NAUKA, BADANIA I DONIESIENIA NAUKOWE 2020

NAUKI TECHNICZNE I ŚCISŁE

Część I

ISBN 978-83-953882-7-9

Nauka, Badania i Doniesienia Naukowe
2020

Nauki techniczne i ścisłe
Część I

Idea Knowledge Future
Świebodzice, 2020

Redakcja
mgr inż. Tobiasz Wysoczański

Opracowanie materiałów
dr inż. Katarzyna Dereń

ISBN 978-83-953882-7-9
ISBN (całość kolekcji) 978-83-953882-4-8

Wydawca: Idea Knowledge Future

Spis treści

Współczesny stan wiedzy na temat nowoczesnych metod modelowania przepływów turbulentnych
Caban Lena [(1)] 6
Badanie właściwości cieczy i elastomerów magnetoreologicznych w stałym polu magnetycznym
Fenyk Anna [(1)], Zieliński Marek [(1)], Miękoś Ewa [(1)] 17
Badanie możliwości rozróżniania wielkości pomieszczenia na podstawie nagrań dźwiękowych
Jasińska Alicja [(1)], Kin Maurycy [(1)] 29
Analiza procesu spalania tlenowego paliw w technologii fluidalnej
Kaczyńska Katarzyna [(1)], Kaczyński Konrad [(1)], Pełka Piotr [(1)] 38
Analiza spalania paliw w cyrkulacyjnej warstwie fluidalnej
Kaczyński Konrad [(1)], Kaczyńska Katarzyna [(1)], Pełka Piotr [(1)] 51
Badania złączy spawanych wykonanych metodą GTAW ze stali AISI 4130
Kucharski Kamil [(1)] 62
Odpady biodegradowalne jako paliwa alternatywne – potencjał i możliwości wykorzystania
Knaś Krzysztof [(1)] 82
Analiza porównawcza implementacji narzędzi lean manufacturing w wybranych przedsiębiorstwach
Kuryło Dominik, Nowacki Kacper [(1)] 94
Molekularne podstawy właściwości antybakteryjnych detergentów gemini
Rzycki Mateusz [(1)] 104
Ocena zagrożenia ^{222}Rn w wybranych wodach podziemnych z obszaru województwa dolnośląskiego
Maciejewski Piotr [(1)] 115
Pogłębienie toru wodnego Szczecin-Świnoujście do 12,5 m perspektywą wzrostu zdolności przeładunkowej terminalu kontenerowego w porcie Szczecin
Możdrzeń Daria [(1)] 125
Przepływy turbulentne w otaczającym nas świecie
Paluszewska Agata [(1)] 136
Adsorpcja miedzi na wermikulicie i haloizycie
Rajczykowski Krzysztof [(1)], Loska Krzysztof [(1)] 147
Numerical simulation of flow around a square cylinder

Szymanek Ewa [1] 158
O pewnych wskaźnikach percepcyjnych, wykorzystywanych do tworzenia perspektywy obrazów wzrokowych i słuchowych
Szymański Witold [1], Jasińska Alicja [2], Kin Maurycy [2] 171
Wpływ wykorzystania mikroplatform programistycznych na wydajność tworzonych serwisów REST API
Szymula Łukasz [1] 180
Nowe „inteligentne" układy ciekłokrystaliczne stosowane jako nośniki teranostyków
Tokarek Beata [1], Bazylińska Urszula [1] 192
Problemy w układach smarowania dzielarek do bułek
Towarnicki Krzysztof [1] 200
Modyfikowane układy lipidowo-polimerowe do transportu substancji biologicznie czynnych
Waglewska Ewelina [1], Bazylińska Urszula [1] 212

Współczesny stan wiedzy na temat nowoczesnych metod modelowania przepływów turbulentnych

Caban Lena [(1)]

[1] Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, Katedra Maszyn Cieplnych, Lena Caban: lena.caban@pcz.pl

Streszczenie
Przepływy turbulentne charakteryzują się szerokim zakresem skal czasu i długości, od skal dużych określonych poprzez charakterystyczny rozmiar kanału, w którym odbywa się przepływ, aż po bardzo małe dyssypatywne struktury przepływu. Różnorodność istniejących skal sprawia, że ich opis za pomocą ogólnych formuł matematycznych jest niezwykle trudny i wymaga dogłębnego zrozumienia fizyki zachodzących zjawisk. W pracy zostanie przedstawiony współczesny stan wiedzy na temat nowoczesnych metod matematycznego modelowania przepływów turbulentnych, wykorzystywanych w numerycznej mechanice płynów (CFD). Omówione zostanie klasyczne podejście Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations, z którym związane są dwie podstawowe grupy modeli turbulencji: modele lepkościowe (Eddy Viscosity Models) oraz modele transportu naprężeń Reynoldsa (Reynolds Stress Models). Wskazane zostaną zalety i wady metody bezpośredniej symulacji przepływów turbulentnych (DNS - Direct Numerical Simulation). Następnie zostanie zaprezentowana, intensywnie rozwijana w ostatnich latach metoda LES (Large Eddy Simulation), która jest postrzegana, jako przyszłościowe narzędzie modelowania przepływów turbulentnych.

Słowa kluczowe: turbulencja, modelowanie, przepływy turbulentne, CFD

The current state of knowledge about modern methods of modeling turbulent flows

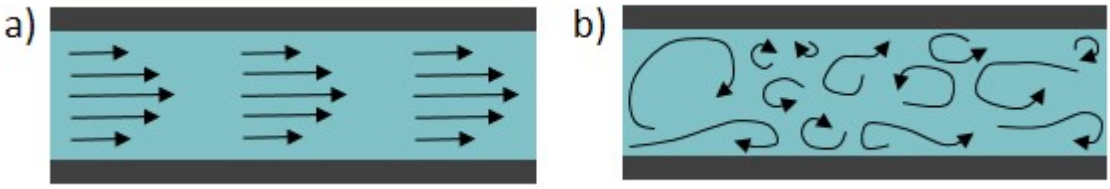
Summary
Turbulent flows are characterized by a wide range of time and length scales, from large scales defined through the characteristic size of the channel in which the flow takes place, to very small dissipative flow structures. The variety of existing scales makes their description using general mathematical formulas extremely difficult and requires a thorough understanding of the physics of occurring phenomena. The current state of the knowledge about modern methods of mathematical modeling of turbulent flows used in computational fluid dynamics (CFD) will be presented within the paper. The classic Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations approach, which is associated with two basic groups of turbulence models: Eddy Viscosity Models and Reynolds Stress Models will be discussed. Advantages and disadvantages of the Direct Numerical Simulation (DNS) will be pointed out. Then, the LES (Large Eddy Simulation) method which is intensively developed in recent years and which is regarded as a future tool for turbulence modeling will be presented.

Keywords: turbulence, modeling, turbulent flows, CFD

1. Wstęp

W przyrodzie wyróżniamy dwa rodzaje ruchu płynów: laminarny i turbulentny. Przepływ laminarny to uporządkowany ruch płynu w równoległych, niezakłócających się warstwach, który zachodzi tylko przy odpowiednio małej prędkości. W rzeczywistości bardzo rzadko mamy do czynienia z takim ruchem płynu. Natomiast przepływ turbulentny (burzliwy) to bardzo skomplikowany ruch płynu, charakteryzujący się zmiennością parametrów przepływu (prędkość, ciśnienie gęstość i in.) w czasie i przestrzeni (Lesieur, 2008). Jest to przepływ chaotyczny, w którym niewielkie zmiany warunków początkowych mogą

prowadzić do całkowicie odmiennych ewolucji płynu. Ponadto w przepływie turbulentnym elementy płynu mieszają się ze sobą, co jest przyczyną intensyfikacji wymiany masy, pędu i energii.



Rys. 1. Rodzaje ruchów płynu: a) przepływ laminarny, b) przepływ turbulentny. Źródło: opracowanie własne

Przejawem turbulencji jest występowanie wirów o szerokim zakresie skal czasu i długości, od skal dużych określonych poprzez charakterystyczny rozmiar kanału, w którym odbywa się przepływ, aż po bardzo małe dyssypatywne struktury przepływu. W praktyce skale turbulentnych wirów osiągają rozmiary z zakresu 10^{-9}–10^{6} m. (Drobniak i in., 2010). Różnorodność istniejących skal sprawia, że ich opis za pomocą ogólnych formuł matematycznych jest niezwykle trudny i wymaga dogłębnego zrozumienia fizyki zachodzących zjawisk.

2. Równania zachowania

Mechaniką płynów rządzą trzy równania zachowania: masy – równanie ciągłości płynu (1), pędu – równanie Naviera-Stokesa (2) i energii (3), które wynikają z ogólnych praw zachowania tych wielkości. W ogólnym przypadku, dla płynu lepkiego, ściśliwego i przewodzącego ciepło, równania te możemy zapisać w następującej postaci:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \rho}{\partial t} + \dfrac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i) = 0 & (1) \\ \rho\left(\dfrac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \dfrac{\partial U_i}{\partial x_j}\right) = F_i + \dfrac{\partial}{\partial x_j}(\sigma_{ij}) & (2) \\ \rho\left(\dfrac{\partial E}{\partial t} + U_j \dfrac{\partial E}{\partial x_j}\right) = \dfrac{\partial}{\partial x_j}\left(\lambda \dfrac{\partial T}{\partial x_j} + U_i \sigma_{ij}\right) & (3) \end{cases}$$

gdzie:

ρ – gęstość płynu,

U_1, U_2, U_3 – składowe wektora prędkości,

F_1, F_2, F_3 – składowe wektora siły masowej,

$\sigma_{ij} = -P\delta_{ij} + \mu\left(2D_{ij} - \frac{2}{3}\frac{\partial U_k}{\partial x_k}\delta_{ij}\right)$ – tensor naprężeń w danym przepływie,

$D_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)$ – tensor prędkości deformacji,

P – ciśnienie,

T – temperatura,

λ – współczynnik przewodności cieplnej,

μ – współczynnik lepkości dynamicznej.

Równanie (3) przedstawia zasadę niezmienności całkowitej energii E odniesionej do jednostki masy płynu i będącej sumą energii kinetycznej $E_k = \frac{1}{2}U_i^2$, potencjalnej E_p oraz energii wewnętrznej $E_w = c_v T$ (Elsner 1987). Powyższe równania zachowania wraz z równaniem stanu $(P = \rho RT)$ tworzą zamknięty układ 6 równań z 6 niewiadomymi. Jego rozwiązanie w takiej postaci dla wszystkich skal przepływu wymaga ogromnych nakładów obliczeniowych i z tego względu najmniejsze struktury przepływu eliminuje się poprzez uśrednianie lub filtrację. W wyniku tych operacji pojawiają się nowe niewiadome, wskutek czego wspomniany układ staje się otwarty (jest więcej niewiadomych niż równań). Poszukiwanie dodatkowych związków, w celu domknięcia układu równań ruchu jest jednym z najistotniejszych problemów współczesnej teorii przepływów turbulentnych, a jego rozwiązania są nazywane modelami turbulencji.

3. Metoda RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes)

Klasyczne modelowanie przepływów turbulentnych oparte jest na hipotezie Reynoldsa, zgodnie z którą każdą wielkość fizyczną $A(\boldsymbol{x}, t)$ charakteryzującą przepływ (np. prędkość, ciśnienie, itp.) można przedstawić jako sumę wielkości $\bar{A}(\boldsymbol{x}, t)$ uśrednionej w czasie (T) oraz wielkości fluktuacyjnej $a(\boldsymbol{x}, t)$, która podlega stochastycznym zmianom w czasie, tj.

$$A = \bar{A} + a,$$

gdzie

$$\bar{A} = \frac{1}{T}\int_{t}^{t+T} A(\boldsymbol{x}, t)dt.$$

Zastosowanie operacji uśredniania do równań Naviera-Stokesa dla płynu nieściśliwego $(\rho = \text{const})$ i o stałej lepkości $(\mu = \text{const})$ przekształca je do następującej postaci, określanej mianem równania Reynoldsa:

$$\rho\left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j}\right) = \bar{F}_i + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\sigma}_{ij}),$$

gdzie $\bar{\sigma}_{ij} = -\bar{P}\delta_{ij} + 2\mu\bar{D}_{ij} - \rho\overline{u_i u_j}$.

W równaniu tym pojawia się nowy, niewystępujący w równaniu Naviera-Stokesa składnik:

$$(\sigma_T)_{ij} = -\rho\overline{u_i u_j},$$

zwany tensorem naprężeń Reynoldsa. Tensor ten jest symetryczny (tzn. $\overline{u_i u_j} = \overline{u_j u_i},\ i \neq j$), wprowadza więc 6 dodatkowych niewiadomych do układu równań ruchu dla przepływów turbulentnych. W celu domknięcia tego układu stosuje się powszechnie dwie grupy modeli turbulencji: modele lepkościowe i modele transportu naprężeń Reynoldsa.

Modele lepkościowe oparte są na założeniu, że tensor naprężeń Reynoldsa $(\sigma_T)_{ij}$ jest proporcjonalny do tensora prędkości deformacji $\overline{D}_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U}_j}{\partial x_i}\right)$ ruchu średniego:

$$(\sigma_T)_{ij} = 2\rho\nu_T \overline{D}_{ij},$$

gdzie współczynnik proporcjonalności ν_T jest kinematycznym współczynnikiem lepkości turbulentnej (Gryboś, 1998). Powyższe założenie poczynione przez Boussinesq'a w 1887 r. było historycznie pierwszą hipotezą zamykającą wspomniany układ równań. Boussinesq jednak niepoprawnie określił współczynnik ν_T jako wielkość skalarną. W rzeczywistości, ze względu na trójwymiarowość pola turbulencji, ma on charakter tensorowy – $(\nu_T)_{ij}$, a określenie jego składowych jest kolejną trudnością na drodze zamknięcia układu równań ruchu opisującego turbulentny przepływ płynu.

W zależności od ilości dodatkowych równań różniczkowych wprowadzonych do układu wyróżniamy modele lepkościowe zerorównaniowe (zwane również algebraicznymi), jedno-, dwu- lub wielorównaniowe.

Przykładem najprostszego modelu turbulencji jest, oparty na koncepcji „drogi mieszania", algebraiczny model Prandtla z 1925 r. Według tej koncepcji struktury drobnoskalowe w przepływie turbulentnym zderzają się ze sobą na wzór zderzeń międzycząsteczkowych w kinetycznej teorii gazów. Tensor naprężeń Reynoldsa dla jednowymiarowego przepływu ścinającego ($U = U(y)$) jest w tym przypadku równy:

$$(\sigma_T)_{ij} = \rho\nu_T \frac{\partial U}{\partial y},$$

przy czym

$$\nu_T = l_m^2 \left|\frac{\partial U}{\partial y}\right|,$$

gdzie l_m jest tzw. drogą mieszania, odpowiadającą drodze swobodnej przebiegu cząstek w ruchu molekularnym gazów, której wartość zależy od konkretnego przepływu (Wilcox, 2006).

W kolejnych latach rozwijały się inne modele algebraiczne oparte na hipotezie Prandta, m.in. model Kármána (1930), model Van Driesta (1956), model Cebeci'ego i Smitha (1974) czy model Baldwina i Lomaxa (1978). Współcześnie wykazano, że hipoteza drogi mieszania

jest błędna, ponieważ struktury turbulentne oddziałują na siebie w sposób ciągły, co wyklucza nieciągłe zderzenia. Niemniej jednak modele zerorównaniowe dają dość dobre wyniki w przypadku wielu prostych przepływów turbulentnych (np. w warstwie przyściennej), są łatwe do zastosowania, a ich koszt obliczeniowy jest niewielki (Bates i in., 2005). Największą wadą modeli tej klasy, w przeciwieństwie do modeli jedno- i dwurównaniowych, jest fakt, że nie uwzględniają one „historii" przepływu i energii kinetycznej ruchu turbulentnego $\left(k = \frac{1}{2}\overline{u_i^2}\right)$.

Począwszy od lat 60-tych XX wieku, w miarę wzrostu mocy obliczeniowej komputerów, podstawą badań turbulencji stały się modele oparte na równaniu energii kinetycznej turbulencji:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \overline{U}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = -\overline{u_\iota u_\jmath}\frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\overline{u_\jmath\left(\frac{u_\iota u_\iota}{2} + \frac{p}{\rho}\right)} - 2\nu\overline{u_\iota d_{\iota\jmath}}\right] - 2\nu\overline{\frac{\partial u_\iota}{\partial x_\jmath} d_{\iota\jmath}},$$

które można zapiać w następującej postaci:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \overline{U}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = D_k + P_k - \varepsilon,$$

gdzie

$$D_k = -\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\overline{u_\jmath\left(\frac{u_\iota u_\iota}{2} + \frac{p}{\rho}\right)} - 2\nu\overline{u_\iota d_{\iota\jmath}}\right], \qquad P_k = -\overline{u_\iota u_\jmath}\frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j}, \qquad \varepsilon = 2\nu\overline{\frac{\partial u_\iota}{\partial x_\jmath} d_{\iota\jmath}}$$

są odpowiednio procesami dyfuzji, produkcji i dyssypacji energii kinetycznej (Markatos 1986), $\nu = \mu/\rho$ jest kinematycznym współczynnikiem lepkości płynu, natomiast

$$d_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)$$

jest tensorem prędkości deformacji ruchu fluktuacyjnego.

Pierwszy model jednorównaniowy oparty na tym równaniu, zaproponowany przez Prandtla w 1945 r., uzależnia kinematyczny współczynnik lepkości turbulentnej od energii kinetycznej turbulencji $\left(\nu_T = l_m\sqrt{k}\right)$. Inne modele tej klasy to m.in. model Bradshawa, Ferrissa i Atwella (1967) oraz niebazujące na równaniu energii kinetycznej turbulencji modele Baldwina i Bartha (1990) oraz Spalarta i Allmarasa (1992). Modele jednorównaniowe stanowią jednak niewielki postęp w porównaniu do hipotezy drogi mieszania.

Bardziej złożone i jednocześnie dokładniejsze modele dwurównaniowe wykorzystują dwa równania transportu: równanie energii kinetycznej turbulencji k oraz równanie dodatkowej wielkości:

$$z = k^m l^n,$$

gdzie l jest funkcją współrzędnych przestrzennych zwaną skalą długości, określaną na drodze doświadczalnej, $m, n \in \mathbb{R}$ (Elsner, 1987). Pierwszy model tego typu został zaproponowany przez Kołmogorowa jeszcze w 1942 r. i był związany z charakterystyczną częstotliwością n ruchu turbulentnego:

$$n = z = \frac{k^{1/2}}{l}.$$

Największą popularność zyskał jednak model $k - \varepsilon$, wprowadzony przez Harlowa, Nakayama i in. (1968), bazujący na równaniach transportu energii kinetycznej turbulencji k oraz prędkości jej dyssypacji:

$$\varepsilon = \frac{k^{3/2}}{l}.$$

Wśród modeli dwurównaniowych warto również wspomnieć model $k - \omega$, zapoczątkowany przez Spaldinga (1969), w którym

$$\omega = \frac{k}{l^2}$$

oznacza wirowość pola prędkości (Kazimierski, 2004) oraz model $k - kl$ Rodiego, Spaldinga i in. (1970). Modele te są powszechnie stosowane w przypadku złożonych przepływów inżynierskich.

W przeciwieństwie do modeli lepkościowych, modele transportu naprężeń Reynoldsa nie korzystają z koncepcji lepkości turbulentnej i polegają na bezpośrednim modelowaniu składowych tensora naprężeń Reynoldsa. Naprężenia te są wyznaczane na podstawie równań transportu naprężeń turbulentnych $-\overline{u_i u_j}$, które umożliwiają analizę ich zmian czasowo-przestrzennych. Modele te, choć dokładniejsze od lepkościowych, są dużo bardziej skomplikowane, głównie z uwagi na ilość występujących w nich równań różniczkowych.

Główną wadą modeli z grupy RANS jest przede wszystkim brak uniwersalności. Występujące w nich stałe empiryczne muszą być adaptowane w zależności od rodzaju przepływu, geometrii obszaru czy intensywności ruchu turbulentnego (Kazimierski, 2004), a uzyskane wyniki często nie odzwierciedlają rzeczywistego przepływu. Pomimo licznych zastosowań aplikacyjnych prawdopodobnie nie mają one dalszych perspektyw rozwoju.

4. Bezpośrednia symulacja numeryczna (DNS)

W latach 80-tych XX wieku zaczęto rozwijać metodę DNS (Direct Numerical Simulation), która polega na bezpośrednim, numerycznym rozwiązywaniu równań Naviera-Stokesa, bez wprowadzania jakichkolwiek założeń upraszczających (Krawczyk, 2018). Pierwsze badania w tym kierunku zostały zapoczątkowane przez Orszaga i Pattersona (1972)

w zastosowaniu do homogenicznych przepływów turbulentnych. W metodzie DNS uwzględniane są wszystkie skale turbulencji, od największych rzędu $k^{3/2}/\varepsilon$, aż do najmniejszych – rzędu $(\nu^3/\varepsilon)^{1/4}$ tzw. skali Kołmogorowa. Wiąże się to jednak z koniecznością zastosowania bardzo gęstych siatek obliczeniowych, co jest niewątpliwie wadą tej metody. Pomimo wydajności współczesnych superkomputerów symulacje przepływów metodą DNS są stosowane tylko w przypadku testów laboratoryjnych na małą skalę i przy bardzo ograniczonej liczbie Reynoldsa (Re) rzędu $10^4 - 10^5$. Głównym tego powodem jest fakt, że liczba węzłów siatki obliczeniowej potrzebna do uzyskania poprawnego rozwiązania jest proporcjonalna do $Re^{9/4}$, a czas pracy procesora do Re^3 (Blazek 2015). Nie oznacza to jednak, że metoda DNS jest całkowicie bezużyteczna, wręcz przeciwnie, jest to narzędzie, które odgrywa istotną rolę w rozwoju i kalibracji nowych modeli turbulencji.

5. Metoda LES (Large Eddy Simulation)

W ostatnich latach intensywnie rozwijana jest metoda LES – Large Eddy Simulation, czyli metoda symulacji wielkich wirów, która jest przyszłościowym narzędziem do modelowania przepływów turbulentnych. Oparta jest ona na filtracji równań Naviera-Stokesa, która usuwa informacje o małych skalach z rozwiązania numerycznego, co znacząco redukuje nakłady obliczeniowe w porównaniu z bezpośrednią symulacją numeryczną (DNS). Oznacza to, że w metodzie LES struktury małe, zwane podsiatkowymi, nie są rozwiązywane a są modelowane. Można powiedzieć, że modelowane jest ich oddziaływanie na struktury gruboskalowe, które z kolei są wyznaczane ze zmodyfikowanych równań Naviera-Stokesa. Jest to, zatem metoda pośrednia między metodami RANS i DNS.

Równania LES są formalnie zdefiniowane za pomocą operatora filtracji przestrzennej, który w przypadku jednowymiarowym jest postaci:

$$\bar{\bar{f}}(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} G(x-\xi) f(\xi) d\xi = G * f,$$

gdzie:

$f(x)$ – dowolna wielkość charakteryzująca pole przepływu,

G – funkcja filtrująca, tzw. jądro filtru, spełniająca warunek normalizacji:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} G(x-\xi) d\xi = 1.$$

Procedura filtracji wynika z przyjęcia siatki numerycznej, która jest na tyle rzadka, że nie pozwala na rozwiązanie wszystkich struktur wirowych, więc odrzuca/odfiltrowuje struktury

małe. Z matematycznego punktu widzenia jest to operacja splotu funkcji. Do najpopularniejszych funkcji filtrujących zaliczamy, tzw. filtr prostokątny (box filter) zdefiniowany następująco:

$$G(x-\xi)=\begin{cases}1/\Delta & dla\ \ |x-\xi|\leq\Delta/2\\ 0 & dla\ \ |x-\xi|>\Delta/2\end{cases}$$

oraz filtr Gaussa dany wzorem:

$$G(x-\xi)=\left(\frac{6}{\pi\Delta^2}\right)^{1/2}\exp\left(-\frac{6|x-\xi|^2}{\Delta^2}\right).$$

Parametr Δ jest nazywany szerokością filtra i w praktyce jest on związany z odległością między węzłami siatki dla zmiennej przestrzennej Δx (Wilcox 2006). Im mniejsza jest szerokość filtra Δ, tym wyniki uzyskane metodą LES są bardziej zbliżone do tych uzyskanych za pomocą DNS. Zastosowanie procedury filtracji do równań Naviera-Stokesa przekształca je do postaci:

$$\rho\left(\frac{\partial\overline{\overline{U}}_i}{\partial t}+\overline{\overline{U}}_j\frac{\partial\overline{\overline{U}}_i}{\partial x_j}\right)=-\frac{\partial\overline{\overline{P}}}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(2\mu\overline{\overline{D}}_{ij}-\tau_{ij}\right),$$

w której pojawia się nowy, nieznany składnik:

$$\tau_{ij}=\rho\left(\overline{\overline{U_iU_j}}-\overline{\overline{U}}_i\overline{\overline{U}}_j\right)$$

tzw. tensor naprężeń podsiatkowych, który podobnie jak tensor naprężeń Reynoldsa w metodzie RANS musi być modelowany (Bogusławski i in., 2008). Pomimo podobieństwa w wyglądzie, istnieje znacząca różnica między tym tensorem a tensorem naprężeń Reynoldsa. Naprężenia Reynoldsa określają strumień pędu spowodowany wszystkimi turbulentnymi fluktuacjami, podczas gdy naprężenia podsiatkowe obejmują jedynie oddziaływanie struktur o skalach długości mniejszych niż szerokość filtra Δ (Zikanov, 2010).

W metodzie LES wyróżniamy trzy grupy modeli turbulencji, zwanych również modelami podsiatkowymi: modele lepkościowe, modele podobieństwa i modele mieszane. Pierwsza grupa, analogicznie jak w metodzie RANS, bazuje na koncepcji lepkości turbulentnej (dla skal podsiatkowych), która wiąże tensor naprężeń podsiatkowych z tensorem prędkości deformacji $\overline{\overline{D}}_{ij}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial\overline{\overline{U}}_i}{\partial x_j}+\frac{\partial\overline{\overline{U}}_j}{\partial x_i}\right)$ ruchu odfiltrowanego:

$$\tau_{ij}=2\rho\nu_T\overline{\overline{D}}_{ij}.$$

Do tej grupy należy m. in. słynny model Smagorinsky'ego (1963), w którym współczynnik lepkości turbulentnej modeluje się analogicznie do hipotezy drogi mieszania:

$$\nu_T=l_S^2\sqrt{2\overline{\overline{D}}_{ij}\overline{\overline{D}}_{ij}},$$

gdzie $l_S = C_S\Delta$ jest skalą długości Smagorinsky'ego, która poprzez stałą Smagorinsk'ego C_S jest proporcjonalna do szerokości filtra Δ. Model ten jest łatwy w implementacji i jest obecny w wielu współczesnych kodach obliczeniowych, aczkolwiek jego zastosowanie powoduje zbyt wysoką wartość dyssypacji w pobliżu ścian (Blazek 2015). Wartość stałej Smogorinsk'ego zmienia się w z zależności od przepływu i jest dostosowywana w celu uzyskania najlepszych wyników. Najczęściej przyjmuje się, że $0.1 < C_S < 0.24$. Inne przykłady modeli lepkościowych to: jednorównaniowy model Lilly (1966), model dynamiczny Germano i in. (1991) oraz model funkcji strukturalnych Lesieura i Metaisa (1996).

Modele podobieństwa polegają na bezpośrednim modelowaniu tensora naprężeń podsiatkowych w analogii do modeli transportu naprężeń Reynoldsa. Jeden z pierwszych modeli w tej kategorii został zaproponowany przez Bardina i in. (1980). Niemniej jednak, wkrótce po sformułowaniu okazało się, że model ten ma tendencję do zaniżania wielkości naprężeń podsiatkowych. Jako remedium zaproponowano tzw. modele mieszane, w których wprowadzono poprawkę związaną z lepkością turbulentną w celu zapewnienia wystarczającej dyssypacji w obrębie skal podsiatkowych.

Ostatnimi czasy bardzo popularne są modele oparte na dekonwolucji, czyli odwrotnej filtracji, dzięki którym możliwe jest uzyskanie informacji o małych skalach, na podstawie skal dużych. Koncepcja ta, zapoczątkowana pod koniec XX wieku przez Domaradzkiego i Saiki, polega na wyznaczaniu naprężeń podsiatkowych na podstawie nieliniowych interakcji wielkości gruboskalowych (Domaradzki i in., 1997). Modele oparte na dekonwolucji pola prędkości to m.in. model przybliżonej odwrotnej filtracji (ADM – Approximate Deconvolution Model) wprowadzony przez Adamsa i Stolza (2001) czy zmodyfikowany model Smaroginsky'ego (2003), w którym lepkość turbulentna wyznaczana jest w oparciu o odfiltrowane pole prędkości.

6. Podsumowanie

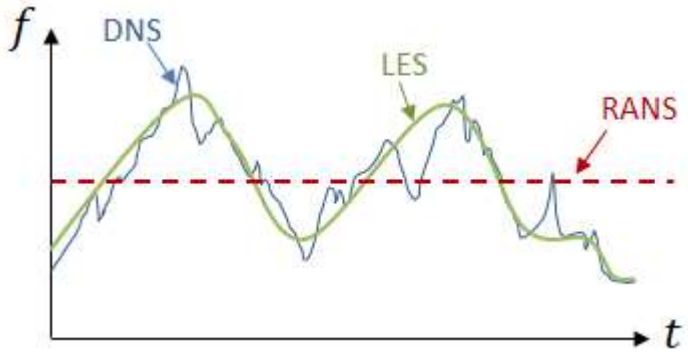
Przedstawione modele turbulencji w postaci dodatkowych równań, wraz z równaniami ruchu średniego określają pola prędkości i ciśnień w przepływie turbulentnym. Nasuwa się jednak oczywiste pytanie: którą z metod powinniśmy stosować? RANS, DNS czy LES? Odpowiedź zależy od celu analizy i rodzaju przepływu. Należy wziąć pod uwagę następujące czynniki (Zikanov, 2010).

Po pierwsze dokładność. Modele turbulencji zastosowane w metodach RANS i LES do aproksymacji dodatkowych składników są z natury nieprecyzyjne. Wprowadzają one tzw. błąd modelu ϵ, którego wielkość zmienia się w zależności od zastosowanego modelu, kroku

siatki obliczeniowej i charakterystyki przepływu. Błąd ten jest największy dla modeli z grupy RANS. W przypadku DNS błąd modelu nie występuje

$$0 = \epsilon_{DNS} < \epsilon_{LES} < \epsilon_{RANS} .$$

Po drugie, wymienione podejścia opisują przepływ na różnych poziomach, co zostało przedstawione na rys. 1. W DNS otrzymujemy pełne pole przepływu we wszystkich skalach długości. W metodzie LES również otrzymujemy pole przepływu, jednak nie dostajemy informacji na temat ruchu w najmniejszych skalach. Natomiast metoda RANS daje nam informacje tylko o ruchu średnim. Charakterystyka turbulentnych fluktuacji pozostaje nieznana, z wyjątkiem podstawowych właściwości, takich jak energia kinetyczna i szybkość jej dyssypacji, które są szacowane na podstawie modeli turbulencji.



Rys. 1. Poziom opisu przepływu metodą DNS, LES i RANS. Źródło: opracowanie własne

Ostatnie kryterium to koszt obliczeniowy, który jest najwyższy dla DNS i najniższy dla RANS. Koszt metody LES zależny jest od modelu i pożądanej dokładności, ale zasadniczo leży między kosztami DNS i RANS.

Zdolność metody DNS do dokładnej symulacji pełnego zachowania przepływu czyni z niej potężne i niezastąpione narzędzie do podstawowych badań turbulencji. Niestety z powodu ogromnych kosztów obliczeniowych większość przepływów turbulentnych jeszcze długo pozostanie poza zasięgiem tej metody. Średnie charakterystyki przepływu są zwykle wystarczające do analizy problemów inżynierskich, dlatego do ich modelowania najczęściej jest stosowana metoda RANS. Obliczenia za pomocą tej metody można przeprowadzić w ciągu kilku godzin, a niekiedy nawet minut. Największą wadą modeli z grupy RANS jest brak uniwersalności i stosunkowo duży błąd modelu. Z tego powodu metoda RANS zostaje powoli wypierana przez droższą, ale dokładniejszą metodę LES.

7. Literatura

Bates P.D., Lane S.N., Ferguson R.I., 2005. Computational Fluid Dynamics: Applications in Environmental Hydraulics. John Wiley & Sons, Inc, s. 27-38.

Blazek J., 2015. Computational Fluid Dynamics. Principles and applications. 3rd Edition. Butterworth Heinemann, Elsevier, s. 215-244.

Bogusławski A., Drobniak S., Tyliszczak A., 2008. Turbulencja – od losowości do determinizmu. IMC Politechnika Częstochowska, Modelowanie Inżynierskie 36, Gliwice, s. 41-48.

Domaradzki A.J., Saiki E.M., 1997. A subgrid-scale estimation model based on the estimation of unresolved scales of turbulence. Physics of Fluids, Vol 9, s: 2148-2164.

Drobniak S., Kowalewski T.A., 2010. Mechanika płynów – dlaczego tak trudno przewidzieć ruch płynu? IMC Politechnika Częstochowska, IPPT PAN, Warszawa, s. 389-428.

Elsner J.W., 1987. Turbulencja przepływów. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, s. 52-54.

Gryboś R., 1998. Podstawy mechaniki płynów. Część 2. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, s. 66-114.

Krawczyk J., Janus J., Głuch B., Skotniczny P., Ostrogórski P., 2018. Modele numeryczne turbulencji – źródła i dostosowanie do specyfiki aerologii górniczej. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, Tom 20, nr 4, s. 355-362.

Kazimierski Z., 2004. Podstawy mechaniki płynów i metod komputerowej symulacji przepływów. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź, s. 197-215.

Lesieur M., 2008. Turbulence in Fluids. Springer, The Netherlands, s. 1-23.

Markatos N.C., 1986. The mathematical modelling of turbulent flows. Applied Mathematical Modelling, Volume 10, Issue 3, Elsevier, s. 190-220.

Wilcox D.C., 2006. Turbulence Modeling for CFD. DCW Industries, Inc.

Zikanov O., 2010. Essential Computational Fluid Dynamics. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, s. 227-258.

Badanie właściwości cieczy i elastomerów magnetoreologicznych w stałym polu magnetycznym

Fenyk Anna [(1)], Zieliński Marek [(1)], Miękoś Ewa [(1)]

[1] Katedra Chemii Nieorganicznej i Analitycznej, Uniwersytet Łódzki
Anna Fenyk: anna.fenyk@chemia.uni.lodz.pl

Streszczenie
Przykładem innowacyjnych materiałów, które coraz częściej znajdują zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym, budownictwie a nawet medycynie są tzw. "materiały inteligentne", które mogą zmieniać swoje własności na skutek oddziaływania zewnętrznych pól fizycznych. Do tej grupy należą ciecze i elastomery magnetoreologiczne. W artykule przedstawiono dane literaturowe oraz prace własne dotyczące budowy, technologii wytwarzania cieczy, a także określenie wpływu stałego pola magnetycznego na wybrane właściwości rozpatrywanych kompozytów. Wykonano badania mrozoodporności, nasiąkliwości oraz odporności chemicznej wybranych elastomerów. Dokonano analizy wyników i przedstawiono wnioski.

Słowa kluczowe: ciecze magnetoreologiczne, elastomery, materiały inteligentne

Properties of magnetorheological fluids and elastomers in a constant magnetic field

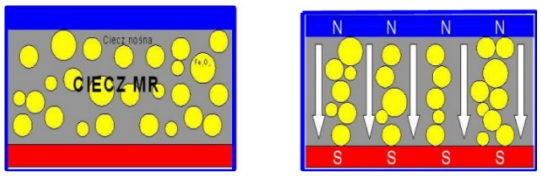
Summary
An example of innovative materials that are increasingly used in the automotive industry, construction industry and even medicine are the so-called "intelligent materials" which they can change their properties as a result of external stimuli. This group includes magnetorheological fluids and elastomers. In this article we present current state of the art together with my experimental results covering construction and fluids production technology as well as determining the impact of a constant magnetic field on selected properties of the composites under consideration. Frost resistance, water absorption and chemical resistance tests of selected elastomers were carried out. The analysis of the results and conclusions are presented.

Keywords: magnetorheological fluids, elastomers, intelligent materials

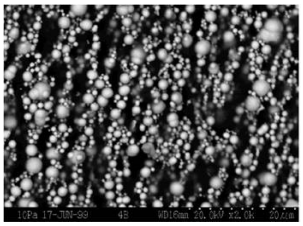
1. Wstęp

Stale rosnące wymagania stawiane współczesnym urządzeniom, maszynom, a w szczególności konstrukcjom lotniczym czy samochodowym, skłaniają do poszukiwania i tworzenia nowych materiałów, które pozwoliłyby na lepszą konstrukcję środków transportu a także byłyby przydatne i wykorzystywane np. w medycynie. Materiały magnetoreologiczne (MR) należą do grupy materiałów inteligentnych (ang. smart materials), których właściwości reologiczne wrażliwe są na obecne pole magnetyczne. Aktualnie wśród materiałów MR wyróżnia się kilka typów: ciecze MR (MRF), pianki MR, żele MR, pasty MR i elastomery MR (MRE). Najbardziej rozpowszechnione są obecnie ciecze i elastomery (Skalski, 2015). Ciecze magnetoreologiczne stanowią szczególną i interesującą grupę materiałów „smart" ze względów komercyjnych, badawczych oraz naukowych. Charakteryzuje je, bowiem niezwykła łatwość sterowania ich właściwościami mechanicznymi za pomocą wartości

parametrów pola elektrostatycznego, magnetycznego, światła lub innych bodźców zewnętrznych, co daje bardzo szerokie możliwości ich zastosowania w wielu dziedzinach nauki. Główną właściwością sterowalnych cieczy magnetycznych jest to, że w obecności działającego pola magnetycznego lub elektrostatycznego, wykazują granicę plastyczności i mogą zmieniać jej wartość (Ławniczak 2014). Pod wpływem pola magnetycznego następuje zmiana własności fizycznych płynu MR i jak głosi jedna z powszechnie akceptowanych hipotez, jego cząsteczki wzajemnie się przyciągają i łączą w łańcuchy wzdłuż linii sił pola magnetycznego (Rys.1), (Rys.2).

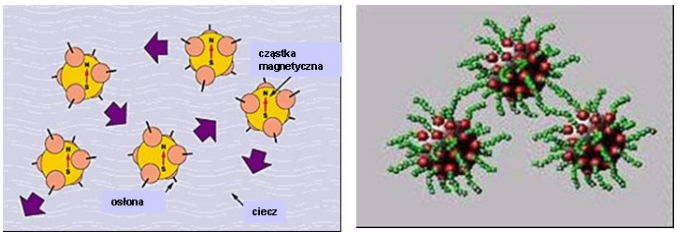


Rys. 1. Ciecz magnetoreologiczna bez udziału pola magnetycznego oraz łańcuchy cząstek cieczy w polu magnetycznym. Źródło: (Bik, 2016)



Rys.2. Cząstki substancji ferromagnetycznej (cząstki karbonylku żelaza) rozproszone w oleju naturalnym, po zadziałaniu pola magnetycznego (zdjęcie wykonane skaningowym mikroskopem elektronowym). Źródło: http://www.matint.pl/materialy-magnetoreologiczne.php

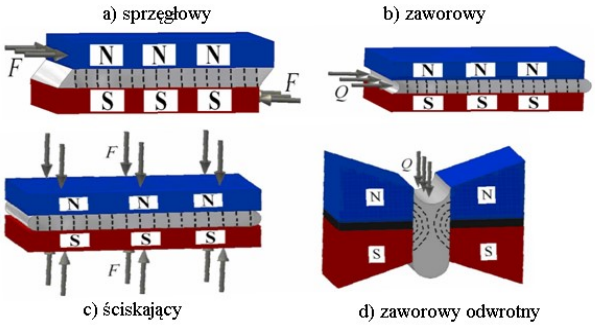
Ważną właściwością cieczy MR jest stabilność podczas pracy w różnych temperaturach oraz fakt, że mogą one pracować nawet w bardzo zanieczyszczonym środowisku. Natomiast główną wadą wszystkich cieczy sterowalnych, w tym również magnetoreologicznych, jest ich naturalna, wynikająca z różnicy gęstości cieczy nośnej i cząstek ferromagnetycznych, skłonność do sedymentacji, czyli osadzania cząstek na dnie zbiornika pod wpływem siły grawitacji (Bajkowski, 2014). Ciecze inteligentne mogą składać się z dwóch faz: stałej i ciekłej, czyli występować, jako mieszaniny lub koloidy, albo być jednorodne (jednofazowe). Stosowane w praktyce ciecze ER są mieszaninami lub są jednorodne, natomiast ciecze MR są mieszaninami lub koloidami. Skład dwufazowej cieczy inteligentnej, od którego zależą jej właściwości fizyczne, jest określany za pomocą udziału objętościowego cząstek stałych w cieczy inteligentnej.



Rys. 3. Cząstki magnetyczne powleczone surfaktantem (substancją powierzchniowo czynną zapobiegają agregacji cząstek) w cieczy nośnej. Źródło: (Bik, 2016)

- Inżynierskie modele pracy cieczy magnetoreologicznych

Ciecz magnetoreologiczna może pracować w jednym z czterech trybów pracy: sprzęgłowym, zaworowym, ściskającym albo zaworowym odwrotnym (Rys, 4).



Rys. 4. Tryby pracy cieczy magnetoreologicznych. Źródło: (Ławniczak, 1999; Bajkowski, 2014; Rosiakowski, 2016).

Każdy z nich znajduje zastosowanie w innych urządzeniach ze względu na warunki pracy, ilość pochłanianej energii i inne aspekty. Najczęściej stosowanymi są tryby zaworowy oraz ścinający. Bardzo ważnym trybem pracy cieczy MR jest tryb zaworowy (ang. pressure driven flow mode). Ciecz MR przepływa pomiędzy dwoma nieruchomymi powierzchniami. Dzięki zmianom indukcji magnetycznej zmienia się naprężenie styczne w cieczy, dzięki czemu można wpływać na opory przepływu, a tym samym na wartość spadku ciśnienia na kontrolowanej polem magnetycznym szczelinie. Obwód magnetyczny projektowany jest tak, aby linie sił jego pola przebiegały prostopadle do kierunku przepływu cieczy. Tryb zaworowy znalazł zastosowanie w takich urządzeniach jak liniowe tłumiki drgań, amortyzatory samochodowe, amortyzatory siedzisk samochodów ciężarowych i maszyn roboczych oraz liniowe pochłaniacze energii o dowolnym zastosowaniu (Ławniczak, 1999; Bajkowski, 2014; Rosiakowski, 2016).

- Właściwości reologiczne i mechaniczne cieczy magnetoreologicznych

Ważnymi informacjami, które będą pomocne podczas procesu projektowania urządzeń MR, są przede wszystkim te, które dotyczą lepkości cieczy MR, właściwości pochłaniania i rozpraszania energii, właściwości magnetycznych oraz granicy plastyczności. Parametrami,

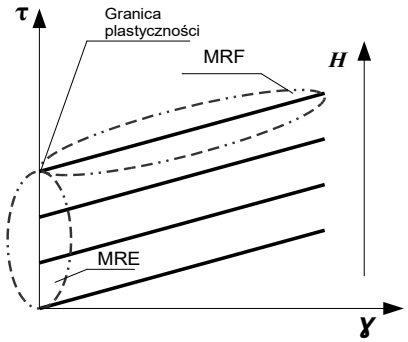
za pomocą, których opisuje się właściwości cieczy MR, są: współczynnik lepkości dynamicznej cieczy η, naprężenia ścinające τ, moduł sprężystości postaciowej G' (wyrażany wartością stosunku naprężeń sprężystych do wielkości odkształceń), moduł stratności postaciowej G" (określany stosunkiem naprężeń lepkosprężystych do odkształceń), a także będący miarą zdolności cieczy do tłumienia drgań kąt stratności δ, którego wartość opisuje się za pomocą zależności:

$$tg\,\delta = G''/G' \qquad (1)$$

oraz zespolony moduł sprężystości G* wyrażany zależnością:

$$G^* = G' + iG'' \qquad (2)$$

Wszystkie wyżej wymienione parametry w przypadku badań CM wyznacza się w zależności od wartości odkształceń, prędkości ścinania, natężenia pola magnetycznego, temperatury, czasu i in. (Bajkowski, 2014). Najczęściej wykorzystywaną charakterystyką cieczy inteligentnych jest zależność naprężenia statycznego τ występującego w cieczy podczas jej przepływu od gradientu prędkości ścinania γ, postaci τ = f (γ), sporządzana dla ustalonego natężenia odpowiedniego pola fizycznego (Rys. 5) (Kęsy i in., 2007; Kukla, 2018).



Rys. 5. Porównanie zakresów pracy cieczy MRF i elastomerów MRE magnetoreologicznych, τ -naprężenia ścinające, γ – odkształcenie, H- natężenie pola magnetycznego. Źródło: (Kukla, 2018)

Kolejnym materiałem, reprezentującym grupę materiałów inteligentnych, jest elastomer magnetoreologiczny. Elastomer MR dzięki zawartości pyłu magnetycznego w matrycy, łączy w sobie właściwości magnetyczne i wysoko elastyczne, co sprawia, że jest on obiektem zainteresowania pod względem aplikacyjnym, jak również poznawczym (Skalski i in., 2015). Elastomery MR są stałymi analogami cieczy magnetoreologicznych, mogą być rozwiązaniem niedogodności MRF, jakim jest sedymentacja. Elastomery MR to kompozyty, w których cząstki magnetyczne rozproszone są w matrycy elastomerowej (Skalski, 2015). Kształtowanie struktury MRE zachodzi najczęściej podczas sieciowania w polu magnetycznym, z cząstek ferromagnetycznych tworzy się wówczas, tzw. struktura kolumnowa (Zhou, 2003). Po utwardzeniu osnowy polimerowej łańcuchy cząstek z liniowo zorientowanymi momentami

dipolowymi zostają „zablokowane”. Osnowa MRE w postaci stałej, w odróżnieniu od MRF, uniemożliwia swobodny ruch cząstek magnetycznych, co wpływa na zupełnie inne parametry zależne od pola magnetycznego związany z tym odmienny, charakterystyczny obszar użytkowania. W przypadku MRE zmianie ulega moduł ścinania, a charakterystycznym obszarem pracy jest zakres poniżej granicy plastyczności. Jest to istotna cecha odróżniająca MRE od MRF, wymagająca zupełnie innego podejścia do projektowania konstrukcji i urządzeń, w których mogą być one wykorzystywane (Boczkowska i in., 2013). Elastomery magnetoreologiczne mają pewne zalety względem cieczy magnetoreologicznych. W związku z zastosowaniem litego materiału matrycy cząsteczki magnetyczne nie mają możliwości sedymentacji. Dodatkowo istnieje możliwość nadawania określonej geometrii wytwarzanemu elastomerowi. Może się to odbywać poprzez np. wycięcie żądanego kształtu z większej próbki, lub na drodze odpowiedniego ukształtowania formy, w której polimeryzuje osnowa kompozytu (Kukla, 2018).

2. Materiał i Metody

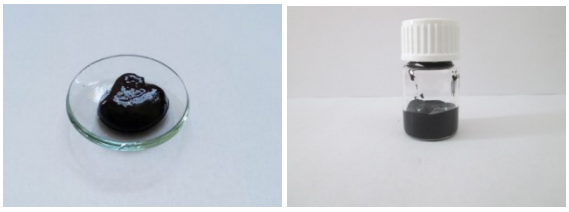
- Skład materiału na próbki

Ciecz magnetoreologiczna: ciecz nośna: (gliceryna, olej syntetyczny OKS 352 -lepkość kinetyczna: 260 mm 2/s ; cząstki magnetyczne (Fe_3O_4, karbonylek żelaza); stabilizator: kwas oleinowy, krzemionka koloidalna hydrofilowa Aerosil 200; środek powierzchniowo - czynny (dodatek): Al_2O_3

Elastomer magnetoreologiczny: osnowa polimerowa: guma silikonowa (Gumosil B), żywica poliuretanowa; cząstki magnetyczne (Fe_3O_4, karbonylek żelaza)

- Wytworzenie cieczy oraz elastomeru magnetoreologicznego

Procedura wytworzenia cieczy polegała na: odmierzeniu odpowiednich ilości konkretnych składników, wprowadzenie magnetytu do oleju i dokładne wymieszanie przy pomocy mieszadła mechanicznego, do otrzymanej w ten sposób substancji, nie przerywając pracy mieszadła, dodawanie małymi porcjami stabilizatora, dokładne wymieszanie wszystkich składników do momentu uzyskania równomiernej konsystencji pozbawionej „grudek”- aglomeratów cząstek.



Rys. 6. Wytworzona ciecz magnetoreologiczna, Fe_3O_4 w glicerynie. Źródło: opracowanie własne

Rys. 7. Wytworzony elastomer magnetoreologiczny, Fe_3O_4 w osnowie polimerowej - Gumosil B. Źródło: opracowanie własne

- Nazwa i skład kilku wybranych cieczy i elastomerów magnetoreologicznych produkcji własnej (Tab.1), (Tab.2).

Tabela 1. Skład wybranych próbek cieczy magnetoreologicznych. Źródło: opracowanie własne

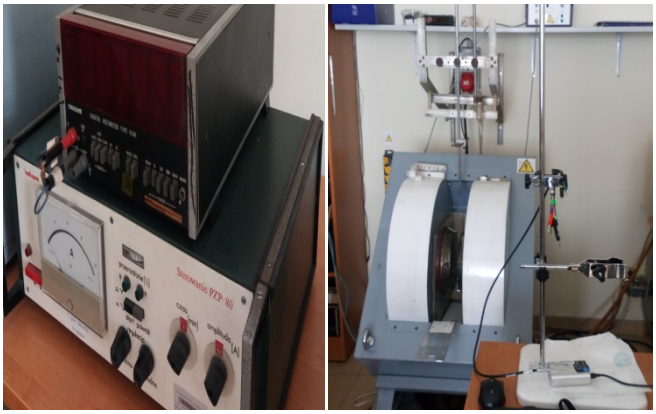
Numer próbki	Skład próbki cieczy magnetoreologicznej					Indukcja magnetyczna B [T]
	Ciecz nośna (100% mas.)	Cząstki magnetyczne (75% mas.)	Stabilizator (1% mas.)	Dodatek (1% mas.)		
CM 1	gliceryna	Fe_3O_4 (magnetyt)	Kwas oleinowy	Al_2O_3		0
CM 2	OKS 352	$Fe(CO)_5$ (karbonylek żelaza)	Kwas oleinowy	Al_2O_3		0
CM 3	OKS 352	Fe_3O_4 (magnetyt)	Kwas oleinowy	Al_2O_3		0
CM 4	OKS 352	$Fe(CO)_5$ (karbonylek żelaza)	SiO_2 (Aerosil 200)	Al_2O_3		0
CM 5	OKS 352	Fe_3O_4 (magnetyt)	SiO_2 (Aerosil 200)	Al_2O_3		0

Tabela 2. Skład wybranych próbek elastomerów magnetoreologicznych. Źródło: opracowanie własne

Numer próbki	Skład próbki elastomeru magnetoreologicznego								Indukcja magnetyczna B [T]
	Substancja bazowa (100% mas.)	Utwardzacz (3% mas.)	Cząstki magnetyczne	(% mas.)	Dodatek	(% mas.)			
EM 1	Gumosil B (kauczuk silikonowy)	OL- 1	Fe_3O_4 (magnetyt)	10					0
EM 2	Gumosil B (kauczuk silikonowy)	OL- 1	Fe_3O_4 (magnetyt)	20					0
EM 3	Gumosil B (kauczuk silikonowy)	OL- 1	Fe_3O_4 (magnetyt)	30					0
EM 4	Gumosil B (kauczuk silikonowy)	OL- 1	Fe_3O_4 (magnetyt)	30					0,5
EM 5	Gumosil B (kauczuk silikonowy)	OL- 1	$Fe(CO)_5$ (karbonylek żelaza)	20	SiO_2 (Aerosil 200)	5			0
EM 6	Gumosil B (kauczuk silikonowy)	OL- 1	Fe_3O_4 (magnetyt)	10	Celuloza (Avicel PH-101)	10			0
EM 7	Gumosil B (kauczuk silikonowy)	OL- 1	Fe_3O_4 (magnetyt)	10	Celuloza (Avicel PH-101)	10			0,5

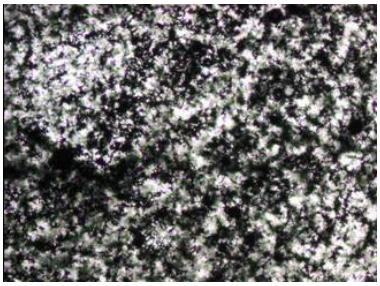
- Aparatura pomiarowa

Część pomiarów została wykonana w stałym polu magnetycznym, z wykorzystaniem elektromagnesu laboratoryjnego typu ER 2505. Badania wykonano przy indukcji magnetycznej o wartości B = 0,5 T

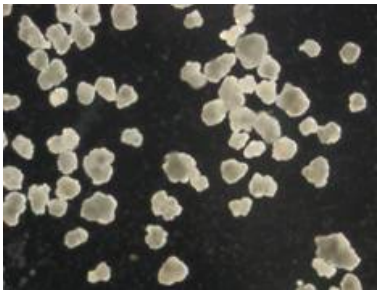


Rys. 8. Elektromagnes laboratoryjny typu ER 2505 oraz sterowanie elektromagnesem. Źródło: opracowanie własne

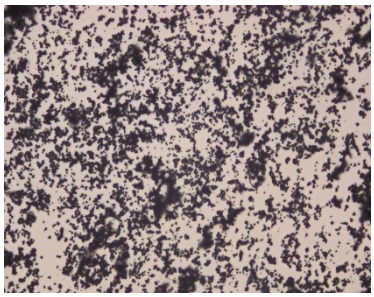
Dokonano również obserwacji mikroskopowych wybranych cieczy a także wybranych składników, wchodzących w skład kompozytu, za pomocą mikroskopu biologicznego OLYMPUS CX 41 stosując różne powiększenia.



Rys. 9. Cząstki Fe_3O_4 w glicerynie - cieczy nośnej (zdjęcie wykonane mikroskopem biologicznym- pow.40 x). Źródło: opracowanie własne



Rys. 10. Cząstki Al_2O_3 – zdjęcie wykonane mikroskopem biologicznym (pow.10 x). Źródło: opracowanie własne



Rys.11. Cząstki karbonylku żelaza – zdjęcie wykonane mikroskopem biologicznym (pow.40x). Źródło: opracowanie własne

3. Wyniki

Wyniki badań nasiąkliwości, mrozoodporności i odporności chemicznej wybranego elastomeru.

- nasiąkliwość

Pomiar nasiąkliwości określa zdolność pochłaniania wody przez dany materiał. Wielkość ta określa maksymalne nasycenie wodą danego materiału. Nasiąkliwość wyrażana jest zazwyczaj w sposób wagowy, jako stosunek masy wody pochłoniętej przez badany materiał, do masy w stanie suchym.

Zależność wagową wyraża się następująco:

$$n_w = \frac{m_n - m}{m} \cdot 100\,\% \qquad (3)$$

gdzie: m_n – masa próbki nasyconej wodą destylowaną [g], m – masa suchej próbki [g]

Tabela 3. Nasiąkliwość elastomeru na bazie Gumosilu B dla B=0 T. Źródło: opracowanie własne

Elastomer	m [g]	m_n [g]	Nasiąkliwość [%]
Gumosil B bez napełniacza	7.8696	7.8995	0.37
Gumosil B + Fe_3O_4 10%	5.4899	5.5146	0.44
Gumosil B + Fe_3O_4 20%	7.5431	7.585	0.55
Gumosil B + Fe_3O_4 30%	7.9845	8.0214	0.46

Tabela 4. Nasiąkliwość elastomeru na bazie Gumosilu B dla B=0,5 T. Źródło: opracowanie własne

Elastomer	m [g]	m_n [g]	Nasiąkliwość [%]
Gumosil B bez napełniacza	0.1647	0.1655	0.48
Gumosil B + Fe_3O_4 10%	6.1483	6.1698	0.34
Gumosil B + Fe_3O_4 20%	6.8571	6.884	0.39
Gumosil B + Fe_3O_4 30%	3.6725	3.693	0.55

- mrozoodporność

Miarą mrozoodporności jest ubytek masy danego tworzywa, który można obliczyć z poniższego wzoru:

$$S = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100\% \qquad (4)$$

gdzie:

m_1 – masa wysuszonej próbki, przygotowanej do badania [g], m_2 – masa próbki wysuszonej, po zakończeniu badania [g]

Tabela 5. Mrozoodporność dla elastomeru na bazie Gumosilu B, przy B=0 T. Źródło: opracowanie własne

Elastomer	m_1 [g]	m_2 [g]	Ubytek masy [%]
Gumosil B bez napełniacza	4.8269	4.8284	-0.03
Gumosil B + Fe_3O_4 10%	10.3422	10.3499	-0.07
Gumosil B + Fe_3O_4 20%	9.0935	9.0987	-0.05
Gumosil B + Fe_3O_4 30%	7.1313	7.1349	-0.05

Tabela 6. Mrozoodporność dla elastomeru na bazie Gumosilu B, przy B=0,5 T. Źródło: opracowanie własne

Elastomer	m_1 [g]	m_2 [g]	Ubytek masy [%]
Gumosil B bez napełniacza	0.8999	0.9068	-0.76
Gumosil B + Fe_3O_4 10%	1.2756	1.2773	-0.13
Gumosil B + Fe_3O_4 20%	2.536	2.5416	-0.22
Gumosil B + Fe_3O_4 30%	1.0397	1.0416	-0.18

- odporność chemiczna

Miarą odporności chemicznej jest ubytek masy, który można wyznaczyć z poniższego wzoru:

$$\Delta m = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100\% \qquad (5)$$

gdzie:

m_1 – masa próbki nasyconej wodą destylowaną [g], m_2 – masa próbki po zanurzeniu w roztworze [g]

Tabela 7. Odporność na kwas siarkowy (VI) dla elastomeru na bazie Gumosilu B, przy B=0T. Źródło: opracowanie własne

Elastomer	m_1 [g]	m_2 [g]	Ubytek masy [%]
Gumosil B bez napełniacza	6.784	6.7964	-0.180
Gumosil B + Fe_3O_4 10%	8.2921	8.2915	0.007
Gumosil B + Fe_3O_4 20%	10.3262	10.3269	-0.006
Gumosil B + Fe_3O_4 30%	8.0319	8.0272	0.058

Tabela 8. Odporność na kwas siarkowy (VI) dla elastomeru na bazie Gumosilu B, przy B=0,5T. Źródło: opracowanie własne

Elastomer	m_1 [g]	m_2 [g]	Ubytek masy [%]
Gumosil B bez napełniacza	0.6644	0.6651	-0.10
Gumosil B + Fe_3O_4 10%	1.3039	1.3032	0.05
Gumosil B + Fe_3O_4 20%	2.9402	2.9435	-0.11
Gumosil B + Fe_3O_4 30%	1.9958	2.0047	-0.44

Tabela 9. Odporność na wodorotlenek sodu dla elastomeru na bazie Gumosilu B, przy B=0T. Źródło: opracowanie własne

Elastomer	m_1 [g]	m_2 [g]	Ubytek masy [%]
Gumosil B bez napełniacza	6.6375	6.655	-0.002
Gumosil B + Fe_3O_4 10%	8.7216	8.7464	-0.002
Gumosil B + Fe_3O_4 20%	6.2545	6.2747	-0.003
Gumosil B + Fe_3O_4 30%	6.3392	6.3556	-0.002

Tabela 10. Odporność na wodorotlenek sodu dla elastomeru na bazie Gumosilu B, przy B=0,5T. Źródło: opracowanie własne

Elastomer	m_1 [g]	m_2 [g]	Ubytek masy [%]
Gumosil B bez napełniacza	1.3654	1.3684	-0.002
Gumosil B + Fe_3O_4 10%	3.5342	3.5426	-0.002
Gumosil B + Fe_3O_4 20%	3.9811	3.9969	-0.003
Gumosil B + Fe_3O_4 30%	3.9206	3.933	-0.003

Tabela 11. Odporność chemiczna na aceton dla elastomeru na bazie Gumosilu B, przy B=0T. Źródło: opracowanie własne

Elastomer	m_1 [g]	m_2 [g]	Ubytek masy [%]
Gumosil B bez napełniacza	6.402	6.5623	-2.50
Gumosil B + Fe_3O_4 10%	8.4775	8.7111	-2.75
Gumosil B + Fe_3O_4 20%	6.2757	6.4121	-2.17
Gumosil B + Fe_3O_4 30%	9.8216	10.0099	-1.91

Tabela 12. Odporność chemiczna na aceton dla elastomeru na bazie Gumosilu B, przy B=0,5T. Źródło: opracowanie własne

Elastomer	m_1 [g]	m_2 [g]	Ubytek masy [%]
Gumosil B bez napełniacza	1.9329	1.9987	-3.40
Gumosil B + Fe_3O_4 10%	7.1799	7.3588	-2.49
Gumosil B + Fe_3O_4 20%	6.0887	6.2541	-2.71
Gumosil B + Fe_3O_4 30%	3.1535	3.2176	-2.03

4. Dyskusja

Wyniki badań wskazują na istotną rolę właściwego doboru odpowiedniej matrycy (rodzaju oraz rozmiaru cząstek magnetycznych), rodzaju wypełnienia jak również stabilizatora. Jest to jeden z argumentów, potwierdzający potrzebę zbudowania a następnie opisu reologii nowo tworzonych kompozytów. Na podstawie badań stwierdzono również, że trwałość cieczy i elastomerów magnetoreologicznych zależy od wielu parametrów, w tym głównie od ich składu, procentowej zawartości matrycy, budowy, a czynnikami, które mogą wpływać destrukcyjnie na odporność materiału, jest temperatura jak również czynniki chemiczne, dlatego tak ważny jest dobór odpowiednich składników oraz metoda ich łączenia, co wpływa na efektywność końcowego materiału. Wykonane badania eksperymentalne oraz analizy ich wyników, wskazują na zmiany, jakie zachodzą w materiale, który poddany jest działaniu czynnika zewnętrznego, w tym przypadku stałego pola magnetycznego. Problem trwałości matrycy, a także całego kompozytu pozostaje, więc sprawą otwartą, wymagającą dalszych badań, które miałyby na celu określenie właściwości magneto-mechanicznych nowo tworzonych materiałów, a następnie możliwości zastosowania ich w nowoczesnej inżynierii bądź medycynie.

5. Wnioski

1. Dodatek 20% Fe_3O_4 w polu magnetycznym polepsza nasiąkliwość elastomeru. Przy dalszym napełnianiu cząsteczkami magnetycznymi, pole magnetyczne nie poprawia nasiąkliwości badanego kompozytu.

2. Badanie mrozoodporności Gumosilu B wykazało przyrost masy tworzywa w stałym polu magnetycznym.
3. Badanie odporności chemicznej na kwas wykazało, że dla Gumosilu B z 20% dodatkiem Fe_3O_4 następuje przyrost masy w polu magnetycznym.
4. Pole magnetyczne nie ma wpływu na odporność chemiczną elastomeru na działanie wodorotlemku sodowego.
5. Aceton powoduje przyrost masy elastomeru w polu magnetycznym.

6. Literatura

Bajkowski J., 2014. Ciecze i tłumiki magnetoreologiczne. Właściwości, budowa, badania, modelowanie i zastosowania. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności WKŁ. Wyd 1,s.288

Bik T., 2016. Zastosowanie cieczy magnetoreologicznych w przemyśle motoryzacyjnym. Mechanik 7: 581-585.

Boczkowska A., Awjetian S., 2013. Inteligentne kompozyty magnetoreologiczne, Polimery 58,6: 443-449.

http://www.matint.pl/materialy-magnetoreologiczne.php

Kęsy A.,Kęsy Z.,Musiałek I.,Migus M., 2007.Ocena właściwości cieczy elektroreologicznych i magnetoreologicznych pod katem zastosowań praktycznych. Problemy eksploatacji 3: 95-112

Kromulski J., Kaźmierczak H., 2006. Damping Of Vibrations With Using Magnetorheological Fluid Devices. Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering 51(3).

Kukla M., 2018. Kształtowanie cech materiałowych elastomerów magnetoreologicznych w budowie maszyn. Praca doktorska, Politechnika Poznańska, s 122

Ławniczak A., Milecki A., 1999. Ciecze elektro- i magnetoreologiczne oraz ich zastosowania w technice. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, s 88

Rosiakowski A., 2016. Badania zastosowania przekładni z cieczą magnetoreologiczną do sterowania prędkością obrotową zespołu napędowego. Praca doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań, s 111

Skalski P., 2015. Zastosowanie elastomerów magnetoreologicznych w transporcie. Logistyka-nauka 3: 4398-4402

Skalski P., Dębek C., 2015. Badania magnetyczne elastomeru magnetoreologicznego. Logistyka-nauka 3: 4403-4407

Zhou G.Y., 2003 Shear properties of a magnetorheological elastomer.Smart Mater. Struct. 12: 139-146

Badanie możliwości rozróżniania wielkości pomieszczenia na podstawie nagrań dźwiękowych

Jasińska Alicja [(1)], Kin Maurycy [(1)]

[1] Wydział Elektroniki Politechniki Wrocławskiej
Jasińska Alicja: 226687@student.pwr.edu.pl

Streszczenie
W pracy przedstawiono wyniki badań nad rozpoznawaniem wielkości pomieszczeń, w których dokonano nagrań z wykorzystaniem różnych technik mikrofonowych. Nagrania zrealizowano z wykorzystaniem sztucznej głowy (technika binauralna), systemu XY (system koincydencyjny), systemu AB (system stereofonii fazowej) oraz zdjęcia mikrofonowego w polu bliskim źródła i zrekonstruowaną atmosferą pogłosową. Przeprowadzono testy subiektywne, w wyniku, których okazało się, że możliwości identyfikacji pomieszczenia zależą od zastosowanej techniki nagraniowej. Zaproponowano także nową miarę odzwierciedlającą możliwości słuchaczy, co do rozróżniania wielkości pomieszczeń na podstawie nagrań atmosfery akustycznej.

Słowa kluczowe: badania subiektywne, techniki mikrofonowe, akustyka wnętrz

Research of the possibility of room size identification on the base of sound recording

Summary
Paper presents the results of research on the possibility of room identification on the base of the recordings realized with different stereo techniques. The test samples have been recorded by the means of binaural method with the dummy head, intensity based XY technique, phase-based AB method as well as the near field one-microphone recording with ambience reconstruction with plug-ins. Subjective tests have shown that the room identification depends on a particular recording technique. The new subjective criterion has been introduced and this reflects the listeners' possibility of room categorization as well as their identification on the base of sensations produced by the recorded acoustical atmosphere.

Keywords: subjective assessment, microphone techniques, room acoustics

1. Wstęp

W życiu codziennym ludzie doświadczają przebywania w pomieszczeniach o najróżniejszych kubaturach oraz właściwościach akustycznych, więc prawdopodobnym jest, że jednocześnie na podstawie tych doświadczeń uczą się wskaźników określających wielkości pomieszczeń. Ważnym składnikiem każdego nagrania dźwiękowego, szczególnie zaś muzycznego, jest tzw. atmosfera akustyczna, popularnie określana, jako ambience. Terminem tym określa się na ogół warstwę pogłosową nagrania powstałą w wyniku reakcji pomieszczenia, w którym dokonuje się nagrania, na dźwięk wytwarzany przez źródło (Huber i in., 2014). Występowanie warstwy pogłosowej nagrania może być przydatne w procesie echolokacji czy też przy identyfikacji pomieszczeń. Istnieją także związki pomiędzy parametrami charakteryzującymi pole akustyczne w pomieszczeniach, a wrażeniem przestrzenności uzyskanym na podstawie nagrań binauralnych (Jasińska i in., 2019 a).

Do rejestracji tejże reakcji wykorzystywane są rozmaite sposoby i techniki ujęcia obrazu dźwiękowego i na ogół takie sygnały są rejestrowane niezależnie od sygnału tzw. głównego, w celu sporządzenia właściwych proporcji między dźwiękiem bezpośrednim pochodzącym ze źródła, a sygnałem akustycznym przestrzeni, która to źródło otacza (Kin i in., 2018 a; Szymański i in., 2018; Rumsey 2017). Optymalnie zrealizowane nagranie dźwiękowe jest wówczas plastyczne, a poszczególne źródła dźwięku są ze sobą spójne przestrzennie. Z kolei nagranie pozbawione, albo z niedostateczną zawartością ambience'u, odbierane jest, jako płaskie, w którym poszczególne źródła dźwięku nie są ze sobą powiązane (tzn. nie tworzą relacji przestrzennych), bez perspektywy, a poszczególne źródła dźwięku są percypowane w jednakowej odległości od słuchającego. Jednakże zaburzenia perspektywy mogą być skutkiem ubocznym ograniczenia objętości informacyjnej wynikającej z procesu kodowania percepcyjnego (Prygoń i in. 2017 a i b; Kin i in., 2018 b) lub też celowo wprowadzonym zabiegiem służącym wywołaniu określonych wrażeń słuchowych (Kin i in., 2018 a).

Celem pracy było wykonanie badań możliwości rozróżniania pomieszczenia na podstawie rejestracji sygnału typu ambience za pomocą różnych metod i technik mikrofonowych. Jest to kontynuacja badań nad identyfikacją pomieszczeń na podstawie parametrów akustycznych (Jasińska i in., 2019 b).

2. Metoda badań

Nagrań dokonano w pięciu pomieszczeniach o różnej kubaturze, a tym samym o zróżnicowanych warunkach akustycznych: dwóch salach wykładowych (na 100 i 200 osób), audytorium na 50 osób, łazience oraz małym studio odsłuchowym. Sygnałami testowymi były dźwięki, zarejestrowane w badanych pomieszczeniach przy użyciu różnych technik: binauralnej z wykorzystaniem sztucznej głowy Neumann KU-100 (DH), koincydencyjnej XY z mikrofonem MCE82 Beyerdynamic, techniki fazowej opartej o dwa mikrofony firmy AudioTechnica AT 4050 o charakterystykach dookólnych (AB) oraz bliskie ujęcie źródła dokonane mikrofonem AT 2020 AudioTechnica (1 – mic). W tym ostatnim przypadku sygnał poddano auralizacji za pomocą wtyczki VST i programu komputerowego Samplitude. Sygnały rejestrowano na magnetofonie wielośladowym FOSTEX D-108 po wzmocnieniu i przekonwertowaniu na sygnał cyfrowy przetwornikiem Behringer ADA 900. Materiałem dźwiękowym były fragmenty tekstu czytanego, śpiew żeński oraz partia perkusyjna wykonana na bębnie Darabouka.

W badaniach odsłuchowych wzięły udział 22 osoby. Utworzono dwie grupy słuchaczy. W pierwszej znalazły się osoby niemające większego doświadczenia w pracy z zakresu

realizacji nagrań i produkcji dźwiękowej (12 osób). Drugą grupę (10-osobową) tworzyły osoby doświadczone, zarówno w badaniach odsłuchowych, jak i w zawodach związanych z produkcja nagrań (realizatorzy i redaktorzy radiowi oraz reżyserzy dźwięku i producenci płyt). Badania zostały przeprowadzone dla każdej z grup osobno. Odsłuchu dokonano przy pomocy stereofonicznego zestawu głośnikowego TLC, w studio nagraniowym Katedry Akustyki i Multimediów Politechniki Wrocławskiej, którego warunki akustyczne są zgodne z zaleceniami EBU oraz ITU. Osobom w pierwszej grupie (bez doświadczenia) zaprezentowano ciąg uczący, który składał się z próbek zawierających nagrania głosu dokonane za pomocą sztucznej głowy w badanych pomieszczeniach. Ciągi testowe, jednakowe dla obu grup słuchaczy, zawierały nagrania czterech różnych źródeł, wykonane w badanych pomieszczeniach przy użyciu testowanych czterech technik ujęcia obrazu dźwiękowego. Zadaniem słuchaczy była identyfikacja określonego pomieszczenia na podstawie nagrania i przyporządkowanie swoich wrażeń odczucia przestrzenności do danego pomieszczenia. Wykaz badanych pomieszczeń zamieszczono w Tabeli 1.

Tabela 1. Wykaz badanych pomieszczeń, w których dokonano nagrań

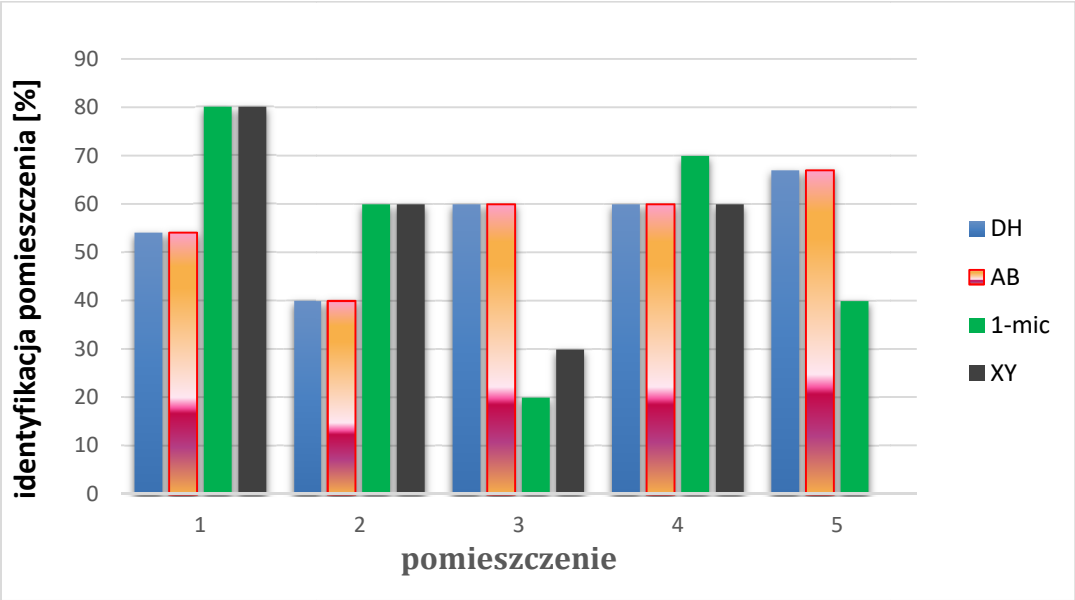
Numer	Rodzaj pomieszczenia
1	Sala wykładowa na 200 osób (205, bud. C-1)
2	Sala wykładowa na 100 osób (201, bud. C-1)
3	Audytorium na 50 osób (41, bud. C-4)
4	Łazienka (obok sali 201 w bud. 201)
5	Małe studio odsłuchowe (na 15 osób) (607, bud. C-5)

3. Wyniki badań

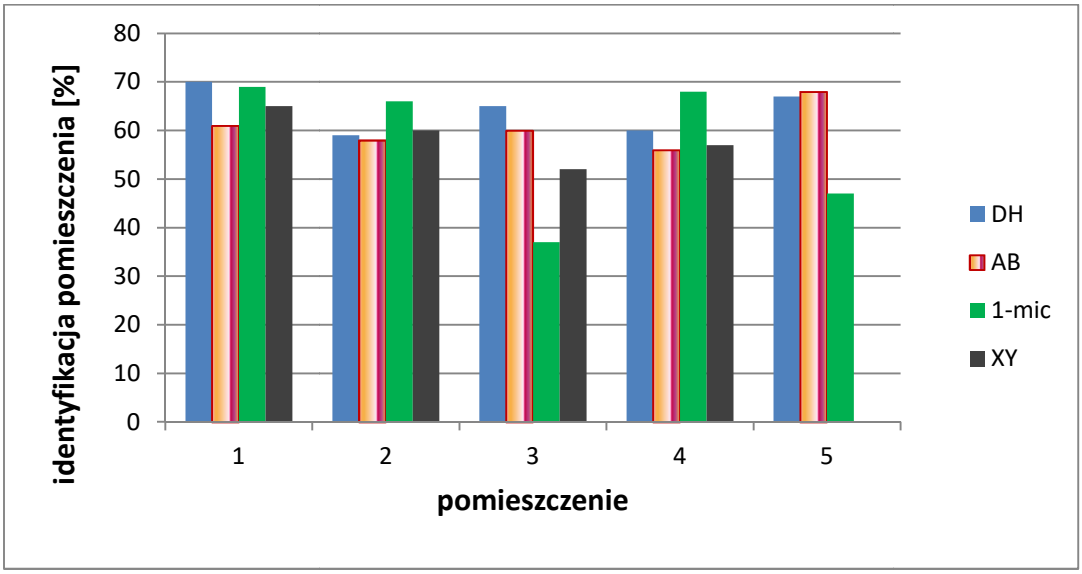
Na Rys. 1 i 2 przedstawiono wyniki badań identyfikacji pomieszczeń dokonane na podstawie nagrań (numery pomieszczeń na osiach poziomych odpowiadają pomieszczeniom, zgodnie z wykazem w Tab. 1). Rys. 1 zawiera rezultaty identyfikacji dokonane przez osoby z mniejszym doświadczeniem w pracy z produkcja dźwiękową, a na Rys. 2 – wyniki osób profesjonalnie związanych z pracą nad dźwiękiem.

Jak można zauważyć, rezultaty identyfikacji dla poszczególnych pomieszczeń przy zastosowaniu różnych technik rejestracji są zbliżone. Wartości odchylenia standardowego w poszczególnych grupach różnią się jednak: u osób bez doświadczenia jego wartość wynosiła od 0,5 do 2,5, w zależności od pomieszczenia i użytej techniki rejestracji, natomiast w grupie profesjonalistów wahała się w granicach 0,4 – 0,6. Można, więc stwierdzić, że grupa profesjonalistów była bardziej spójna. W celu weryfikacji, czy rozkłady odpowiedzi w obu

grupach słuchaczy są jednakowe, przeprowadzono analizę statystyczną przy wykorzystaniu testu Kołmogorowa - Smirnowa, w oparciu o statystykę λ.



Rys. 1. Wyniki identyfikacji pomieszczeń dokonane na podstawie nagrań różnymi metodami – słuchacze bez doświadczenia.



Rys. 2. Wyniki identyfikacji pomieszczeń dokonane na podstawie nagrań różnymi metodami – słuchacze profesjonalnie związani z produkcja dźwiękową.

Dla poziomu istotności $\alpha = 0{,}05$ wartość krytyczna wynosi $\lambda_\alpha = 1{,}358$. Na podstawie obliczeń wartości statystyki λ dla poszczególnych sposobów rejestracji dźwięku okazało się, że jedynie dla systemu opartego o rejestrację w polu bliskim źródeł (i rekonstrukcji atmosfery akustycznej za pomocą wtyczek VST) oceny osób profesjonalnie związanych z produkcją dźwiękową mają istotnie statystyczny inny rozkład w porównaniu do słuchaczy bez doświadczenia ($\lambda = 1{,}419$). W przypadku pozostałych systemów użytych do rejestracji otrzymano nierówność $\lambda < \lambda_\alpha$, co oznacza, że doświadczenie słuchaczy nie wpływa w istotny

sposób na identyfikację pomieszczenia na podstawie nagrań wykonanych przy użyciu badanych systemów mikrofonowych.

W celu znalezienia ewentualnego związku pomiędzy percypowaną przestrzennością źródeł, w grupie profesjonalistów zadano pytanie o wrażenie przestrzenności źródeł w prezentowanych nagraniach. Odpowiedzi udzielono w formie ankiety, stopniując w skali 1-5 wrażenie przyporządkowane do poszczególnych próbek, czyli systemów mikrofonowych. Próbki testowe rejestrowane w badanych pomieszczeniach prezentowane były dwukrotnie. Do badań wykorzystano dźwięki mowy żeńskiej oraz partii Darabouki. Uśrednione wyniki oceny przestrzenności w zależności od użytego systemu zamieszczono w Tabeli 2.

Tabela 2. Wrażenie przestrzenności próbek dźwiękowych rejestrowanych różnymi systemami

System ujęcia mikrofonowego	Ocena przestrzenności
DH	duża (4,6)
AB	duża (4,8)
1-mic	średnia (3,7)
XY	średnia (3,9)

Jak należało się spodziewać, największe wrażenie przestrzenności nagrania zapewnia system oparty o stereofonię fazową (AB), a najmniejsze – system 1-mikrofonowy (ujęcie bliskie źródła) i nałożonym sztucznym pogłosem o parametrach symulujących średniej wielkości audytorium. Wyniki ankiety są zbieżne ze źródłami literaturowymi (Huber i in., 2014; Kin i in., 2018a), co pozwala sądzić, iż zastosowana technika rejestracji ma wpływ na uzyskane wyniki.

4. Dyskusja wyników

Wyniki eksperymentu wskazują na to, iż na podstawie nagrania słuchacze są w stanie ocenić warunki przestrzenne i zidentyfikować rodzaj oraz przybliżoną kubaturę pomieszczenia, w którym zostało dokonane nagranie, przy czym precyzja tej identyfikacji zależy od rodzaju sposobu i systemu mikrofonowania użytego w nagraniu, a także (w mniejszym stopniu) od warunków akustycznych ocenianego pomieszczenia. Należy także zauważyć, że obie grupy biorące udział w badaniach wykazują się nieco inną precyzją, co do identyfikacji: grupa profesjonalnych słuchaczy charakteryzuje się mniejszym „rozrzutem" odpowiedzi w porównaniu do słuchaczy z małym doświadczeniem „dźwiękowym", co znajduje swoje odbicie w wartościach odchylenia standardowego, jak i w precyzji identyfikacji na podstawie zarejestrowanego materiału dźwiękowego. Może to być spowodowane użyciem innych wskaźników percepcyjnych przez słuchaczy z obu grup. Jak można wywnioskować ze źródeł literaturowych (np. Fastl i in., 2007; Rumsey, 2017), do oceny i oszacowania wrażenia przestrzenności dźwięku profesjonaliści opierają swoje sądy na

relacjach pomiędzy dźwiękiem bezpośrednio dochodzącym od źródła, a dźwiękiem odbitym od ścian pomieszczeń, oceniając w ten sposób panoramę i perspektywę nagrania. Pozostali słuchacze mogą się z kolei posługiwać mniej zaawansowanymi z estetycznego punktu widzenia wskaźnikami, na przykład siłą dźwięku (Aretz i in., 2009), która jakkolwiek może odzwierciedlać wrażenia przestrzenności, ale z racji definicji tego parametru fizycznego, nie uwzględnia się w nim choćby międzyusznych różnic w czasach dojścia i natężenia sygnału akustycznego (Cabrera i in., 2005; Jasińska i in., 2019a i b), koncentrując się niejako na „wszechkierunkowym" wzmocnieniu dźwięku bezpośredniego przez wczesne odbicia.

Na podstawie uzyskanych wyników oraz spostrzeżeń własnych można wnioskować, że osoby profesjonalnie zajmujące się produkcją nagrań dźwiękowych, wskutek dużego osłuchania i posiadanego doświadczenia w kreowaniu czy też analizie przestrzeni słuchowej (panorama i perspektywa) nieco inaczej słuchały prezentowanych sygnałów testowych. Można zaryzykować stwierdzenie, że w tym przypadku odniesienie wskaźników percepcyjnych do uprzednio nabytego doświadczenia w zakresie lokalizacji i percepcji przestrzeni odbywało się niejako samoczynnie w mózgu człowieka, i pozwoliło lepiej zanalizować przestrzenność źródeł w obrazie słuchowym (Stevens i in., 1968).

Zwraca także uwagę stosunkowo wysoki stopień rozróżniania pomieszczeń na podstawie nagrania zrealizowanego przy pomocy jednego mikrofonu w polu bliskim źródła i sztucznie zrekonstruowanej atmosferze pogłosowej. Na podstawie samej zasady takiego ujęcia mikrofonowego, pozbawionego w znacznej części informacji przestrzennych spodziewać się należało znacznego spadku stopnia identyfikacji w porównaniu do konwencjonalnych metod rejestracji stereofonicznej. Otrzymane rezultaty nie potwierdzają tych przypuszczeń, zwłaszcza w przypadku pomieszczeń o dużej kubaturze (obie sale wykładowe) oraz, co ciekawe, łazienki o mocno odbijających powierzchniach ścian. Z drugiej jednak strony, jak wykazano w poprzednio przeprowadzonych badaniach (Jasińska i in., 2019 a), występuje związek pomiędzy wrażeniem przestrzenności pomieszczenia, a wzmocnieniem dźwięku, który się w nim propaguje. Analizując wyniki pod kątem wybranych pomieszczeń można stwierdzić, że bardziej wytłumione audytoria powodują silne wrażenie poczucia przestrzenności, choć z jednej strony znikoma pogłosowość jest łatwo zauważalna, z drugiej zaś bardziej wygłuszone przestrzenie są postrzegane, jako mniejsze przez uczestników odsłuchów. Dodatkowym zaskoczeniem jest fakt, że parametry dodanego sztucznego pogłosu do nagrania wykonanego jednym mikrofonem, były dla wszystkich pomieszczeń jednakowe (odpowiadające średniej wielkości sali audytoryjnej) i nie spowodowały istotnego zaburzenia w postrzeganiu przestrzeni. Autorzy sugerują, więc

istnienie dodatkowego mechanizmu percepcyjnego, opartego na wyrazistości czy też przejrzystości lub selektywności przekazu dźwiękowego, charakterystycznych dla oceny odległości między źródłem a obserwatorem. Zastanawiające jest też, że najniższą rozpoznawalność na podstawie nagrania jednomikrofonowego odnotowano właśnie w stosunku do pomieszczenia, którego symulację parametrów pogłosowych wykorzystano do stworzenia sztucznego pogłosu. Powyższe fakty pozwalają stwierdzić, że prócz klasycznych, opartych na prawach fizycznych, wskaźnikach lokalizacyjnych (międzyuszne różnice widmowe, natężeniowe i czasowe), w ocenie przestrzenności źródeł, a tym samym do identyfikacji pola akustycznego (czyli poszczególnych pomieszczeń), wykorzystywany jest dodatkowo mechanizm oparty na aspektach semantycznych percypowanych sygnałów, podobnie jak to ma miejsce w przypadku percepcji sygnału mowy (Barbedo i in., 2005; Brachmański, 2015). Jakkolwiek dokładne zbadanie wpływu semantyki bodźców na wrażenie przestrzenności wymagałoby zastosowania odmiennych bodźców: zawierających określone informacje oraz informacji tych pozbawionych, podobnie do metodyki zastosowanej w pomiarach telefonometrycznych, wykorzystującej listy logatomowe oraz listy zdaniowe (Brachmański, 2015). Autorzy skłaniają się do tezy, że wpływ tego mechanizmu jest jednak mniej znaczący w przypadku percepcji przestrzenności, niż dla percepcji i oceny sygnału mowy, a większe znaczenie dla poczucia wrażenia przestrzenności mają różnice międzyuszne oraz zmiana widma sygnału.

5. Wnioski

Otrzymane wyniki badań identyfikacji pomieszczeń na podstawie nagrań wykonanych różnymi technikami ujęć mikrofonowych pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- istnieje zależność rozróżniania pomieszczeń od rodzaju systemu mikrofonowania użytego w nagraniu, a także od warunków akustycznych ocenianego pomieszczenia;
- dokładność identyfikacji zależy od doświadczenia słuchaczy w zakresie produkcji dźwiękowej (odchylenie standardowe), natomiast jej stopień od tegoż doświadczenia nie został potwierdzony (zgodność rozkładów) dla systemów rejestracji dwukanałowej;
- doświadczenie słuchaczy ma istotny statystycznie wpływ na rozkład wyników słuchowej identyfikacji pomieszczeń przy nagraniu jednomikrofonowym i rekonstrukcji atmosfery akustycznej za pomocą sztucznego pogłosu;
- sugerowane jest występowanie wspomagającego, dodatkowego mechanizmu wywołującego wrażenie przestrzenności, a związanego z percepcją informacji semantycznej zawartej

w sygnałach testowych – potwierdzenie tego mechanizmu wymagałoby zastosowania odmiennych grup bodźców testowych.

Autorzy planują w przyszłości kontynuację badań nad słuchową identyfikacją przestrzeni (pomieszczeń) przy użyciu innych sygnałów testowych, zawierających konkretne treści i tych treści pozbawionych, analogicznie do bodźców stosowanych do oceny jakości sygnałów mowy, a także przy ekspozycji sygnałów za pomocą słuchawek. Planowane jest też przeprowadzenie eksperymentów ze słuchaczami niewidomymi i niedowidzącymi. Ten ostatni przypadek mógłby pozwolić na zbadanie udziału pamięci wzrokowej przy tworzeniu się wrażenia przestrzenności wyłącznie na podstawie percepcji fonosfery. Interesujące byłoby też przeprowadzenie badań odsłuchowych z osobami widzącymi w warunkach zupełnej ciemności oraz przy naturalnym oświetleniu, co pozwoliłoby na wyeliminowanie bodźców wizualnych, jako czynników wpływających na percepcję słuchową.

Podziękowania

Praca została w ramach działalności statutowej Wydziału Elektroniki Politechniki Wrocławskiej - zlecenie nr 049U/0024/19.

6. Literatura

Aretz M., Orlowski R., 2009. Sound strength and reverberation time in small concert halls, Applied Acoustics, vol. 70, 1099-1110.

Barbedo J. G. A., Lopez A., 2005. A new cognitive model for objective assessment of audio quality. J. Audio Eng. Soc., 53, (1-2), 22-31.

Brachmański S., 2015. Wybrane zagadnienia oceny jakości transmisji sygnału mowy, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 127-143.

Cabrera D., Pop C., 2005.Auditory room size perception for real room. Proceedings of "ACOUSTICS 2005", Busselton, Western Australia, 115-121.

Fastl H., Zwicker E., 2007. Psychoacoustics. Facts and Models, Springer, Berlin, 159-233.

Huber D. M., Runstein R. E., 2014. Modern Recording Techniques, 8th Edition, Focal Press, 492-510.

ITU-R BS.1284. Methods for the subjective assessment of sound quality – general requirements. Geneva, Switzerland.

ITU-T: Recom, P.800, Method for subjective determination of transmission quality. Geneva, Switzerland.

EBU Technical Recommendation R22-1999, Listening Conditions for the Assessment of Sound Programme Material. EBU Geneva, Switzerland.

Jasińska A., Kin M., 2019 a. Badanie możliwości identyfikacji pomieszczenia w zależności od siły dźwięku, w: Nauka, Badania i Doniesienia Naukowe 2019, Nauki techniczne i ścisłe, Idea Knowledge Future, 56-64.

Jasińska A., Kin M., 2019 b. Study of the influence of room acoustic parameters on the image of the auditory size, Proceedings of the International Conference "Acoustics 2019 High Tatras", Štrbské Pleso, Slovakia, 34-41.

Kin M., Prygoń S., 2018 a. Wykorzystanie pogłosu bramkowanego w realizacji nagrań muzycznych, w: Nauka, Badania i Doniesienia Naukowe 2018, Nauki techniczne i ścisłe, Idea Knowledge Future, 151-159.

Kin M., Prygoń S., Szymański W., 2018 b. Deformacje perspektywy w przestrzeni audiowizualnej, w: Nauka, Badania i Doniesienia Naukowe 2018, Nauki techniczne i ścisłe cz. 2, Idea Knowledge Future, 64-74.

Prygoń S., Kin M., 2017 a. Badanie zauważalności zmian sceny dźwiękowej sygnałów poddanych różnym rodzajom kompresji, Mat. XVII Międzynarodowego Sympozjum Inżynierii i Reżyserii Dźwięku ISSET 2017, Warszawa, 1-9.

Prygoń S., Kin M., 2017 b. Ocena wybranych atrybutów sceny dźwiękowej sygnałów poddanych różnym rodzajom kompresji, w: Aspekty komputerowej inżynierii dźwięku, Wyd. Jakopol, 39-47.

Rumsey F., 2017. Recording and reproduction. Studio myths and new technology, Journal of Audio Engineering Society, vol. 65, no.9, (2017), 776-780.

Stevens S. S., Davis H., 1968. Hearing, Wiley&sons, New York, 173-197.

Szymański W., Prygoń S., Kin M., 2018. Tworzenie głębi w przestrzeni audiowizualnej, w: Nauka, Badania i Doniesienia Naukowe 2018, Nauki techniczne i ścisłe cz. 2, Idea Knowledge Future, 172-180.

Analiza procesu spalania tlenowego paliw w technologii fluidalnej

Kaczyńska Katarzyna (1), Kaczyński Konrad (1), Pełka Piotr (1)

[1] Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, Politechnika Częstochowska
Katarzyna Kaczyńska: kgajewska@imc.pcz.pl

Streszczenie
Rosnące obawy dotyczące emisji gazów cieplarnianych i ich potencjalnego wpływu na zmiany klimatu wpływają na rozwój technologii wychwytywania i składowania CO_2 – CCS (ang. Carbon Capture and Storage) w dużych punktach antropogenicznych źródeł emisji CO_2, takich jak elektrownie węglowe i gazowe, ale także wdrożenia technologii ujemnego spalania CO_2, takich jak bioenergia z wychwytywaniem i składowaniem CO_2 BECCS (ang. Bioenergy with Carbon Capture and Storage). Spośród wszystkich dostępnych technologii spalania, spalanie w złożu fluidalnym CFB (ang. Circulating Fluidized Bed) jest często uważane za najlepszy wybór do spalania i/lub współspalania biomasy, odpadów i innych paliw stałych niskiej jakości ze względu na elastyczność paliwową, długi czas przebywania cząstek paliwa w złożu oraz jednolite temperatury spalania. Podczas badań eksperymentalnych analizowano ubytek masy peletów węgla kamiennego oraz biomasy różnego pochodzenia w atmosferze utleniającej i obojętnej w dwufazowym przepływie z udziałem materiału inertnego. Uzyskane wyniki pozwalają stwierdzić, że duża różnorodność oferowanej przez dostawców biomasy, wymaga dokładnego poznania jej właściwości oraz określenia jej wpływu na proces oraz instalacje przy zastosowaniu w energetyce.

Słowa kluczowe: spalanie tlenowe, paliwa, biomasa, fluidyzacja, spalanie

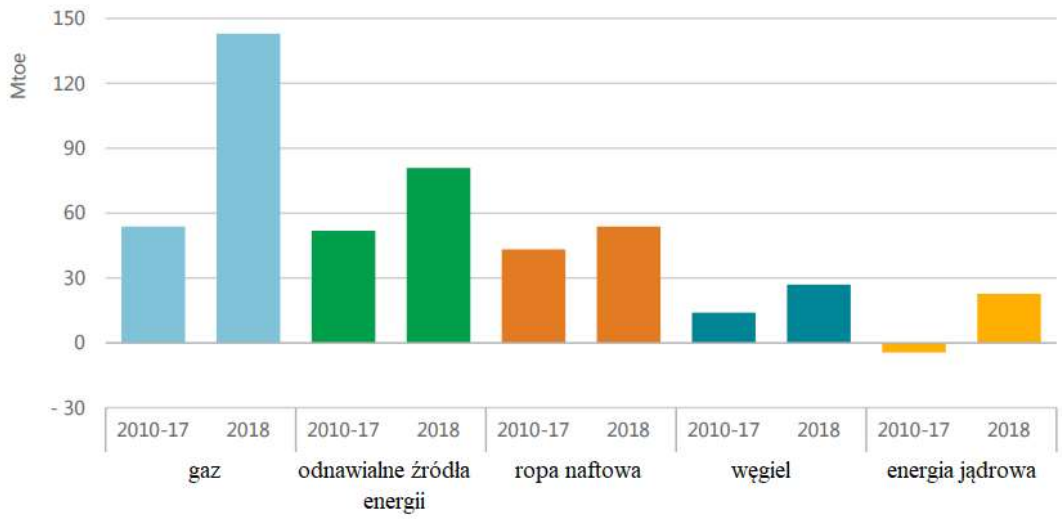
Analysis of fuels combustion of the circulation fluidized bed

Summary
Growing concerns on the greenhouse gas emissions and their potential impact on climate change demand not only the application of CO_2 capture and storage (CCS) technologies to large point anthropogenic CO_2 emission sources such as coal and natural gas fired power plants but also the implementation of CO_2 negative combustion technologies such as Bio-energy with Carbon Capture and Storage (BECCS). Among all the available combustion technologies, fluidized bed combustion (FBC) is often considered as the best choice for the combustion and/or co-combustion of biomass, waste and other low-quality solid fuels due to its fuel flexibility, long residence times, and uniform combustion temperatures. During experimental research, the mass loss of coal nad biomass pellets of various origins was analyzed in an oxidizing and inert atmosphere in a two-phase flow with the use of inert material. The obtained results allow to state that the large variety of biomass offered by suppliers requires a thorough knowledge of its properties and determination of its impact on the process and installations when used in the power industry.

Keywords: oxy-combustion, fuels, biomass, fluidization, combustion

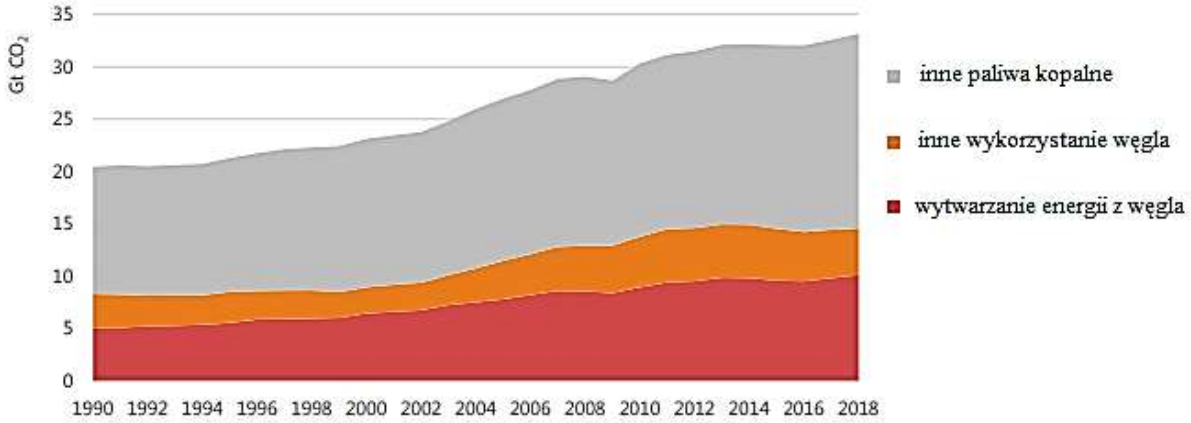
1. Wstęp

W wyniku wzrostu populacji ludności, rozwoju światowej gospodarki, a także wyższego zapotrzebowania na ogrzewanie i chłodzenie w niektórych częściach świata zużycie energii na całym świecie wzrosło o 2,3% w 2018 r. (IEA, 2019), blisko dwukrotnie więcej niż średnie tempo wzrostu od 2010 r. Zwiększył się popyt na wszystkie paliwa (rys. 1.), a paliwa kopalne osiągnęły prawie 70% wzrostu w drugim roku z rzędu. Odnawialne źródła energii rosły w dwucyfrowym tempie, ale wciąż nie wystarczająco, aby sprostać wzrostowi zapotrzebowania na energię elektryczną na całym świecie.



Rys. 1. Średni roczny globalny wzrost zapotrzebowania na energię pierwotną według paliw, 2010-18 (IEA, 2019)

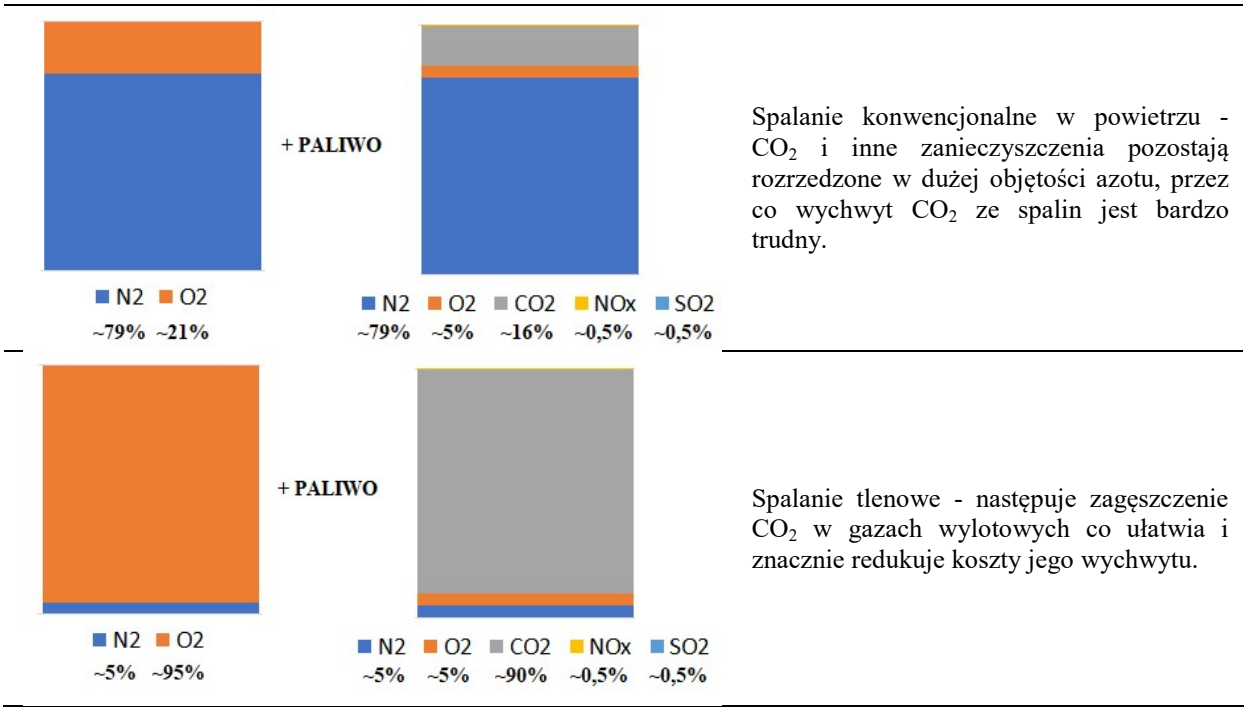
W wyniku wyższego zużycia energii globalne emisje CO_2 związane z energią zwiększyły się do 33,1 Gt CO_2 (rys. 2.) co stanowi wzrost o 1,7%. Wytwarzanie energii z węgla jest nadal największym pojedynczym emiterem, odpowiedzialnym za 30% wszystkich emisji dwutlenku węgla związanych z energią.



Rys. 2. Globalne emisje dwutlenku węgla związane z energią według źródła, 1990-2018 (IEA 2019)

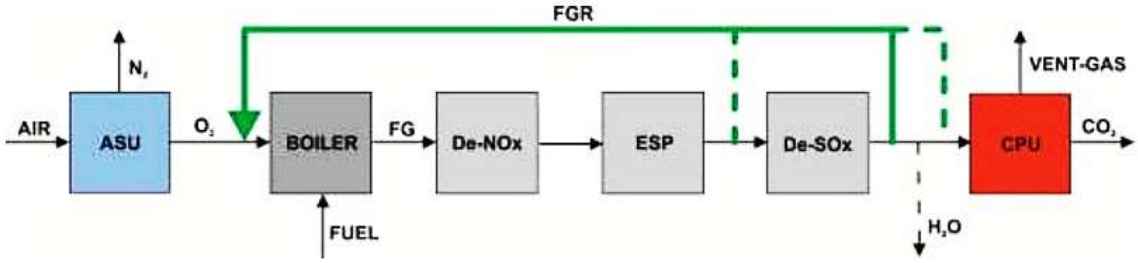
W ostatnich latach rośnie świadomość społeczeństwa na temat zagrożeń związanych z emisją gazów cieplarnianych i ich potencjalnego wpływu na zmiany klimatu. Dlatego ważny jest rozwój technologii wychwytywania i składowania CO_2 – CCS (ang. Carbon Capture and Storage) w dużych punktach antropogenicznych źródeł emisji CO_2, takich jak elektrownie węglowe i gazowe, ale także wdrożenia technologii ujemnego spalania CO_2, takich jak bioenergia z wychwytywaniem i składowaniem CO_2 - BECCS (ang. Bioenergy with Carbon Capture and Storage) w ciągu następnych dziesięcioleci (Sher i in., 2018; Greinert i in., 2019). Spalanie biomasy zintegrowane z CCS może prowadzić do ujemnych emisji CO_2 ze względu

na to, iż biomasa jest uważana za paliwo odnawialne, neutralne pod względem emisji dwutlenku węgla źródło energii. Mimo oczekiwań, że paliwa kopalne utrzymają dominującą rolę w światowych dostawach energii w nadchodzących dziesięcioleciach biomasa przyciągnęła już uwagę specjalistów na całym świecie w kontekście kontroli emisji gazów cieplarnianych. Spalanie tlenowe realizuje się w kotłach energetycznych poprzez spalanie paliw stałych w atmosferze wzbogacanej tlenem. Efektem takiego procesu są spaliny o podwyższonej koncentracji dwutlenku węgla, co znacznie ułatwia i redukuje koszty jego separacji. Rys. 3. przedstawia porównanie spalania konwencjonalnego i tlenowego.



Rys. 3. Porównanie spalania konwencyjnego i tlenowego

Z technologią spalania tlenowego nierozerwalnie związane są trzy kwestie, a mianowicie separacja powietrza, poprzedzająca proces spalania, kontrola temperatury w samym palenisku (wysokie stężenie tlenu wpływa na wzrost adiabatycznej temperatury spalania) oraz doczyszczanie powstających gazów spalinowych. Rys. 4. przedstawia przykładowy schemat blokowy elektrowni realizującej spalanie tlenowe. Instalacja składa się z kotła energetycznego i jednostki separacji powietrza ASU (ang. Air Separation Unit) do wytworzenia prawie czystego strumienia tlenu. Strumień tlenu jest następnie łączony z RFG (ang. Recirculation Flue Gas) w celu wytworzenia gazu wzbogaconego w tlen jako utleniacza. Recykling spalin jest konieczny, aby złagodzić zbyt wysoką temperaturę płomienia, która wynika ze spalania paliwa w czystym tlenie. W układzie znajduje się również jednostka doczyszczania CO_2 CPU (ang. CO_2 Processing Unit). Po usunięciu wody i innych zanieczyszczeń ze strumienia wylotowego gazu spalinowego, otrzymuje się CO_2 o wysokiej czystości (do 95%).



Rys. 4. Blokowy schemat elektrowni realizującej spalanie tlenowe (Czakiert, 2017)

Spalanie w złożu fluidalnym CFB (ang. Circulating Fluidized Bed) spośród wszystkich dostępnych technologii spalania jest często uważane za najlepszy wybór do spalania i/lub współspalania biomasy i innych paliw stałych niskiej jakości. Niewątpliwymi zaletami są elastyczność paliwowa, długi czas przebywania cząstek paliwa w złożu oraz jednolite temperatury spalania. Charakterystyka cyrkulacyjnej technologii fluidalnej ma również kilka zalet dla jego zastosowania w układach spalania tlenowego (Mathekga i in., 2016). Po pierwsze, trudność recyrkulacji spalin w celu kontroli temperatury w instalacjach pyłowych może zostać zmniejszona w cyrkulacyjnym złożu fluidalnym (CFB) za pomocą recyrkulacji materiału złoża, ponieważ ciepło właściwe ciał stałych jest znacznie wyższe niż ciepło odzyskanych spalin. Po drugie, niższe emisje NOx i lepsze usuwanie siarki ze względu na niską temperaturę złoża (850°C). Prostsza modernizacja kotła fluidalnego do spalania tlenowego ze względu na brak konieczności wymiany palnika.

Zagadnienie spalania tlenowego paliw w technologii fluidalnej stanowi przedmiot wielu badań i analiz. Wpływ atmosfery utleniającej w układach ze złożem fluidalnym, w których wypalane są różne rodzaje węgla, został w ostatnich latach dokładnie zbadany przez wielu badaczy (Mathekga i in., 2016; Bis i in., 2008), w których potwierdzone zostały zalety oxy-spalania a mianowicie: podwyższona konwersja energii oraz możliwość sekwestracji dwutlenku węgla. Na ogół, wyniki doświadczalne wykazały, że emisja NOx przy małym stężeniu O_2 jest niższa niż podczas spalania w atmosferze powietrza. Emisje NOx rosną wraz ze wzrostem stężenia O_2 w utleniaczu ze względu na wzrost temperatury w piecu, który podnosi stężenie rodników O i OH i poprawia tworzenie NO oraz ze względu na niższą prędkość gazu i dłuższy czas przebywania cząstek paliwa w komorze spalania, który może sprzyjać konwersji paliwa N w prekursory NOx (Duan i in., 2011). Jak dotąd niewielu badaczy analizowało spalanie tlenowe w reaktorach ze złożem fluidalnym opalanych paliwami w 100% z biomasy. Właściwości biomasy różnią się od właściwości węgla pod wieloma względami, co powoduje różnice w charakterze spalania tych paliw. Na przykład biomasa ogólnie ma mniej węgla, więcej tlenu, wyższą zawartość wodoru i niższą wartość

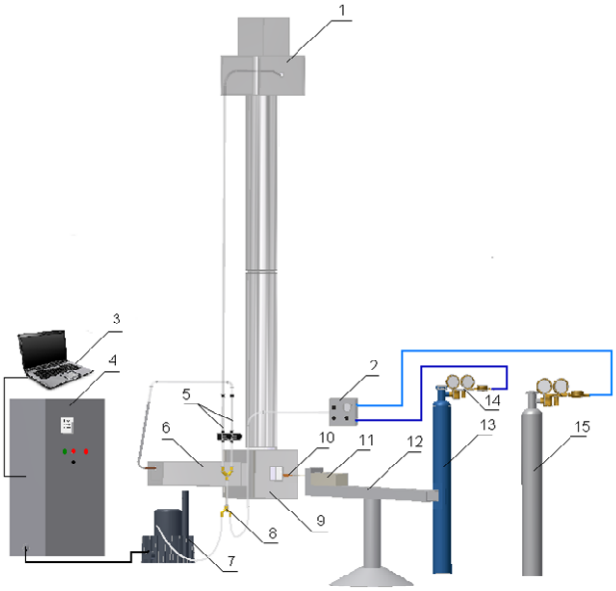
opałową. Istnieją ogromne różnice w zawartości substancji lotnych między biomasą a węglem. Biomasa, bowiem może stracić nawet do 90% jej masy (jako substancji lotnych) w pierwszym etapie spalania. Niektóre rodzaje biomasy zawierają ponadto wysoką zawartość pierwiastków azotu, siarki i chloru oraz związki metali alkalicznych, które mogą wpływać na obniżenie temperatury mięknięcia i topnienia popiołu generując poważne problemy podczas spalania. Celem pracy (Sher i in., 2018) było badanie oxy-combustion trzech rodzajów paliw biomasowych: agro, leśnej oraz rosliny energetycznej w jednostce o mocy 20 kWth z warstwą fluidalną pęcherzową (BFB). Analizowano wpływ atmosfery spalania oraz stężenia tlenu w utleniaczu na profile emisji gazów i temperatury. Natomiast praca (Kosowska – Golachowska i in., 2016) w odróżnieniu od wyżej wspomnianej została poświęcona analizie spalania pojedynczego ziarna biomasy w warstwie fluidalnej w różnych atmosferach utleniających. W badaniu tym zastosowano sferyczne „brykiety" biomasy (wierzby, salix viminalis). Wyniki eksperymentu wskazują, że skład atmosfery utleniającej silnie wpływa na proces spalania paliw z biomasy. Zastąpienie N_2 w środowisku spalania, przez CO_2 spowodowało niewielkie opóźnienie zapłonu i mniejszą maksymalną utratę masy podczas spalania nieprzetworzonej biomasy. Zwiększenie ilości utleniacza powodowało skrócenie czasu spalania. Niniejsza praca eksperymentalna w odróżnieniu do badań opisanych w przeglądzie polega na analizie ubytku masy pojedynczych peletów spalanych w laboratoryjnym reaktorze z cyrkulacyjnym złożem fluidalnym. W eksperymencie wykorzystane zostały biomasy różnego pochodzenia, dostępne na rynku i specjalnie dedykowane do spalania w energetyce.

2. Cel pracy

Celem badań eksperymentalnych była analiza procesu spalania tlenowego paliw w technologii z CFB w różnych atmosferach utleniających.

3. Parametry eksperymentu

Eksperyment polegał na spalaniu próbek paliw z wykorzystaniem stanowiska badawczego umożliwiającego zamodelowanie warunków cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej ze spalaniem tlenowym. Schemat stanowiska eksperymentalnego został przedstawiony na rys. 5. (Pełka, 2009).



Rys. 5. Schemat stanowiska eksperymentalnego 1 – pojemnik na piasek kwarcowy, 2 – mieszalnik, 3 – laptop, 4 – skrzynka sterująca, 5 – rotametry, 6 – nagrzewnica, 7 – wentylator, 8 – trójnik, 9 – komora spalania, 10 – koszyczek na ziarno, 11 – waga tensometryczna, 12 – platforma wjazdowa, 13, 15 – butle z gazem technicznym, 14 – reduktor

Podczas badań eksperymentalnych analizowano wpływ oddziaływania materiału inertnego oraz atmosfery utleniającej na szybkość ubytku masy peletów dwóch rodzajów biomasy:

- leśnej - pelety z trociny dębowej,
- agro - pelety z łuski słonecznika oraz pelety ze słomy.

Badania prowadzono w temperaturze 850°C, która jest utrzymywana podczas spalania paliw w kotłach fluidalnych energetyki zawodowej. Pelety spalano w następujących stężeniach mieszaniny gazów tlen/dwutlenek węgla: 21%/79%, 25%/75%, 30%/70%. Eksperyment został przeprowadzony zarówno bez odziaływania materiału inertnego oraz w jego strudze Gs=2,5 kg/m^{2}s.

Wyniki eksperymentu zostały zestawione z wynikami spalania węgla kamiennego w analogicznych warunkach (Kaczyński i in. 2019).

Pelety z trociny dębowej, mieszaniny trocin 30%buk/70%dąb oraz słomy miały średnicę 6mm, a średnica peletów z łuski słonecznika wynosiła 8mm. Masa wyselekcjonowanych z ogółu materiału próbek wynosiła 0,73±0,03 g.

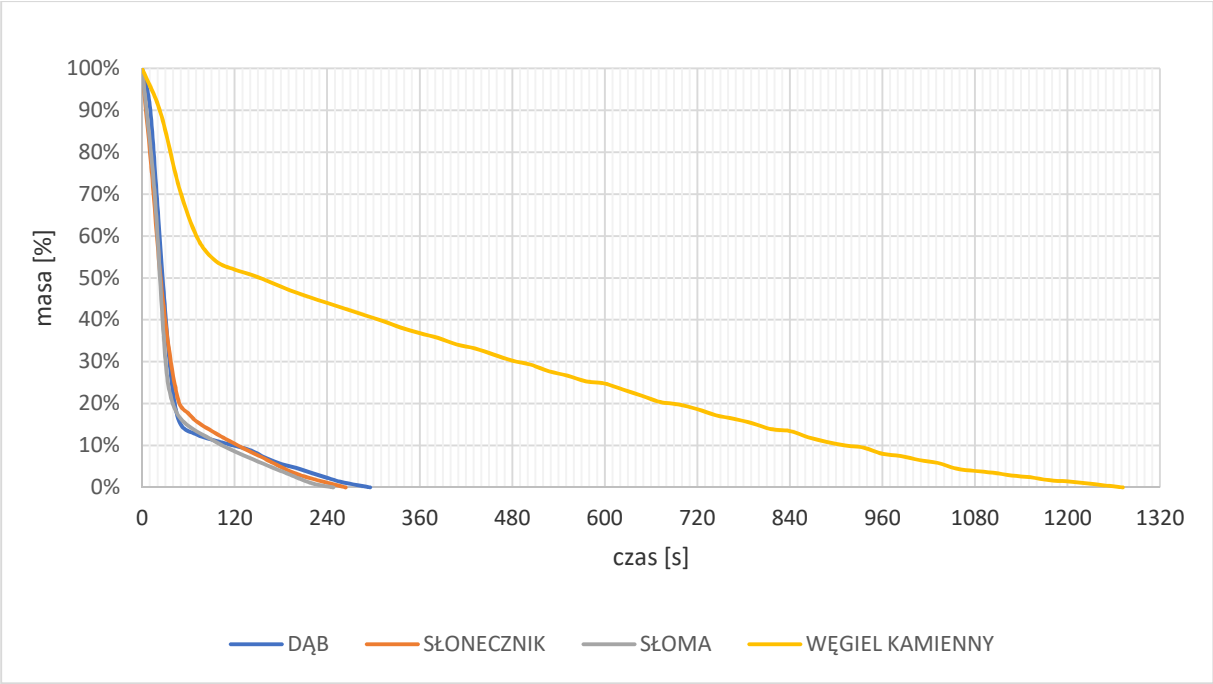
Węgiel kamienny pochodził z kopalni Sobieski typ płomienny 31.2. Jest to węgiel szeroko stosowany w polskiej energetyce m.in. w elektrowni Łagisza, ze względu na wysoką zawartość części lotnych oraz bardzo słabą zdolność do spiekania. Próbki badawcze o sferycznym kształcie, średnicy d=10mm i masie w zakresie 0,73±0,05 g były mechanicznie preparowane z ziaren rzeczywistych węgla.

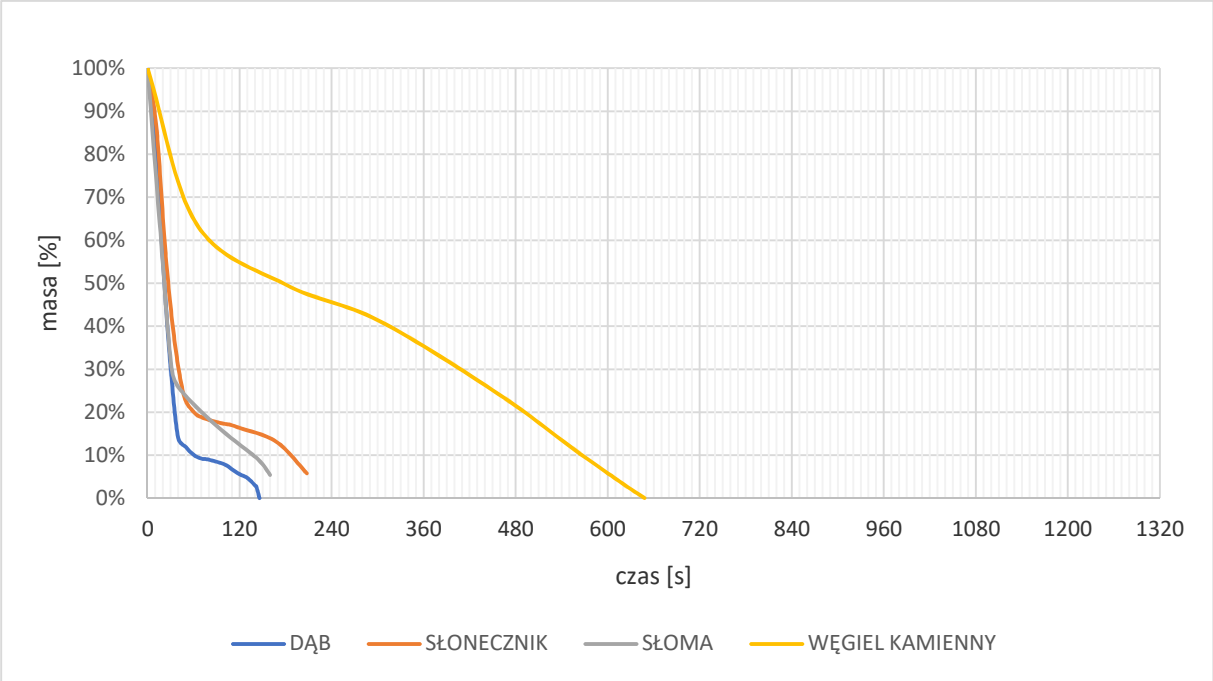
3. Wyniki eksperymentu

Zestawienie średnich procentowych ubytków masy paliw biomasowych oraz węgla kamiennego spalanych w temperaturze 850°C bez udziału materiału inertnego oraz w jego strumieniu dla Gs=2,5 kg/m^{2}s w różnych atmosferach utleniających przedstawiają rys. 6-8. Analiza zamieszczonych wykresów pozwala na sformułowanie następujących spostrzeżeń. Proces ubytku masy peletów z biomasy na etapie wydzielania i spalania części lotnych przebiega w sposób gwałtowniejszy niż w przypadku ziarna węgla kamiennego. Etap ten trwa niemal połowę krócej w przypadku peletu z biomasy (ok 40 s) w porównaniu z węglem kamiennym (ok 80 s). Ziarno węgla spala się zdecydowanie dłużej od peletów z biomasy ze względu na dużo większą zawartość karbonizatu. Różnica czasu spalania węgla i biomasy jest niemal trzykrotna. Zmiana atmosfery spalania polegająca na zwiększaniu koncentracji utleniacza powoduje skracanie czasu całkowitego ubytku masy spalanych ziaren paliw W przypadku badań bez udziału materiału inertnego w atmosferze 21% O_2/79% CO_2 całkowity czas spalania próbki węgla wyniósł 1272s. Zmiana stężenia mieszanki na 25% O_2/75% CO_2 spowodowała skrócenie czasu spalania próbki o 94 s, czyli o 7,4%. Dalsze zwiększenie zawartości utleniacza 30% O_2/70% CO_2 spowodowało kolejne skrócenie czasu spalania o 10,4% w porównaniu do atmosfery 21%O_2/79%CO_2. Podczas zwiększania stężenia mieszanki utleniającej przy udziale materiału inertnego proces erozji również ulega intensyfikacji. W mieszaninie 21% O_2/79% CO_2 i Gs= 2,5 kg/m^{2}s całkowity czas spalania próbki wyniósł 650s, czyli skrócił się o ok 48% w porównaniu ze spalaniem bez materiału inertnego. Natomiast w przypadku stężenia mieszanki na poziomie 30% O_2/70% CO_2 czas ten ulega skróceniu do 570 s, i skrócił się o ok 54,5% w porównaniu ze spalaniem bez materiału inertnego.

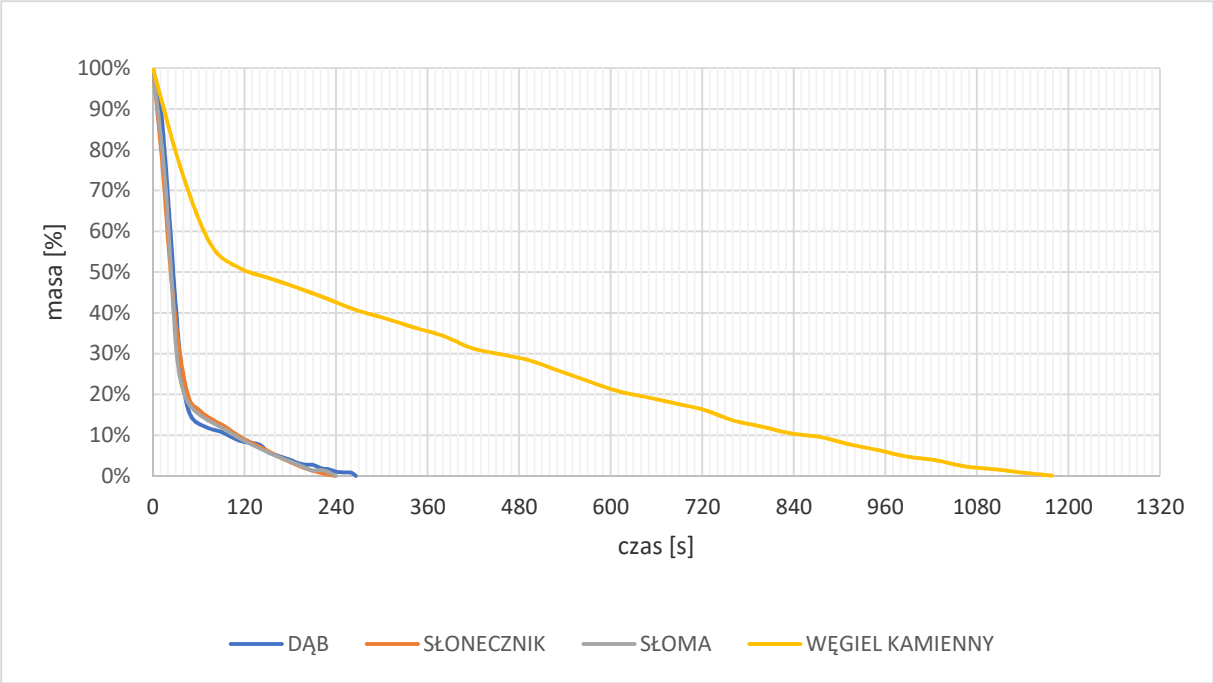
W przypadku spalania peletów z biomasy zmiana atmosfery spalania oraz obecność materiału inertnego przyspieszają ubytek masy wszystkich rodzajów peletów. W przypadku biomasy z trociny dębowej spalanie w strumieniu materiału Gs=2,5 kg/m^{2}s, w każdej atmosferze trwa krócej o ok 45% w porównaniu ze spalaniem bez materiału inertnego. W przypadku spalania peletu z łuski słonecznika w porównaniu ze spalaniem bez materiału inertnego czas spalania w strumieniu Gs=2,5 kg/m^{2}s skrócił się o ok 20-30%. W przypadku peletów ze słomy w porównaniu ze spalaniem bez materiału inertnego czas spalania w strumieniu materiału inertnego Gs=2,5 kg/m^{2}s skrócił się o ok 35%. W przypadku spalania biomasy agro i leśnej w strumieniu materiału inertnego widoczne są wyraźne różnice w charakterze spalania paliw. Biomasa leśna spala się podobnie jak węgiel, natomiast biomasa agro ma inny charakter spalania. Krzywe ubytku po etapie spalania części lotnych (po 40 s) wskazują na przyrost

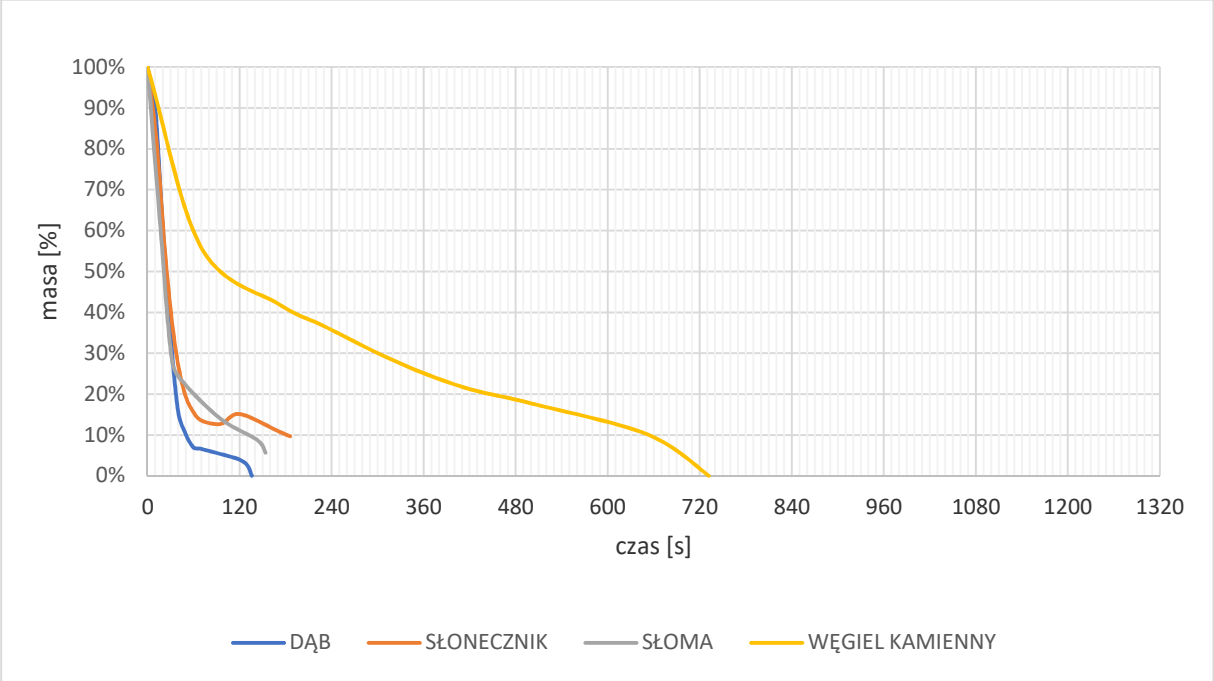
masy próbek, co spowodowane jest wystąpieniem zjawiska topnienia i mięknięcia popiołu. W przypadku peletu z łuski słonecznika piasek kwarcowy oblepia pelet wytwarzając na jego powierzchni twardą skorupę, natomiast pelet ze słomy ulega spiekaniu. Powoduje to niezerowe wartości ubytku masy paliw z biomasy agro na końcu spalania w strumieniu materiału inertnego.



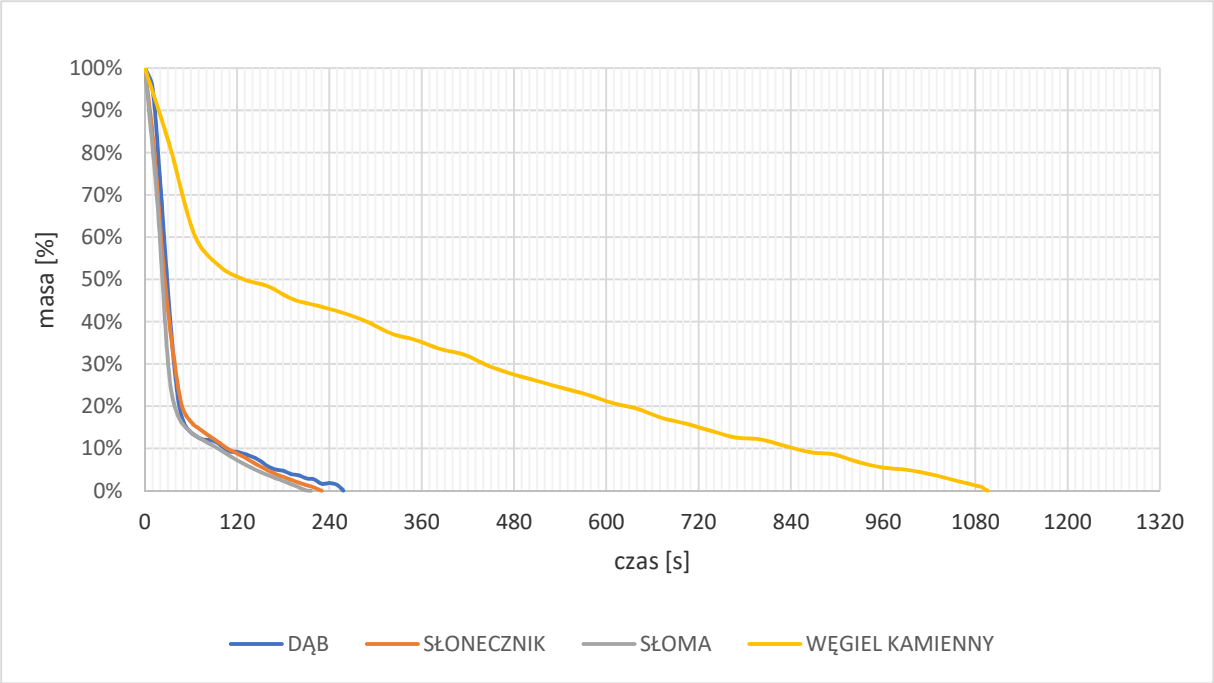


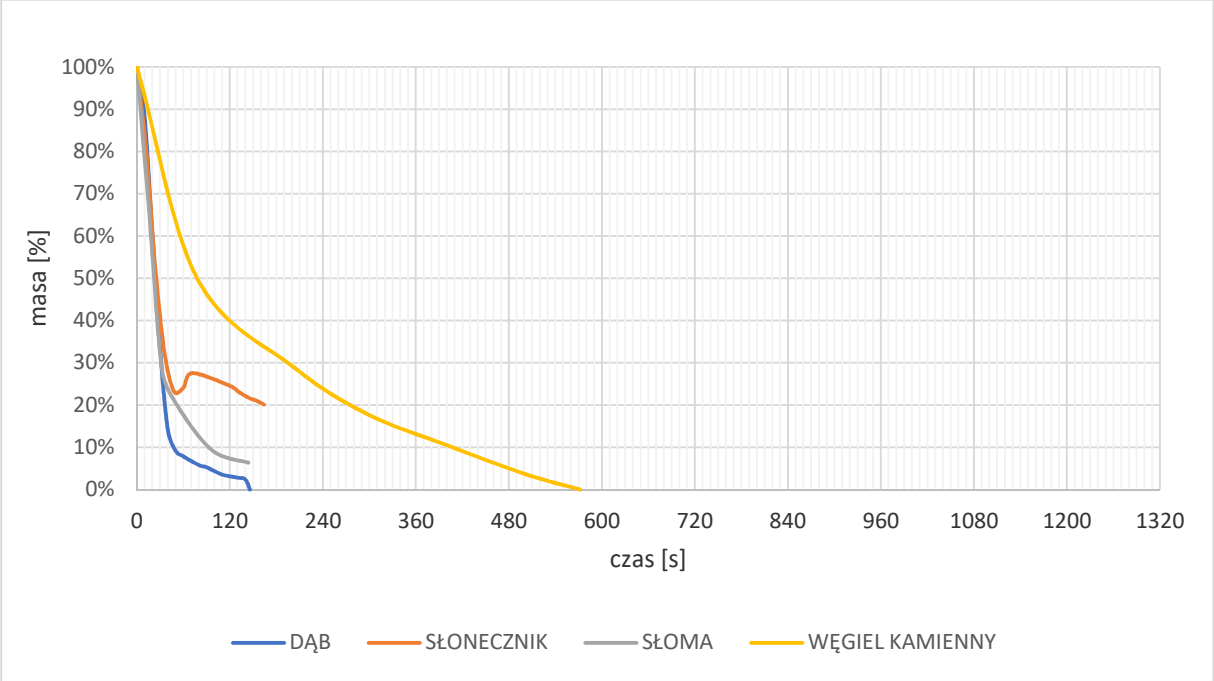
Rys. 6. Zestawienie średnich procentowych ubytków masy paliw biomasowych oraz węgla kamiennego spalanych w mieszaninie 21%O_2/79%CO_2 bez materiału inertnego (wykres górny) oraz w strumieniu materiału inertnego Gs=2,5 kg/m^{2}s (wykres dolny)





Rys. 7. Zestawienie średnich procentowych ubytków masy paliw biomasowych oraz węgla kamiennego spalanych w mieszaninie 25%O_2/75%CO_2 bez materiału inertnego (wykres górny) oraz w strumieniu materiału inertnego Gs=2,5 kg/m^2s (wykres dolny)

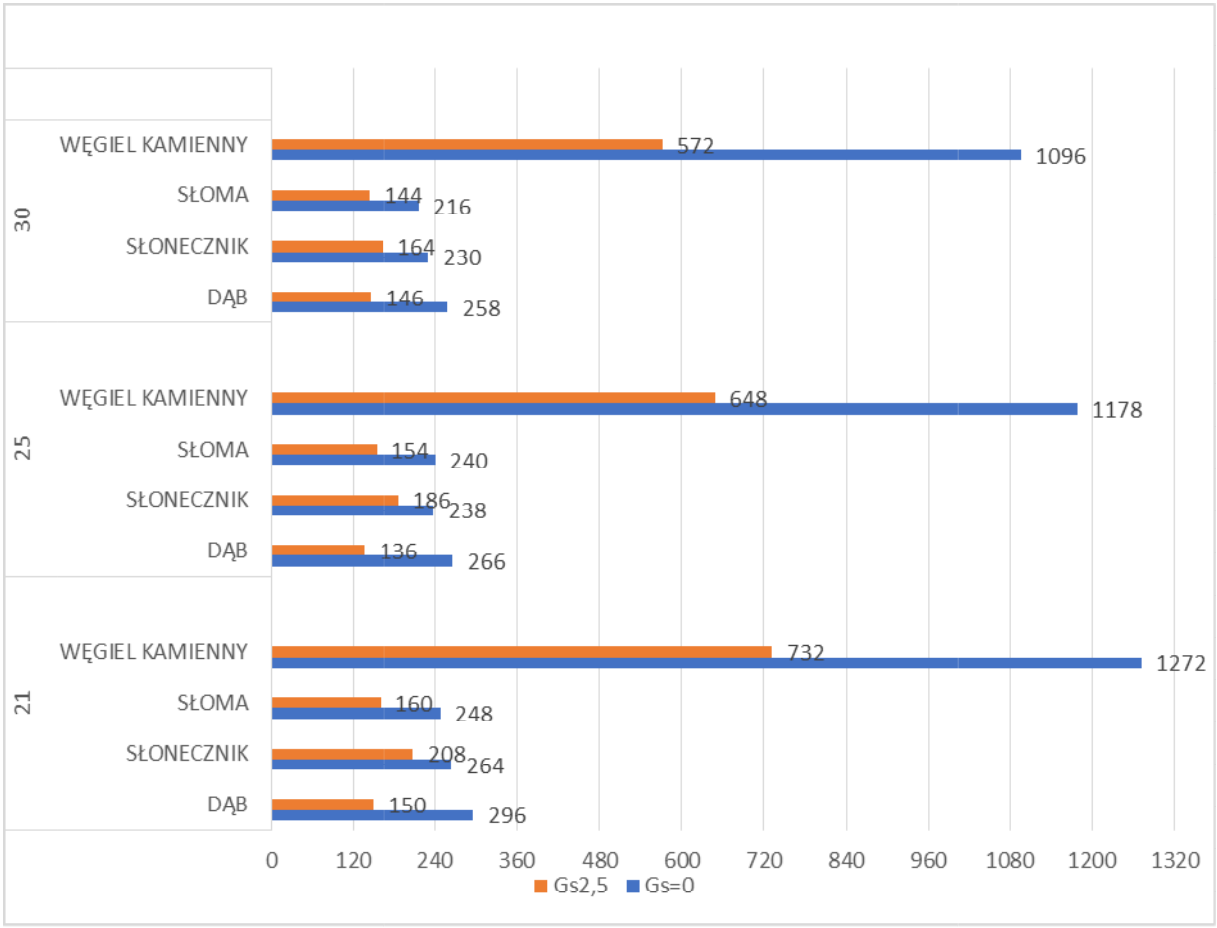




Rys. 8. Zestawienie średnich procentowych ubytków masy paliw biomasowych oraz węgla kamiennego spalanych w mieszaninie 30%O_2/70%CO_2 bez materiału inertnego (wykres górny) oraz w strumieniu materiału inertnego Gs=2,5 kg/m^2s (wykres dolny)

Zestawienie całkowitego czasu spalania paliw w temperaturze 850°C bez udziału materiału inertnego oraz w jego strumieniu dla Gs=2,5 kg/m^2s przedstawia rys. 9. Zmiana atmosfery spalania polegająca na zwiększaniu koncentracji utleniacza powoduje skracanie czasu całkowitego ubytku masy spalanych paliw. W przypadku węgla kamiennego oraz biomasy leśnej czas spalania we wszystkich atmosferach w strumieniu materiału inertnego trwa o ok 50-60% krócej niż spalanie bez materiału inertnego. W przypadku biomasy agro

czas spalania skraca się o ok. 20-30% ze względu na wystąpienie zjawiska topnienia i mięknięcia popiołu.



Rys. 9. Czasy spalania paliw w zależności od wartości strumienia materiału Gs w różnych atmosferach utleniających.

4. Wnioski

Przeprowadzone w ramach pracy badania eksperymentalne ubytku masy węgla kamiennego oraz peletów z biomasy z trociny dębowej, z łuski słonecznika oraz ze słomy spalanych w warunkach utleniających bez materiału inertnego oraz w jego strumieniu pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Zwiększanie koncentracji utleniacza w atmosferze spalania powoduje skracanie czasu całkowitego ubytku masy spalanych paliw. Zgodnie z teorią dostarczenie w obszar spalania większej ilości utleniacza wywołuje przyspieszenie procesu spalania, w związku z tym przyspieszeniu ulega ubytek masy.
2. Materiał inertny powodował skrócenie całkowitego czasu spalania w porównaniu z czasem spalania bez jego udziału w każdej analizowanej atmosferze utleniającej, a zwiększenie strumienia w dalszym stopniu skracało czas spalania.

a) Materiał inertny podczas spalania węgla kamiennego oraz peletów z trociny dębowej intensyfikuje proces spalania. Spalanie w strumieniu materiału inertnego na poziomie 2,5 kg/m^{2}s trwa o niemal połowę krócej niż spalanie bez materiału inertnego w każdej analizowanej atmosferze utleniającej.

b) W przypadku spalania peletów z łuski słonecznika w strumieniu materiału inertnego następowało przekroczenie temperatury mięknięcia popiołu i oblepianie próbki przez piasek kwarcowy w każdej analizowanej atmosferze utleniającej. W przypadku spalania peletu z łuski słonecznika we wszystkich atmosferach w porównaniu do spalania bez materiału inertnego czas spalania w strumieniu Gs=2,5 kg/m^{2}s skrócił się o ok 20-30%.

c) Podczas spalania peletu ze słomy w strumieniu materiału inertnego w każdej analizowanej atmosferze utleniającej obserwowano tworzenie się spieków, W przypadku peletów ze słomy w porównaniu ze spalaniem bez materiału inertnego czas spalania w strumieniu materiału inertnego Gs=2,5 kg/m^{2}s skrócił się o ok 35%.

Badania eksperymentalne wskazują, że pelety uzyskiwane z biomasy agro charakteryzują się odmiennym charakterem spalania w warunkach fluidalnych w porównaniu z węglem kamiennym i biomasą pochodzenia leśnego. Z jednej strony wszechstronny charakter biomasy umożliwia jej wszechstronne wykorzystanie, z drugiej strony ta różnorodność sprawia, że biomasa jest złożonym i trudnym paliwem, zwłaszcza ze względu na wysoki procent alkaliów potasu i chloru, w niektórych rodzajach biomasy rolniczej, które mogą generować problemy podczas spalania, obniżając temperaturę mięknięcia i topnienia popiołu. Biomasę rolniczą można wykorzystywać podczas spalania tlenowego w kotłach z cyrkulacyjnym złożem fluidalnym w odpowiednich kontrolowanych warunkach, dostosowanych do rodzaju i jakości stosowanego paliwa.

5. Literatura

Bis Z., Czakiert T., Nowak W., 2008. Spalanie w atmosferach modyfikowanych tlenem kierunkiem rozwoju dla kotłów CWF; Energetyka i Ekologia; str. 713-718.

Czakiert T., 2017. Stan rozwoju technologii spalania tlenowego. Rynek Energii 12/2017.

Duan L., Zhao C., Zhou W., Qu C., Chen X. 2011. Effects of operation parameters on NO emission in an oxy-fired CFB combustor. Fuel Process Technol, 92(3):379–84.

Greinert A., Mrówczyńska M., Szefner W., 2019. The Use of Waste Biomass from the Wood Industry and Municipal Sources for Energy Production, Sustainability, 11, 3083

IEA, 2019. Global Energy & CO2 Status Report 2018, The latest trends in energy and emissions in 2018, 1-22.

Kaczyński K., Kaczyńska K., Pełka P., Analiza ubytku masy ziarna węgla w atmosferze utleniającej oraz obojętnej w zmiennej temperaturze panującej w komorze paleniskowej w dwufazowym przepływie z udziałem materiału inertnego, Rynek Energii, Nr 1(140) - 2019, ISSN 1425-5960, str. 87-97.

Kosowska-Golachowska M., Kijo-Kleczkowska A., Luckos A., Wolski K., Musiał T., 2016. Oxy-combustion of biomass in a circulating fluidized bed. Archives of Thermodynamics, vol. 37, no. 1, p.17-30.

Mathekga H.I., Oboirien B.O., North B.C. 2016. A review of oxy-fuel combustion in fluidized bed reactors. Int J Energy Res;40(7):878–902.

Pełka P., 2009. Analysis of a coal particle mass loss burning in flow of inert material. Combust. Flame, 156, 1604.

Sher F., Pans M.A., Sun Ch., Snape C., Liu H., 2018. Oxy-fuel combustion study of biomass fuels in a 20 kWth fluidized bed Combustor, Fuel, 215, 778–786.

Analiza spalania paliw w cyrkulacyjnej warstwie fluidalnej

Kaczyński Konrad (1), Kaczyńska Katarzyna (1), Pełka Piotr (1)

[1] Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, Politechnika Częstochowska
Konrad Kaczyński: kkaczyński@imc.pcz.pl

Streszczenie
Najbardziej korzystną technologią spalania zarówno dla węgla jak i biomasy jest technologia fluidalna, która należy do tzw. „czystych technologii węglowych" i jest uznawana za jedną z najbardziej przyjaznych środowisku. Właściwości poszczególnych paliw nie pozostają bez wpływu na przebieg procesu spalania zachodzący w złożu fluidalnym. W pracy porównany został charakter spalania oraz czasy ubytku masy paliw węglowych i biomasowych różnego pochodzenia (leśna i agro), spalanych w temperaturze 850° bez materiału inertnego oraz przy dwóch wartościach strumienia materiału inertnego (Gs=2,5 kg/m^{2}s oraz Gs=5 kg/m^{2}s). Wyniki eksperymentu wskazują, iż w przypadku peletów pochodzenia agro, charakter spalania w warstwie fluidalnej jest odmienny od spalania węgli i biomasy leśnej. Popiół różnych rodzajów biomasy zawiera związki metali alkaicznych, których zawartość wpływa na obniżenie temperatury mięknięcia i topnienia popiołu. Niedostosowanie temperatury pracy kotła oraz natężenia Gs do rodzaju dostarczanego paliwa może powodować zwiększanie straty niecałkowitego spalania oraz narastanie osadu na powierzchniach grzewczych kotłów, a nawet spowodować zmianę rozkładu ziarnowego materiału warstwy (poprzez wytworzone spieki).

Słowa kluczowe: węgiel, biomasa, fluidyzacja, spalanie, paliwa

Analysis of fuels combustion of the circulation fluidized bed

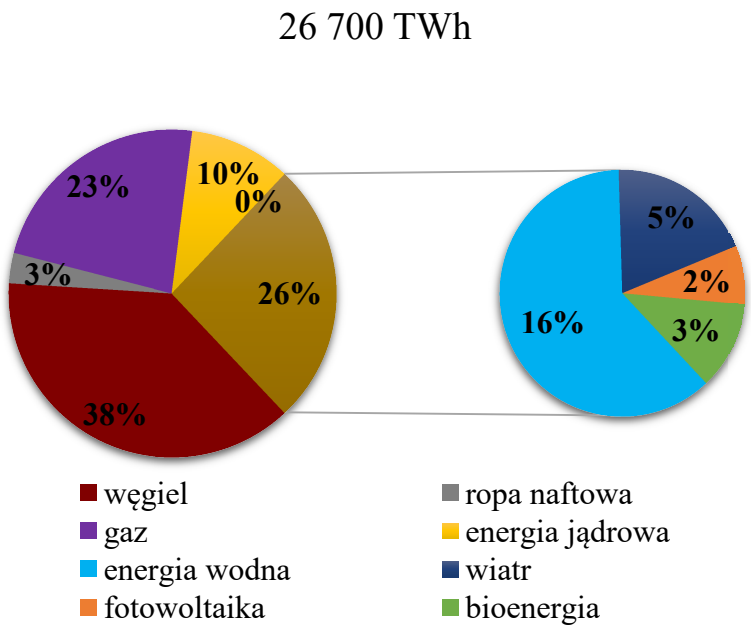
Summary
The most advantageous combustion technology for both coal and biomass are fluid technology, which best meets the requirements set by global trends in the modernization of the energy sector. This technology belongs to the so-called "clean coal technologies" and is considered one of the most environmentally friendly. The properties of individual fuels have an impact on the combustion process in the fluidized bed. The paper compares the nature of combustion and the times of mass loss of coal and biomass fuels of various origin (wood and agro), combusted at 850 ° without inert material and with two values of inert material stream (Gs = 2.5 kg/m^{2}s and Gs = 5 kg/m^{2}s). The results of the experiment indicate that in the case of pellets of agro origin, the nature of combustion in the fluidized bed is different from the combustion of coals and wood biomass. Ash of various types of biomass contains alkali metal compounds whose content reduces softening and melting points. Failure to adjust the boiler operating temperature and Gs intensity to the type of fuel supplied may result in increased loss of incomplete combustion and build-up of deposits on the boiler's heating surfaces, and even cause a change in the particle size distribution of the bed material (through sinters produced).

Keywords: coal, biomass, fluidization, combustion, fuels

1. Wstęp

Według raportu International Energy Agency (IEA, 2019) globalne zapotrzebowanie na energię elektryczną w 2018 roku wzrosło o 4%, co odpowiada za ponad połowę wzrostu całkowitego zapotrzebowania na energię. Obok zwiększenia produkcji energii elektrycznej z elektrowni węglowych i gazowych (w konsekwencji odnotowano wzrost emisji CO_2 z sektora o 2,5%). W ostatnich latach nastąpił również wzrost wykorzystania odnawialnych źródeł energii i energii jądrowej. Produkcja energii poprzez spalanie paliw stałych nadal dominuje na świecie (rys. 1.), również w przypadku największych producentów energii, jak USA, Chiny, Indie oraz większości krajów Unii Europejskiej (UE). Można się spodziewać, że

paliwa węglowe pozostaną ważnym elementem ich gospodarek, przez co najmniej kilkadziesiąt lat.



Rys. 1. Wykorzystanie źródeł energii do produkcji energii elektrycznej na świecie w 2018 roku (IEA, 2019).

Jednak spalanie węgla wywołuje znaczne zanieczyszczenie środowiska. Emisje szkodliwych związków (m.in. SO_2, NO_x, CO i CO_2), a także pyłów i metali ciężkich przyczyniają się do katastrofalnych w skutkach zmian klimatycznych. Kluczowym rozwiązaniem jest zwiększenie produkcji energii ze źródeł odnawialnych, równocześnie z doskonaleniem technologii spalania paliw w celu zmniejszenia emisji zanieczyszczeń. Dla kotłów energetycznych zostało opracowanych wiele innowacyjnych metod spalania paliw. Szczególną rolę odgrywają kotły fluidalne, które można podzielić na kotły z pęcherzową warstwą fluidalną (BFB) i kotły z cyrkulacyjną warstwą fluidalną (CFB). Podstawowym elementem konstrukcyjnym kotła fluidalnego jest wielootworowe dno, gdzie z odpowiednią prędkością podawany jest czynnik fluidyzujący, najczęściej powietrze. Złoże kotła fluidalnego składa się z materiału obojętnego: piasku kwarcowego, paliwa, popiołu, sorbentów itp. W kotłach BFB pod wpływem powietrza przepływającego przez złoże pojawiają się pęcherzyki gazu, a materiał złoża nie krąży w przestrzeni kotła, jak ma to miejsce w przypadku kotłów CFB. Obie techniki spalania w złożu fluidalnym różnią się (tab. 1.) m.in. obciążeniem termicznym, ilością zastosowanego sorbentu. W kotłach CFB konieczne jest zastosowanie większej prędkości fluidyzacji w porównaniu ze złożem pęcherzowym. Technologia CFB pozwala na budowę kotłów energetycznych o znacznie wyższych mocach niż w przypadku BFB. Na drodze zwiększania efektywności energetycznej kotłów CFB staje jednak ograniczenie w materiałach konstrukcyjnych.

Tab.1. Porównanie technik spalania CFB i BFB (Leski i in., 2018)

Parametr	Typ kotła	
	CFB	BFB
obciążenie termiczne związane z powierzchnią q_A [MV/m^2]	1,8-2,5	1,2-1,5
obciążenie termiczne związane z objętością q_v [MV/m^3]	0,2-0,4	0,1-0,2
średnia wielkość cząstek paliwa [mm]	3-30	<25
moc [MW_{th}]	>50	<50
prędkość powietrza [m/s]	5-9	1-3
powierzchnia złoża	nieokreślona	ściśle określona
Ca/S	1,5	2,5-3,5
wpływ wysokości złoża na wiązanie SO_2	nie	tak

Zastosowanie technologii spalania fluidalnego przynosi wiele korzyści. Przede wszystkim następuje znaczna redukcja emisji termicznych tlenków azotu do atmosfery z powodu niskiej (w porównaniu z kotłami pyłowymi oraz rusztowymi) temperatury w komorze spalania (Basu, 2015). Temperatura 850°C sprzyja również wiązaniu siarki przez sorbenty doprowadzane do złoża w celu redukcji emisji dwutlenku siarki (nawet do 80%). W przypadku spalania w złożu fluidalnym cząstki paliwa są intensywnie mieszane z utleniaczem, co poprawia skuteczność wypalania oraz pozwala również na spalanie paliw gorszej jakości o niskiej wartości opałowej, jak np. biomasa.

2. Spalanie paliw w technologii fluidalnej

Specyfika palenisk fluidalnych umożliwia spalanie nie tylko paliw tradycyjnych: węgli kamiennych i brunatnych, ale również materiałów i odpadów energonośnych. Wiele jednostek na świecie również w Polsce w technologii spalania fluidalnego wykorzystuje, jako paliwo podstawowe lub uzupełniające biomasę. Biomasa jest źródłem energii, które jest bardzo rozproszone i w porównaniu do paliw kopalnych charakteryzuje się zróżnicowanymi właściwościami paliwowymi (tab. 2.), wśród których należy wymienić wartość opałową, zawartość wilgoci, popiołu oraz węgla całkowitego, zawartości chloru, siarki całkowitej i azotu. Odmienny jest również skład chemiczny popiołów, a zwłaszcza zawartości krzemu, wapnia, fosforu i potasu, które wpływają na charakterystyczne temperatury topliwości popiołów. Dotychczas na cele energetyczne wykorzystywana była głównie biomasa pochodzenia leśnego (pozostałości po wycince i obróbce drewna do 27% masy drewna). Jednakże wraz z rosnącym popytem rozwinął się rynek biomasy niedrzewnej – pochodzącej m.in. z upraw rolniczych i plantacji roślin energetycznych. W energetyce najczęściej stosowana jest biomasa przetworzona, w postaci zrębków, trocin, peletów i brykietów. Składniki biomasy obejmują celulozę, hemicelulozę, ligninę, lipidy, białka, cukry proste, skrobię, wodę, hydro-węgiel, popiół i inne związki. Koncentracja każdego z nich zmienia się w zależności od gatunku, rodzaju rośliny tkanki, etapu i warunków wzrostu. Ogólny skład biomasy pod względem węgla, wodoru i tlenu (CHO) niewiele różni się między sobą

w zależności od źródła biomasy. Typowe (suche) procenty wagowe dla C, H i O wynoszą odpowiednio 30-60%, 5-6% i 30-45%. Azot, siarka i chlor występują w ilościach zwykle mniejszych niż 1% suchej masy, jednak czasem znacznie przekraczają tą wartość, szczególnie w przypadku biomasy pochodzenia agro. Związki te mają negatywny wpływ, zarówno na środowisko naturalne, jak i na stosowane w procesie spalania i współspalania instalacje technologiczne.

Tab.2. Porównanie właściwości paliw (Jagustyn i in., 2011)

właściwości				
parametr	węgiel kamienny	węgiel brunatny	biomasa drzewna	biomasa agro
wilgoć W_t^r [%]	3,2 - 19,1	10,9 - 54,6	4,9 - 68,5	6,1 - 82,2
popiół A^d [%]	3,5 - 27,9	7,8 - 20,3	0,3 - 6,9	0,5 - 44,4
siarka S_t^d [%]	0,32 - 1,17	0,69 - 1,10	< 0,02 - 0,08	0,03 - 0,67
wartość opałowa Q_r	21,1 - 27,7	7,8 - 18,4	4,4 - 18,4	1,1 - 24,5
chlor Cl^d	0,020 - 0,159	< 0,005 - 0,029	< 0,005 - 0,057	< 0,005 - 1,168
węgiel C_t^d	49,7 - 78,4	41,7 - 56,8	45,2 - 51,7	27,2 - 59,1
azot N^d [%]	0,54 - 1,51	0,31 - 0,98	0,12 - 0,92	0,16 - 6,45

r – stan roboczy, t – zawartość całkowita, d – stan suchy

Generalnie biomasa zawiera znacznie mniej popiołu niż typowe paliwa kopalne, jednak jego skład chemiczny jest znacznie bardziej zróżnicowany. W tab. 3. przedstawiono zestawienie wyników analizy popiołu niektórych paliw biomasowych i węgla kamiennego. Główne pierwiastki tworzące popiół w biomasie obejmują Si, Al, Ti, Fe, Ca, Mg, Na, K, S i P. Materiał, który jest z natury lotny w temperaturach spalania, obejmuje pochodne niektórych metali alkalicznych, w szczególności potasu i sodu. Wysoka procentowa zawartość krzemu wraz z potasem i chlorem odgrywają istotną rolę w powodowaniu problemu silnego osadzania popiołu przy wysokich lub umiarkowanych temperaturach spalania. Głównymi źródłami tych problemów są (1) reakcja alkalia z krzemionką z wytworzeniem krzemianów metali alkalicznych, które topią się lub miękną w niskiej temperaturze (temperatury mogą być niższe niż 700°C, w zależności od składu biomasy) i (2) reakcja zasady z siarką z wytworzeniem siarczanów alkalicznych na powierzchniach wymiany ciepła komory spalania. Związki alkaliczne odgrywają kluczową rolę w obu procesach.

Tab.3. Analiza popiołu niektórych paliw biomasowych i węgla kamiennego (% wagowy% popiołu) (Khana i in. 2009)

paliwo	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	Mn	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	SO_3
biomasa leśna	4.3	1.3	1.5	5.9	8.5	55.9	0.6	16.8	0.1	3.9	1.3
słonecznik	2.9	0.6	0.8	0.1	21.6	21.6	0.24	22.8	0.1	15.2	14.0
słoma	53.1	3.6	1.2	---	3.0	17.7	4.5	30.0	---	4.1	---
odpady z upraw szklarniowych	28.4	3.9	18.4	0.3	5.7	25.8	0.8	9.7	0.8	3.8	---
węgiel kamienny	59.7	20.3	7.0	<0.01	1.9	1.8	1.0	2.3	0.9	0.1	1.3

Właściwości poszczególnych paliw nie pozostają bez wpływu na przebieg procesu spalania zachodzący w złożu fluidalnym.

Dla technologii spalania fluidalnego charakterystyczne jest zachodzące w komorze kotła rozdrabianie paliwa, które wpływa na sprawność spalania oraz poziom emisji zanieczyszczeń. Badacze od dawna podejmują próby analizy i opisu mechanizmów wiodących do redukcji rozmiaru ziaren węgla podczas procesu spalania w warstwie fluidalnej (Gajewski i in., 2004 oraz 2007; Kijo-Kleczkowska, 2011; Pełka, 2013 oraz 2017). Przeanalizowane zostało zagadnienie erozji ziaren węgla kamiennego spalanych w cyrkulacyjnej warstwie fluidalnej (Pełka, 2009), gdzie stwierdzono, że rola erozji w przyspieszaniu ubytku masy jest niewielka i silnie powiązana z procesem spalania. Największy udział w przyspieszaniu ubytku masy cząstek węgla ma charakterystyczny przepływ gazu w złożu fluidalnym, który intensyfikuje proces dyfuzji w obszarze reakcji.

Zagadnienie spalania biomasy agro w złożu fluidalnym w jednostkach małej skali zostało omówione w artykule przeglądowym (Khana i in., 2009), gdzie przedstawiono najważniejsze problemy dotyczące spalania biomasy, szczególnie ze względu na występowanie związków metali alkalicznych, wyjaśniono mechanizmy prowadzące do żużlowania i zanieczyszczania powierzchni ogrzewalnych kotłów. W badaniach eksperymentalnych (Kosowska-Golachowska i in., 2016) analizowano proces spalania sferycznych „brykietów" (uzyskiwanych specjalnie do badań w procesie rozdrobnienia i sprasowania) biomasy agro (słoma pszeniczna i wierzba energetyczna) oraz biomasy leśnej (sosna zwyczajna) w cyrkulacyjnej warstwie fluidalnej w temperaturze 850°C. Niniejsza praca w przeciwieństwie do wspomnianych podejmuje analizę spalania pojedynczych peletów, ale wyprodukowanych w komercyjnej technologii z biomasy różnego pochodzenia. Stosowanych m.in. w elektrowniach wykorzystujących spalanie fluidalne.

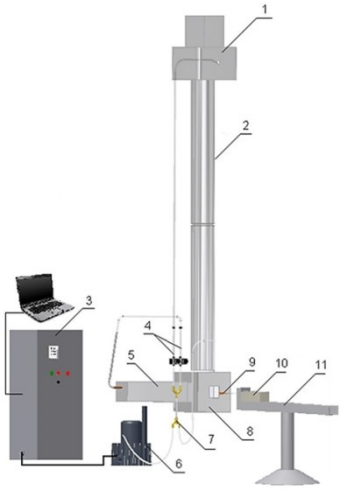
2. Cel pracy

W paleniskach fluidalnych możliwe jest spalanie zarówno paliw konwencjonalnych: węgli kamiennych i brunatnych, ale również paliw biomasowych i innych odpadów energonośnych.

W pracy porównany został charakter spalania oraz czasy ubytku masy paliw węglowych i biomasowych różnego pochodzenia, spalanych w temperaturze 850° bez materiału inertnego oraz przy dwóch wartościach strumienia materiału inertnego.

3. Parametry procesu

Badania eksperymentalne prowadzono na specjalnie zaprojektowanym stanowisku eksperymentalnym umożliwiającym zamodelowanie warunków cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej, którego schemat został przedstawiony na rys. 2. (Pełka, 2009).



Rys. 2. Schemat stanowiska pomiarowego (Pełka, 2009) 1 – pojemnik na piasek kwarcowy, 2 – rura opadowa, 3 – skrzynka sterująca, 4 – rotametry, 5 – nagrzewnica, 6 – wentylator, 7 – trójnik, 8 – komora spalania, 9 – koszyczek na ziarno, 10 – waga tensometryczna, 11 – platforma wjazdowa.

Podczas badań eksperymentalnych analizowano wpływ oddziaływania materiału inertnego na szybkość ubytku masy 4 paliw biomasowych różnego pochodzenia:

- biomasy leśnej: peletu z trociny dębowej i peletu z trocin 30% buk/70% dąb,
- biomasy agro pelet z łuski słonecznika oraz słomy.

Wyniki eksperymentu zostały zestawione z wynikami eksperymentalnymi spalania paliw węglowych w analogicznych warunkach warstwy fluidalnej:

- węgla kamiennego z kopalni Sobieski (Kaczyński i in., 2019),
- węgla brunatnego z kopalni Bełchatów (Pełka, 2009).

Pelety z trociny dębowej, mieszaniny trocin 30%buk/70%dąb oraz słomy miały średnicę 6mm, a średnica peletów z łuski słonecznika wynosiła 8mm. Masa wyselekcjonowanych z ogółu materiału próbek wynosiła 0,73±0,03 g.

Węgiel kamienny pochodził z kopalni Sobieski typ płomienny 31.2. Jest to węgiel szeroko stosowany w polskiej energetyce m.in. w elektrowni Łagisza, ze względu na wysoką zawartość części lotnych oraz bardzo słabą zdolność do spiekania. Próbki badawcze o sferycznym kształcie, średnicy d=10 mm i masie w zakresie 0,73±0,05 g były mechanicznie preparowane z rzeczywistych ziaren węgla. Węgiel brunatny został pozyskany z kopalni Bełchatów. Próbki zostały przygotowane w ten sam sposób jak w przypadku węgla kamiennego i miały zbliżone parametry.

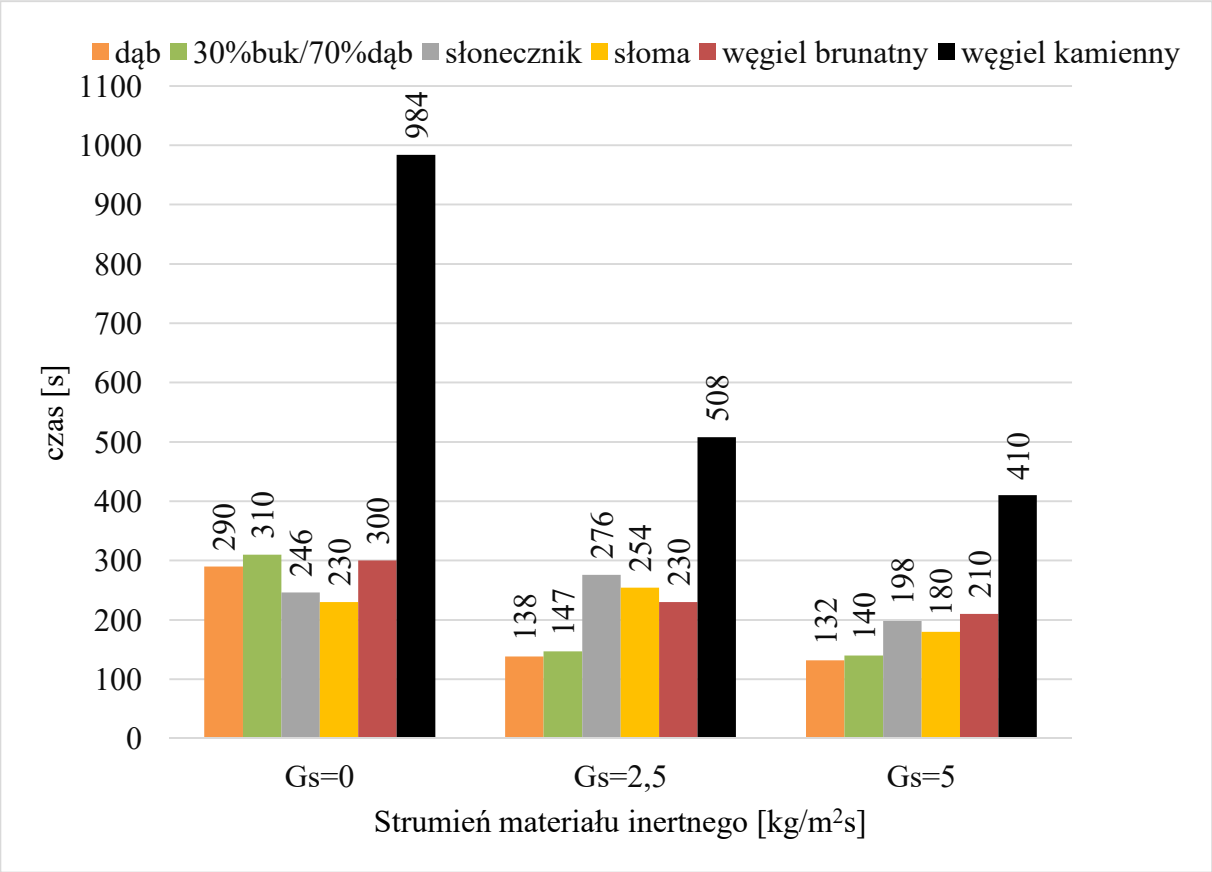
Atmosferą utleniającą podczas spalania paliw było powietrze, a temperatura w komorze spalania wynosiła 850°C. Eksperyment prowadzono w warunkach bez odziaływania materiału inertnego oraz w jego strudze, przy dwóch wartościach strumienia masy (Gs=2,5 kg/m^{2}s oraz Gs=5 kg/m^{2}s), które odpowiadają górnej i środkowej strefie spalania w rzeczywistym palenisku z cyrkulacyjną warstwą fluidalną. W tab. 4. zamieszczono wyniki analizy technicznej badanych paliw. Pelety z biomasy leśnej charakteryzują się niewielką ilością popiołu, w przeciwieństwie do peletów ze słomy, które mają stosunkowo wysoką zawartość popiołu. Pelety ze słomy często charakteryzują się wysokim stopniem zanieczyszczenia przez ziarna piasku.

Tab. 4. Wyniki analizy technicznej badanych paliw (Pełka, 2009; Kaczyński i in., 2019).

pelety	części lotne [%]	wilgoć [%]	popiół [%]	stałe części palne [%]	ciepło spalania [MJ/kg]
trocina dębowa	79,6	8,7	1,2	10,5	18,2
trocina 30%buk /70%dąb	78,7	9,1	1,5	10,7	17,9
łuska słonecznika	73,8	8,4	5,5	12,3	19,8
słoma	71,8	8,7	12,2	7,3	16,2
węgiel brunatny	42,5	14,5	18,5	24,5	23,5
węgiel kamienny	27,9	12,4	16,7	43	26,5

4. Wyniki eksperymentu

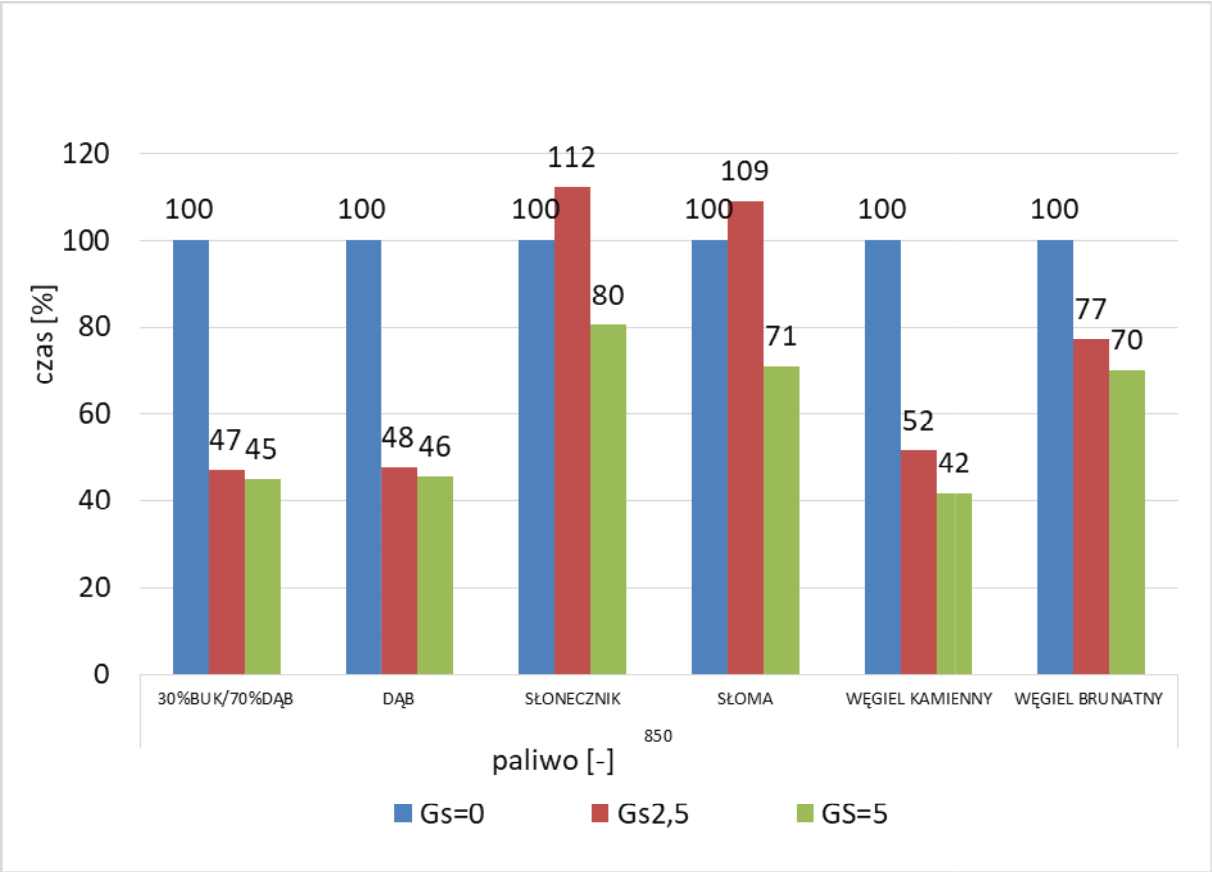
Rys. 2. przedstawia zestawienie wyników eksperymentu dla 6 paliw spalanych w temperaturze 850°C bez materiału inertnego oraz w jego strumieniu dla Gs=2,5 kg/m^{2}s oraz dla Gs=5 kg/m^{2}s. W pierwszym etapie eksperymentu paliwa spalano bez materiału inertnego, analizując wykres można zauważyć, że spalanie peletów z biomasy i węgla brunatnego (230-310 s) trwa niemal trzykrotnie krócej niż spalanie węgla kamiennego (984 s). Czasy spalania peletów oraz węgla brunatnego są bardzo zbliżone. Najkrócej spalają się pelety z biomasy agro: pelet ze słomy (230 s) i pelet z łuski słonecznika (246 s). Podczas spalania peletów w strumieniu materiału inertnego widoczne są wyraźne różnice w charakterze spalania peletów z biomasy pochodzenia agro w porównaniu do biomasy leśnej i węgli. Czasy spalania węgli oraz biomasy leśnej ulegają skróceniu, natomiast w przypadku biomasy agro czas spalania wydłuża się. Podczas spalania paliw w strumieniu materiału inertnego najkrócej spalają się pelety z biomasy pochodzenia leśnego: pelet z trociny dębowej (138 s) i pelet z mieszanki trocin bukowo-dębowych.



Rys. 2. Zestawienie czasów spalania paliw w różnych warunkach komory paleniskowej

Rys. 3. przedstawia procentowe zestawienie ubytków masy podczas spalania paliw w zależności od wartości strumienia materiału Gs (Gs=0 poziom odniesienia). Pojawienie się materiału inertnego (Gs=2,5 kg/m^{2}s) skraca czasy spalania peletów z biomasy leśnej oraz węgla kamiennego o blisko połowę. W przypadku węgla brunatnego skrócenie wynosi ok. 20%. Zwiększenie strumienia materiału inertnego w przypadku wspomnianych paliw w dalszym ciągu skraca czasy spalania o około 10%. W przypadku peletów z łuski słonecznika i słomy spalanie w strudze materiału inertnego w Gs=2,5 kg/m^{2}s trwa dłużej niż spalanie bez materiału inertnego. W przypadku peletu z łuski słonecznika różnica wynosi 12%, natomiast w przypadku peletu ze słomy 9%. Zwiększenie strumienia materiału inertnego Gs=5 kg/m^{2}s spowodowało skrócenie czasu spalania peletu z łuski słonecznika o 20% w porównaniu do spalania bez materiału inertnego. W przypadku peletu ze słomy skrócenie wyniosło blisko 30%. W temperaturze 850°C następuje przekroczenie temperatury mięknięcia popiołu, a piasek kwarcowy oblepia pelet z łuski słonecznika. Powłoka z piasku kwarcowego utrudnia dopływ utleniacza do ziarna paliwa. Natomiast pelet ze słomy ulega spiekaniu. Podczas zwiększenia natężenia strumienia materiału inertnego w przypadku peletu z łuski słonecznika powłoka ulegała częściowemu rozpadowi, a w przypadku peletu ze słomy

spiek ulegał całkowitemu rozpadowi. Rys. 4. przedstawia zestawienie pozostałości po spalaniu peletów z biomasy pochodzenia agro.



Rys. 3. Zestawienie ubytków masy podczas spalania paliw w zależności od wartości strumienia materiału Gs spalanych w temperaturze 850°C (Gs=0 poziom odniesienia)

Rys. 4. Zestawienie pozostałości po spalaniu peletów z biomasy pochodzenia agro

5. Wnioski

Porównując spalanie peletów bez materiału inertnego oraz w jego strumieniu widoczne są wyraźne różnice w charakterze spalania peletów z biomasy pochodzenia agro w porównaniu do biomasy leśnej i węgli. Czasy spalania węgla kamiennego oraz biomasy leśnej ulegają skróceniu o niemal połowę, węgla brunatnego o blisko 20%, natomiast

w przypadku biomasy agro czas spalania wydłuża się. Spowodowane jest to wystąpieniem zjawiska mięknięcia popiołu. Popiół różnych rodzajów biomasy może zawierać związki metali alkaicznych, których zawartość wpływa na obniżenie temperatury mięknięcia i topnienia. Niedostosowanie temperatury pracy kotła oraz natężenia Gs do rodzaju dostarczanego paliwa może powodować zwiększanie straty niecałkowitego spalania oraz narastanie osadu na powierzchniach grzewczych kotłów, a także zaburzyć pracę kotłów z cyrkulacyjną warstwą fluidalną ze względu na zmianę rozkładu ziarnowego materiału warstwy. Tworzenie się twardych spieków powstających po spaleniu zbliżonych rozmiarem do cząstki wprowadzanego do komory paliwa może w konsekwencji prowadzić do zmiany warunków dynamicznych, a nawet do defluidyzacji złoża.

6. Literatura

Basu P., 2015. Circulating Fluidized Bed Boilers: Design, Operation and Maintenance, Canada.

Gajewski W., Kijo-Kleczkowska A., 2004. The kinetics of periodic combustion of coal. Powder Handling & Processing 16, 2 pp. 126-131.

Gajewski W., Kijo-Kleczkowska A., 2007. Co-combustion of coal and biomass in the fluidized bed. Archives of Thermodynamics 28, no. 4,. pp. 63-77.

IEA, 2019. Global Energy & CO2 Status Report 2018, The latest trends in energy and emissions in 2018, 1-22.

Jagustyn B., Bątorek-Giesa N., Wilk B., 2011. Ocena właściwości biomasy wykorzystywanej do celów energetycznych. Chemik, 65, 6, 557-563.

Kaczyński K., Kaczyńska K., Pełka P., Analiza ubytku masy ziarna węgla w atmosferze utleniającej oraz obojętnej w zmiennej temperaturze panującej w komorze paleniskowej w dwufazowym przepływie z udziałem materiału inertnego, Rynek Energii, Nr 1(140) - 2019, ISSN 1425-5960, str. 87-97.

Khana A.A., de Jong W., Jansens P.J., Spliethoff H., 2009. Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies, Fuel Processing Technology, Volume 90, Issue 1, 21-50.

Kijo-Kleczkowska A., 2011. Combustion of coal–water suspensions. Fuel 90, 2011, pp. 865-877.

Kosowska-Golachowska M., Wolski K., Gajewski W., Kijo-Kleczkowska A., Musiał T., Środa K., 2016. Spalanie biomasy agro i leśnej w cyrkulacyjnej warstwie fluidalnej, Rynek Energii, 3(124).

Leski K., Luty P., Łucki A., Jankowski D., 2018. Application of circulating fluidized bed boilers in the fuel combustion proces, Technical Transactions Vol. 4/2018, 83–96.

Pełka P., 2009. Analysis of a coal particle mass loss burning in flow of inert material. Combust. Flame, 156, 1604.

Pełka P., 2013. Erozja ziaren węgla spalanych w cyrkulacyjnej warstwie fluidalnej, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa.

Pełka P., 2017. Mass loss of coal particles burning in fluidized bed, Archives of Mining Sciences, Vol. 62, no. 2, 339-354.

Badania złączy spawanych wykonanych metodą GTAW ze stali AISI 4130

Kucharski Kamil [(1)]

[1] Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Politechnika Rzeszowska
Kamil Kucharski: k.kucharski@prz.edu.pl

Streszczenie
Praca przedstawia badania złączy spawanych rur cienkościennych ze stali AISI 4130, wykonanych metoda GTAW. Badania obejmują wykonanie piętnastu próbek poprzez spawanie. Każda z próbek została wykonana z innymi parametrami natężania prądu(A) oraz prędkości spawania(s). Następnie przygotowanie po dwie próbki z każdej grupy o skrajnych parametrach spawania do próby statycznego rozciągania oraz resztę próbek do badań metalograficznych i pomiaru mikrotwardości. Kolejno zostały przeprowadzone próby statycznego rozciągania na maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell Z100, badania metalograficzne makro i mikrostruktury oraz pomiary mikrotwardości próbek złączy. Praca stanowiła część projektu ramy nośnej do bolidu PMT-02 biorącego udział w międzynarodowych zawodach Formula Student. Przedstawione badania oraz analiza ich wyników pozwoliły określić zdolność do spełnienia założeń FSAE (Formula Society of Automotive Engineering) dla trzech grup próbek oraz zmian względem materiału rodzimego wynikających ze spawania. Wyniki badań stanowią także punkt odniesienia oraz wytyczne przy wykonywaniu takich złączy w tego typu konstrukcjach.

Słowa kluczowe: AISI 4130, GTAW, Formuła Student, Spawanie, Badania metalograficzne

Test of welded joints made by GTAW method from AISI 4130 steel

Summary
The work presents tests of welded joints of thin-walled pipes made of AISI 4130 steel, made using the GTAW method. The tests include the performance of fifteen samples by welding. Each sample was made with different parameters of current (A) and welding speed (s). Then preparation of two samples from each group with extreme welding parameters for static tensile test and the rest of the samples for metallographic tests and microhardness measurement. Static tensile tests were carried out on a Zwick / Roell Z100 testing machine, macro and microstructure metallographic tests as well as microhardness measurements of joint samples. The work was based on the creation of a support frame for the PMT-02 car participating in the international Formula Student competitions. The presented research and analysis of their results allowed to determine the ability to meet the assumptions of FSAE (Formula Society of Automotive Engineering) for three groups of samples and changes in relation to the native material resulting from welding. Test results are also a reference point and guidelines for making such joints in this type of constructions.

Keywords: AISI 4130, GTAW, Formula Student, Welding, Metallographic examination

1. Wstęp

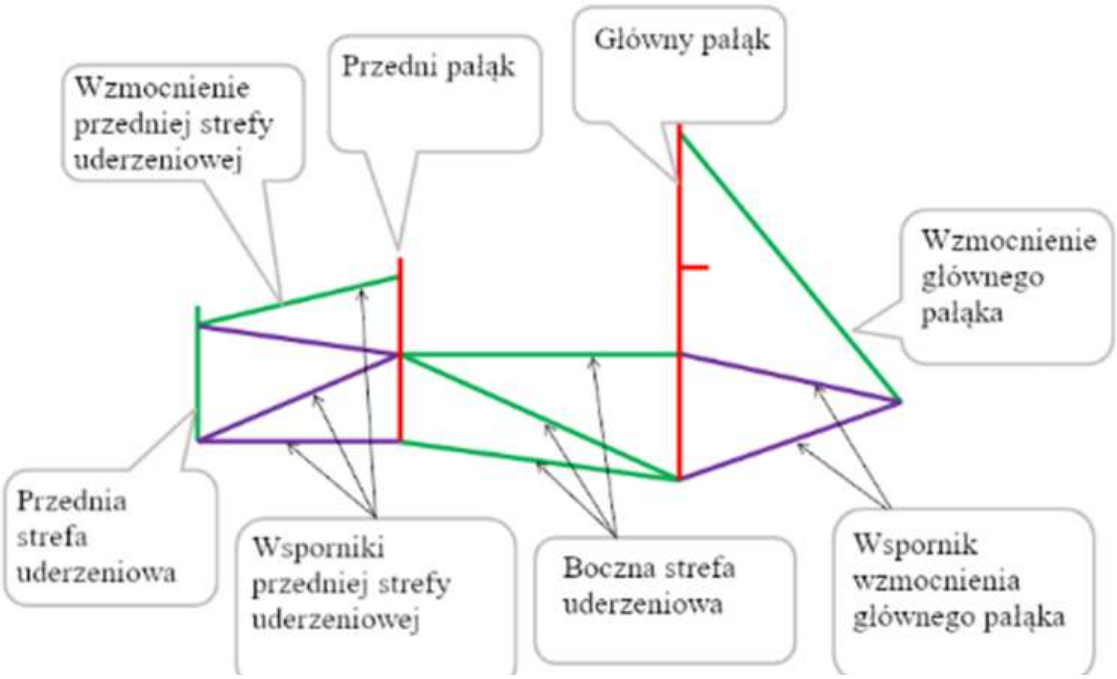
Budowa bolidu formuły student przebiega w oparciu o regulaminy Society of Automotive Engineering oraz Formula Student Germany, z którymi zgodność jest weryfikowana skrupulatnie na zawodach. Regulaminy stawiają jasne wymagania dotyczące wykorzystywanych materiałów na ramę bolidu. Rama bolidu musi być wykonana ze stali stopowej o minimalnej zawartości 0,1% węgla i minimalnych właściwościach mechanicznych: moduł Young'a = 200 GPa, granica plastyczności Re=305 MPa, granica wytrzymałości Rm= 365 MPa. Natomiast dla złączy spajanych właściwości mechaniczne muszą spełniać minimalne warunki: granicy plastyczności Re= 180 MPa, granicy wytrzymałości Rm= 300 MPa. Oprócz warunków wytrzymałościowych, wymagane są

również przekroje minimalne w odpowiednich sekcjach bolidu. Wymagania te przedstawiono w tabeli 1. (www.1)

Tabela 1. Minimalne przekroje rur stosowane w budowie ramy bolidu Formuły Student (www.1)

Część struktury (Item or application)	Minimalna grubość ścianki (Minimum wall thickness)	Minimalny moment bezwładności (Minimum area moment of interia)
Główny oraz przedni pałąk, łącznik pałąka na poziomie barków. (Main and front hoops, shoulder harness mounting bar.)	2.0 mm	11320 mm^4
Boczne strefy uderzeniowe, przednia strefa uderzeniowa, wzmocnienia pałąków. (Side impact structure, front bulkhead, roll hoop bracing, driver's restraint harness attachment).	1.2 mm	8509 mm^4
Wzmocnienia przedniej strefy uderzeniowej, wsporniki wzmocnień głównego pałąka. (Front bulkhead support, main hoop bracing supports).	1.2 mm	6695 mm^4

Na rysunku 1 przedstawiono szkic ramy bolidu z zaznaczonymi poszczególnymi częściami jej budowy, a na rysunku 2 ogólny widok ramy bolidu zespołu PRz Racing Team.



Rys. 1. Budowa ramy bolidu

Rys. 2. Rama bolidu PMT-02

2. Charakterystyka stali wykorzystanej w badaniach

Do budowy ramy bolidu wykorzystano stal AISI 4130. Stal ta wykazuje bardzo dobre właściwości wytrzymałościowe, dużą ciągliwość, posiada dobrą spawalność. W przypadku zastosowań konstrukcyjnych, wykorzystywana jest najczęściej w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym i maszynowym. Stal ta jest stosowana najczęściej w aplikacjach narażonych na zmienne obciążenia podczas pracy. W tabeli 2 i 3 przedstawiono skład chemiczny oraz parametry wytrzymałościowe stali AISI 4130.

Tabela 2. Skład chemiczny stali AISI 4130 (www.4)

[%]	C	Cr	Mn	Mo	P	S	Si
Min	0.28	0.8	0.4	0.15	-	-	0.15
Max	0.33	1.1	0.6	0.25	0.035	0.04	0.30

Tabela 3. Wybrane właściwości wytrzymałościowe stali AISI 4130 (www.4)

Rm [MPa]	$R_{0,2\%}$ [MPa]	[HB]
860	690	217

3. Badania

- Cel badań

Celem badań jest określenie właściwości mechanicznych oraz przeprowadzenie badań metalograficznych złączy spawanych rur ramy bolidu Formuły Student, wykonanych metodą GTAW ze stali AISI 4130. Ponadto określenie czy tak wykonane ramy spełniają założenia stawiane przez regulamin Society of Automotive Engineering.

- Przygotowanie materiału do badań

a) Wycięcie rur

Do przeprowadzenia badania zostało przygotowanych piętnaście próbek, po pięć dla każdego przekroju wskazanego w tabeli 4.

Tabela 4. Zestawienie próbek wykorzystanych w badaniach (opracowanie własne)

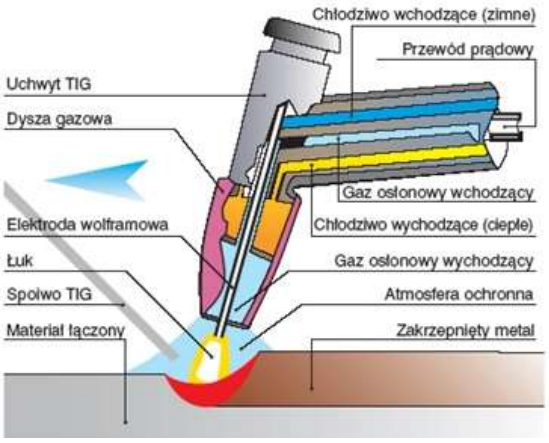
Średnica zewnętrzna [mm]	Grubość ścianki [mm]	Długość próbki [mm]	Numer próbki
28,575	1,650	200	1-5
25,400	1,244	200	6-10
28,575	2,413	200	11-16

Proces cięcia został przeprowadzony przy użyciu piły taśmowej MIT 400. Podczas cięcia stosowano chłodziwo, aby wyeliminować wpływ powstającego ciepła na strukturę materiału przeznaczonego do spawania. Krawędzie zewnętrzne i wewnętrzne rur o grubościach ścianki 1,244 mm i 1,65 mm zostały ogratowane ręcznie. Natomiast krawędzie zewnętrzne rur o grubości ścianki 2,413 zostały zukosowane pod kątem 60° zgodnie z normą PN-ISO 9692 (Rys. 3.).

Rys. 3. Przygotowanie krawędzi rur do spawania

b) Wykonanie złączy spawanych

Złącza spawane wykonano za pomocą metody GTAW. Proces spawania metodą GTAW (Rys. 4.) polega na tym, że ciepło wytwarzające się podczas jarzenia się łuku elektrycznego pomiędzy elektrodą nietopliwą wykonaną z wolframu, a spawanym materiałem w osłonie gazów (argon) powoduje stapianie brzegów elementów spawanych i spoiwa, które po ostudzeniu tworzą trwałe złącze spawane (Tasak E., 2008). Złącza zostały wykonane przy pomocy spawarki KEMPPI Master TIG 2300 AC/DC.



Rys. 4. Graficzna prezentacja metody GTAW (www.2)

Do spawania złączy zostało wykorzystane spoiwo 4130 MC-GRADE WELDING ROD .062 o średnicy 1,6 mm, oraz elektrody nietopliwe SP20TR24 o średnicy 2,4 mm z dodatkiem 2% tlenku Toru.

Ostatnią czynnością przed przystąpieniem do spawania próbek było wykonanie w czterech punktach spoin szczepnych (Rys. 5.). Spoiny te zostały wykonane na każdej z rur w celu uniknięcia przemieszczeń względem siebie części próbek podczas spawania. Podczas wykonywania spoin zastosowano następujące parametry: natężenie prądu spawania I=100 A, czas wypływu gazu ochronnego po zgaszeniu łuku 5 s, brak czasu opadania prądu spawania.

Rys. 5. Wykonane spoiny szczepne w jednej z grup próbek

W tabeli 5 zestawiono parametry dodatkowe stosowane podczas spawania, a w tabeli 6 zestawiono podstawowe parametry spawania próbek. Prędkość spawania została obliczona na podstawie czasu spawania rury odniesionego do jej obwodu. Wartość natężenia prądu spawania jest bezpośrednio powiązana z prędkością spawania. Wartości zestawione w poniższych tabelach wskazują, że wzrastają one wraz ze wzrostem wartości natężenia prądu. Wynika to bezpośrednio z wydzielającego się ciepła w strefie spawania, które wzrastając wymaga większej prędkości spawania w celu uniknięcia pojawienia się niezgodności (wad) w spoinie (Ferenc K., 2013). Wartości natężenia prądu spawania rur

wynikają bezpośrednio z zakresów w jakich były one zmieniane podczas spawania ramy bolidu, dlatego badanie to miało na celu oddanie rzeczywistych parametrów stosowanych podczas jej budowy.

Tabela 5. Dodatkowe parametry stosowane podczas spawania (opracowanie własne)

Parametr	Czas wypływu gazu przed zajarzeniem łuku	Czas wzrostu prądu spawania	Czas opadania prądu spawania	Czas wypływu gazu po zgaszeniu łuku
Wartość	1s	0s	2s	8s

Tabela 6. Parametry spawania próbek (opracowanie własne)

Numer próbki	Natężenie prądu spawania, I [A]	Czas spawania, t [s]	Prędkość spawania, V [mm/min]
1	40	83	64,9
2	45	83	64,9
3	50	80	67,3
4	55	72	74,8
5	60	65	82,9
6	35	87	55,0
7	40	70	68,4
8	45	61	78,5
9	50	59	81,1
10	55	54	88,7
11	55	98	55,0
12	60	90	59,8
13	65	79	68,2
14	70	75	71,8
15	75	72	74,8

- Badania niszczące

a) Przygotowanie próbek

W ramach pracy została wykonana próba rozciągania statycznego w temperaturze pokojowej. W tym celu zostały przygotowane zgodnie z normą PN-EN ISO 6892-1 próbki w postaci pasków wyciętych z rur ze złączami spawanymi. Paski blach zostały wycięte przy użyciu przecinarki taśmowej MIT 400 z chłodzeniem zewnętrznym, aby wyeliminować wpływ temperatury na strukturę próbek. Łącznie przygotowano sześć próbek, po dwie z każdej z trzech grup. Do badań wzięto dwie próbki ze złączami spawanymi, wykonanymi najniższym i najwyższym natężeniem prądu spawania tj. próbki 1, 5, 6, 10, 11 i 15 (Rys. 6.).

Rys.6. Próbki przygotowane do prób statycznego rozciągania

b) Przeprowadzenie próby statycznego rozciągania

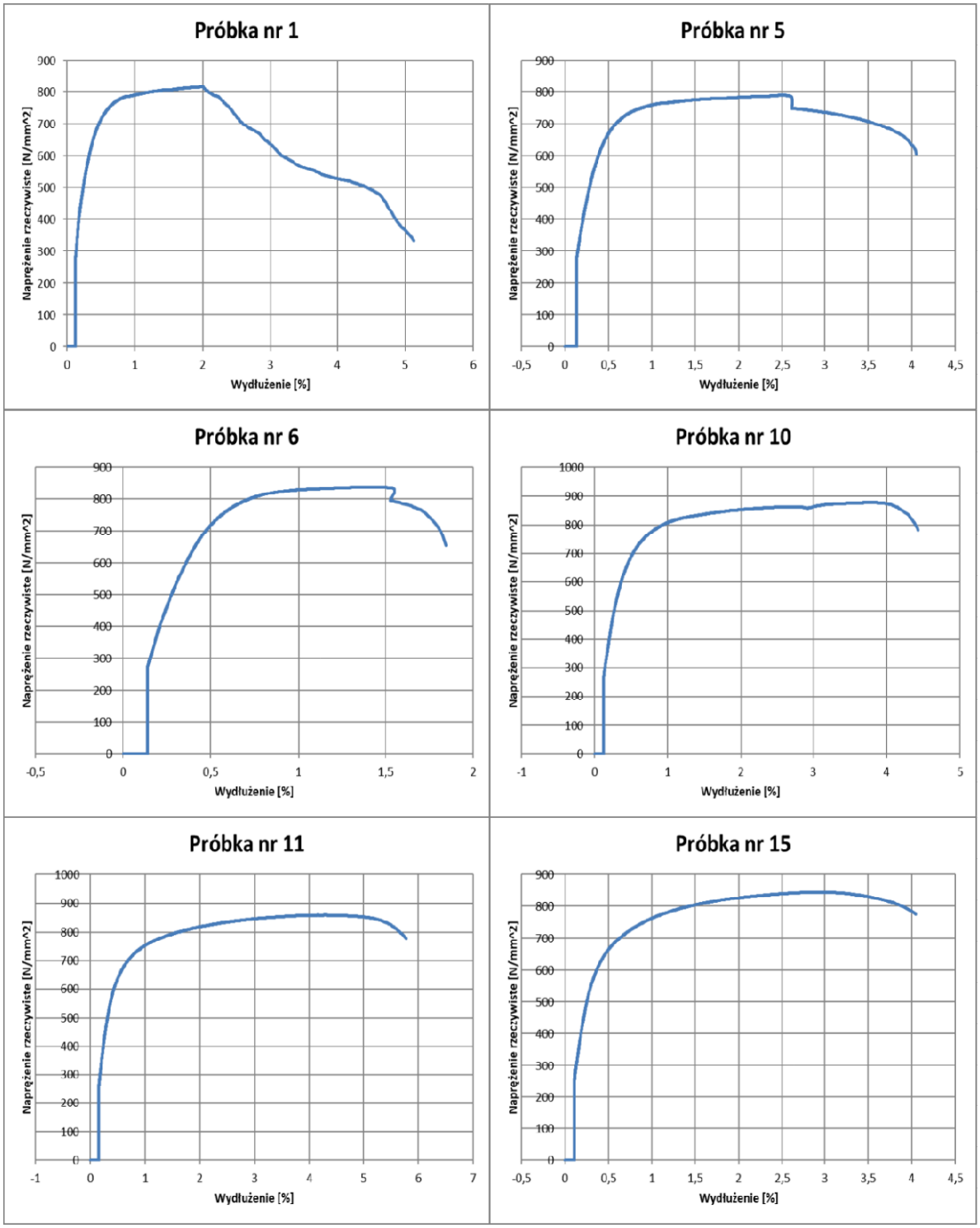
Próby rozciągania zostały przeprowadzone przy użyciu maszyny wytrzymałościowej Zwick/Roell Z100 w laboratorium Katedry Przeróbki Plastycznej na Politechnice Rzeszowskiej (Rys.7.).

Rys. 7. Widok ogólny Zwick/Roell Z100 (www.3)

Części chwytowe próbek zostały spłaszczone ze względu na zaokrąglenie, a następnie kolejno umieszczane w szczękach zaciskowych maszyny i rozciągane. Próby zostały przeprowadzone zgodnie z metodą A normy PN-EN ISO 6892-1 tzn., że szybkość rozciągania próbek była kontrolowana na podstawie szybkości ich odkształcenia.

c) Wyniki badań

Na rysunku 8 przedstawiono wykresy zależności naprężeń rzeczywistych od względnego wydłużenia próbek wraz z widokami próbek po ich zerwaniu natomiast w ostatnim rozdziale artykułu porównano wyniki z wartościami nominalnymi materiału.



Rys. 8 Wykresy rozciągania statycznego próbek 1,5,6,10,11,15

Rys. 9. Zdjęcia zerwanych próbek kolejno 1,5,6,10,11,15

- Badania metalograficzne

a) Przygotowanie próbek

Próbki do badań metalograficznych (Rys. 10.) wycięto z pozostałych złączy spawanych tj. próbek o nr 2, 3, 4, 7, 8, 9, 12, 13, 14, wzdłuż osi rury, próbki posiadały powierzchnię około 2 cm^2. Proces wycinania przeprowadzono przy użyciu przecinarki taśmowej MIT 400 z chłodzeniem zewnętrznym. W tym wypadku nie można dopuścić do lokalnego przegrzania próbki, ponieważ mogłoby to zmienić miejscową strukturę materiału.

Rys. 10. Próbki pobrane do badań metalograficznych

b) Przygotowanie zgładów

Do wykonania zgładów wybrano próbki nr 3, 8 ,13. Próbki ze złączami spawanymi po ich wycięciu inkludowano w masie przewodzącej prąd elektryczny. Następnie celem uzyskania równej powierzchni o małej chropowatości przeprowadzono szlifowanie. Przebiegało przy użyciu papierów ściernych z coraz drobniejszym ziarnem kończąc na gradacji P1000 wg normy ISO 6344. Kolejnym zabiegiem było polerowanie mechaniczne na tarczach filcowych, w celu usunięcia wszystkich rys powstałych w procesie szlifowania. Ostatnim etapem przygotowania zgładów jest ich trawienie, w roztworze 4% kwasu azotowego w alkoholu etylowym (nitalu). Na rysunku 20 przedstawiono przygotowane zgłady do badań metalograficznych struktury.

Rys. 11. Próbki po przygotowaniu, gotowe do badań metalograficznych

c) Wyniki badań makro i mikrostruktury

Badania mikrostruktury zostały przeprowadzone przy użyciu mikroskopu metalograficznego Zeiss Neophot 2. natomiast badania makrostruktury zostały przeprowadzone przy użyciu mikroskopu inspekcyjnego Makrolite 4.

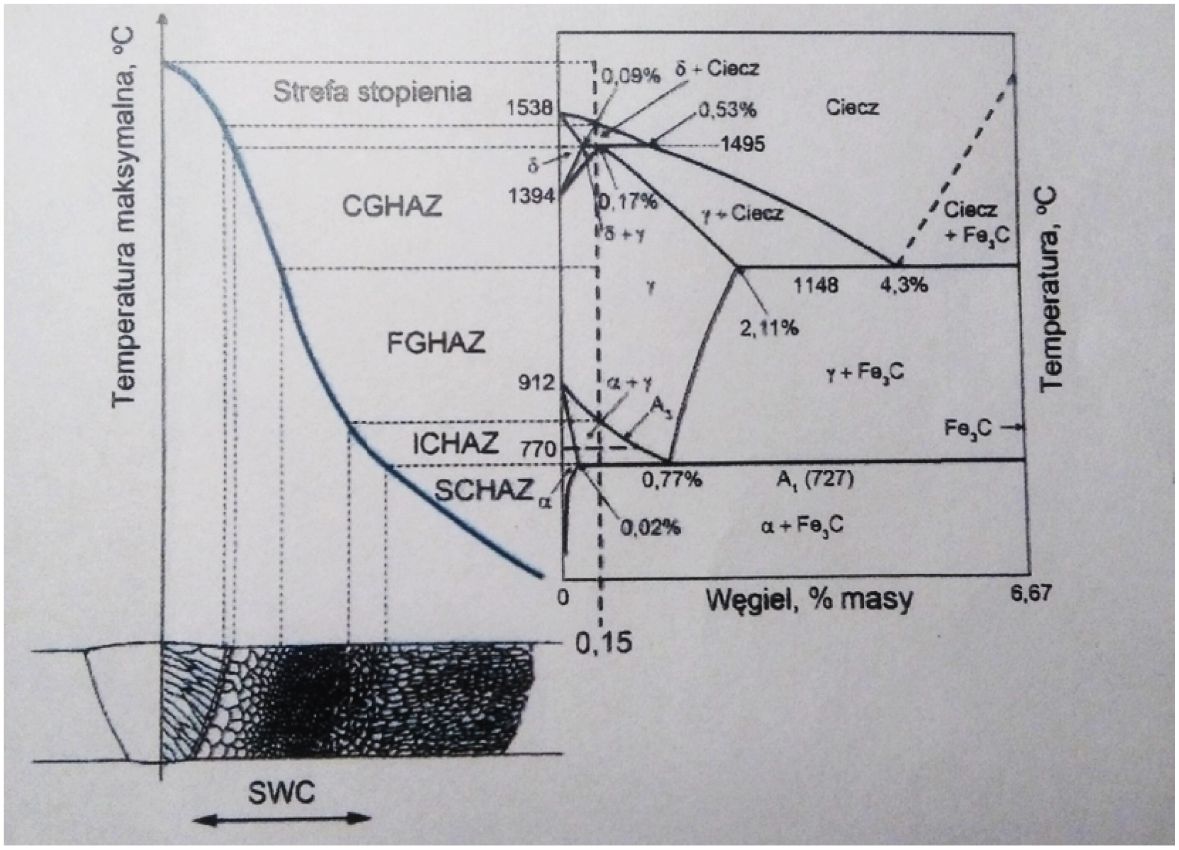
Obszary strukturalne złącza spawanego są ściśle powiązane z temperaturą podczas spawania i układem równowagi fazowej Fe-C (Rys. 12.).

Stąd też możemy wyróżnić w złączu spawanym stali konstrukcyjnej niskostopowej obszary takie jak :

I. SCHAZ (Subcritical Heat Affected Zone) – Obszar strefy wpływu ciepła (SWC) o strukturze odpowiadającej temperaturom niższym od A_{c1} ($700 > T_{max} > 600°C$).
II. ICHAZ (Intecrticial HAZ) – Obszar SWC o strukturze odpowiadającej zakresowi temperatur A_{c3}~ A_{c1} ($900 > T_{max} > 700°C$). Jest to obszar niepełnej normalizacji.
III. FGHAZ (Fine Grain HAZ) – Obszar SWC o strukturze drobnoziarnistej, temperatura powyżej A_{c3} ($1150 > T_{max} > 900°C$). Jest to obszar pełnej normalizacji.

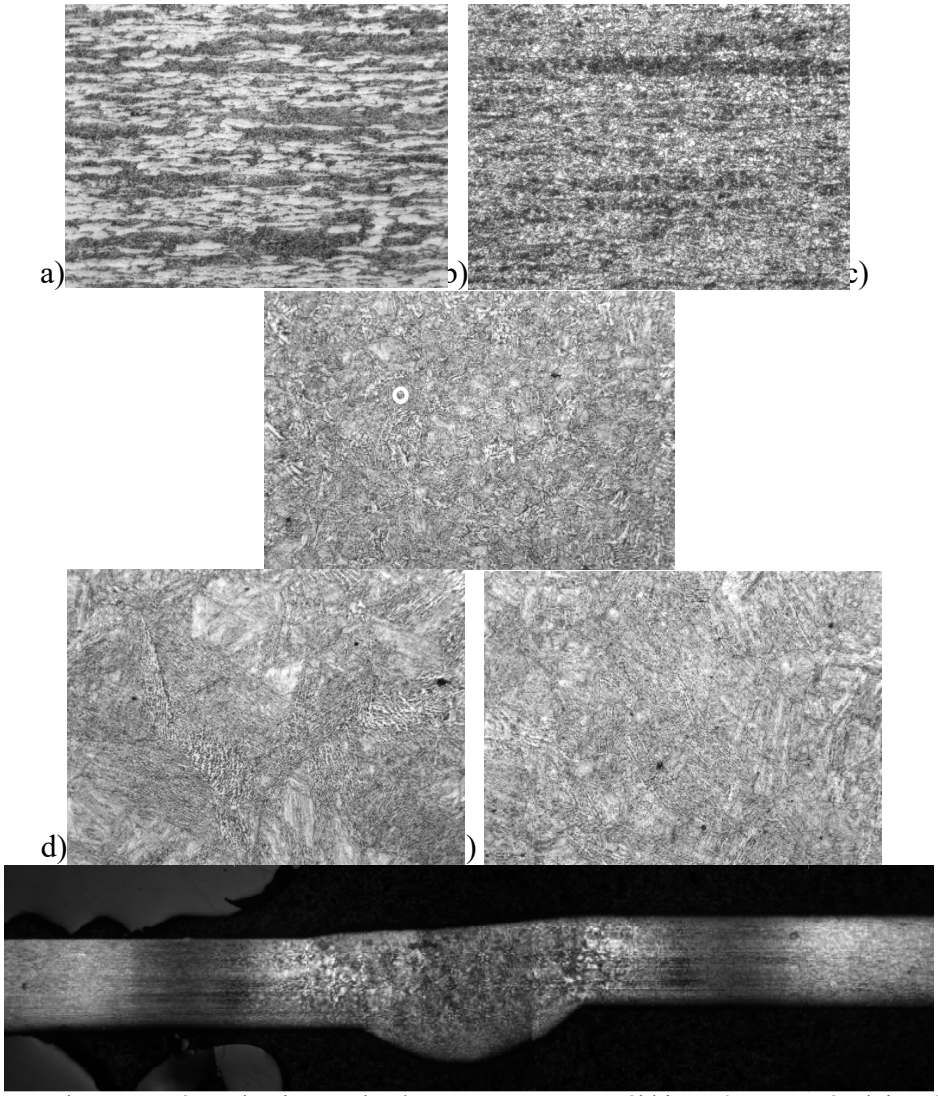
IV. CGHAZ (Coarse Grain HAZ) – Obszar SWC o strukturze gruboziarnistej (T_{max} > 1150°C). W praktyce właściwości użytkowe obszaru CGHAZ mogą decydować o właściwościach użytkowych całego złącza spawanego.

Wymienione na Rys. 12 strefy można bezpośrednio zaobserwować na mikrostrukturach złączy spawanych ujawnionych na zgładach metalograficznych przedstawionych na Rys. od 13 do 21.



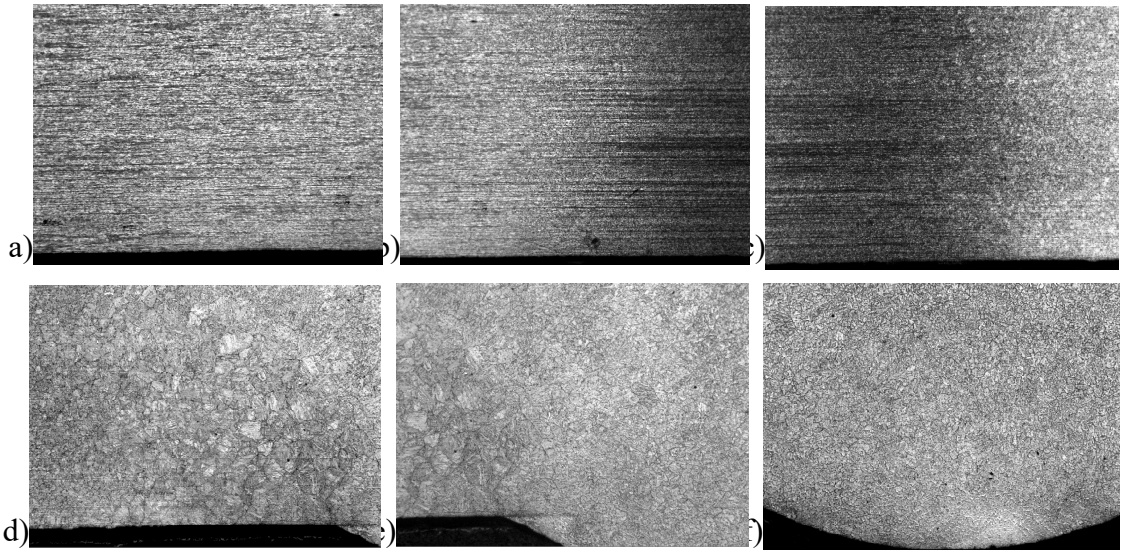
Rys. 12. Rozmieszczenie obszarów strukturalnych w SWC w funkcji temperatury, w nawiązaniu do układu równowagi fazowej żelazo-węgiel (Tasak E., 2008)

Pow. 400x



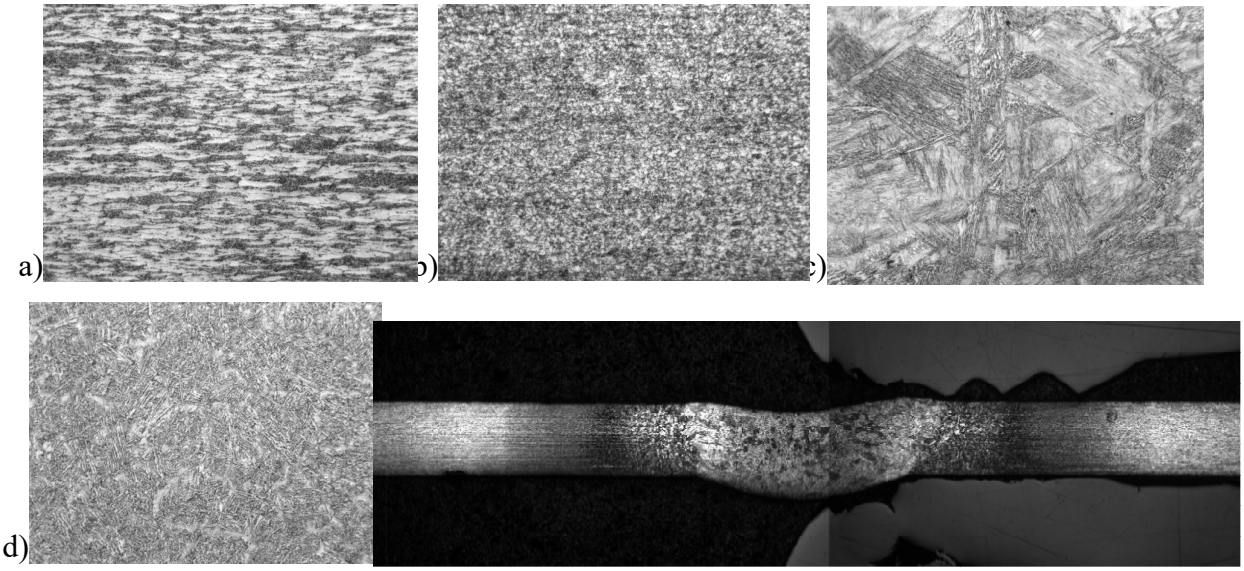
Rys. 13. Mikrostruktury w różnych obszarach złącza spawanego próbki nr 3,rury o średnicy 28,575 mm i grubości ścianki 1,65 mm, spawanej natężeniem prądu 50 A. a) Mikrostruktura materiału rodzimego M.R., ferryt + perlit, b) obszar pełnej normalizacji, jednorodna i drobnoziarnista struktura ferrytyczno-perlityczna, c) i d) Obszar strefy wpływu ciepła o strukturze gruboziarnistej e) Spoina, bainit + ferryt, dodatkowo poniżej makrostruktura złącza spawanego próbki 3 pow.8x

Pow. 50x



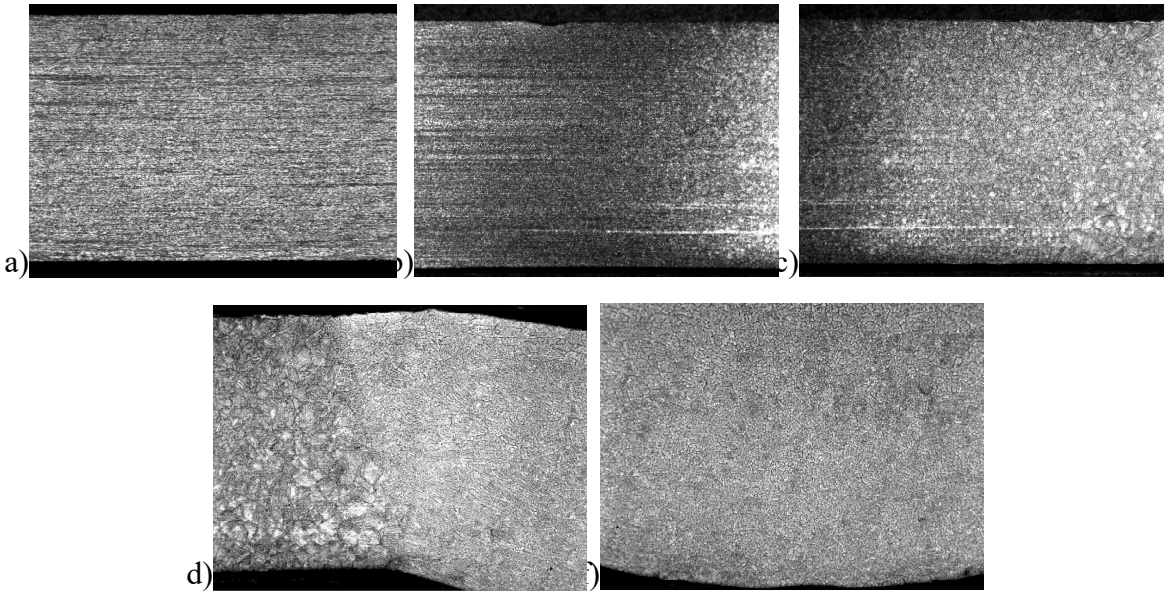
Rys. 14. Mikrostruktura w różnych obszarach złącza spawanego próbki nr 3. a) Mikrostruktura M.R., b)granica strefy wpływu ciepła, c)obszar niepełnej normalizacji, d)obszar pełnej normalizacji e)obszar strefy wpływu ciepła o strukturze gruboziarnistej, f)spoina

Pow. 400x



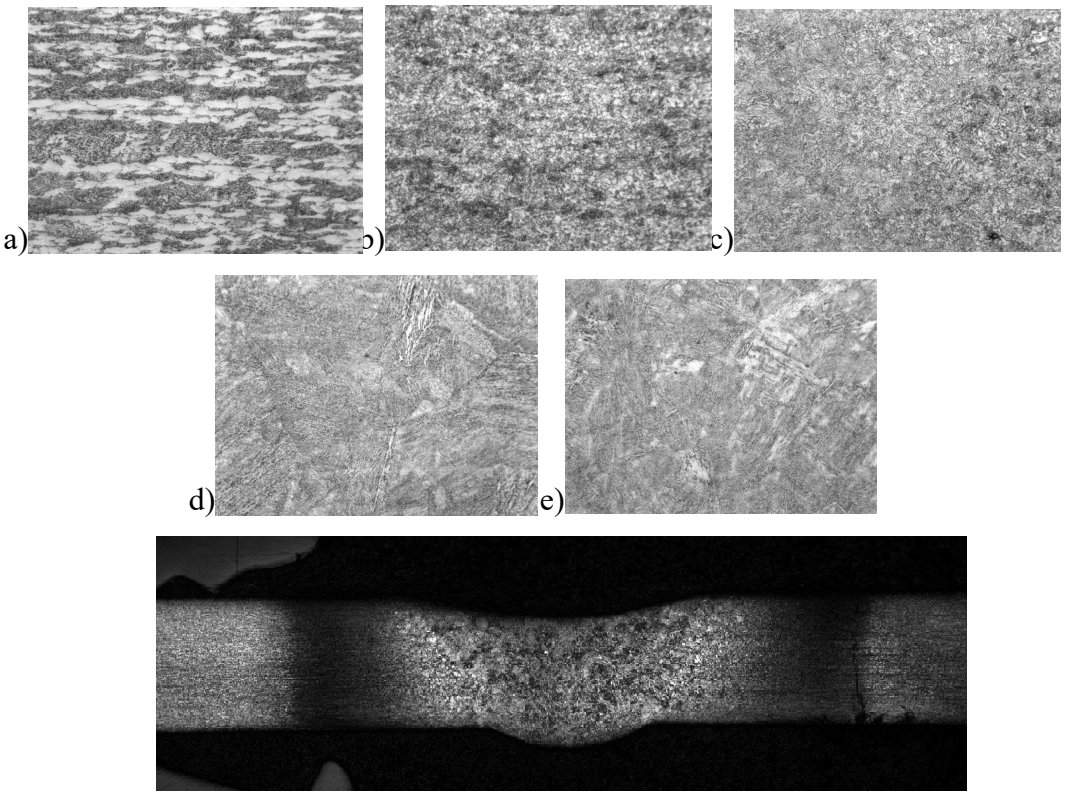
Rys. 15. Mikrostruktury w różnych obszarach złącza spawanego próbki nr 8 rury o średnicy 25,4 mm i grubości ścianki 1,244 mm, spawanej natężeniem prądu 45 A. a) Mikrostruktura M.R, ferryt + perlit, b) obszar pełnej normalizacji, jednorodna i drobnoziarnista struktura ferrytyczno-perlityczna, c) obszar strefy wpływu ciepła o strukturze gruboziarnistej e) spoina, bainit + ferryt, dodatkowo po obok makrostruktura złącza spawanego próbki 8 pow.8x

Pow. 50x



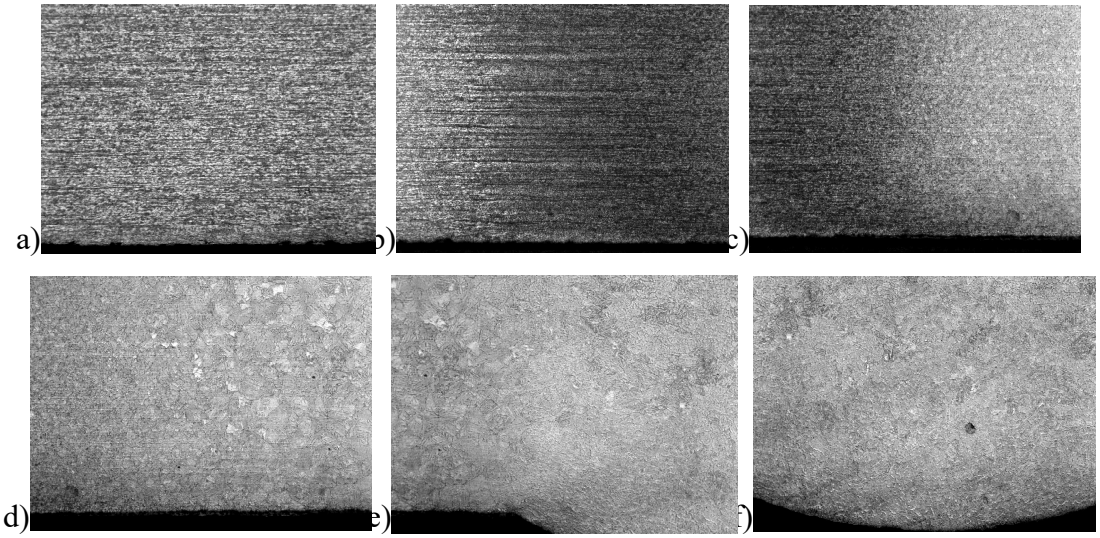
Rys. 16. Mikrostruktury w różnych obszarach złącza spawanego próbki nr 8. a) Mikrostruktura M.R., b) granica strefy wpływu ciepła, c)obszary niepełnej i pełnej normalizacji, d)obszar strefy wpływu ciepła o strukturze gruboziarnistej, na rysunku widać wyraźną granicę między spoiną a strefą wpływu ciepła, f)spoina

Pow. 400x

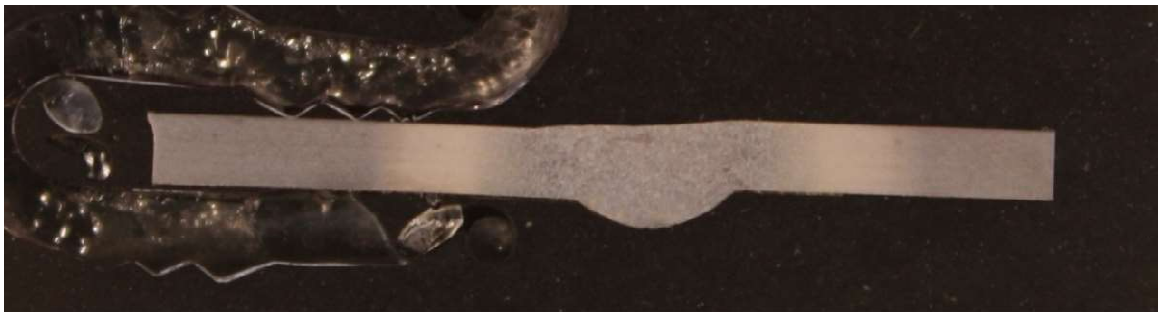


Rys. 17. Mikrostruktury w różnych obszarach złącza spawanego próbki nr 13 rury o średnicy 28,575 mm i grubości ścianki 2,413 mm, spawanej natężeniem prądu 65 A a) Mikrostruktura M.R , ferryt + perlit, b) obszar pełnej normalizacji, jednorodna i drobnoziarnista struktura ferrytyczno-perlityczna, c) Obszar przejściowy pomiędzy strukturą drobnoziarnistą a gruboziarnistą, d) Obszar strefy wpływu ciepła o strukturze gruboziarnistej e) Spoina, bainit + ferryt, dodatkowo poniżej makrostruktura złącza spawanego próbki 13 pow.8x

Pow. 50x



Rys. 18. Mikrostruktury w różnych obszarach złącza spawanego próbki nr 13 a) Mikrostruktura M.R., b)granica strefy wpływu ciepła, c)obszar niepełnej normalizacji, d)obszar pełnej normalizacji e)obszar strefy wpływu ciepła o strukturze gruboziarnistej, f)spoina



Rys. 19. Makrostruktura złącza spawanego próbki nr 3, rury o średnicy 28,575 mm i grubości ścianki 1,65 mm, spawanej natężeniem prądu 50 A

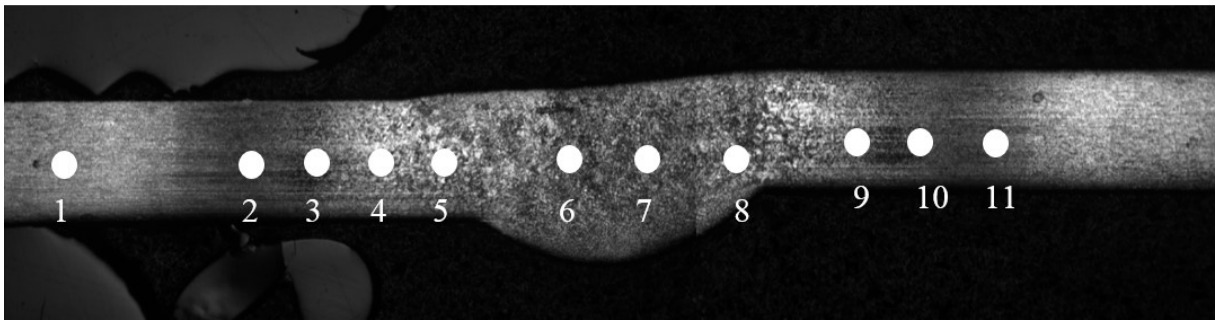
Rys. 20. Makrostruktura złącza spawanego próbki nr 8, rury o średnicy 25,4 mm i grubości ścianki 1,244 mm, spawanej natężeniem prądu 45 A

Rys. 21. Makrostruktura złącza spawanego próbki nr 8, rury o średnicy 25,4 mm i grubości ścianki 1,244 mm, spawanej natężeniem prądu 45 A

d) Pomiar twardości

Badanie twardości wykonano przy użyciu mikrotwardościomierza Vickersa ZHVμ Indentec firmy Zwick/Roell.

Pomiary twardości wykonano w jedenastu obszarach mikrostruktury złączy spawanych przedstawionych na rys. 22.

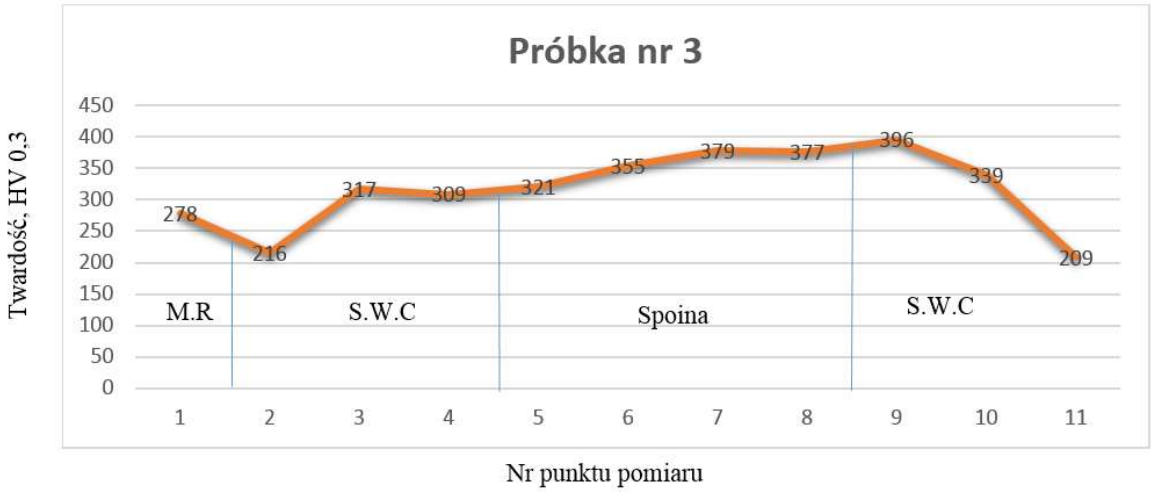


Rys. 22. Miejsca pomiaru twardości na przekrojach poprzecznych złączy spawanych

Pomiary twardości wykonano piramidką Vickersa przy jej obciążeniu HV 0,3 tzn. że nominalna wartość siły obciążającej F wynosiła 2,942 N. Wyniki pomiarów zestawiono w tabeli 7 oraz przedstawiono wykreślnie na rysunkach od 23 do 25.

Tabela 7. Wyniki pomiarów twardości złączy spawanych dla próbek nr 3,8,13

Nr.pkt.	Uwagi	Próbka nr 3 Twardość HV 0,3	Próbka nr 8 Twardość HV 0,3	Próbka nr 13 Twardość HV 0,3
1	M.R	278	274	291
2	S.W.C	216	357	295
3	S.W.C	317	362	349
4	S.W.C	309	420	360
5	S.W.C	321	427	344
6	Spoina	355	315	358
7	Spoina	379	294	315
8	Spoina	377	302	353
9	S.W.C	396	364	339
10	S.W.C	339	353	358
11	S.W.C	209	268	323



Rys. 23. Twardość w zależności od punktu pomiaru w złączu spawanym nr 3

Rys. 24. Twardość w zależności od punktu pomiaru w złączu spawanym nr 8

Rys. 25. Twardość w zależności od punktu pomiaru w złączu spawanym nr 13

4. Omówienie wyników badań i wnioski końcowe

W tabeli 8 zestawiono otrzymane podczas badań wyniki granicy plastyczności $R_{p0,2}$ i granicy wytrzymałości R_m dla próbek o nr 1,5,6,10,11,15 oraz wskazano procentową różnicę względem wartości wcześniej wymienionych parametrów dla materiału rodzimego.

Tabela 8. Zestawienie różnicy procentowej otrzymanych wyników względem wartości nominalnych

Numer próbki	Średnica x grubość [mm]	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_{p0,2}$ nominalna [MPa]	Różnica [%]	R_m [MPa]	R_m nominalna [MPa]	Różnica [%]
1	28,575 x 1,65	719	689	4,35	800	862	-7,19
5	28,575 x 1,65	683	689	-0,87	770	862	-10,67
6	25,4 x 1,244	761	689	10,45	827	862	-4,06
10	25,4 x 1,244	700	689	1,60	845	862	-1,97
11	28,575 x 2,413	679	689	-1,45	825	862	-4,29
15	28,575 x 2,413	657	689	-4,64	822	862	-4,64

Z badania tego wynika, że w przypadku złączy spawanych 1, 6, 10 wzrosła granica plastyczności $R_{p0,2}$ względem wartości nominalnej, natomiast we wszystkich próbkach zmniejszyła się granica wytrzymałości R_m. Największy spadek (-10,67%) odnotowano w złączu nr.5, które było spawane natężeniem prądu 60A. Złącze to pękło poza obszarem strefy wpływu ciepła. Wynika to prawdopodobnie z błędów kształtowo – wymiarowych powstałych podczas wycinania pasków blach ze złączy spawanych. W złączach 6,10 i 11 spawanych kolejno natężeniem prądu 35A, 55A i 55A odnotowano najmniejszy spadek granicy wytrzymałości R_m. Warunki wytrzymałościowe przyjęte do budowy bolidu zgodnie z regulaminem SAE wynoszą $R_{p0,2}$ = 180 MPa , R_m = 300 MPa. Wszystkie przebadane podczas próby statycznego rozciągania złącza, pomimo spadków granicy wytrzymałości spełniają założenia stawiane przez ten regulamin.

Badania metalograficzne przeprowadzono na zgładach otrzymanych z jednej próbki złączy spawanych dla każdej grubości ścianki rury. Były to złącza nr 3,8 i 13, spawane kolejno natężeniem prądu 50A, 45A i 65A. Z badania tego wynika, że złącza są pozbawione pustek, wtrąceń, przyklejeń. W złączu nr 3 zauważalna jest niezgodność dot. kształtu tj. przesunięcie brzegów spawanego materiału. W złączach nr 8 i 13 zauważalny jest brak całkowitego wypełnienia lica spoiny. Twardość przedstawiona na rysunkach od 23 do 25

przebiega inaczej w zależności od grubości ścianki spawanej rury. Najbardziej linowy przebieg utrzymuje ona w złączu spawanym nr 13 o średnicy 28,575 mm i grubości ścianki 2,413 mm. Natomiast największy rozrzut wskazano w złączu nr 8 o średnicy 25,4 mm i grubości ścianki 1,244 mm. Najwyższe twardości w próbkach o nr 3 i 8,odpowiednio 396 HV i 427 HV, uzyskano w obszarze o strukturze gruboziarnistej. W próbce nr 13 najwyższą twardość odnotowano w obszarze przejściowym między strukturą drobnoziarnistą, a gruboziarnistą tj. 360 HV.

Na podstawie przeprowadzonych badań niszczących i metalograficznych, złączy spawanych rur cienkościennych wykonanych metodą GTAW w atmosferze ochronnej Argonu, wyciągnięto wnioski o charakterze praktycznym:

- Natężenie prądu spawania dla złączy rur spawanych ze stali AISI 4130 o numerach 1 (40A), 5 (60A), 6 (35A), 10 (55A), 11 (55A), 15 (75A) wskazuje wartości, z jakich powinien korzystać personel spawalniczy podczas budowy ramy bolidu z takiej stali. Wartości te wskazują także zakres, w jakim spawacz powinien dobierać parametry natężenia prądu zależnie od szybkości spawania, aby uzyskać prawidłowe, spełniające założenia FSAE złącza.
- Wysoka twardość w złączach spawanych nr 3 i 8, w obszarze o strukturze gruboziarnistej może prowadzić do pęknięć w złączach. Należałoby przy wykonywaniu kolejnej ramy bolidu, uwzględnić obróbkę cieplną po spawaniu (o ile jest to możliwe do zrealizowania przez zespół), aby zlikwidować ryzyko pojawienia się takich defektów.
- Niska twardość w strefie wpływu ciepła w próbce nr 3 w punkcie 11 (209 HV03), może być wynikiem błędu pomiarowego należałoby to zweryfikować ponownym badaniem.

5. Literatura

Czuchryj J., Niezgodności w złączach spajanych, Instytut Spawalnictwa, Gliwice, 2005, 40-75.

Ferenc K., Spawalnictwo, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa, 2013, 35-37, 77-91.

Sieniawski J., Metaloznawstwo i podstawy obróbki cieplnej, Oficyna wydawnicza PRz, Rzeszów, 2014, 59-60.

Tasak E., Metalurgia spawania, JAK, Kraków, 2008, 67-68, 432-449.

www.1 https://www.formulastudent.de/fsg/rules/#c3938, 27-28, (dostęp 20.10.2019)

www.2 https://narzedziowa.com.pl/spawanie-tig-w-praktyce-szybkie-wprowadzenie-do-spawania-tig/ (dostęp 20.10.2019)

www.3 https://kpp.prz.edu.pl/fcp/8GBUKOQtTKlQhbx08SlkTWgVQX2o8DAoHNiwFE1xVSXxBG1gnBVcoFW8SBDRKHg/91/p.mysliwiec%40prz.edu.pl/lab/m2.jpg (dostęp 20.10.2019)
www.4 https://www.lightaircraftassociation.co.uk/engineering/TechnicalLeaflets/Building,%20Buying%20or%20Importing/TL%201.16%20Material%20Allowable%20Strength%20Data.pdf (dostęp 20.10.2019)

Odpady biodegradowalne jako paliwa alternatywne – potencjał i możliwości wykorzystania

Knaś Krzysztof [(1)]

[1] Katedra Maszyn Cieplnych, Politechnika Częstochowska
Krzysztof Knaś: kknas@itm.pcz.pl

Streszczenie
W pracy przedstawiono potencjał, możliwości oraz ograniczenia wykorzystania odpadów biodegradowalnych jako nowego strumienia paliw alternatywnych. Paliw powstałych z surowców odpadowy, a równocześnie zaliczanych do odnawialnych źródeł energii. W artykule wskazano również główne regulacje prawne mające największy wpływ na możliwość energetycznego odzysku tego typu odpadów. Dokonano charakterystyki bioodpadów w podziale na główne źródła pochodzenia, przedstawiono ich potencjał ilościowy i jakościowy. Przeprowadzono analizę głównych technologii umożliwiających ich energetyczny wykorzystanie wskazując wady i zalety wynikające z ich wykorzystania do zagospodarowania tego typu surowców.

Słowa kluczowe: odpady biodegradowalne, paliwa alternatywne, recykling energetyczny

Biodegradable waste as alternative fuels - potential and possibilities of use

Summary
The paper presents the potential, possibilities and limitations of using biodegradable waste as a new stream of alternative fuels. Alternative fuels made from waste raw materials and at the same time classified as renewable energy sources. The article also indicates the main legal regulations having the greatest impact on the possibility of energy recovery of this type of waste. The characteristics of bio-waste were made according to the main sources of origin and their quantitative and qualitative potential was presented. An analysis of the main technologies enabling their energy use has been carried out, indicating the advantages and disadvantages resulting from their use for the development of this type of fuel.

Keywords: biodegradable waste, alternative fuels, energy recycling

1. Wstęp

Dążenie do koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym wiąże się z wieloma wyzwaniami stawianymi przed gospodarką odpadami w Polsce. Przejście z dotychczasowego liniowego systemy gospodarki „weź – zużyj – wyrzuć” na koncepcję obiegu zamkniętego wymaga dużych zmian w zakresie podejścia do produkcji, konsumpcji, przetwarzania, przechowywania. Jak również recyklingu i unieszkodliwiania zasobów odpadowych, w tym także tych pochodzenia biologicznego. Jedną z możliwości wtórnego wykorzystania palnej części z pośród bioodpadów jest ich odzysk energetyczny. Wykorzystanie biopaliw, jako odnawialnych źródeł energii do celów energetycznych czy to spalanych samodzielnie czy też współspalanych z węglem stało się powszechnym sposobem ograniczania emisji gazów cieplarnianych. Natomiast wykorzystania frakcji bio z odpadów jest nadal słabo rozwinięte zarówno pod względem technologicznym, jak i legislacyjnym. Wytwarzanie paliw alternatywnych jest szansą na energetyczne wykorzystanie tej części strumienia odpadów,

która w wyniku różnych czynników nie jest poddawana recyklingowi. Ponadto w związku z obostrzeniami ograniczającymi możliwości składowania odpadów biodegradowalnych ich energetyczne wykorzystanie, jako odnawialnych źródeł energii wydaje się mieć uzasadnienie nie tylko ekonomiczne, ale i ekologiczne.

2. Regulacje prawne – odpady biodegradowalne

Polskie regulacje prawne dostosowując się do praw Unii Europejskiej wprowadzają szereg uregulowań pozwalających na zdefiniowanie, określenie poziomu recyklingu oraz uwarunkowania związane z składowaniem i energetycznym wykorzystaniem odpadów biodegradowalnych. W ustawie z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach zawarto definicję, według której za odpady ulegające biodegradacji uznaje się wszelkie odpady podlegające rozkładowi tlenowemu lub beztlenowemu przy udziale mikroorganizmów. W treści powyższej ustawy spośród odpadów biodegradowalnych wyszczególniono grupę bioodpadów. Definiując je, jako: „ulegające biodegradacji odpady z terenów zieleni, odpady spożywcze i kuchenne z gospodarstw domowych, zakładów gastronomii, zakładów żywienia zbiorowego i jednostek handlu detalicznego, a także podobne ze względu na swój charakter lub skład odpady z zakładów produkujących lub wprowadzających do obrotu żywność".

Ustawa ta wprowadza także regulacje, co do wdrożenia obostrzeń dotyczących możliwości składowania części odpadów bio, a mianowicie frakcji komunalnych odpadów biodegradowalnych. Narzucając ścieżkę dojścia do limitu dopuszczalnego poziomu składowania masy odpadów komunalnych ulegających biodegradacji (Tab.1), który w połowie tego roku osiągnie ostatecznie próg 35%.

Tabela 1. Limity składowanie odpadów komunalnych ulegających biodegradacji (Ustawa z dnia 14.12.2012 o odpadach)

Rok	2016	2017	2018	2019	16 lipca 2020
Dopuszczalny poziom składowania masy odpadów komunalnych ulegających biodegradacji w stosunku do masy tych odpadów wytworzonych w 1995 r. [%]	45	45	40	40	35

Obostrzenia dotyczące możliwości składowania odpadów biodegradowalnych wprowadza również Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 8 stycznia 2013 r. w sprawie kryteriów oraz procedur dopuszczania odpadów do składowania na składowisku odpadów danego typu.

Tabela 2. Kryteria dopuszczenia odpadów do składowania (Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 8 stycznia 2013 r.)

Parametr	Wartość graniczna
Ogólny węgiel organiczny (TOC)	5 % suchej masy
Strata przy prażeniu (LOI)	8 % suchej masy
Ciepło spalania	maks. 6 MJ/kg suchej masy

Przedstawione w tabeli 2 parametry na czele z ciepłem spalania masy suchej na poziomie 6 MJ/kg, praktycznie całkowicie uniemożliwiają składowanie części biodegradowalnej odpadów komunalnych. Jeśli wykluczymy zagospodarowanie tego typu odpadów poprzez składowanie, to niezagospodarowaną masę należy przetworzyć np. w procesie odzysku energii.

By uatrakcyjnić energetyczne zagospodarowanie strumienia bio z odpadów komunalnych zaliczono je do odnawialnych źródeł energii. Rozszerzając definicję biomasy o zapis: „…a także ulegająca biodegradacji część odpadów przemysłowych i komunalnych, pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego, w tym odpadów z instalacji do przetwarzania odpadów oraz odpadów z uzdatniania wody i oczyszczania ścieków, w szczególności osadów ściekowych, zgodnie z przepisami o odpadach w zakresie kwalifikowania części energii odzyskanej z termicznego przekształcania odpadów.” (Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 8 stycznia 2013 r. w sprawie kryteriów oraz procedur dopuszczania odpadów do składowania na składowisku odpadów danego typu). A także kwalifikując część energii uzyskanej z termicznego przekształcania odpadów zawierających frakcje biodegradowalne jako energię ze źródeł odnawialnych, wprowadzając odpowiedni zapis do ustawy o odpadach.

3. Analiza potencjału wykorzystania odpadów biodegradowalnych, jako paliw alternatywnych

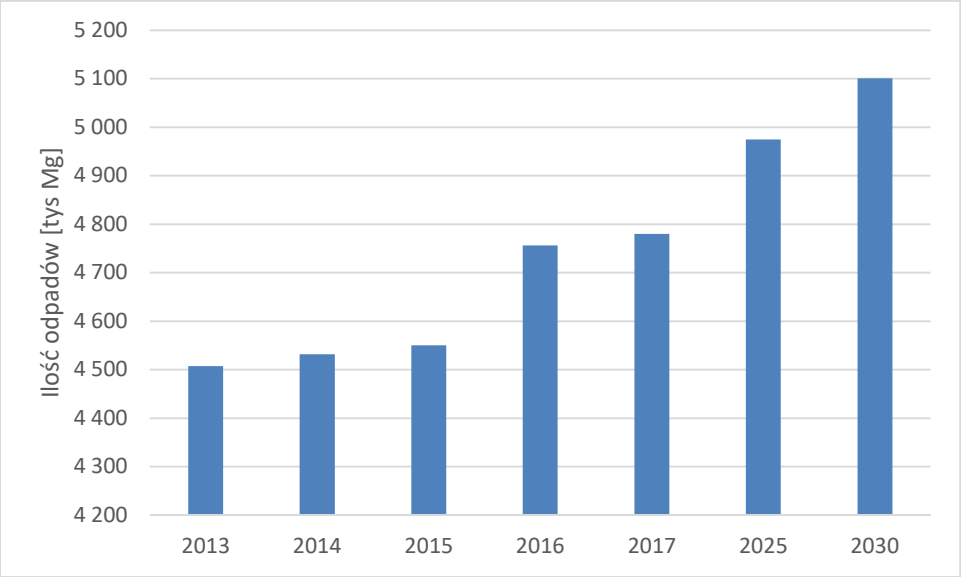
Analizując zapisy Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 9 grudnia 2014 r. w sprawie katalogu odpadów, wyróżnić możemy dwie grupy odpadów biodegradowalnych, a mianowicie biodegradowalne odpady komunalne oraz biodegradowalne odpady inne niż komunalne (określane często, jako przemysłowe).

W skład biodegradowalnych odpadów komunalnych wchodzą odpady z grup:

- grupa 15 – odpady opakowaniowe, w tym opakowania z papieru i tektury, drewna, tekstyliów z włókien naturalnych oraz wielomateriałowe (5 rodzajów z podgrupy 15 01),
- grupa 19 – odpady z mechanicznej obróbki odpadów komunalnych, w tym papier i tektura, drewno, tekstylia i inne (5 rodzajów z podgrupy 19 12),

- grupa 20 – odpady komunalne łącznie z frakcjami gromadzonymi selektywnie, w tym papier i tektura, odpady kuchenne ulegające biodegradacji, odzież oleje i tłuszcze jadalne, drewno, odpady z targowisk (7 rodzajów z podgrup 20 01, 20 02, 20 03).

Na rysunku 1 przedstawiono zmiany masy frakcji biodegradowalnych z odpadów komunalnych oraz ich prognozy na lata 2025 i 2030. W kolejnych latach masa odpadów biodegradowalnych systematycznie wzrasta wraz z ogólną masą odpadów komunalnych, odpady z przedstawionych powyżej grup w latach 2013 -2017 stanowiły około 55% masy wszystkich odpadów komunalnych. Z prognoz przedstawionych w Krajowym planie gospodarki odpadami 2022 wynika, iż ta tendencja wzrostowa zostanie zachowana, by w roku 2030 osiągnąć poziom około 62%, co da ponad 5,1 mln Mg odpadów tego typu. Taka masa odpadów kwalifikowanych, jako źródło energii odnawialnej, stanowi znaczący potencjał dla ich energetycznego wykorzystania.

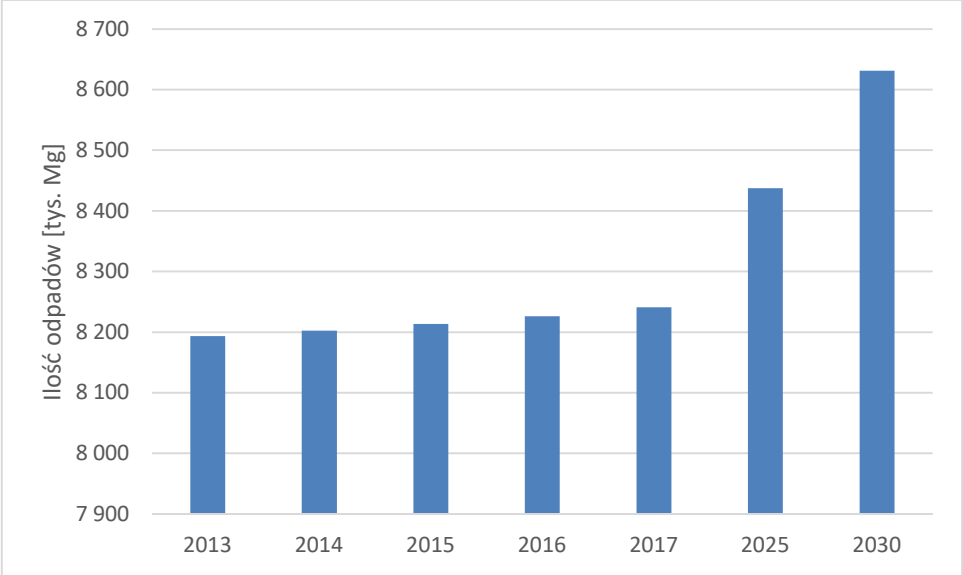


Rys. 1. Masa frakcji biodegradowalnych odpadów komunalnych (opracowanie własne na podstawie danych GUS)

W skład biodegradowalnych odpadów innych niż komunalne wchodzą odpady z grup:

- grupy 02 - odpady z rolnictwa, sadownictwa, upraw hydroponicznych, rybołówstwa, leśnictwa, łowiectwa oraz przetwórstwa żywności (30 rodzajów odpadów z podgrup: 02 01, 02 03, 02 04, 02 05, 02 06 i 02 07),
- grupy 03 - odpady z przetwórstwa drewna oraz produkcji płyt i mebli, masy celulozowej, papieru i tektury (10 rodzajów odpadów z podgrup: 03 01 i 03 03),
- grupy 19 - odpady z instalacji i urządzeń służących zagospodarowaniu odpadów, z oczyszczalni ścieków oraz z uzdatniania wody pitnej i wody do celów przemysłowych (13 rodzajów odpadów z podgrup: 19 06, 19 08, 19 09 i 19 12).

Na rysunku 2 przedstawiono zmiany masy odpadów biodegradowalnych innych niż komunalne oraz ich prognozy na lata 2025 i 2030. Masa odpadów przedstawionych powyżej grup w ostatnich latach utrzymywała się na poziomie około 8,2 mln Mg. Z prognoz przedstawionych w Krajowym planie gospodarki odpadami 2022 wynika, iż w kolejnych latach masa odpadów innych niż komunalne zacznie nieznacznie wzrastać i utrzyma taką tendencję, by w roku 2030 osiągnąć poziom 8,6 mln Mg. Odpady z powyższych grup są obecnie niemal w całości zagospodarowywane, to też nie będą rozważane w dalszej części pracy.



Rys. 2. Masa odpadów biodegradowalnych innych niż komunalne (opracowanie własne, na podstawie danych GUS)

Po przeprowadzeniu analiz ilościowych dostępności odpadów biodegradowalnych, do dalszych analiz wytypowano: frakcję biodegradowalnych odpadów komunalnych. Na podstawie przeprowadzonej analizy dostępnych danych literaturowych (m.in. Mokrzycki i in., 2005; Socotec, 2008; Dąbrowski i in., 2011; Sorek i in., 2012; Cichy i in., 2014; Piecuch i in., 2014; Tora i in., 2014) oraz wyników badań własnych stwierdzono, że poszczególne frakcje morfologiczne biodegradowalnych odpadów komunalnych charakteryzują się dużymi wahaniami wartości opałowej. W tabeli 3 zestawiono przedziały wartości dla poszczególnych frakcji morfologicznych oraz ich wartości uśrednione.

Tabela 3. Porównanie wartości opałowych wybranych frakcji biodegradowalnych odpadów komunalnych (opracowano na podstawie przeglądu literatury)

Frakcja odpadu	Wartość opałowa [MJ/kg]	
	Przedział wartości	Wartość uśredniona
papier i tektura	11,0 – 20,0	13,6
opakowania wielomateriałowe	12,0 – 16,2	14,2
organiczne (spożywcze)	10,6	10,6
tekstylne	12,8 – 15,2	13,0
drewno	11,0 – 21,0	13,8

Analizowane frakcje morfologiczne biodegradowalnych odpadów komunalnych charakteryzowały się wartością opałową w przedziale od 11 do 21 MJ/kg. Wśród analizowanych frakcji najwyższą wartością opałową odznaczały się: odpady papieru i tektury oraz drewno, osiągając wartości na poziomie 11–21 MJ/kg. Następnie tekstylia 13–16 MJ/kg oraz odpady wielomateriałowe na poziomie 12-16 MJ/kg. Najniższą wartością opałową charakteryzowała się frakcja odpadów organicznych osiągając poziom 10,6 MJ/kg. Tak zróżnicowane wartości w obrębie jednej frakcji morfologicznej wynikają głównie z różnic poziomów zawilgocenia analizowanych próbek. W oparciu o uśrednione wyniki literaturowe, a także doświadczenia autora przyjęto, iż średnia wartość opałowa dla biodegradowalnych odpadów komunalnych jest zbliżona do 13 MJ/kg.

Przyjmując średnią wartość opałową komunalnych odpadów biodegradowalnych na poziomie 13 MJ/kg wykonano obliczenia: potencjału energetycznego analizowanej masy odpadów oraz możliwość pokrycia zapotrzebowania na energię elektryczną dla Polski (tab. 4). Obliczenia możliwość pokrycia zapotrzebowania na energię elektryczną wykonano na podstawie danych GUS dla lat 2016-2017 oraz prognoz zużycia energii w Polsce zawartych w opracowaniu Polityka energetyczna Polski do 2050 roku, przyjmujących wartości odpowiednio: 187,5 TWh dla 2025r. oraz 206,8 TWh dla 2030.

Tabela 4. Potencjał energetyczny odpadów biodegradowalnych (opracowanie własne)

Rok	2016	2017	2025	2030
Odpady biodegradowalne [Mg]	4 756 470	4 780 248	4 974 838	5 100 459
Potencjał energetyczny [TWh]	17,18	17,26	17,96	18,41
Możliwe pokrycie zapotrzebowania [%]	10,42	10,28	9,58	8,90

Według przyjętych założeń potencjał energetyczny frakcji biodegradowalnej odpadów komunalnych w latach 2016-2017 klasował by się na poziomie około 17,2 TWh, co przekładało by się na ponad 10% pokrycie zapotrzebowania na energię elektryczną w Polsce. W perspektywie roku 2025 było by to odpowiednio około 18 TWh i pokrycia zapotrzebowania na poziomie 9,58%. Zaś dla roku 2030 potencjał energetyczny wyniósł by 18,41 TWh, co umożliwiło by pokrycie krajowego zapotrzebowania na energię na poziomie niecałych 9%.

4. Technologiczne możliwości wykorzystania odpadów biodegradowalnych jako paliw alternatywnych

Poniżej przedstawiono wybrane zalety oraz wady 4 technologii pozwalających na przeprowadzenie energetycznego odzysku szerokiego spektrum biodegradowalnych odpadów komunalnych. Jako klucz przyjęto następujące założenia: ilościowe możliwości zagospodarowania odpadów, emisyjność technologii, powstawanie odpadów po procesowych oraz możliwości ich zagospodarowywania, energochłonność procesu, emisyjność substancji odorowych, eksploatacja.

4.1 Termiczne przekształcanie odpadów w kotłach rusztowych

Zalety:

- możliwość zagospodarowania dużych ilości odpadów,
- powstają niewielkie ilości odpadów stałych do składowania (do 5% masy dostarczanych odpadów), możliwość składowania na składowisku odpadów innych niż niebezpieczne i obojętne,
- zapewniona redukcja objętości wprowadzanych odpadów > 90%,
- nie wymaga dostarczania energii (z wyjątkiem rozruchu),
- minimalizacja oddziaływania substancji złowonnych
- bezpieczne warunki pracy, duża automatyka procesów (bezawaryjność),
- zweryfikowana i bezpieczna technologia,
- odzysk metali żelaznych i nieżelaznych,
- odzysk znacznej większości żużla (95%),
- może być bezściekowe (przy zastosowaniu pół-suchego bądź suchego systemu oczyszczania spalin).

Wady:

- znaczny strumień spalin do oczyszczenia, zawierających m.in. NOx, dioksyny, furany i metale ciężkie.

- konieczność zastosowania urządzeń zapewniających wydajny system oczyszczania spalin
- trudne do zagospodarowania pozostałości z oczyszczania spalin
- wysokie koszty składowania pozostałości stałych.

4.2 Termiczne przekształcanie odpadów w kotłach fluidalnych

Zalety:

- możliwość zagospodarowania dużych ilości odpadów, zapewnia redukcję objętości wprowadzanych odpadów >90%
- minimalizacja oddziaływania substancji złowonnych
- bezpieczne warunki pracy, duża automatyka procesów (bezawaryjność),
- nie wymaga dostarczania energii (z wyjątkiem rozruchu),
- powstaje mniejsza ilość NOx w spalinach (w porównaniu z piecem rusztowym),
- umożliwia odzysk metali żelaznych i nieżelaznych,
- umożliwia odzysk żużla (jednak o 50% mniej niż w piecu rusztowym),
- może być bezściekowe

Wady:

- znaczny strumień spalin do oczyszczenia, zawierających m.in. NOx, dioksyny, furany, metale ciężkie,
- znaczne ilości odpadów stałych (ok. 17% masy dostarczanych odpadów) do składowania,
- konieczność przeprowadzenia kosztownej homogenizacji odpadów - zapotrzebowanie na energię do przygotowania (rozdrobnienia) paliwa,
- trudności z dotrzymaniem temperatury 850°C w komorze dopalania,

4.3 Termiczne przekształcanie odpadów w procesie pirolizy

Zalety:

- brak spalin z procesu (proces beztlenowy) chyba, że niewielka ilość powstanie później przy spalaniu powstałego gazu i koksu,
- praktycznie brak formowania dioksyn i furanów,
- bezpieczne warunki pracy, duża automatyka procesów,
- umożliwia odzysk metali żelaznych i nieżelaznych.

Wady:

- technologia na etapie pilotażu, brak długo eksploatowanych instalacji. Proces złożony pod względem chemicznym, co zwiększa ryzyko awaryjności i możliwego negatywnego oddziaływania na środowisko,

- brak doświadczenia w zagospodarowaniu dużych ilości odpadów, istnieje ryzyko wystąpienia okresowych zastojów i nadmiernego gromadzenia nieprzetworzonych odpadów, co powodować będzie niekorzystne oddziaływanie na środowisko
- powstaje duża ilość pozostałości ciekłych: oleje, smoły i zanieczyszczona woda.
- z powodu dużego zanieczyszczania powstającego w efekcie pirolizy gazu syntetycznego olejami i smołami, konieczne jest poddanie go kondensacji w celu wytrącenia zanieczyszczeń i oczyszczenia,
- wymaga dostarczania energii (ciepła) na potrzeby prowadzenia procesu oraz rozdrabniania odpadów,
- możliwe oddziaływanie odorowe,

4.4 Termiczne przekształcanie odpadów w procesie zgazowania

Zalety:

- powstaje niewielka ilość spalin z procesu (proces przebiegający z ograniczonym dostępem tlenu),
- bezpieczne warunki pracy, duża automatyka i kontrolowany przebieg procesów, zabezpieczający przed wystąpieniem awarii.
- umożliwia odzysk żużla
- umożliwia odzysk metali żelaznych i nieżelaznych,
- może być bezściekowe,
- bezpieczne warunki pracy, duża automatyka i kontrolowany przebieg procesów, zabezpieczający przed wystąpieniem awarii.

Wady:

- technologia na etapie pilotażu, brak długo eksploatowanych instalacji przeznaczonych do odpadów oraz instalacji przeznaczonych na duże wydajności – istnieje ryzyko wystąpienia nieprzewidzianego oddziaływania na środowisko, w tym, co najmniej okresowej niemożności zagospodarowania całego strumienia odpadów przeznaczonego do unieszkodliwienia w tej instalacji,
- brak doświadczenia w zagospodarowaniu dużych ilości odpadów - istnieje ryzyko wystąpienia okresowych zastojów i nadmiernego gromadzenia nieprzetworzonych odpadów, co powodować będzie niekorzystne oddziaływanie na środowisko i konieczność szybkiego zagospodarowania zalegających odpadów w inny sposób,
- gaz syntetyczny zawiera śladowe ilości smoły oraz toksyczne i rakotwórcze cząstki, które mogą zanieczyszczać wodę wykorzystywaną do jego oczyszczania,

- wymaga dostarczania energii na potrzeby przygotowania odpadów, wytworzenia tlenu, (jeśli jest zastosowana opcja z częściowym utlenieniem z wykorzystaniem tlenu),
- możliwe oddziaływanie odorowe,

Analizując przedstawione powyżej technologie możemy zauważyć, iż zastosowanie technologii spalania (kotły rusztowe i fluidalne) prowadzi do powstawania dużego strumienia spalin, (które trzeba oczyścić), przy możliwości pracy bez ściekowej (opcjonalnie). W zamian otrzymujemy: możliwość odzysku dużej ilości materiałów o wysokiej jakości oraz dużą ilości wytwarzanej energii. W konsekwencji zastosowania technologii pirolizy otrzymamy: powstawanie niewielkiego strumienia spalin lub jego brak, przy dużej ilości odpadów stałych i ciekłych wymagających dalszego zagospodarowania (możliwość zagospodarowania na potrzeby procesu lub dalszego przetworzenia w produkt), symboliczną ilości materiałów do odzysku przy średniej ilości wytwarzanej energii. Podobnie jak przy zastosowaniu technologii pirolizy, wykorzystanie technologii zgazowania przyniesie efekty w postaci powstawania: niewielkiego strumienia spalin lub jego brak, niewielkiej ilości odpadów stałych wymagających dalszego zagospodarowania, średniej ilości materiałów do odzysku o średniej jakości i średniej ilości wytwarzanej energii, możliwy brak ścieków (opcjonalnie).

5. Podsumowanie

Frakcja biodegradowalnych odpadów komunalnych posiada duży potencjał zarówno ilościowy jak i jakościowy by stać się jednym z elementów wachlarza paliw alternatywnych. Wytwarzanie paliw alternatywnych jest szansą na energetyczne wykorzystanie biodegradowalnej części odpadów, która w świetle obowiązujących przepisów nie można zagospodarować poprzez składowanie na składowiskach. Natomiast poddanie ich procesowi odzysku energetycznego, oprócz rozwiązania środowiskowego problemu z ich składowaniem. Może przynieść zyski nie tylko z sprzedaży wytworzonej energii elektrycznej i/lub ciepła, ale także dodatkowe korzyści wynikające z zaliczenia jej w części/całości do energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych, jak i uczestnictwa w systemie handlu uprawnieniami do emisji gazów cieplarnianych. W związku z istniejącymi obostrzeniami środowiskowymi ograniczającymi możliwości składowania odpadów biodegradowalnych ich energetyczne wykorzystanie, jako odnawialnych źródeł energii wydaje się mieć uzasadnienie nie tylko ekonomiczne, ale i ekologiczne.

6. Literatura

Adamczyk I., Przybylska M., Różańska B., Sobczyk M., 2014. Infrastruktura komunalna w 2014r, Główny Urząd Statystyczny.

Adamczyk I., Różańska B., Sobczyk M., 2015. Infrastruktura komunalna w 2014r, Główny Urząd Statystyczny.
Adamczyk I., Różańska B., Sobczyk M., 2016. Infrastruktura komunalna w 2015r, Główny Urząd Statystyczny.
Adamczyk I., Różańska B., Sobczyk M., 2017. Infrastruktura komunalna w 2016r, Główny Urząd Statystyczny.
Adamczyk I., Różańska B., Sobczyk M., 2018. Infrastruktura komunalna w 2017r, Główny Urząd Statystyczny.
Basiak M., i inni, 2010. Raport o oddziaływaniu przedsięwzięcia na środowisko, budowa ITPOK w Poznaniu, Socotec Polska Sp. z o.o.
Budzyń, S., Tora, B. 2014. Energetyczne i materiałowe wykorzystanie odpadów – wybrane technologie opracowane we współpracy Wydziału Energetyki i Paliw oraz Wydziału Górnictwa i Geoinżynierii Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Wydawnictwo Naukowe Akapit, s. 9–24.
Dąbrowski, J. i Piecuch, T., 2011. Badania laboratoryjne nad możliwością współspalania wybranych grup odpadów tworzyw sztucznych wraz z osadami ściekowymi. Polityka Energetyczna tom 14: 213–236.
Jaglarz, G., Generowicz, A. 2015. Charakterystyki energetyczne odpadów komunalnych po procesach odzysku i recyklingu. Ekonomia i środowisko t. 2(53), s. 154–165.
Klojzy-Karczmarczyk B., Staszczak J., 2017. Szacowanie masy frakcji energetycznych w odpadach komunalnych wytwarzanych na obszarach o różnym charakterze zabudowy, Polityka Energetyczna tom 20: 143–154.
Mokrzycki E., Uliasz-Bocheńczyk A., 2005. Paliwa alternatywne z odpadów dla energetyki, Polityka Energetyczna, tom 8: 507-515.
Piecuch, T., Dąbrowski, J., 2014. Projekt koncepcyjno-technologiczny Zakładu Termicznego Przekształcania Odpadów Komunalnych dla Regionu Środkowopomorskiego. Monografia nr 2 Wyd. Środkowo-Pomorskie Towarzystwo Ochrony Środowiska, 136 s.
Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 8 stycznia 2013r. w sprawie kryteriów oraz procedur dopuszczania odpadów do składowania na składowisku odpadów danego typu.
Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 grudnia 2014r. w sprawie katalogu odpadów (Dz.U. 2014 poz. 1923).
SOCOTEC, 2008 Analiza wartości opałowej odpadów komunalnych. Studium Wykonalności dla Projektu: System zagospodarowania odpadów komunalnych w Olsztynie. Budowa Zakładu Unieszkodliwiania Odpadów, Socotec Polska Sp. z o.o.

Sorek, A., Borecki, M. i Ostrowska-Popielska, P., 2012. Wybrane odpady tworzyw sztucznych jako źródła paliw alternatywnych w przemyśle metalurgicznym. Prace IMŻ 4, s. 47–57.

Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach (Dz. U. 2013, poz. 21).

Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii (Dz. U. 2015, poz. 478).

Analiza porównawcza implementacji narzędzi lean manufacturing w wybranych przedsiębiorstwach

Kuryło Dominik, Nowacki Kacper [(1)]

[1] Uniwersytet Szczeciński, Wydział Zarządzania i Ekonomiki Usług, Koło Naukowe Lean&Smart / University of Szczecin, Faculty of Management and Economics Service, Science Club Lean&Smart
Kuryłko Dominik:dominikm.kurylo@gmail.com

Streszczenie
Artykuł przedstawia wybrane narzędzia i metody Lean Manufacturing (LM) zarówno w ujęciu teoretycznym, jak i praktycznym. Przeprowadzone rozważania ukazują jak ważne staje się świadome wdrażanie instrumentów LM, które w efekcie istotnie oddziałują na różne obszary działalności przedsiębiorstwa. W związku z powyższym w artykule podjęto także próbę porównania wdrożenia poszczególnych metod i narzędzi LM w wybranych przedsiębiorstwach produkcyjnych oraz ukazanie ich wpływu na wyniki organizacyjne. W tym celu porównano wskaźnik OEE, wyniki wdrożenia Total Productive Maintenance oraz 5S. Efekty wdrożenia wskazały na uniwersalność narzędzia 5S oraz na możliwe różnice, pomiędzy przedsiębiorstwami produkcyjnymi, które miały wpływ na wyniki wdrożenia.

Słowa kluczowe: Lean Manufacturing, Total Productive Maintenance, 5S, Kanban, współczynnik OEE

Comparic analysis of mplementation lean manufacturing tools in selected enterprises

Summary
The article presents selected Lean Manufacturing (LM) tools and methods in theoretical and practical terms. Considerations that have been carried out show how important is concious implementation of LM which, in result, affect different parts of a company. According to that, in the article, there was an attempt to compare implementation of some LM methods and tools in selected manufacturing companies and to show how they affect operational results of said companies. For this purpose OEE index, TPM implementation results and 5S were compared. Effects of implementation indicated at versatility of 5S tools and possible differences between manufacturing enterprises, which had an impact on implementation results.

Keywords: Lean Manufacturing, Total Productive Maintenance, 5S, Kanban, Overall Equipment Effectiveness

1. Wstęp

Obecnie doskonalenie organizacji produkcji jest niezbędne do utrzymania się na konkurencyjnym i dynamicznym rynku. Stale wzrastające wymagania klientów wymuszają, zatem na przedsiębiorstwach produkcyjnych dążenie do ciągłego doskonalenia. Współcześni klienci, którzy są *nota bene* coraz bardziej świadomi, chcą otrzymywać wyroby (i usługi) coraz szybciej i coraz taniej, jednocześnie przy zachowaniu odpowiedniej jakości. Jedną z koncepcji zarządzania, która oferuje różne możliwości w obszarze doskonalenia procesów i przynosi wymierne efekty, jest Lean Manufacturing (LM), której idee można zawrzeć w łacińskiej sentencji *Primus non prodigere,* czyli *po pierwsze nie marnować* (Antosz i in., 2018). Właśnie to podejście stało się źródłem sukcesów wielu przedsiębiorstw z różnych

krajów, stąd współcześnie „szczupła produkcja” uznawana jest za jedno z najlepszych sposobów wpływających na zwiększenie produktywności przedsiębiorstwa.

2. Instrumenty Lean Manufacturing

Do doskonalenia produkcji przyczyniają się różne instrumenty LM, m.in. takie metody i narzędzia zarządzania jak:

- Kanban

Jest to narzędzie polegające na dołączaniu kart do pojemników (kontenerów), którymi w określonym czasie i na danym stanowisku, transportuje się niewielkie ilości elementów niezbędnych do wytworzenia wyrobu gotowego (finalnego). Karty Kanban związane są również z systemem Just in Time, w związku, z czym, ich funkcjonowanie oparte jest na następujących zasadach (Antosz i inni, 2018):

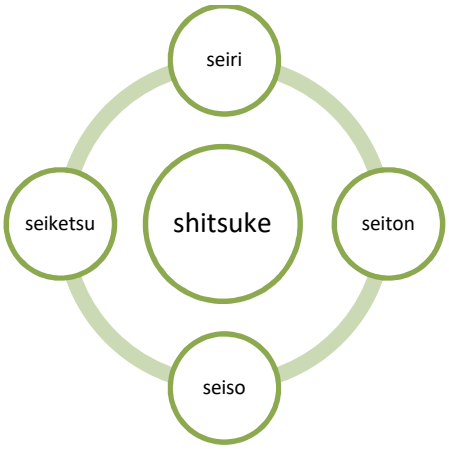
  - wysłanie wiadomości do poprzedniego stanowiska, aby produkować tyle ile jest faktycznie potrzebne,
  - kontenery powinny przechowywać ustaloną (daną) ilość zasobów produkcyjnych,
  - używa się określonej liczby kontenerów albo kart systemowych (w zależności od potrzeb),
  - pomimo prostoty zastosowania system przyczynia się do optymalnego zarządzania zapasami produkcji w toku (zapasy nie będą dostarczone za szybko lub za późno).

- 5S

Jedno z podstawowych narzędzi Lean Manufacturing mające na celu utrzymanie odpowiednich warunków panujących na stanowisku pracy. Metoda ta składa się z pięciu następujących po sobie czynnościach: sortowania, systematyki, sprzątania, standaryzacji, samodyscypliny. Nazwa metody pochodzi od pierwszych liter pięciu japońskich słów (leantime.pl). Strukturę 5S przedstawia rysunek 1.

  - seiri – sortowanie: usunięcie z miejsca pracy wszystkich niepotrzebnych elementów,
  - seiton – systematyka: ułożenie wszystkich potrzebnych elementów w odpowiednich miejscach oraz ich oznaczenie,
  - seiso – sprzątanie: sprzątnięcie miejsca pracy oraz zorganizowanie środków czystości,
  - seiketsu – standaryzacja: określenie standardów rozmieszczenia elementów na miejscu pracy,
  - shitsuke – samodyscyplina: również samorealizacja, polega na wpojeniu przez pracowników wszystkich czterech poprzednich czynności i wykonywanie je z jak

najlepszą dokładnością dającą pracownikowi poczucie dumy z dobrze wykonanej pracy (lean.org.pl).



Rys. 1. Struktura 5S. Źródło: Opracowanie własne na podstawie (lean.org.pl).

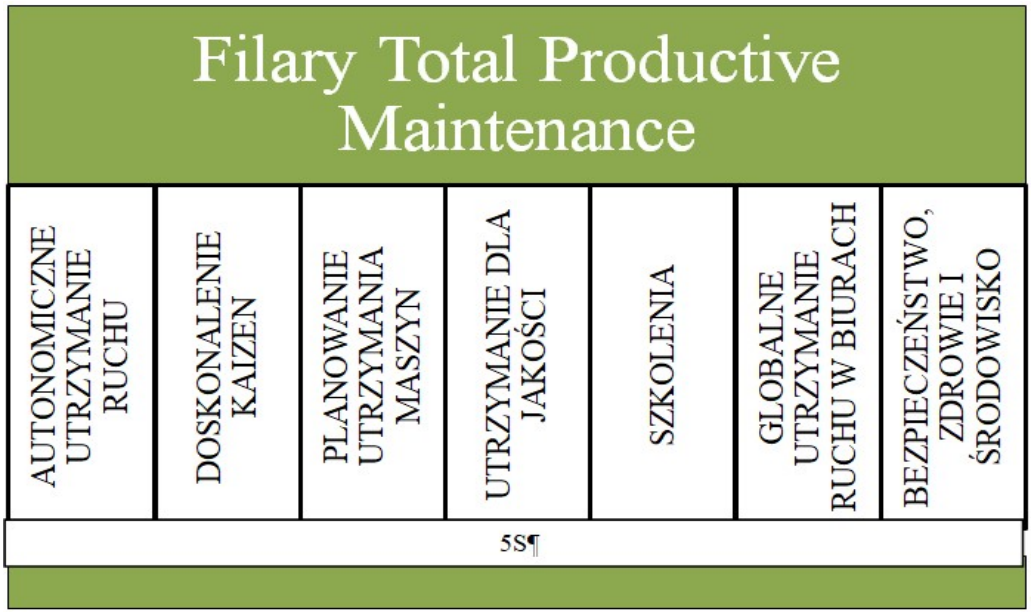
Kompleksowe utrzymanie maszyn TPM

Jest jednym z narzędzi Lean Manufacturing, które polega m.in. na doskonaleniu, automatyzacji i utrzymaniu bezawaryjności maszyn, a także podnoszeniu kwalifikacji pracowników.

Do głównych celów TPM należą (mfiles.pl):

- zero awarii, zero defektów,
- znajomość maszyn przez operatorów, którzy się nimi zajmują,
- większa wydajność procesów produkcyjnych,
- mniejsze koszty utrzymania maszyn,
- wykwalifikowanie operatorów i pracowników,
- większa niezawodność maszyn.

System TPM opiera się na filarach przedstawionych na rysunku 2.



Rys. 2. 8 filarów TPM. Źródło: Opracowanie własne na podstawie (www.jakość.biz).

1) autonomiczne utrzymanie produkcji: polega na dokładnym zapoznaniu się z maszynami przez operatorów, dzięki temu można szybciej wykryć nieprawidłowości takie jak hałas i tarcie,
2) doskonalenie Kaizen: wyeliminowanie marnotrawstwa za pomocą przeprowadzonych analiz dotyczących pracy maszyn,
3) planowane utrzymanie maszyn: skupienie się na skróceniu czasu rozruchu maszyn, ale również na przepływie informacji między pracownikami dotyczących np. uruchomienia nowych maszyn,
4) utrzymanie dla jakości: analiza techniczna poszczególnych elementów maszyny, która ma na celu zminimalizowanie powstawania błędów, mające wpływ na produkt finalny,
5) szkolenia: działania dotyczące zdobywania nowej wiedzy i poszerzania umiejętności pracowników,
6) globalne utrzymanie ruchu w biurach: działania, które doskonalą procesy biurowe, dzięki temu poprawia się komunikacja między różnymi działami przedsiębiorstwa,
7) bezpieczeństwo, zdrowie i środowisko: wyeliminowanie potencjalnych zagrożeń mających wpływ na pracowników, ich zdrowie, ale również ochronę środowiska,
8) 5S: ważnym elementem dla całego systemu TPM jest wprowadzenie metody 5S, która ma na celu stworzenie jak najlepiej zorganizowanego i uporządkowanego miejsca pracy, co wpływa na efektywniejsze utrzymanie maszyn, łatwiej wtedy dostrzec występujące defekty.

- Współczynnik OEE

Overall Equipment Effectiveness (OEE) jest najczęściej stosowanym współczynnikiem w ocenie sprawności i wydajności produkcji w zakładach przemysłowych. Korzysta się z niego przy ilościowej ocenie wydajności funkcjonowania maszyn, linii produkcyjnych, a nawet ocenie poszczególnych wydziałów zakładu. OEE zawiera trzy składowe (Wielgoszewski, 2007):

- dostępność - jest to stosunek czasu dostępnego do czasu całkowitego, przy czym czas dostępny to czas całkowity pomniejszony o straty dostępności,
- efektywność - jest to stosunek czasu produktywnego do czasu dostępnego, przy czym czas produktywny to czas dostępny pomniejszony o straty efektywności,
- jakość - jest to stosunek czasu efektywnego do czasu produktywnego, przy czym czas efektywny to czas produktywny pomniejszony o straty jakości.

Wzór współczynnika OEE wygląda następująco:

$$\boldsymbol{OEE} = (\boldsymbol{Dostępno}\text{ść} * \boldsymbol{Efektywno}\text{ść} * \boldsymbol{Jako}\text{ść}) * \mathbf{100}\%$$

Źródło: (Palonek, 2009)

Poziom wskaźnika powinien wynosić powyżej 60%. Przedsiębiorstwo z niskim wskaźnikiem OEE nie powinno zawyżać wyniku, gdyż świadczy on o dużym potencjale firmy (Łazicki, 2011).

Pomimo tego, że koncepcja szczupłego zarządzania stawia na proste, a zarazem tanie rozwiązania to wciąż są przedsiębiorstwa, które nie zdecydowały się na wdrożenie tych podstawowych narzędzi LM. Powinny uświadomić sobie, że dzięki ich implementacji mogą podnieść efektywność procesu produkcyjnego oraz wydajność pracowników, przy czym zminimalizować koszty marnotrawstwa czasu.

W pierwszej części artykułu przedstawiono teoretyczne ujęcie wybranych instrumentów Lean Manufacturing, w celu wyjaśnienia słuszności ich zastosowania. W drugiej części podjęta została próba analizy porównawczej efektów wdrożenia instrumentów LM.

3. Wdrożenie narzędzi Lean Manufacturing w przedsiębiorstwie kosmetycznym X

Głównym celem wdrożenia Lean Manufacturing w przedsiębiorstwie kosmetycznym X było zwiększenie efektowności na liniach produkcyjnych oraz zmniejszenie kosztów wybranych obszarów działalności. Aby to osiągnąć w przedsiębiorstwie przeprowadzono analizę problemów i błędów, a następnie podjęto decyzję o wybraniu odpowiednich instrumentów LM (lean.org.pl, 2014).

W początkowej fazie wprowadzenia wybranych narzędzi LM odbyły się intensywne szkolenia zarówno kadry kierowniczej, jak również kluczowych osób z obszarów produkcji. Głównym celem zorganizowanych szkoleń było zwiększenie świadomości na temat implementacji wybranych instrumentów LM oraz przedstawienie korzyści, jakie z tego tytułu można osiągnąć (lean.org.pl, 2014).

W drugiej fazie najistotniejsze było wdrożenie TPM. Zmiany w pierwszej kolejności objęły obszar wokół maszyn, jak również część magazynu. Dokonano dokładnego przeglądu maszyn oraz ustalono ich miejsce na linii produkcyjnej. Miało to znaczący wpływ na zwiększenie efektywności produkcji. Następnie stworzono strumienie doskonalone przez pracowników, z wykorzystaniem wizualizacji w zarządzaniu przepływem i standaryzacji na stanowiskach pracy. Wykorzystano w tym celu mapowanie oraz doskonalenie strumienia wartości (lean.org.pl, 2014).

Kolejnym krokiem było wprowadzenie 5S oraz Kanban. Te dwa narzędzia świetnie uzupełniają się i współgrają z TPM. Usprawniły one wprowadzenie poprzednich narzędzi. Dzięki zastosowaniu tych narzędzi poprawiła się organizacja na produkcji. Zmianie uległo otoczenie linii jak i samo podejście pracowników. Dzięki temu rozpoczęto pracę nad skróceniem czasu przezbrojeń oraz poprawą skuteczności wykorzystania warsztatów na linii (TPM) (lean.org.pl, 2014).

Efektami wdrożenia było następujące (lean.org.pl, 2014):

- skrócenie czasu przezbrojenia maszyn o 50%,
- wzrost wskaźnika OEE o 30%, w tym obniżenie kosztów jednostkowych produkcji, dzięki synergii pomiędzy procesami,
- zmniejszenie o 70% wielkości zlecenia produkcyjnego,
- zmniejszenie ilości komponentów przy linii w tym:
    - kontrola wizerunku stanów zapasów w zasobnikach,
    - komponenty wywoływane kartami Kanban.
- poprawa działalności operacyjnych poprzez zwiększenie rotacji zapasów, skrócenie całkowitego czasu przejścia, poprawę, jakości,
- terminowe dostawy, dzięki czemu poziom satysfakcji klienta mieścił się w przedziale od 92% do 97%.

4. Wdrożenie narzędzi Lean Manufacturing w przedsiębiorstwie motoryzacyjnym X

Celem wykorzystania narzędzi LM w przedsiębiorstwie motoryzacyjnym X była poprawa efektywności parku maszynowego poprzez wdrożenie TPM (Total Productive

Maintenance). Aby ocenić stan istniejącego parku maszynowego wykorzystano współczynnik całkowitej efektywności wdrożenia OEE. Warto również podkreślić, iż fundamentem wdrożenia TPM jest metoda 5S, której zasady są widoczne na każdym etapie wdrażania TPM (www.ptzp.org.pl, 2014).

Proces wdrożenia TPM w wybranym przedsiębiorstwie rozpoczęto od szkolenia kadry kierowniczej w zakresie wdrażania i nadzorowania poprawności działania systemu. Następnie zdobyte informacje kadra kierownicza przekazała pozostałym pracownikom. Zorganizowano cykl szkoleń, których celem było przybliżenie pracownikom wyznaczonych zadań i celów oraz sporządzono plan implementacji TPM. W planie tym zawarto stworzenie arkuszy i wyznaczenie odpowiednich osób (właścicieli maszyn) dla wybranych maszyn na linii montażu. Kluczową kwestią było dobranie maszyn pilotażowych w przeciętnym stanie technicznym. Taka maszyna tj. z przeciętną ilością awarii, stanowiła odpowiednią podstawę do określenia właściwych procedur TPM. Proces wdrożenia oparto na ustalonych celach i wyznaczonych terminach oraz podzielono je na 3 główne etapy (www.ptzp.org.pl, 2014).

Pierwszym etapem była ocena maszyny. Wybrana maszyna lub obszar został gruntownie posprzątany przez pracowników tego obszaru oraz pracowników utrzymania ruchu. Podczas procesu sprzątania ustalono wszystkie źródła zanieczyszczeń, miejsca trudne do sprzątania i miejsca trudne do kontroli. Sporządzono 3 arkusze odpowiednie dla każdej grupy problemów, w których zapisywano każdy napotkany defekt. Dla każdego problemu ustalono działania mające na celu ich usunięcie, wytypowano osoby odpowiedzialne za ich realizację oraz ustalono czas realizacji zadań. Każda usterka maszyny, niepowiązana z czystością, została opisana na osobnych kartach. Część karty z numerem usterki zostawiano na miejscu jej wystąpienia, natomiast szczegółowy opis trafiał do koordynatora utrzymania ruchu. Po wykonaniu wszystkich czynności czyszczenia i przeglądu maszyny każdy uczestnik brał udział w podsumowaniu działań. W pierwszym etapie wprowadzono również rejestrację usterek. W wyznaczonym arkuszu zapisywano informacje o awariach i czasie ich występowania. Zebrane dane zostały przeanalizowane przy użyciu wykresu Pareto-Lorenza do określenia najistotniejszych przyczyn postoju maszyny, a poprzez wykres Ichikawy i analizę 5Why wytypowano metodę ich eliminacji (www.ptzp.org.pl, 2014).

Drugi etap polegał na zlikwidowaniu, przez wyznaczone osoby, całości niezgodności wykrytych w etapie pierwszym. Dopiero po ukończeniu wszystkich określonych zadań z etapu pierwszego można było przejść do następnego etapu (www.ptzp.org.pl, 2014).

W fazie trzeciej ustanowiono i wdrożono standardy dotyczące czyszczenia. Dzięki doświadczeniu uzyskanemu podczas czyszczenia maszyn stworzono kartę zawierającą

informacje o czynnościach, jakie należy wykonać na danej maszynie. Czynności te wykonywane są według ustalonego harmonogramu zapisanego w kolejnej karcie. Karty te mają charakter komplementarny. W pierwszej określono obszar do czyszczenia, środki do użycia, cel i czas na wykonanie procedur TPM. W drugiej zaś znajdowały się informacje dotyczące o częstotliwości wykonywania zadań. Na podstawie tego wykonywane jest cykliczne czyszczenie maszyny podczas określonego czasu w planie dnia pracy.

Dodatkowo wraz z ukończeniem każdej fazy wdrażania TPM, grupa odpowiedzialna za proces wdrażania systemu wystawia certyfikat. Otrzymanie certyfikatu świadczy o gotowości stanowiska na wdrożenie kolejnych etapów TPM (www.ptzp.org.pl, 2014).

Po udanym wdrożeniu TPM na wybranych maszynach, działania z nim związane zostały rozszerzone na kolejne obszary produkcyjne.

Analiza wyników wdrożenia kształtowała się następująco (www.ptzp.org.pl., 2014):

- wskaźnik OEE wzrósł do 70% przez rok wdrażania a w późniejszych okresach stopniowo rósł (błąd pomiaru może wynikać ze względu na wartości średnie użyte do obliczenia wskaźnika, aby wskaźnik odzwierciedlał rzeczywisty stan powinno się go liczyć dla każdej maszyny osobno),
- przedsiębiorstwo posiadało już własny system eksploatacji, co przełożyło się na długi czas oczekiwania na pozytywne rezultaty wdrożenia. przyczyny:
    - zły stan techniczny parku maszyn,
    - wymagane duże nakłady pracy ze strony obsługi na przywrócenie pierwotnego stanu maszyn,
    - zmiana harmonogramu pracy skutkująca mniejszą efektywnością linii produkcyjnej.
- na pozytywną implementację TPM wpłynęła w dużym stopniu zmiana podejścia do pracowników. poszerzyli oni swoje kompetencje z zakresu obsługi technicznej maszyn, co skutkowało wzrostem niezawodności maszyn,
- kolejnym efektem jest czystość maszyn i ogólna czystość na hali produkcyjnej,
- operatorzy sami usuwają drobne awarie odciążając pracowników działu utrzymania ruchu.

5. Analiza porównawcza efektów wdrożenia instrumentów Lean Manufacturing

Porównując wyniki wdrożeń Lean Manufacturing w wybranych przedsiębiorstwach, przedstawionych w artykule, można stwierdzić, że najefektywniejszym z przedstawionych narzędzi wydaje się TPM. Poprzez jego zastosowanie w obu przedsiębiorstwach wzrosła

efektywność, zmniejszyły się koszty oraz zwiększyły się kompetencje i zaangażowanie pracowników. Ponadto powiększyła się umiejętność i sprawność stosowania metod TPM przez pracowników. Oba przedsiębiorstwa zrealizowały zamierzone cele, choć w różnych odstępach czasowych.

Nie bez znaczenia pozostaje także wskaźnik OEE. Przedsiębiorstwo kosmetyczne X uzyskało wzrost wskaźnika OEE, o 30 % co jest bardzo dobrym wynikiem. Natomiast przedsiębiorstwo motoryzacyjne X uzyskało wzrost wskaźnika jedynie o ok 8% w skali roku, aczkolwiek do poziomu 70% co jest zadowalającym wynikiem. Przyczyną uzyskania wysokiego wyniku pierwszego przedsiębiorstwa może być skupienie się tylko na zwiększeniu efektywności wykorzystywanych zasobów oraz rozbudowaniu linii produkcyjnej. Powodem niewielkiego wzrostu wyniku OEE drugiego przedsiębiorstwa mogło być natomiast skupienie uwagi na efektywności parku maszynowego. Zły stan parku maszyn stwarzał konieczność doprowadzenia ich do stanu pierwotnego, dlatego też wdrożenie TPM wymagało znacznie większego nakładu pracy niż w przedsiębiorstwie kosmetycznym X.

W przedsiębiorstwie kosmetycznym X skupiono się również na funkcjonowaniu magazynu. Poprzez zastosowanie kart Kanban zmniejszono ilość jednorazowo wywoływanych komponentów z magazynu. Przyczyniło się to m.in. do zmniejszenia ilości czynności transportowych pomiędzy tymi obszarami. Natomiast w przedsiębiorstwie motoryzacyjnym X skupiono się tylko na obszarze produkcyjnym, co również mogło mieć wpływ na mniejszą efektywność wdrożenia TPM.

W obu przedsiębiorstwach wdrożenie metody 5S w znacznym stopniu usprawniło pracę, zmniejszyło czas wykonywanych zadań, zwiększyło przejrzystość stanowisk oraz wyeliminowało popełniane błędy. Na podstawie przytoczonych instrumentów LM można zauważyć, że metoda 5S stanowi swego rodzaju bazę – podłoże – które ułatwia wdrożenie innych metod czy narzędzi Lean Management.

6. Zakończenie

Omówione we wstępie narzędzia LM, wydają się w największym stopniu wpływać na procesy produkcyjne w obu przypadkach, choć nie należy marginalizować pozostałych instrumentów wpływających na efektywność ich zastosowania takich jak 5WHY, Diagram Ichikawy.

7. Literatura

5S dla operatorów. 5 filarów wizualizacji miejsca pracy. Wyd. Productivity Press, Wrocław 2010.

Antosz K., Ciecińska B.: Podstawy zarzadzania parkiem maszyn w przedsiębiorstwie, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2011.

Antosz K., Pacana A., Stadnicka D., Zielecki W. (2018) Lean Manufacturing Doskonalenie Produkcji. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów.

Antosz K.: Problemy wdrażania Lean Manufacturing w procesie utrzymania maszyn, Utrzymanie Ruchu 2, 2015.

Furman J.: Wdrażanie wybranych narzędzi koncepcji Lean Manufacturing w przedsiębiorstwie produkcyjnym [w:] Knosala R. (red.): Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji, tom 1, Oficyna Wyd. PTZP, Opole 2014.

Harris R., Harris Ch., Wilson E.: Doskonalenie przepływu materiałów. Przewodnik po systemie szczupłego zarządzania materiałami dla specjalistów z produkcji, sterowania produkcją oraz technologii, Wrocławskie Centrum Transferu Technologii, Wrocław 2003.

Kaźmierczak J.: Eksploatacja systemów technicznych, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2000.

Nakajima S.: Introduction to TPM, Portland, Productivity Press 1988.

Płończyk M., Hatowski J., Kuliński M. (2014) Wybór Lean Management jako drogi do doskonalenia organizacji na przykładzie produkcji kosmetyków w firmie X. Lean Enterprise Institute Polska, Wrocław.

Palonek R.: Wyliczona efektywność, Top Logistyk, 2009, Nr 4, s. 49-51.

Wielgoszewski P.: TPM – Total Productive Maintenance – czyli jak zredukować do zera liczbę wypadków, awarii i braków, Zarządzanie Jakością, 2007, Nr 1, s. 25.

lean.org.pl/5s-na-produkcji-i-w-biurze [dostęp 29.03.2019].

lean.org.pl/wybor-lean-management-drogi-doskonalenia-organizacji-przykladzie-produkcji-kosmetykow-firmie-X-/ [dostęp: 29.03.2019].

leantime.pl/glosariusz [dostęp 30.03.2019].

mfiles.pl/pl/index.php/Total_Productive_Maintenance [dostęp 30.03.2019].

www.jakość.biz/total-productive-maintance [dostęp 30.03.2019].

www.ptzp.org.pl/files/konferencje/kzz/artyk_pdf_2014/T1/t1_247.pdf [dostęp 27.03.2019].

Molekularne podstawy właściwości antybakteryjnych detergentów gemini

Rzycki Mateusz [(1)]

[1] Wydział Podstawowych Problemów Techniki, Politechnika Wrocławska
Mateusz Rzycki: mateusz.rzycki@pwr.edu.pl

Streszczenie
Ze względu na rosnącą z roku na rok antybiotykooporność bakterii brakuje efektywnych leków do walki z nimi. Światowa Organizacja Zdrowia (WHO) donosi, iż z tego powodu umiera około 700 tysięcy osób rocznie. Nowe podejście zakłada traktowanie bakterii surfaktantami (związkami powierzchniowo czynnymi) z rodziny gemini w celu zdestabilizowania błony, aż do jej zniszczenia.
Do analiz stworzono modele numeryczne błon: bakteryjnej i zwierzęcej. Następnie poddano je symulacjom dynamiki molekularnej, generując trajektorię ruchu atomów. Stworzone modele zostały poddane działaniu środków antybakteryjnych. Do badań wykorzystano cząsteczki znanych, komercyjnych związków: oktenidyny oraz chlorheksydyny. Na podstawie symulacji dokowania molekularnego na pełnej trajektorii stworzono 80 000 modeli przyłączeń cząsteczek do powierzchni hydrofilowej oraz hydrofobowej dla każdej z błon komórkowych.
Otrzymane wyniki pozwoliły na statystyczne określenie selektywności związków bakteriobójczych, opierając się na powinowactwie, czyli energii swobodnej wiązania zarówno do bocznych jak i górnych części modelowych dwuwarstw lipidowych. Wyniki dokowania molekularnego ukazały selektywne działania związków antybakteryjnych z preferencją do błon bakteryjnych, a najwyższe powinowactwa obserwowano dla cząsteczek chlorheksydyny.

Słowa kluczowe: błona bakteryjna, oktenidyna, chlorheksydyna, dynamika molekularna, dokowanie molekularne

Molecular basis of gemini detergents antibacterial properties

Summary
Due to the growing antibiotic resistance of bacteria from year to year, there is a shortage of effective drugs to defeat them. The World Health Organization (WHO) reports that approximately 700,000 people die each year from antibiotic-resistant bacteria. The new approach involves the treatment of bacteria with surfactants from the gemini family in order to destabilize the cell membrane.
The numerical models of bacterial and animal membranes were created for analysis. Afterwards the molecular dynamics simulations were performed, generating a trajectory of the atomic motion. Created models have been treated with well-known antibacterial agents: octenidine and chlorhexidine. Based on the simulation of molecular docking on the full trajectory, 80 000 models of molecule aggregation to the hydrophilic and hydrophobic surface were created for each of the cell membranes.
The obtained results allowed for statistical determination of antibacterial agents' selectivity, based on affinity – a free binding energy to the both lateral and upper parts of the model lipid bilayers. The results of the molecular docking showed the selective action of antibacterial compounds with preference for the bacterial membranes. Furthermore the highest affinities were observed for chlorhexidine molecules.

Keywords: bacterial membrane, octenidine, chlorhexidine, molecular dynamics, molecular docking

1. Wstęp

Przez rosnącą z roku na rok antybiotykooporność bakterii brakuje skutecznych leków do walki z nimi Światowa Organizacja Zdrowia (World Health Organization) w swoich raportach szacuje, iż co najmniej 700 tysięcy osób rocznie przegrywa walkę z opornymi na działanie antybiotyków bakteriami (www.who.int). Jeżeli do 2050 roku nie zostaną odkryte nowe lekarstwa, śmierć może ponieść nawet 10 milionów osób rocznie (www.who.int). Przyczyn uodparniania się mikroorganizmów jest wiele, m.in. ciągłe mutacje, nabywanie

genów odporności od innych organizmów czy nawet nieprawidłowo prowadzone antybiotykoterapie. Z biegiem czasu bakterie uciekają przed zabójczym działaniem antybiotyków, wykształcając swój własny mechanizm adaptacyjny. Wprowadzenie nowych leków, czy synteza innych związków o działaniu antyseptycznym może pomóc w rozwiązaniu tego problemu (www.who.int).

1.1. Surfaktanty z rodziny gemini

W ostatnich latach uwagę wielu grup akademickich i przemysłowych przyciągnęło kilka nowych klas związków powierzchniowo czynnych (Kamboj, 2012). Wspomniane związki o strukturze amfifilowej to środki powierzchniowo czynne (surfaktanty) z rodziny gemini, które składają się z dwóch alifatycznych łańcuchów węglowodorowych - ogonów i dwóch grup hydrofilowych – głów, połączonych sztywnym lub elastycznym łącznikiem (Hu, 2013; Tehrani-Bagha, 2010). Łącznik może być wiązaniem podwójnym lub takim, które wykorzystuje dwie takie same cząsteczki (np. mostek dwusiarczkowy), a ich struktura przyczynia się do stopnia biodegradacji surfaktantów gemini. Głowy surfaktantów mogą składać się z: reszt fosforanowych, sulfonowych, karboksylowych, siarczanowych etyloamoniowych lub pirolidynowych. Środki powierzchniowo czynne zachowują się podobnie do klasycznych środków surfaktantów o zbliżonych sekwencjach fazowych i strukturach agregatów, ale wykazują także pewne interesujące różnice. Przyciągają uwagę ze względu na swoje specyficzne właściwości: charakteryzują się niskim CMC (Critical micelle concentration)- niższym nawet o dwa rzędy wielkości w porównaniu do klasycznych środków jednołańcuchowych, są znacznie bardziej wydajne niż monomery przy zmniejszaniu napięcia powierzchniowego wody. Charakteryzują się również wyższą rozpuszczalnością, pienieniem lub zwilżalnością niż środki klasyczne. Ważnym aspektem jest również niska temperatura punktu Kraffta, która pozwala na ich użytkowanie w zimnej wodzie (Tehrani-Bagha, 2010; Hongqi, 2013).

Część środków powierzchniowo czynnych gemini ma niezwykłe właściwości przeciwbakteryjne skierowane przeciwko bakteriom Gram-dodatnim i Gram-ujemnym, a także działa grzybobójczo. Środki gemini są znane z wysokiego stopnia biodegradacji i mogą przyjmować złożone struktury. Związki powierzchniowo czynne zawierające struktury węglowodorowe mogą tworzyć różne formy, np. cylindryczne lub sferyczne micele (Hu, 2013).

W raportach WHO mocno skupiono się na bakteriach opornych na antybiotyki. Jednymi z wielu związków o silnym działaniu przeciwbakteryjnym są czwartorzędowe sole amoniowe, które zapobiegają rozwojowi bakterii i grzybów, dlatego są stosowane na dużą skalę do

czyszczenia, konserwacji i dezynfekcji (Koch, 2003). Działanie antybakteryjne surfaktantów gemini opartych o czwartorzędowe sole amoniowe jest bezpośrednio związane z rodzajem i długością łącznika w cząsteczce.

Z powodu obecności dwóch hydrofobowych łańcuchów i elastycznych łączników w cząsteczce, gemini są bardziej wydajne w niższych stężeniach, agregują i silnie adsorbują niż monomery, destabilizując błony komórkowe. Powszechnie zakładano, że hydrofobowe łańcuchy alkilowe są ważnym czynnikiem w biobójczej aktywności środków, określając powinowactwo do błony komórkowej (Tawfik, 2015). Wielu naukowców udowodniło, że liczba atomów węgla jest skorelowana z aktywnością przeciwdrobnoustrojową. Ustalono, że większa liczba atomów węgla w cząsteczce zwiększa jej działanie przeciwbakteryjne, a obecność 12 atomów węgla powoduje największą odpowiedź antybakteryjną. Bardzo długie ogony mogą zakrzywiać się i skręcać, dyskwalifikując interakcję z ujemnie naładowanymi powierzchniami membrany (Kamboj, 2012; Hu, 2013; Tehrani-Bagha, 2010). Chociaż uważa się, że główny element właściwości przeciwdrobnoustrojowych środka powierzchniowo czynnego jest związany z łańcuchem hydrofobowym, potwierdzono, że rodzaj i struktura grupy głowy surfaktantu są również istotnym czynnikiem aktywności biologicznej. Ponadto udowodniono, że struktura części hydrofilowej odgrywała również ważną rolę w działaniu przeciwdrobnoustrojowym (Bhagwat, 2013).

1.2. Lipidy i błony komórkowe

Lipidy, czyli cząsteczki tłuszczowe, stanowią około połowę masy całkowitej większości błon komórkowych zwierząt. Cząsteczki lipidów w błonach komórkowych są amfifilowe, czyli mają hydrofilowy koniec z jednej strony i jednocześnie hydrofobowy koniec po drugiej stronie (Alberts, 2002).

Najliczniejszymi lipidami w błonie są fosfolipidy. Mają one polarną główkę oraz dwa hydrofobowe ogony węglowodorowe. Ogony to zwykle kwasy tłuszczowe, które różnią się długością – od około 14 do 24 atomów węgla. Jeden z ogonów przeważnie posiada minimum jedno wiązanie podwójne cis (jest nienasycony), natomiast drugi go nie posiada (jest nasycony). Różnice w długości oraz nasyceniu ogonów wpływają na zdolności agregacji fosfolipidów, a przy tym na płynność błony. Kształt oraz amfifilowy charakter cząsteczek tłuszczowych powoduje spontaniczne tworzenie się dwuwarstw w środowisku wodnym. Cząstki hydrofilowe łatwo rozpuszczają się w wodzie, gdyż zawierają naładowane lub nienaładowane grupy polarne, które mogą tworzyć korzystne oddziaływania elektrostatyczne bądź wiązania wodorowe z cząsteczkami wody. Natomiast cząsteczki hydrofobowe są nierozpuszczalne w wodzie, ponieważ wszystkie lub prawie wszystkie ich atomy są

nienaładowane i niepolarne, więc nie mogą tworzyć energetycznie korzystnych oddziaływań. Molekuły lipidowe agregują wystawiając hydrofilowe głowy ku wodzie jednocześnie chowając hydrofobowe ogony do wewnątrz. Pozwala to na tworzenie sferycznych miceli, bądź dwuwarstwy z ogonami skrywanymi do wnętrza, pomiędzy zewnętrznymi hydrofilowymi głowami (Hope, 2011; Koch, 2003).

2. Materiały i metody

W badaniu numerycznie sprawdzono, czy komercyjnie dostępne związki powierzchniowo aktywne tj. chlorheksydyna oraz oktenidyna wykazują silne i selektywne działanie antybakteryjne, względem błony bakteryjnej oraz eukariotycznej. Symulacje zostały prowadzone z wykorzystaniem dynamiki molekularnej oraz dokowania molekularnego.

Modele numeryczne błon zostały utworzone za pomocą oprogramowania *CHARMM-GUI* (Brooks, 1983). Konstruowanie błony obejmuje określenie wielkości systemu, objętości rozpuszczalnika oraz zawartych jonów. Utworzone dwuwarstwy lipidowe zostały złożone z dwóch homogenicznych monowarstw po 180 fosfolipidów; bakteryjna o składzie: 80% PE (fosfatydyloetanoloamina), 15% PG (fosfatydyloglicerol) oraz 5% CL (kardiolipina); eukariotyczna: 100% POPC (fosfatydylocholina). Błony zostały wygenerowane, jako numeryczne odpowiedniki komercyjnie dostępnych błon eukariotycznej oraz bakteryjnej z *E Coli*. System uwzględniał również jony Na^+ i Cl^- o fizjologicznym stężeniu 0,15 M rozmieszczone w środowisku wodnym modelowanym cząsteczkami wody typu TIP3P. Modele były symulowane w polu siłowym CHARMM36m w stałej temperaturze 300K oraz stałym ciśnieniu 1 bar.

Symulacje dynamiki molekularnej prowadzone były w programie *NAMD* (Oosten, 2014), przy użyciu zasobów udostępnionych przez Wrocławskie Centrum Sieciowo-Superkomputerowe (http://wcss.pl), grant obliczeniowy nr 274.

Dokowanie molekularne przeprowadzono w programie *AutoDock Vina* (Trott, 2010). Przygotowane błony zostały poddane działaniu związków antybakteryjnych takich jak: oktenidyna oraz chlorheksydyna.

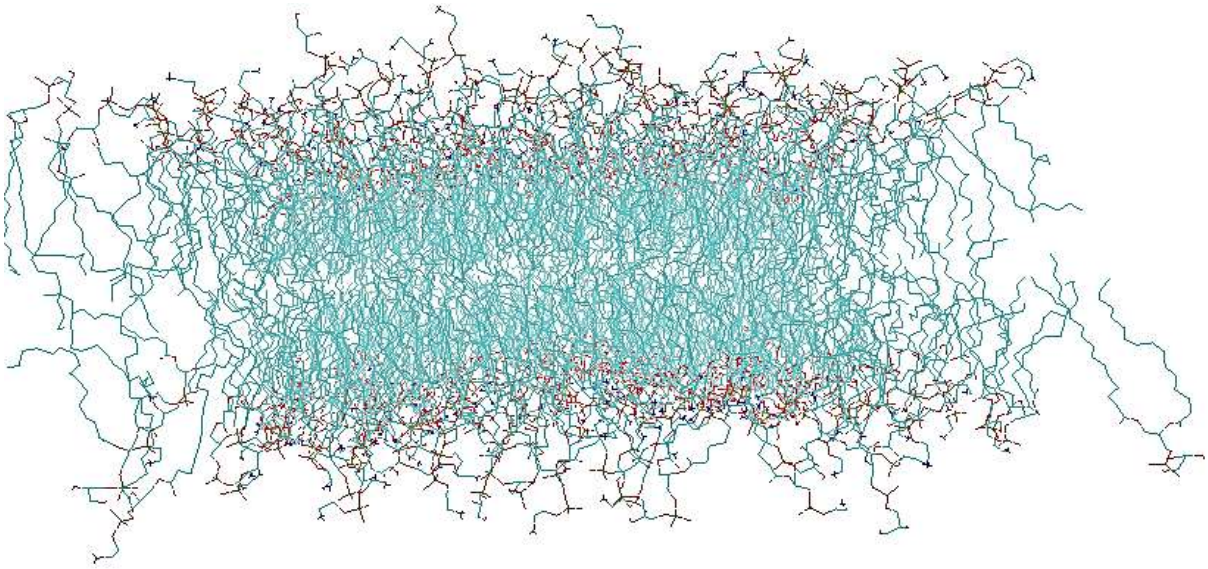
Oktenidyna – (dichlorowodorek oktenidyny, OCT) jest kationowym surfaktantem z rodziny gemini wykazującym doskonałe właściwości bakteriostatyczne oraz bakteriobójcze. Jest skuteczny przeciwko bakteriom gram-dodatnim oraz gram-ujemnym (Raab, 2008).

Chlorheksydyna – (diglukonian chlorheksydyny, CHX) jest antybakteryjnym środkiem szeroko stosowanym głównie do dezynfekcji. Podobnie jak oktenidyna działa zarówno na bakterie gram-dodatnie jak i gram-ujemne. Wykazuje silne działanie bakteriobójcze oraz bakteriostatyczne uszkadzając i destabilizując błony komórkowe (Raab, 2008).

Za pomocą narzędzi *Autodock* stworzono dwa rodzaje siatek dokowań (Gridbox). Pierwsza uwzględniała jedynie warstwy hydrofilowe (upper), czyli górną oraz dolną część błony, natomiast druga, jedynie boczne fragmenty błony (side) – części hydrofobowe. Wspomniany układ pozwolił na określenie powinowactwa związków antybakteryjnych do warstw hydrofilowych oraz hydrofobowych poprzez pomiar towarzyszącej energii swobodnej.

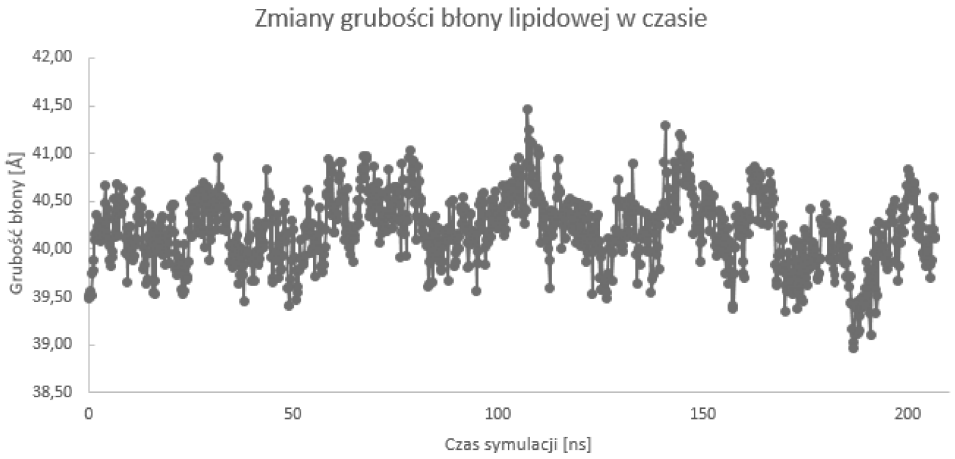
3. Wyniki i dyskusja

W wyniku symulacji dynamiki molekularnej otrzymano stabilne modele numeryczne błony bakteryjnej i zwierzęcej. Zostały one pozbawione rozpuszczalnika, wycentrowane oraz złożone tak, by zapewnić optymalne warunki dla dalszego dokowania (Rys. 5).



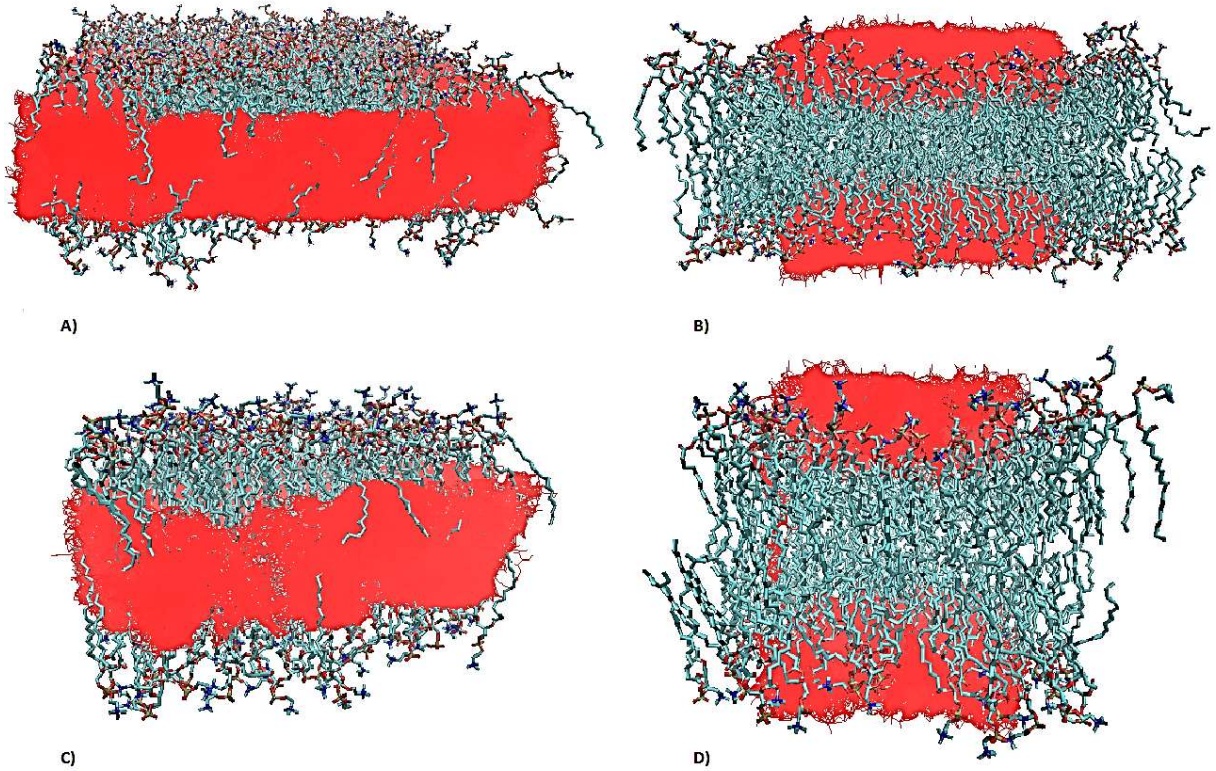
Rys. 5 Przygotowany model błony bakteryjnej gotowy do procesu dokowania.

Symulacje dynamiki molekularnej pozwoliły ukazać efekt dyfuzji lateralnej w postaci zmian grubości błon poprzez rotacje oraz fluktuacje lipidów (Rys. 6). Średnia grubość błony wyniosła 40,20 ± 0,37 Å. Analizując inne badania (Wu, 2014; Mitra, 2004) wykonywane na bakterii *E. Coli* otrzymany wynik można uznać za stabilny, co potwierdziło poprawność stworzonego systemu.



Rys. 6 Zmiana grubości błony komórkowej w czasie

Dokowanie molekularne przeprowadzono na całej trajektorii błony lipidowej i odwzorowało możliwe modele przyłączeń cząsteczek oktenidyny oraz chlorheksydyny z konkretnymi wartościami energii swobodnych (Rys. 7). W badaniach skupiono się na powinowactwie związków do warstw hydrofobowych oraz hydrofilowych błon.



Rys. 7 Wyniki dokowania chlorheksydyny: A) błona bakteryjna bocznie B) błona bakteryjna część górna i dolna, C) błona eukariotyczna bocznie, D) błona eukariotyczna część górna i dolna

Kolorem czerwonym oznaczono 20000 konfiguracji cząsteczek antyseptyka ponakładanych na siebie, które podłączyły się do warstw zewnętrznych błon tworząc obszar

dokowania. Podobna organizacja związku wystąpiła zarówno dla dwuwarstw bakteryjnych oraz eukariotycznych.

Proces oddziaływania z błoną wymaga dwuetapowego rozpatrzenia. Efekt antybakteryjny polega na zniszczeniu i rozpuszczeniu błony lipidowej, gdzie cząsteczka najpierw zakotwicza się na powierzchni błony, a następnie wnika do jej wnętrza. Stąd dąży się do tego, by pierwszy kontakt środków antybakteryjnych był priorytetowy właśnie dla błon bakteryjnych (korzystniejsza energia oddziaływania). Następnie oczekuje się większych oddziaływań ze strefą hydrofobową, tak by cząsteczka mogła wejść do środka i rozpuścić błonę. Stąd kluczowy jest nie tylko pierwszy kontakt antyseptyka z głowami hydrofilowymi, ale jego chęć penetracji w głąb błony, tak by działać na ogony hydrofobowe. Z tego powodu zdecydowano się na dwuetapowy proces dokowania molekularnego. Wyniki dokowania zestawiono w tabeli (Tab. 1).

Tab. 1 Średnie wartości powinowactwa dla poszczególnych błon komórkowych

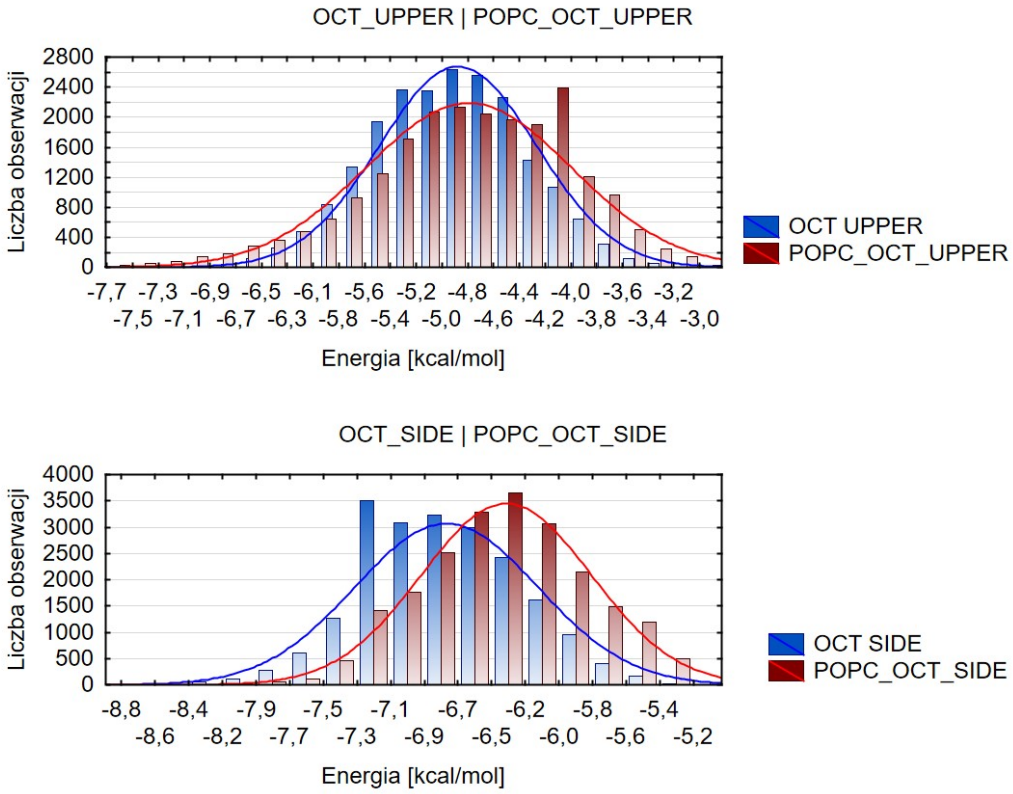
	$\Delta G_{CHLORHEKSYDYNA}$ $\left[\frac{kcal}{mol}\right]$	ODCHYLENIE STANDARD.	$\Delta G_{OKTENIDYNA}$ $\left[\frac{kcal}{mol}\right]$	ODCHYLENIE STANDARD.
POPC SIDE	-7,21	0,74	-6,38	0,53
POPC UPPER	-7,17	0,78	-4,65	0,82
BACTERIAL SIDE	-7,73	0,68	-6,76	0,50
BACTERIAL UPPER	-7,58	0,69	-4,92	0,60

W pierwszym etapie cząsteczki antyseptyków dokowano do powierzchni błony. Szacowana energia oddziaływań cząsteczki z błoną określa powinowactwo antyseptyka. Im niższa (bardziej ujemna) wartość energii swobodnej, tym większe prawdopodobieństwo interakcji antyseptyka z powierzchnią błony. Drugim etapem jest dokowanie do powierzchni bocznej. Wartość energii przy warstwie hydrofobowej określa zdolność wchodzenia w głąb błony. Jeżeli energia przy warstwie hydrofobowej jest wyższa niż przy hydrofilowej oznacza to, że cząsteczka chętnie penetruje jedynie powierzchnie i zostaje w tej fazie.

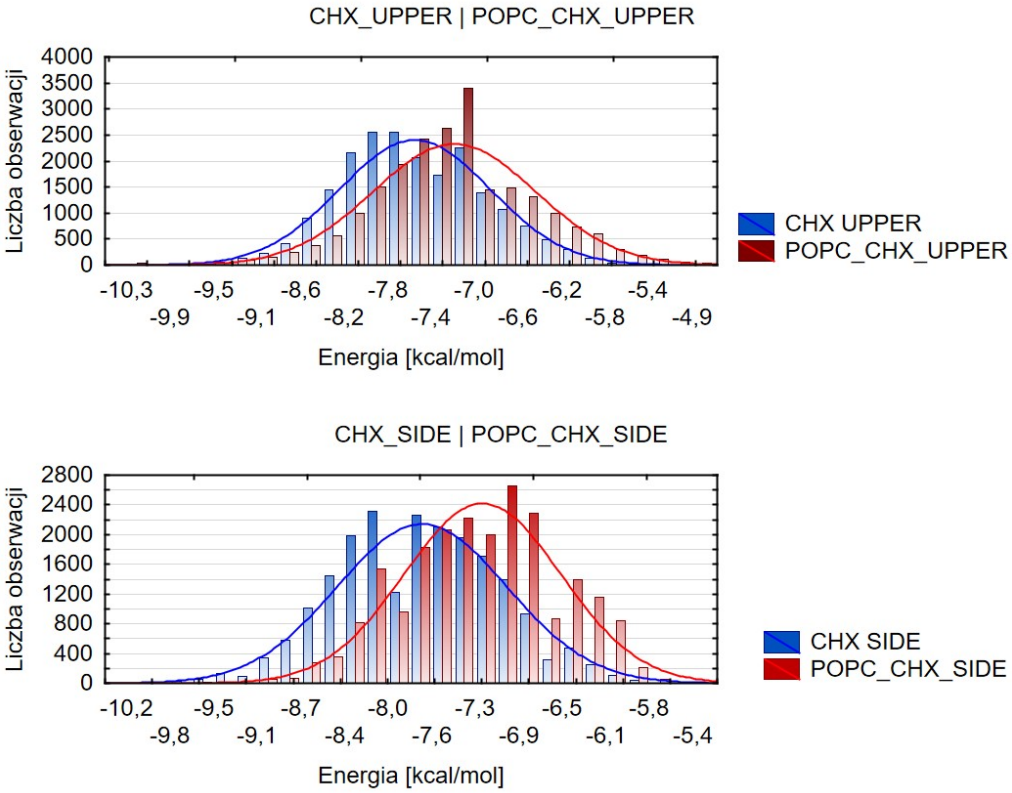
Średnie wartości energii swobodnej mogą pomóc w określeniu stopnia powinowactwa związku antyseptycznego do błony i oceny jego selektywności. Zarówno chlorheksydyna jak i oktenidyna wykazują wyższe powinowactwa do błon bakteryjnych, co jest pożądanym efektem. W obu przypadkach energie swobodne przyłączeń do powierzchni bocznych są niższe, a dodatkowo chlorheksydyna przejawia wyższą aktywność antybakteryjną, co może uzasadniać jej dopuszczenie do zastosowania wewnątrz jam ciała.

W kontekście selektywności związków antybakteryjnych, cząsteczki powinny preferencyjnie wybierać korzystne dla nich połączenia z błonami bakteryjnymi. W celu

weryfikacji selektywności cząsteczek antyseptyków zestawiono modele określające powinowactwo energetyczne dla błon eukariotycznych oraz bakteryjnych (Rys. 8, Rys. 9).



Rys. 8 Porównanie selektywności oktenidyny (OCT) na obu błonach



Rys. 9 Porównanie selektywności chlorheksydyny (CHX) na obu błonach

Analizując nałożone na siebie histogramy z Rys. 9 można zauważyć, iż krzywa funkcji gęstości w CHX UPPER osiąga swoje maksima dla niższych energii przy błonie bakteryjnej. Stąd wyższe powinowactwo w warstwach hydrofilowych obserwowane jest dla bakterii, co pozwala potwierdzić selektywność związków antyseptycznych. W przypadku chlorheksydyny bocznie dokowanej także obserwowana jest niższa energia wiązania. Różnica pomiędzy maksimami dopasowanej funkcji Gaussa na osi OX jest równa ok. 0,7 kcal/mol. Jak widać w momencie przejścia przez dwuwarstwę, chlorheksydyna zacznie szybciej działa w błonach bakteryjnych.

Charakterystycznie przesuniecie zarówno przy kontakcie z górną i boczną warstwą błony określa selektywność antyseptyka. Powinowactwo do błony bakteryjnej jest wyższe, jednak oczekuje się, aby przytaczana selektywność była na tyle silna, by oba zbiory były znacząco rozsunięte. W przypadku oktenidyny (Rys. 8) krzywa Gaussa OCT UPPER określa większy zbiór modeli osiągających niższe energie swobodne, niż dla błon eukariotycznych POPC. Widoczne jest również niewielkie przesuniecie (ok. 0,1 kcal/mol) w kierunku wyższego powinowactwa błony bakteryjnej.W przypadku kontaktu bocznego oktenidyny zauważalne jest ewidentne rozsunięcie zbiorów na korzyść dwuwarstwy bakteryjnej (Rys. 8). Różnica energetyczna pomiędzy maksymalnymi wartościami funkcji dla błony bakteryjnej i zwierzęcej wynosi około 0,4 kcal/mol. Wszystkie wyniki zostały przeanalizowane statystycznie. Otrzymane wyniki jednoznacznie pozwalają stwierdzić, iż związki cechują się selektywnością ($p \leq 0,05$).

4. Podsumowanie i wnioski

Symulacje dynamiki i dokowania molekularnego pozwoliły zaobserwować selektywność związków antybakteryjnych na błonach lipidowych – bakteryjnej oraz eukariotycznej. Dokowanie molekularne na pełnej trajektorii atomów lipidów umożliwia statystyczne określenie optymalnych energii swobodnych wiązania. Uzyskane 160 000 modeli pozwoliło ocenić, które substancje prezentują wyższą aktywność względem błon. Otrzymane wyniki umożliwiły określenie, iż chlorheksydyna cechuje się wyższym powinowactwem do błon bakteryjnych niż oktenidyna, co przekłada się na działanie bakteriobójcze. Jest to zgodne z badaniami in vitro, w których chorheksydyna wykazała czterokrotnie wyższą skuteczność od oktenidyny na wielu szczepach bakteryjnych m. in. *E. Coli* (Harke, 2009).

Symulowane lądowanie na powierzchni błony bakteryjnej było preferowane przez obie cząsteczki. Istotne jest również, iż w obu przypadkach energie przy strefach hydrofobowych były niższe, co może sugerować zdolność dostania się antyseptyka do wnętrza błony,

doprowadzając do odkrycia ogonów hydrofobowych, a następnie emulgacji i zniszczenia bariery lipidowej. Należy jednak pamiętać, iż przedstawiony model dokowania bocznego zakłada jedynie łączenie antyseptyka z błoną przez połowę cząsteczki. Model numeryczny, posiada ograniczoną powierzchnię. W rzeczywistości jest on kompletny i nie ma bezpośredniego kontaktu cząsteczki ze strefą niepolarną. Stąd rzeczywista energia swobodna będzie nawet dwukrotnie niższa.

Cząsteczki powinny odznaczać się znacząco różnym, niskim powinowactwem względem błon eukariotycznych. Wyższe powinowactwo do błon bakteryjnych jest zauważalne, lecz oczekuje się, aby związki antybakteryjne cechowały się diametralnie wyższą selektywnością, co w dalszym etapie pozwoli na ich rozpatrywanie, jako potencjalnych następców antybiotyków.

Praca zrealizowana w ramach grantu z Narodowego Centrum Nauki z programu OPUS 10, 2015/19/B/NZ7/02380.

5. Literatura

Alberts B., Johnson A., Lewis J., Raff M, Molecular biology of the cell (4th ed.), Garland Science, New York, 2002.

Bhagwat A., Ghumare K., Pawar B., Sunil S., Synthesis and Antibacterial Activity of Novel Amido-Amine-Based Cationic Gemini Surfactants, J Surfact Deterg . 2013, Tom 16, 85-93.

Brooks B.R., Bruccoleri R. E., Olafson B. D., States D. J., CHARMM: A program for macromolecular energy, minimization, and dynamics calculations, J. Comput. Chem. 1983, 4: 187–217

Harke H. P., Disinfectants, Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry (7th ed.), 2009,Wiley, 1–17.

Hope M. J., Nayar R., Mayer L. D., Cullis P. R., Biomembrane fluidity - studies of model and natural membranes in Biological Membranes, Academic Press, 2011, London, 1-56

Hu D.H., Guo X.F., Jia L.H., Synthesis, surface active properties of novel Gemini surfactants with amide groups and rigid spacers, J Surfactant Deterg. 2013, Tom 16, 913–919.

Ichikawa S., Hirabayashi Y., Glucosylceramide synthase and glycosphingolipid synthesis, Trends Cell Biol., 1998, 8: 198-202.

Kamboj R., Singh S., Bhadani A., Kataria H., Kaur G., Gemini imidazolium surfactants: synthesis and their bio physiochemical study, Langmuir. 2012, Tom 28, 11969–11978

Pandit K. R., Klauda J. B., Membrane models of E. coli containing cyclic moieties in the aliphatic lipid chain, Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Biomembranes, 2012, vol. 1818, Issue 5 :1205-1210

Tawfik S.M., Synthesis, surface, biological activity and mixed micellar phase properties of some biodegradable gemini, Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 25 August 2015, strony 171-183,Volume 28.

Raab D., Preparation of contaminated root canal systems – the importance of antimicrobial irrigants, DENTAL INC, 2008, 34–36.

Tehrani-Bagha A.R., Holmberg K., Cationic ester-containing Gemini surfactants: physical–chemical properties. Langmuir, 2010, Tom 26, 9276–9282.

Trott O.,Olson A. J., AutoDock Vina: improving the speed and accuracy of docking with a new scoring function, efficient optimization and multithreading, J Comput Chem., 2010, 31(2): 455–461

Van Meer G., Lipid traffic in animal cells, Annu. Rev. Cell Biol., 1989, 5: 247-275.

Vance D.E., Vance J.E., Biochemistry of Lipids, Lipoproteins and Membranes, Elsevier Science B.V, 1996, 1-32

Wu E. L., Fleming P. J., Yeom M. S., E. coli Outer Membrane and Interactions with OmpLA, Biophys J., 2014, 106(11): 2493–2502.

www.who.int/medicines/publications/WHO-PPL-Short_Summary_25Feb-ET_NM_WHO.pdf [Data uzyskania dostępu: 10.01.2020

Ocena zagrożenia ^{222}Rn w wybranych wodach podziemnych z obszaru województwa dolnośląskiego

Maciejewski Piotr [(1)]

[1] Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii
Piotr Maciejewski: piotr.maciejewski@pwr.edu.pl

Streszczenie
Naturalne izotopy promieniotwórcze występują w różnych elementach środowiska naturalnego. Ogół populacji może korzystać z tych zasobów, w związku z tym wprowadzono wiele regulacji prawnych dotyczących monitoringu aktywności promieniotwórczej niektórych z izotopów zarówno w powietrzu jak i w wodach podziemnych, które mogą być wykorzystywane w gospodarce. Władze lokalne są zobowiązane do monitoringu występujących koncentracji między innymi radonu ^{222}Rn w wodach przeznaczonych do spożycia. Występowanie tego izotopu w skałach zbiornikowych, czy w wodach podziemnych może wpływać na jego obecność w glebie, powietrzu oraz w budynkach. Dokonano przeglądu literatury zbierając dane o geologii obszarów, z których dokonywano pomiarów stężeń aktywności ^{222}Rn. Zebrano również wyniki pomiarów z wybranych wód podziemnych na obszarze województwa dolnośląskiego i dokonano oceny zagrożenia ze względu na stężenie aktywności ^{222}Rn w tych wodach.

Słowa kluczowe: radon, wody podziemne, województwo dolnośląskie

^{222}Rn threat assessment in selected groundwater from the Lower Silesian Voivodship

Summary
Natural radioactive isotopes occur in different components of natural environment. The general population can use these resources. Therefore, many regulations have been introduced. The activity concentration of some of the isotopes should be monitored both in air and in groundwater. Local government are also obliged to monitor the level of radioactivity especially radon (^{222}Rn) activity concentration in drinking waters. The occurrence of this isotope in reservoir rocks may affect the occurrence of this gas also in soil, air and buildings. This study presents a literature review about geology od Lowers Silesia region as well as the data of radon activity concentrations in groundwaters of this area. Based on collected data author made an assessment of a risk due to radon occurring.

Keywords: radon, groundwaters, Lower Silesia

1. Wstęp

Historia badań radonu liczy już ponad 100 lat (Skłodowska-Curie, 1953; Miliszkiewicz, 1978; Cothern & Smith, 1987; Szymański, 1991; Heiserman, 1997).

Radon został odkryty w 1900 roku przez niemieckiego chemika Friedricha Ernsta Dorna prowadzącego badania nad rozpadem radu. W ich trakcie starał się znaleźć przyczynę samoistnego ubytku masy tego izotopu. Wówczas odkrył promieniotwórczy gaz i nazwał go nitonem (Przylibski, 2005a).

Obecność tego promieniotwórczego pierwiastka w wodach wodociągowych w 1902 roku stwierdził sir Joseph John Thomson. Później stwierdzono jego występowanie także w wodach podziemnych, jak również termalnych i mineralnych. Jego właściwości chemiczne

i fizyczne są określane z coraz większą precyzją aż do dziś (Skłodowska-Curie, 1953; Miliszkiewicz, 1978, Cothern & Smith, 1987, Collé 1995a, b).

Od pierwszych odkryć minęło ponad sto lat. Stosunek ludzi do promieniotwórczości się zmienił. Początkowo radon był chętnie stosowany w zabiegach balneologicznych i medycznych, a z innych promieniotwórczych pierwiastków chętnie korzystano między innymi w przemyśle. W latach XX wprowadzono koncepcję progu po tym jak stwierdzono, że pierwiastki promieniotwórcze, w tym radon, mogą negatywnie oddziaływać na zdrowie człowieka, a negatywne skutki mogą występować dopiero po otrzymaniu odpowiednio dużej dawki (Przylibski, 2005a).

Wody podziemne wykorzystywane są do wielu celów, między innymi mogą stanowić źródło wód przeznaczonych do spożycia przez ludzi. Muszą wówczas spełniać szereg wymogów opisanych w obowiązujących aktach prawnych. Obecność niektórych izotopów promieniotwórczych, jako źródło szkodliwego promieniowania jonizującego, również musi być monitorowana i – w przypadku przekroczenia granicznych stężeń – usuwana z wody. Jednym z takich składników jest izotop radonu ^{222}Rn. Zgodnie z aktualnie obowiązującymi przepisami prawa (Rozporządzenie 2017), aby woda nadawała się do spożycia przez ludzi, jego stężenie aktywności nie może przekraczać 100 Bq/dm^3. Dodatkowo, w zależności od wartości stężenia aktywności zawartego w wodzie radonu, dokonywana jest ocena narażenia związanego z przyjęciem pewnej dawki promieniowania jonizującego od radonu, a w związku z tym zalecane jest odpowiednie postępowanie.

Wiele składników rozpuszczonych w wodach podziemnych, w tym także radon, w odpowiednich stężeniach może korzystnie wpływać na zdrowie konsumentów czy innych osób korzystających z tych wód. Zgodnie z prawem (Załącznik, 2019) wodę podziemną uznaje się za leczniczą, jeśli nie jest zanieczyszczona pod względem chemicznym i mikrobiologicznym. Musi cechować się również zmiennością cech fizycznych i chemicznych oraz zawartością składników nadającym im właściwości farmakodynamicznych. Woda może być wodą lecznicza radonową, jeśli poza wymogami czystości, charakteryzuje się stężeniem aktywności radonu nie mniejszym niż 74 Bq/dm^3.

2. Geneza radonu w wodach podziemnych

Rad, z którego w wyniku rozpadu powstaje radon, jest metalem wykazującym podobne właściwości do wapnia i baru. Do wód podziemnych dostaje się na skutek wymiany sorpcyjnej i ługowania. Niekiedy również poprzez rozkład niektórych obumarłych roślin, które koncentrują ten metal (Samarina, 1997).

Radon w wodach podziemnych powstaje na skutek przemian typu α ^{226}Ra w skałach zbiornikowych. Następnie z wodami jest przenoszony do źródła bądź ujęcia. Nie przebywa zwykle drogi dłuższej jak 200 metrów. Zmienia się również wtedy jego stężenie bowiem jest on bezbarwnym gazem szlachetnym o stosunkowo krótkim czasie połowicznego rozpadu, wynoszącym 3,8224 dnia (Miliszkiewicz, 1978; Browne & Firestone, 1986; Przylibski, 2005a).

Stężenie aktywności ^{222}Rn w wodach podziemnych zależy głównie od stężenia ^{226}Ra w skałach oraz współczynnika emanacji a także od charakterystyki mineralogiczno-petrologiczno-geochemicznej danego rejonu wypływu bądź ujęcia. Im dłużej woda przepływa bądź przebywa większą odległość przez ośrodek skalny, tym większe jest prawdopodobieństwo obecności w niej radu, który jest źródłem radonu w wodzie krążącej w skałach. Największą zawartość ^{226}Ra mają bogate w alkalia skały magmowe, skały pomagmowe oraz pneumatolityczne i hydrotermalne skały żyłowe. Skały metamorficzne mogą zawierać podwyższone ilości ^{226}Ra o ile powstawały z przeobrażenia skał o znacznej koncentracji tego izotopu bądź został on do nich doprowadzony (Przylibski, 2002, 2005).

Do czynników wpływających na ilość radonu w wodach zalicza się również zawartość faz stałych w skałach zawierających tor i uran oraz udział radu w skale (Guzdenko, 1987).

Zawartość radonu w wodach podziemnych jest bardzo zróżnicowana. Od ilości śladowych do setek tysięcy a nawet milionów Bq/dm^3, nigdy jednak woda nie osiąga stanu nasycenia radonem. Wówczas stężenie aktywności radonu wyniosłoby $5{,}926 \cdot 10^{15}$, a takowe nigdy nie zostało odnotowane w środowisku (Macioszczyk, 2002, Przylibski, 2005a).

3. Zestawienie danych geologicznych oraz wyników stężeń aktywności ^{222}Rn i ocena zagrożenia wynikającego z obecności radonu w wodach podziemnych na badanym obszarze

W celu realizacji niniejszej pracy zestawiono dane archiwalne z danymi otrzymanymi w ramach pracy własnej. Zestawiono wyniki stężenia aktywności ^{222}Rn w wodach podziemnych z obszaru województwa dolnośląskiego (Rys. 1., Tab. 1.). Numery próbek wód podziemnych od 1 do 8 oraz od 13 do 67 reprezentują dane literaturowe. Próbki wód oznaczone numerami od 9 do 12 autor pobrał i zmierzył w ramach badań własnych przeprowadzonych
w Laboratorium Nauk o Ziemi i Inżynierii Mineralnej na Wydziale Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej metodą ciekłoscyntylacyjną.

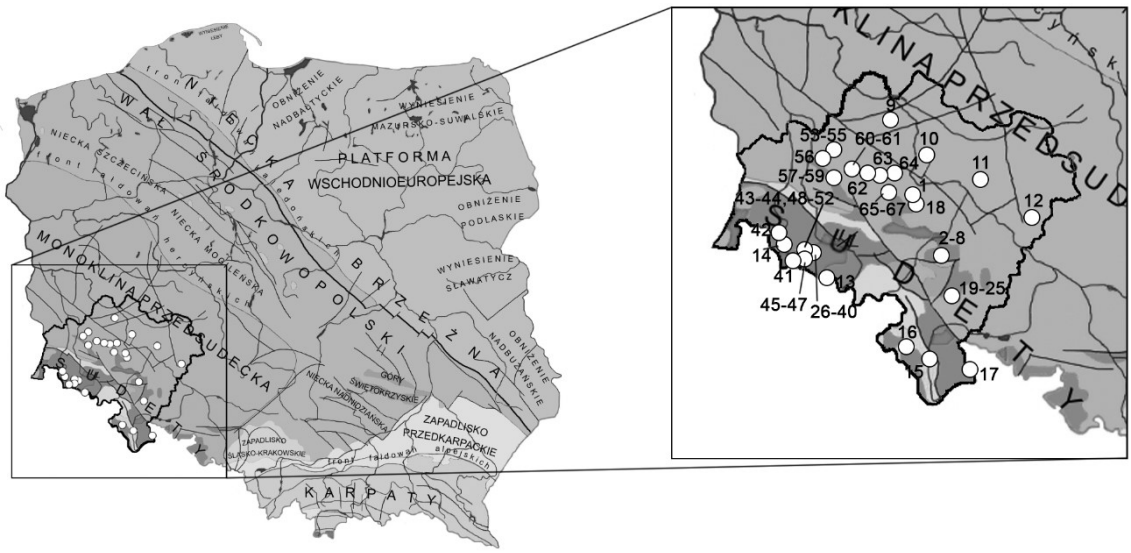
Część z ujęć (1, 13-40 i 53-67) znajdowała się w obszarze bloku przedsudeckiego, bloku karkonoszy, Sudetów. Skałami metamorfiku kaczawskiego na bloku przedsudeckim są

głównie fyllity, łupki serycytowo-kwarcowe, kwarcyty, łupki krzemionkowe i lidyty a także metamułowce i metaszarogłazy, granity i bazaltoidy. Pokrywę kenozoiczną stanowią piaski, muły oraz iły. Występują lokalne pokłady węgla brunatnego. Blok karkonoszy składa się z granitu karkonoskiego i metamorfiku izerskiego, który stanowi osłonę masywu granitowego (Żelaźniewicz, 1997, 2005; Aleksandrowski i Mazur, 2002; Kryza i in., 2004; Mazur i in., 2006; Domin i Przylibski, 2014).

Próbki 41-52 zlokalizowane były w obszarze Pogórza Izerskiego, który swym obszarem obejmuje fragmenty metamorfiku kaczawskiego. Na południu zbudowany jest głównie z gnejsów, podrzędnie amfibolitów, łupków łyszczykowych i innych metamorficznych skał. Od północy z łupków kwarcowych i serycytowych, fyllitów, wapieni krystalicznych, zieleńców oraz skał osadowych (piaskowce, wapienie, mułowce, gipsy i anhydryty, margle) i wulkanicznych (porfiry, melafiry, tufy) (Oberc, 1970; Cymerman, 2008).

Część próbek (2-8) zlokalizowana była na Masywie Ślęży zbudowanego z gabra składającego się przede wszystkim z piroksenów i plagioklazów, granitoidów, amfibolitów reprezentujących serię law poduszkowych i subwulkanicznych dajek pakietowych i przeobrażonych harzburgity reprezentujących serpentynity. Podrzędnie występują również łupki krystaliczne. Na zboczach Ślęży występują neogeńskie i czwartorzędowe, najczęściej zbudowane z gabra oraz granitu, pokrywy rumoszowe, zwietrzelinowe i blokowiska. Skały krystaliczne charakteryzują się małą oraz zmienną pojemnością (Gaździk, 1957; Majerowicz i Maciejewski 1979; Migoń 2005; Przylibski, 2005a, b; Przylibski i in., 2008).

Próbki 9-12 były pobrane z przydomowych studni z obszaru monokliny przedsudeckiej. Były to, więc wody płytkiego pochodzenia z osadów czwartorzędu.



Rys. 3. Rozmieszczenie ujęć badanych wód podziemnych opisanych w tabeli 1. na tle uproszczonej mapy geologicznej Polski (Znosko 1998). Linią pogrubioną czarną zaznaczono granicę województwa dolnośląskiego.

Tabela 4. Wyniki pomiarów stężeń aktywności ^{222}Rn; 1 - Pachocki i in. 2001, 2 - Pachocki i in. 2002, 3 - Przylibski i in. 2008, 4 - Walencik i in. 2010, 5 - badania własne, 6 - Pachocki i in. 2009, 7 - Kowalska 2017, 8 - Domin i Przylibski 2014; * - podano błąd pomiarowy; r - podano wartość rozstępu; ** - podano niepewność pomiarową

Data Autor badań	Nr na mapie	Lokalizacja	Nazwa ujęcia	^{222}Rn	Odchylenie standardowe
15.04.2019[5]	12	Sątok	studnia indywidualna	0,69	0,18**
15.02.2014[8]	55	Modła	studnia	1,10	0,10**
15.02.2014[8]	56	Różyniec	studnia	1,10	0,10**
12.11.2002 - 15.17.2005[3]	2	Masyw Ślęży	źródło Życia	1,20	0,1
02.03.2014[8]	64	Kawice	studnia	1,60	0,10**
16.02.2019[5]	10	Wodniki	studnia indywidualna	1,93	0,25**
05.04.2014[8]	66	Wądroże Wielkie	studnia	4,00	0,20**
08.02.2014[8]	53	Pasternik	studnia	5,20	0,10**
09.03.2014[8]	59	Zagrodno	studnia	6,90	0,20**
02.03.2014[8]	18	Zabłoto	studnia	7,00	0,20**
21.03.2003-20.07.2005[3]	3	Masyw Ślęży	źródło Jakuba (Zagłoba)	7,50	0,8
09.03.2014[8]	57	Modlikowice	studnia	7,50	0,20**
25.05.2003-28.01.2004[3]	5	Masyw Ślęży	źródło Lustiga	8,20	1,4
22.07.2003-15.07.2005[3]	4	Masyw Ślęży	źródło Joanny	8,90	5,6[r]
2007-2008[6]	28	Jelenia Góra - Cieplice	odwiert C-2	11,90	0,70
02.03.2014[8]	1	Cesarzowice	studnia	12,10	0,20**
08.02.2014[8]	62	Bobrów	studnia	12,20	0,20**
16.02.2019[5]	9	Krzydłowice	studnia indywidualna	12,58	0,94**
15.02.2014[8]	54	Gromadka	studnia	13,30	0,20**
02.03.2014[8]	63	Kunice	studnia	13,80	0,20**
1999-2011[4]	23	Przerzeczyn-Zdrój	odwiert nr 11	15,00	2,00
16.02.2019[5]	11	Wisznia Mała	studnia indywidualna	15,81	1,48**
1995-2000[1]	40	Jelenia Góra - Grabarów	studnia infiltracyjna nr 10	17,20	1,26
1999-2013[4]	25	Przerzeczyn-Zdrój	odwiert nr 15	18,00	2,00
2007-2008[6]	26	Jelenia Góra - Cieplice	źródło nr 1 "Marysieńka"	18,90	1,00
07.01.2014[8]	61	Siedliska	studnia	19,10	0,20**
18.07.2013[7]	15	Gorzanów	odwiert 7M („Sudety”)	20,30	0,36*
05.04.2014[8]	67	Usza	studnia	20,80	0,30**
08.02.2014[8]	60	Michów	studnia	22,30	0,30**
09.03.2014[8]	58	Olszanica	studnia	27,30	0,40**
1999-2010[4]	22	Przerzeczyn-Zdrój	odwiert nr 10	36,00	3,00
2007-2008[6]	27	Jelenia Góra - Cieplice	źródło nr 4 "Nowe"	52,50	2,50
1999-2009[4]	21	Przerzeczyn-Zdrój	odwiert nr 9	56,00	5,00
1997-2001[2]	51	Antoniów	studnia indywidualna	58,69	3,35
1999-2007[4]	19	Przerzeczyn-Zdrój	odwiert nr 2	69,00	4,00
1997-2001[2]	44	Mała Kamienica	studnia indywidualna	70,79	3,75
1995-2000[1]	30	Jelenia Góra - Grabarów	studnia drenażowa nr 2	83,20	4,33
1997-2001[2]	50	Kwieciszowice	studnia indywidualna	84,85	4,41
1999-2012[4]	24	Przerzeczyn-Zdrój	odwiert nr 13	87,00	5,00
6.08.2003-20.07.2005[3]	7	Masyw Ślęży	źródło Korzenne	99,90	39,1

Tabela 1 c.d.					
Data Autor badań	Nr na mapie	Lokalizacja	Nazwa ujęcia	^{222}Rn	Odchylenie standardowe
1997-2001[2]	41	Szklarska Poręba	studnia indywidualna	119,99	6,00
1997-2001[2]	48	Chromiec	studnia indywidualna	126,62	6,33
21.08.2013[7]	16	Bobrowniki Stare	źródło Maria	139,12	0,99*
1997-2001[2]	42	Pobiedna	studnia indywidualna	144,71	7,24
1999-2008[4]	20	Przerzeczyn-Zdrój	odwiert nr 8	154,00	22,00
1997-2001[2]	49	Rybnica	studnia indywidualna	156,82	7,84
1995-2000[1]	37	Jelenia Góra - Grabarów	studnia infiltracyjna nr 7	160,70	8,04
1995-2000[1]	36	Jelenia Góra - Grabarów	studnia infiltracyjna nr 6	175,50	8,95
19.01.2003-20.07.2005[3]	6	Masyw Ślęży	źródło Jasne	176,10	37,5
1995-2000[1]	34	Jelenia Góra - Grabarów	studnia drenażowa nr 6	183,20	8,98
1995-2000[1]	35	Jelenia Góra - Grabarów	studnia infiltracyjna nr 5	196,20	10,01
1997-2001[2]	45	Kromnów	studnia indywidualna	200,01	9,80
1995-2000[1]	29	Jelenia Góra - Grabarów	studnia drenażowa nr 1	246,90	12,10
1995-2000[1]	38	Jelenia Góra - Grabarów	studnia infiltracyjna nr 8	256,50	12,57
1995-2000[1]	39	Jelenia Góra - Grabarów	studnia infiltracyjna nr 9	258,60	12,67
1997-2001[2]	43	Stara Kamienica	studnia indywidualna	285,40	13,98
1997-2001[2]	47	Wola Kromnowska	studnia indywidualna	285,78	14,00
1995-2000[1]	32	Jelenia Góra - Grabarów	studnia drenażowa nr 4	294,10	14,41
1995-2000[1]	33	Jelenia Góra - Grabarów	studnia drenażowa nr 5	295,50	14,48
23.08.2004-5.01.2008[3]	8	Masyw Ślęży	źródło Klasztorne	306,20	19,6
1995-2000[1]	31	Jelenia Góra - Grabarów	studnia drenażowa nr 3	350,40	17,17
05.04.2014[8]	65	Wierzchowice	studnia	443,00	2,00
13.06.2013[7]	13	Kowary	źródło nr 26 przy parkingu	500,11	3,03*
1997-2001[2]	46	Kopaniec	studnia indywidualna	501,38	24,07
06.10.2013[7]	17	Młynowiec	źródło Zagożdżonów	576,46	7,29*
1997-2001[2]	52	Proszowa	źródło górskie "Stuletnia Woda"	903,33	43,36
26.06.2013[7]	14	Świeradów-Zdrój	studnia MCS 5	1535,22	30,85*

W zestawieniu ujęto 67 wyników stężeń aktywności ^{222}Rn. Największe wyniosło ponad 1500 Bq/dm^3 w Świeradowie-Zdroju, najmniejsze stężenie aktywności (poniżej 1 Bq/dm^3) zanotowano w miejscowości Sątok. Spośród wszystkich ujęć 27 z nich nie spełniało wymogów zawartych w Rozporządzeniu Ministra Zdrowia z dnia 7 grudnia 2017 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi pod względem stężenia aktywności radonu.

Bez odpowiedniego uzdatnienia woda ta nie powinna być, więc spożywana przez ludzi.

Należy także zwrócić uwagę, że poza wodami pochodzącymi z odwiertów (a więc wód głębokiego krążenia), są wśród nich również studnie indywidualne oraz źródła. W źródłach: Zagożdżonów czy Stuletnia Woda stężenie aktywności ^{222}Rn było parokrotnie przekroczone względem referencyjnej wartości dla wody pitnej. Aż 31 ujęć zawierało wodę o zawartości radonu powyżej 74 Bq/dm^3 a więc spełniały wymogi stawiane wodom leczniczym, można je zatem uznać za wody potencjalnie lecznicze.

4. Podsumowanie

Przedstawione wyniki badań charakteryzują się dużym rozrzutem, co z pewnością wynika z faktu, że autorzy cytowanych badań pobierali próbki wód podziemnych z różnych ujęć (studnie, odwierty, źródła itp.). Radon (^{222}Rn) jest gazem, przez co niskie wartości w wodach podziemnych oznaczonych numerami np. 53-64 czy 9-12 mogą być związane z poborem próbek z płytkich warstw wodonośnych. W przypadku, gdzie granitoidy stanowiły skałę zbiornikową (np. próbki 6-8) notuje się wyższe stężenie aktywności ^{222}Rn co jest związane z większymi zawartościami macierzystego ^{226}Ra w tych właśnie skałach. Największe zanotowane wartości występują w wodach uznanych i eksploatowanych, jako wody lecznicze.

Biorąc pod uwagę obowiązujące przepisy prawa dotyczące jakości wód przeznaczonych do spożycia przez ludzi (Rozporządzenie 2017) należy stwierdzić, że 40 z 67 badanych ujęć spełnia wymogi dotyczące stężeń aktywności ^{222}Rn. Co istotne i warte podkreślenia, nie wszystkie wody, które nie spełniają wymogów (posiadają stężenie aktywności $^{222}Rn > 100$ Bq/dm^3) są wodami wykorzystywanymi w celach leczniczych. Są wśród nich również źródła, z których ludzie mogą w sposób swobodny czerpać wodę, nie będąc świadomymi jej składu i zawartości ^{222}Rn. Należy również zaznaczyć, że w przypadku stężenia aktywności ^{222}Rn w wodach leczniczych, nie ma górnej granicy, jaka jest dozwolona i uznana za zdrowotną. W województwie dolnośląskim największe zagrożenie pod względem stężeń aktywności ^{222}Rn występuje w obszarach: Sudetów i bloku, przedsudeckiego co jest związane z budową geologiczną tych regionów.

5. Literatura

Aleksandrowski P., Mazur S., 2002. Collage tectonics in the northeasternmost part of the Variscan Belt: the Sudetes, Bohemian Massif. [In:] Winchester J. A., Pharaoh T. C., Verniers J. Palaeozoic Amalgamation of Central Europe. Geological Society 201: 237-277.

Browne E., Firestone R.B., 1986. Table of radioactivity isotopes. A Wiley-Interscience Publication. John Wiley & Sons.

Collé R., 1995a. A precise determination of the 222Rn half-life by 4-liquid scintillation measurements. Radioactivity & Radiochemistry 6, 1: 16-29.

Collé R., 1995b. Critically evaluated half-life for 222Rn radioactive decay and associated uncertainties. Radioactivity & Radiochemistry 6, 1: 30-40.

Cothern C.R., Smith J.E., 1987. Environmental Radon. Plenum Press.

Cwojdziński, S., 2012. Charakterystyka budowy geologicznej Dolnego Śląska. Państwowy Instytut Geologiczny, Oddział Dolnośląski.

Cymerman Z., 2008. Objaśnienia do szczegółowej mapy geologicznej Polski, 1:50 000. Arkusz Mirsk (794). Państwowy Instytut Geologiczny.

Domin E., Przylibski T.A., 2014. Występowanie ^{222}Rn w wodach podziemnych metamorfiku kaczawskiego na obszarze bloku przedsudeckiego. Interdyscyplinarne zagadnienia w górnictwie i geologii (Drzymała J. red.). Politechnika Wrocławska, Wydz. Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii 5: 33-40

Dziedzic K. (red), 1979. Surowce mineralne Dolnego Śląska. Zakład Narodowy im. Ossolińskich Wydawnictwo Polskiej Akademii Nauk.

Gaździk J., 1957. Szczegółowa mapa geologiczna Sudetów. Skala 1:25 000. Arkusz Sobótka. Instytut Geologiczny.

Guzdenko W. W., Dubinczuk W. T., 1987. Izotopy radia i radon w prirodnych Wodach. Nauka.

Heiserman D.L., 1997. Księga pierwiastków chemicznych. Prószyński i S-ka.

Jaroszewski W., Marks L., Radomski A., 1985. Słownik geologii dynamicznej. Wydawnictwa Geologiczne.

Kłapciński J., 1958. Trias na północny-wschód od wału przedsudeckiego. Rocznik PTG 25: 361-408.

Kowalska A., 2017. praca doktorska: Zależność występowania zwiększonych stężeń aktywności izotopów ^{226}Ra i ^{228}Ra od składu i typu chemicznego wód podziemnych, Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii.

Kryza R., Mazur S., Oberc-Dziedzic T., 2004. The Sudetic geological mosaic: Insights into the root of the Variscan orogen. Przegląd Geologiczny 52, 8/2: 761-773.

Macioszczyk A., Dobrzyński D., Hydrogeochemia strefy aktywnej wymiany wód podziemnych, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2002

Majerowicz A., Maciejewski S., 1979. Gabra. W: Dziedzic K., Kozłowski S., Majerowicz A., Sawicki L. (red.) Surowce mineralne Dolnego Śląska: 207–211. Ossolineum

Mazur S., Aleksandrowski P., Kryza R., Oberc-Dziedzic T., 2006. The Variscan orogen in Poland. Geological Quarterly 50, 1: 89-118.

Migoń P., 2005. Rozwój rzeźby terenu. [W:] Fabiszewski J. (red.) Przyroda Dolnego Śląska: 135–170. Polska Akademia Nauk, Oddział we Wrocławiu.

Miliszkiewicz A., 1978. Radon. PWN.

Oberc J., 1979. Geologia i surowce bloku karkonosko-izerskiego. Rocznik Polskiego Towarzystwa Geologicznego XL, 1: 195-206.

Pachocki K.A., Gorzkowski B., Różycki Z., Wilejczyk E., Smoter J., 2001. Radon ^{222}Rn w wodzie do picia z obszaru Jeleniej Góry, Roczn. PZH 52, 3: 237-246

Pachocki K.A., Gorzkowski B., Różycki Z., Wieprzowski K., Wilejczyk E., Smoter J., 2002. Radon ^{222}Rn w wodzie do picia z terenu Pogórza Izerskiego, Roczn. PZH 53, 4: 371-376.

Pachocki K.A., Wieprzowski K., Bekas M., Różycki Z., 2009. Występowanie radonu ^{222}Rn w wodach leczniczych, Roczn. PZH 60, 2: 129-136.

Piestrzyński A. (red), Banaszak A. (red), Zaleska-Kuczmierczyk M. (red), 2007. Monografia KGHM Polska Miedź S.A.

Przylibski T. A., 2005a. Radon. Składnik swoisty wód leczniczych Sudetów. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.

Przylibski T.A., 2005b. Concentrations of ^{222}Rn in groundwaters flowing through different crystalline rocks: An example from Ślęża Massif (SW Poland). [In:] Proceedings from the International NORM IV (Naturally Occurring Radioactive Materials) Conference, 2004. CD: 201–213, Vienna: 299–304.

Przylibski T. A., 2002. Radon w środowisku wód podziemnych i górnej części litosfery. Wiadomości Chemiczne 56, 11-12: 1003-1033.

Przylibski T.A., Fijałkowska L., Bielecka A., 2008. Potencjalnie lecznicze wody radonowe Masywu Ślęży, Przegląd Geologiczny 56, 8/2: 763-771.

Rozporządzenie, 2017. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 7 grudnia 2017 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi (Dz.U. 2017 poz. 2294).

Samarina W.S., 1997. Gidrogieochimija. Wydawnictwo Uniwersytetu Leningradzkiego.

Skłodowska-Curie M., 1953. Promieniotwórczość. PWN.

Szymański W., 1991. Chemia jądrowa. Wydawnictwo Naukowe PWN.

Walencik A., Kozłowska B., Przylibski T.A., Dorda J., Zipper W., 2010. Natural radioactivity of groundwater from the Przerzeczyn-Zdrój Spa. Nukleonika 55: 169-175

Załącznik 2019. Załącznik do obwieszczenia Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 4 kwietnia 2019 r. (poz. 868): Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r. Prawo geologiczne i górnicze

Znosko J. (red), 1998. Atlas tektoniczny Polski. PiG.

Żelaźniewicz A., 1997. The Sudetes as a Palaeozoic orogen in central Europe. Geological Magazine 134, 5: 691-702.

Żelaźniewicz A., 2005. Przeszłość geologiczna. [w:] Fabiszewski J. (red.) – Przyroda Dolnego Śląska: 61-134. Polska Akademia Nauk, Oddział we Wrocławiu.

Żelaźniewicz A. i Aleksandrowski P., 2008. Regionalizacja tektoniczna Polski – Polska południowo-zachodnia. Przegląd Geologiczny 56, 10: 904–911.

Pogłębienie toru wodnego Szczecin-Świnoujście do 12,5 m perspektywą wzrostu zdolności przeładunkowej terminalu kontenerowego w porcie Szczecin

Możdrzeń Daria [(1)]

[1] Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Techniki Morskiej i Transportu, Daria Możdrzeń: daria.mozdrzen@zut.edu.pl

Streszczenie
Widoczny wzrost przeładunków kontenerów w porcie Szczecin stwarza potrzebę dostosowania terminalu kontenerowego do obsługi większej liczby jednostek kontenerowych. W związku z tym, w celu usprawnienia tej obsługi, realizowane i planowane są inwestycje infrastrukturalne na terenie portu i jego najbliższego otoczenia. Jedną z takich inwestycji jest pogłębienie toru wodnego Szczecin-Świnoujście. Celem opracowania jest analiza zdolności przeładunkowej terminalu kontenerowego w porcie Szczecin po pogłębieniu toru wodnego Szczecin-Świnoujście do 12,5 m. W pracy scharakteryzowano terminal kontenerowy w Szczecinie. Przedstawiono metodę analizy zdolności przeładunkowej terminali kontenerowych oraz przeprowadzono symulację przeładunków wybranego terminalu przy założonych warunkach. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń stwierdzono, że pogłębienie toru wodnego Szczecin-Świnoujście wpłynie korzystnie na pracę terminalu kontenerowego w porcie Szczecin i przyczyni się do zwiększenia jego zdolności przeładunkowej.

Słowa kluczowe: tor wodny Szczecin-Świnoujście, kontenery, terminal kontenerowy, port Szczecin, zdolność przeładunkowa

Dredging the Szczecin-Świnoujście fairway to 12,5 m as the prospect of handling increase at the container terminal in Szczecin port

Summary
The visible increase in container handling at the port of Szczecin creates the need to adapt the container terminal to support a larger number of container units. Therefore, in order to improve this service, infrastructure investments have been implemented and planned in the port area and its immediate surroundings. One of such investment is the dredging of the Szczecin-Świnoujście fairway. The aim of the study is to analyze the handling capacity of the container terminal in the port of Szczecin after the dredging of the Szczecin-Świnoujście fairway to 12,5 m. The paper characterizes the container terminal in Szczecin. A method of analyzing the handling capacity of container terminals was presented and a simulation of reloading of the selected terminal was carried out under the assumed conditions. Based on the calculations carried out, it was found that the dredging of the Szczecin-Świnoujście fairway will have a positive effect on the operation of the container terminal in the port of Szczecin and contribute to the increase of its handling capacity.

Keywords: Szczecin-Świnoujście fairway, containers, container terminal, port of Szczecin, handling capacity

1. Wstęp

Obserwowany dynamiczny rozwój morskiej żeglugi kontenerowej związany jest z rozwojem handlu międzynarodowego, w tym importu i eksportu towarów. Wymiana handlowa pomiędzy różnymi regionami świata jest realizowana z wykorzystaniem specjalistycznej floty statków, w tym kontenerowców. Statki te kursują pomiędzy portami morskimi, na terenie, których funkcjonują terminale przeładunkowe, realizujące obsługę statków, ładunków i środków transportu zaplecza.

Infrastruktura portów i ich zaplecza warunkuje funkcjonowanie znajdujących się w nich terminali przeładunkowych. Ważnym aspektem jest, zatem, aby infrastruktura ta była dostosowana do potrzeb portu i umożliwiała osiągnięcie jak najlepszych korzyści dla terminali przeładunkowych. Korzyści te mogą wynikać na przykład ze zwiększenia obrotów przeładunkowych wskutek obsługi większych jednostek pływających, przyśpieszenia realizacji operacji przeładunkowych itp.

W Europie jest wiele portów usytuowanych w głębi lądu, w tym port w Hamburgu (Niemcy), który dzieli od morza ok. 140 km (Admiralty, 2005), bądź port w Antwerpii (Belgia), oddalony od morza o ok. 130 km (Admiralty, 2006). Porty takie połączone są z morskimi szklakami, rzekami lub kanałami stanowiąc ważne centra gospodarcze państw, w których funkcjonują.

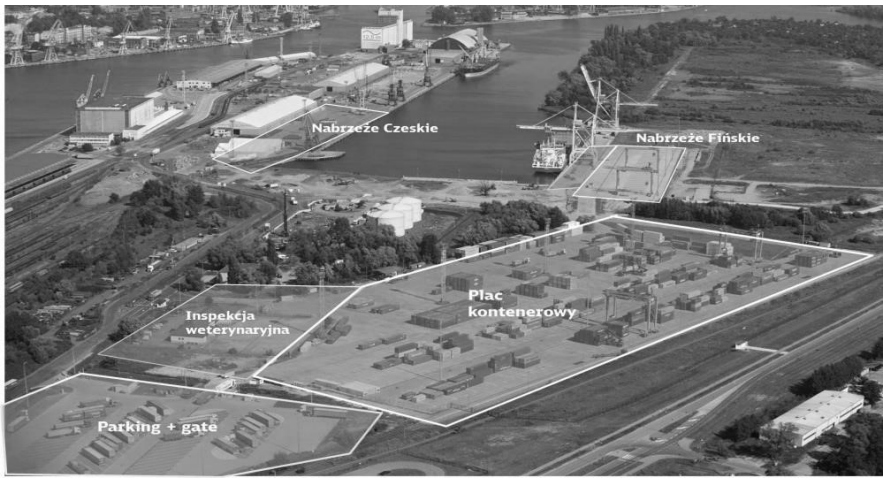
Przykładem portu, którego funkcjonowanie jest uzależnione od stanu infrastruktury dostępu jest także port morski w Szczecinie. Port ten położony jest na Równinie Odrzańsko-Zalewowej i znajduje się nad rzeką Odrą. Jego odległość od Morza Bałtyckiego w linii prostej wynosi 65 km (Neider, 2008), a długość toru wodnego Szczecin-Świnoujście wynosi 67,7 km, minimalna głębokość – 10,5 m, natomiast szerokość waha się od 90 do 150 m (Załącznik nr 1, 2017). Tor wodny umownie dzielony jest na trzy części, takie jak: śródlądowy odcinek toru, zalewowy odcinek oraz tor wodny. Znajdują się na nim 2 miejsca do mijania statków – mijanki i 9 obrotnic (Chrzanowski i in., 2010). Niestety, parametry te w chili obecnej nie pozwalają na obsługę dużych statków. Port może przyjmować statki o maksymalnym zanurzeniu 9,15 m i długości całkowitej nie przekraczającej 215 m (Program Funkcjonalno-Użytkowy, 2017).

Wartym uwagi jest fakt, że szczeciński port jest dostępny przez cały rok, jego obszar wynosi ponad 900 ha, posiada on 11,7 km nabrzeży przeładunkowych (Chmielewska-Przybysz, 2013; Rocznik Statystyczny Gospodarki Morskiej, 2018).

Na terenie portu w Szczecinie funkcjonuje terminal kontenerowy, zlokalizowany na wyspie Ostrów Grabowski. Od strony wody prowadzi do niego Kanał Dębicki, przy którym leży Nabrzeże Spółdzielcze, Czeskie, Słowackie oraz wybudowane w 2012 r. Nabrzeże Fińskie. W chwili obecnej terminal jest zarządzany przez spółkę DB Port Szczecin (www 5, 2019).

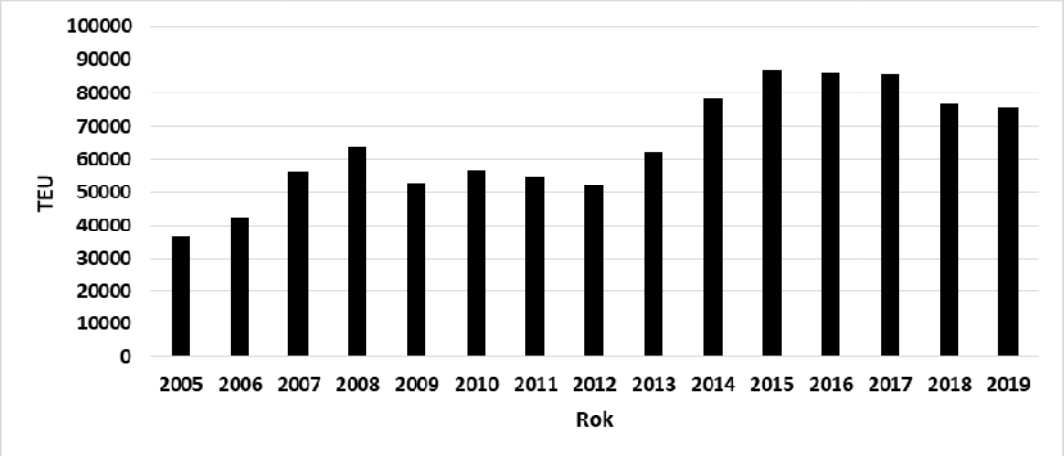
Nabrzeże Fińskie, przy którym obecnie realizowane są przeładunki na terminalu kontenerowym w Szczecinie (Rys.1), ma długość 300 m, natomiast długość operacyjna wynosi 240 m. Nabrzeże jest przystosowane do obsługi statków kontenerowych o pojemności

wynoszącej ok. 1600 TEU (ang. twenty-foot equivalent unit) (Neider, 2008; Wiśnicki i in., 2007).



Rys.1. Terminal kontenerowy przy Nabrzeżu Fińskim wraz z przyległą infrastrukturą (www 2, 2019)

Do terminala kontenerowego przynależą dwa place kontenerowe. Jeden znajduje się przy nabrzeżu Fińskim, natomiast drugi jest zlokalizowany nieopodal Granicznego Punktu Kontroli Weterynaryjnej. Terminal posiada 2 suwnice nabrzeżne STS (ang. ship to shore) o udźwigu 45 t, 4 suwnice placowe typu RTG (ang. rubber tires gantry), 3 wozy wysięgnikowe typu Reach Stacker itp. (www 2, 2019). Place składowe mają pojemność 4000 TEU. Terminal wyposażony jest w 157 przyłączy elektrycznych dla kontenerów chłodniczych. Na jego terenie zlokalizowany jest także parking dla 85 pojazdów ciężarowych (Materiały wewnętrzne spółki DB Port Szczecin). Rysunek 2 przedstawia przeładunki kontenerów w TEU w porcie Szczecin.



Rys.2. Przeładunki kontenerów w porcie Szczecin w latach 2005-2019 (opracowanie własne na podstawie: Materiały wewnętrzne spółki DB Port Szczecin; www 1, 2019)

Oferowane przez terminal kontenerowy usługi to nie tylko składowanie i przeładunek kontenerów (Filina-Dawidowicz i in., 2014), ale także obsługa transportu intermodalnego (Kabus i in., 2016), formowanie i rozformowanie kontenerów, usługi depotowe, pełna

obsługa logistyczna kontenerów chłodniczych na terenie portu, obsługa ładunków niebezpiecznych, pobyt ładunku w strefie wolnocłowej itp. (www 2, 2019).

Podczas pierwszego etapu budowy terminalu w 2007 roku zakładano, że roczna zdolność przeładunkowa terminalu wynosić będzie 80 tys. TEU (www 7, 2019). Z oficjalnej strony DB Port Szczecin wynika, że obecna zdolność przeładunkowa terminala wynosi około 150 tys. TEU rocznie. Wiąże się to m.in. z faktem, że do portu nie mogą zawijać statki, których zanurzenie przekracza 9,15 m.

Koncepcja pogłębienia toru wodnego Szczecin-Świnoujście zakłada pogłębienie toru do głębokości technicznej 12,5 m (Tab.1), i użytkowej głębokości 11,05 m (Borowiec, 2013).

Tabela 1. Etapy modernizacji toru wodnego Szczecin-Świnoujście (opracowanie własne na podstawie: Załącznik nr 1, 2017; www 6, 2019)

Lp.	Etap modernizacji	Rodzaj przeprowadzonych działań modernizacyjnych	Lata realizacji zadania
1	I	dostosowanie do głębokości 12,5 m umocnień brzegowych Kanału Piastowskiego od 13 km do 16 km oraz budowa falochronów I Bramy Torowej	2000-2004
2	II	dostosowanie do głębokości 12,5 m umocnień Kanału Piastowskiego i Kanału Mielińskiego od 5 km do 13 km	2009-2015
3	III	uzyskanie głębokości minimalnej 12,5 m na całej długości toru wodnego 12,5 m na całej długości toru wodnego Szczecin-Świnoujście	2019-2022

Celem rozdziału pracy jest analiza zdolności przeładunkowej terminalu kontenerowego w porcie Szczecin zlokalizowanego w Kanale Dębickim przy Nabrzeżu Fińskim. Przeprowadzono symulację wielkości przeładunków kontenerów na tym terminalu po pogłębieniu toru wodnego Szczecin-Świnoujście do 12,5 m przy założonych warunkach.

2. Materiały i metody

Zdolność przeładunkowa portu w literaturze przedmiotu określana jest, jako zdolność przepustowa lub produkcyjna, która określa ilość oraz jakość usług, które port jest w stanie wykonać w ciągu założonego czasu przy wykorzystaniu odpowiednich narzędzi (Kotowska, 2010; Kuźma, 2003; Kreft i Salomon, 1998). Do czynników, które mogą wpłynąć na zwiększenie zdolności przeładunkowej można zaliczyć (Kuźma, 2003):

- stan ilościowy i jakościowy oraz kwalifikacje zawodowe pracowników,
- stopień wyposażenia portu w potencjał techniczny, czyli urządzenia przeładunkowe, sprzęt zmechanizowany, urządzenia składowe, tabor pływający, a także ich parametry techniczne,
- poziom i stan techniczno-eksploatacyjny portowego układu komunikacyjnego,
- aktualną organizację pracy i produkcji,
- stosowane technologie przeładunku,

- liczbę stanowisk przeładunkowych przy nabrzeżach oraz ich głębokość,
- zmianowość pracy portu,
- wykorzystywane techniki informatyczne do zarządzania przedsiębiorstwem portowym,
- zespół przepisów i zwyczajów portowych.

W literaturze opisane są metody wyznaczania zdolności przeładunkowej portów oraz znajdujących się w nich terminali (Kotowska, 2010; Kreft i Salomon, 1998). W niniejszym opracowaniu do analizy zdolności przeładunkowej Nabrzeża Fińskiego przynależnego do terminalu kontenerowego w Szczecinie wybrano metodę Z. Pełczyńskiego (Kreft i Salomon, 1998), zmodyfikowaną przez I. Kotowską (Kotowska, 2010). Metoda ta umożliwia obliczenia czasu postoju statku przy nabrzeżu, czasu martwego nabrzeża oraz zdolności przeładunkowej przy wykorzystaniu następujących relacji:

- średni czas postoju statku przy nabrzeżu (Kreft i Salomon, 1998):

$$TP = \frac{N_{śr}}{W_T * k}\ [godz.], \tag{1}$$

gdzie:

$N_{śr}$ – średnia pojemność statku [TEU],

W_T – wydajność urządzenia przeładunkowego [TEU/godz.],

k – liczba urządzeń nabrzeżnych biorących udział przy przeładunku.

- czas martwy nabrzeża – brak operacji przeładunkowych przy nabrzeżu (Kreft i Salomon, 1998):

$$TM = \frac{d * N_{śr}}{(365-d) * W_T * k}\ [godz.], \tag{2}$$

gdzie:

d – liczba dni wstrzymujących prace przeładunkowe (dni ustawowo wolne od pracy w ciągu roku, liczba dni awarii i planowanych remontów/przeglądów oraz liczba dni niekorzystnych warunków meteorologicznych; suwnice STS mogą opracować przy wietrze nie przekraczającym 20 m/s. W dalszej części pracy wykonano obliczenia zdolności przeładunkowej dla trzech różnych wartości d (50, 60, 70)

- zdolność przeładunkowa dla nabrzeża (Kreft i Salomon, 1998):

$$ZP_{ss} = \frac{N_{śr} * B}{(TP + TM_{pn} + T_{rn} + T_{nr})}\ [TEU], \tag{3}$$

gdzie:

B – liczba godzin pracy nabrzeża w ciągu roku [godz.],

TP – średni czas postoju statku przy nabrzeżu [godz.],

T_{pn} – czas postoju statku przy nabrzeżu (po zacumowaniu przed przeładunkiem i po przeładunku do odcumowania) [godz.],

T_{rn} – czas przepłynięcia statku z redy do nabrzeża [godz.],

T_{nr} – czas przepłynięcia statku z nabrzeża do redy [godz.].

Analiza zdolności przeładunkowej została przeprowadzona przy wykorzystaniu materiałów pozyskanych od DB Port Szczecin (Materiały wewnętrzne spółki DB Port Szczecin).

Obliczenia zostały przeprowadzone dla dwóch wariantów pracy Nabrzeża Fińskiego:

- Wariant I. Analizie podlega zdolność przeładunkowa przed pogłębieniem toru wodnego Szczecin-Świnoujście do 12,5 m. Założono, że przy Nabrzeżu Fińskim cumują statki o maksymalnej pojemności 1300 TEU.
- Wariant II. Analizie podlega zdolność przeładunkowa po pogłębieniu toru wodnego do 12,5 m. Rozważono tu dwa przypadki:
  - II A – analizie poddano pracę Nabrzeża Fińskiego. Obliczenia te będą się różnić od obliczeń w wariancie I założono maksymalną pojemnością statków, które będą mogły cumować przy nabrzeżu – 2500 TEU.
  - II B – zakłada, że oprócz Nabrzeża Fińskiego kontenery będą obsługiwane na wybudowanym i oddanym do eksploatacji Nabrzeżu Norweskim, które jest uwzględnione w planach rozwoju terminalu po pogłębieniu toru wodnego. Do obliczeń przyjmuje się założenie, że liczba urządzeń przeładunkowych przy dwóch nabrzeżach będzie wynosić 4, a liczba stanowisk przy nabrzeżu – 2.

Poniżej przedstawiono wyniki obliczeń zdolności przeładunkowych według relacji (3) zgodne z założeniami i wariantami przedstawionymi w tabeli 2.

3. Wyniki

Przeprowadzona analiza zdolności przeładunkowej terminalu kontenerowego w Szczecinie została oparta o założenia przedstawione w tabeli 2. Założenia te uwzględniają materiały uzyskane od DB Port Szczecin, charakteryzujące pracę terminalu kontenerowego. Biorąc pod uwagę sformułowane założenia, przeprowadzono obliczenia dla wybranych wariantów pracy terminalu. Wyniki przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 2. Założenia do obliczenia zdolności przeładunkowej (opracowanie własne)

Lp.	Wyszczególnienie	Przed modernizacją	Po modernizacji	
			II A	II B
1	Nazwa nabrzeża	Fińskie	Fińskie	Fińskie + Norweskie
2	Długość nabrzeży przeładunkowych [m]	300	300	300 + 300
3	Głębokość techniczna toru wodnego [m]	10,15	12,5	12,5
4	Maksymalne zanurzenie obsługiwanych statków [m]	9,15	11,05	11,05
5	Wydajność urządzenia przeładunkowego [TEU/godz.]	20	20	20
6	Liczba urządzeń nabrzeżnych [szt.]	2	2	2 + 2
7	Liczba urządzeń nabrzeżnych biorących udział przy przeładunku statku/ów [szt.]	2	2	4*
8	Liczba stanowisk przeładunkowych przy nabrzeżu	1	1	2*
9	Liczba urządzeń obsługujących jedno stanowisko [szt.]	2	2	2
10	Maksymalna pojemność obsługiwanych statków [TEU]	1300**	2500	2500
11	Liczba statków przy nabrzeżu	1	1	2*
12	Liczba godzin pracy nabrzeża w ciągu roku [godz.]	1 rok = 365 dni * 24 godz. = 8760		
13	Czas przepłynięcia statku z redy do nabrzeża [godz.]	4	4	4
14	Czas przepłynięcia statku z nabrzeża do redy [godz.]	4	4	4
15	Czas postoju statku przy nabrzeżu (po zacumowaniu przed przeładunkiem i po przeładunku do odcumowania) [godz.]	5	5	5
* Obsługa przy dwóch nabrzeżach (Fińskie + Norweskie) ** W chwili obecnej terminal obsługuje statki kontenerowe o pojemności 600 – 700 TEU				

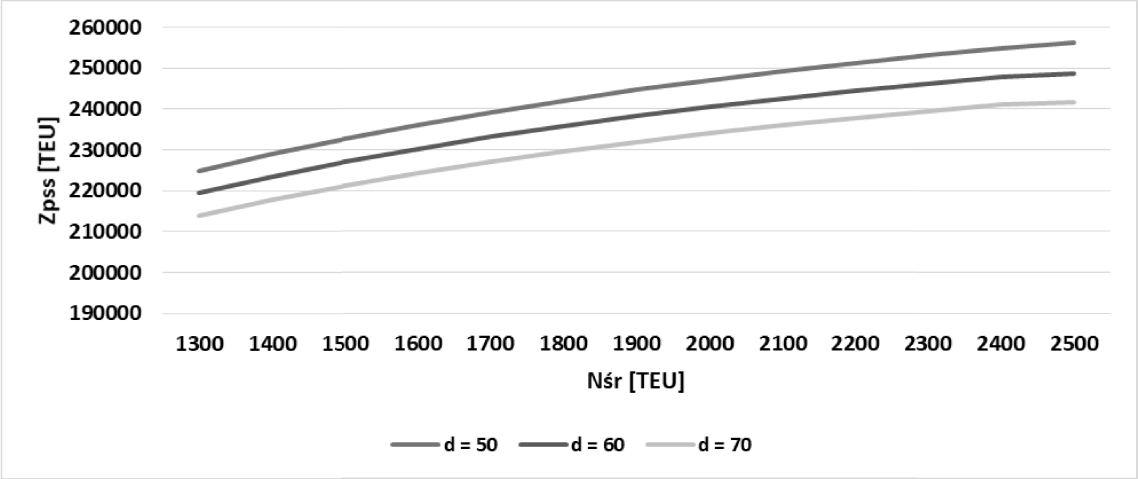
Na podstawie przeprowadzonych obliczeń można stwierdzić, że przy założonych warunkach pracy terminalu obliczona zdolność przeładunkowa dla wariantu pierwszego, charakteryzującego stan obecny jest znacząco większa 224 798 TEU przy założeniu d = 50, niż wynika z oficjalnej strony terminalu (150 000 TEU rocznie). Jest to uwarunkowane tym, że do obliczeń przyjęto maksymalną pojemność statku 1300 TEU, a w chwili obecnej terminal obsługuje statki kontenerowego pojemności 600-700 TEU. Przy założeniu, że do terminalu zawijają statki o pojemności 700 TEU i przy założonej liczbie dni wstrzymujące prace przeładunkowe (50), obliczona wartość zdolności przeładunkowej będzie wynosić 184 267 TEU.

Tabela 3. Wyniki obliczeń analizowanej zdolności przeładunkowej (opracowanie własne)

Lp.	Wyszczególnienie	Nabrzeże Fińskie		Nabrzeże Fińskie + Norweskie
		Przed modernizacją	Po modernizacji	
			II A	II B
1	Czas postoju statku przy nabrzeżu w czasie przeładunku [godz.]	32,5	62,5	31,25
2	Zdolność przeładunkowa stanowiska statkowego, d= 50 [TEU/rok]	224 798	256 378	445 028
3	Zdolność przeładunkowa stanowiska statkowego, d= 60 [TEU/rok]	219 449	249 444	434 545
4	Zdolność przeładunkowa stanowiska statkowego, d= 70 [TEU/rok]	214 012	242 443	423 882

Analiza wyników obliczeń dla wariantu drugiego, z wykorzystaniem dwóch koncepcji rozbudowy terminalu, wskazuje na możliwy wzrost zdolności przeładunkowej po pogłębieniu toru wodnego do 12,5 m do poziomu ok. 256 378 TEU dla etapu II A. Dla wariantu II B uzyskuje się istotny wzrost zdolności przeładunkowej do 445 028 TEU i wiąże się on z przedłużeniem Nabrzeża Fińskiego o nowe Nabrzeże Norweskie. Należy podkreślić, że przeprowadzone obliczenia mają charakter szacunkowy.

Uwzględniając przyjęte założenia, możliwe było określenie zależności zdolności przeładunkowej terminalu kontenerowego od wielkości obsługiwanych statków (Rys. 3). W tej analizie założono, że będzie pracować tylko jedno nabrzeże (Wariant II A), które będzie wyposażone w dwa urządzenia przeładunkowe o wydajności urządzeń przeładunkowych wynoszących 20 TEU/godz., oraz liczba dni wstrzymujących prace przeładunkowe będzie wynosić 50, 60 i 70 dni. Można zauważyć, że zdolność przeładunkowa terminalu kontenerowego wzrasta proporcjonalnie ze wzrostem wielkości obsługiwanych statków.



Rys.3. Prognozowany wzrost zdolności przeładunkowej (opracowanie własne)

Przeprowadzone wyniki badań zdolności przeładunkowej dla terminalu kontenerowego w porcie Szczecin zlokalizowanego przy Nabrzeżu Fińskim wskazują, że wprowadzenie zmiany modernizacyjnej, w tym przypadku pogłębienia toru wodnego Szczecin-Świnoujście do 12,5 m, przyczyni się do znacznego zwiększenia przepustowości terminalu kontenerowego.

4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonej analizy obliczenia zdolności przeładunkowej obecnej i przyszłej terminalu kontenerowego w Szczecinie można stwierdzić, że do grupy najistotniejszych elementów przy obliczaniu zdolności przeładunkowej należy m.in. czas postoju statku przed przeładunkiem, czas postoju statku po operacjach przeładunkowych, czas potrzebny do przybycia z redy do portu i w odwrotnej relacji, wydajność przeładunkowa urządzeń oraz liczba dni wstrzymujących prace przeładunkowe. W związku z tym należy podkreślić, że duży wpływ na uzyskane wyniki mają założenia przyjęte do obliczeń.

Autorka przeprowadziła analizę zdolności przeładunkowej szczecińskiego terminalu kontenerowego dla dwóch wariantów jego funkcjonowania. Pierwszy wariant dotyczy istniejącej obecnie sytuacji (jedno nabrzeże przeładunkowe o głębokości 9,15 m), a w drugim wariancie rozważono wpływ na zdolność przeładunkową po pogłębieniu toru wodnego do głębokości 12,5 m oraz przedłużeniu Nabrzeża Fińskiego o nowe Nabrzeże Norweskie.

Podsumowując, przeprowadzone analizy wskazały, że pogłębienie toru wodnego Szczecin-Świnoujście do 12,5 m znacząco wpłynie na wzrost zdolności przeładunkowej terminalu kontenerowego w Szczecinie. Wykonane obliczenia udowodniły, że zdolność przeładunkowa terminalu kontenerowego po wybudowaniu nowego nabrzeża wzrosłaby prawie dwukrotnie. Wprowadzenie zmian modernizacyjnych umożliwiłoby jednoczesną obsługę większej liczby statków, przyczyniając się do zwiększenia obrotu ładunkami czy wzrostu korzyści finansowych wynikających z opłat portowych. W istocie pogłębienie toru wodnego wpłynęłoby nie tylko na poprawę zdolności przeładunkowej analizowanego terminalu kontenerowego, lecz na funkcjonowanie całego portu oraz jego otoczenia skutkując podniesieniem konkurencyjności na tle innych portów znajdujących się w rejonie Morza Bałtyckiego.

5. Literatura

Admiralty Sailing Directions, Dovert Strait Pilot, NP28, 7th Edition 2006, United Kingdom, Hydrographic Office, s. 188.

Admiralty Sailing Directions, North Sea (East) Pilot, NP55, 5th Edition 2005, United Kingdom, Hydrographic Office, s. 219.

Borowiec, A., 2013. 12,5 m do Szczecina- Stan obecny i plan dalszego działania, Prezentacja Urzędu Morskiego w Szczecinie, I Międzynarodowy Kongres w Szczecinie, Szczecin 2013.

Chmielewska-Przybysz M., 2013. Miejsce portu szczecińskiego w sieci polskich portów morskich, w: Semenov I. N., Wiktorowska-Jasik A. (red.): Transport w regionie pomorza zachodniego, Wydawnictwo Uczelniane ZUT w Szczecinie, Szczecin, s. 110-111.

Chrzanowski I. i in., 2010. Studium przyszłych społeczno-ekonomicznych efektów pogłębienia toru wodnego Szczecin – Świnoujście do 12,5 m, Instytut Analiz, Diagnoz i Prognoz Gospodarczych, Szczecin.

Filina-Dawidowicz, L., Kaup, M., Wiktorowska-Jasik, A., 2014. Zintegrowany transport wodny i lądowy, Wydawnictwo Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, Szczecin.

Kabus J., Strulak-Wójcikiewicz R., Nurzyńska A., 2016. Logistyczne aspekty transportu, innowacje – zrównoważony rozwój – bezpieczeństwo, Wydawnictwo Naukowe SOPHIA, Katowice.

Kotowska I., 2010. Zdolność przepustowa jako element konkurencyjności portu morskiego, Logistyka, Tom 4, s. 1-9.

Kreft K., Salomon A., 1998. Narzędzia informatyczne w projektowaniu działalności portów morskich, Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk.

Kuźma L. (red.), 2003. Ekonomika portów morskich i polityka portowa, Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk.

Materiały wewnętrzne spółki DB Port Szczecin.

Neider J., 2008. Polskie porty morskie, Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk.

Wiśnicki B., Klabacha M., Borowiec A., 2007. Analiza wpływu głębokości toru wodnego Szczecin – Świnoujście na rozwój zespołu portowego Szczecin – Świnoujście, w: Funkcjonowanie i rozwój polskich portów morskich w świetle zapisów „Zielonej Księgi" polityki morskiej Unii Europejskiej, VII Konferencja Naukowa PORTY MORSKIE 2007, Szczecin, s. 329-337.

Program Funkcjonalno-Użytkowy dla inwestycji pod nazwą "*Modernizacja toru wodnego Świnoujście-Szczecin do głębokości 12,5m*", Szczecin 2017, s. 6, http://www.ums.gov.pl/przetargi/nieograniczone/2017/siwz_29122017_z8.pdf , (dostęp: on-line: 08.01.2020).

Rocznik Statystyczny Gospodarki Morskiej 2018, 2018. Główny Urząd Statystyczny Urząd statystyczny w Szczecinie, Warszawa Szczecin, s. 89.

Załącznika nr 1 do SIWZ, *Obsługa prawna inwestycji pn. „Modernizacja toru wodnego Świnoujście – Szczecin do głębokości 12,5”*, http://www.ums.gov.pl/przetargi/nieograniczone/2017/siwz_26042017_z1.pdf, (dostęp on-line: 25.04.2019).

www 1, http://www.port.szczecin.pl/pl/, (dostęp on-line: 10.12.2019).

www 2, https://portszczecin.deutschebahn.com/dbportszczecin-pl, (dostęp on-line: 10.12.2019).

www 3, https://www.ekologia.pl/pogoda/polska/zachodniopomorskie/szczecin/archiwum, (dostęp on-line: 14.01.2020).

www 4, https://www.kalendarzswiat.pl/swieta/wolne_od_pracy/2019, (dostęp on-line: 12.11.2019).

www 5, https://www.urbanity.pl/zachodniopomorskie/szczecin/terminal-kontenerowy-db-port-szczecin,b594, (dostęp on-line: 10.12.2019).

www 6, https://zagle.se.pl/zeglarstwo/poglebienie-toru-wodnego-swinoujscie-szczecin-ostatnia-umowa-podpisana-aa-d8EZ-DJoB-zEee.html, (dostęp on-line: 19.12.2019).

www 7, www.port.szczecin.pl/pl/spolka/strategia-i-rozwój/rozwój/inwestycje-ukończone/terminal-kontenerowy/#, (dostęp on-line: 10.12.2019).

Przepływy turbulentne w otaczającym nas świecie

Paluszewska Agata [(1)]

[1] Katedra Maszyn Cieplnych, Politechnika Częstochowska
Agata Paluszewska: agata660@gmail.com

Streszczenie
Istnieją dwa rodzaje przepływów płynów – uwarstwione (zwane laminarnymi) oraz burzliwe (zwane turbulentnymi). Podczas gdy z przepływami laminarnymi spotykamy się bardzo rzadko, z przepływami turbulentnymi mamy do czynienia w życiu codziennym. W ostatnich czasach intensywnie rozwijają się badania poświęcone temu zagadnieniu. W pracy tej omówione zostały wybrane zagadnienia związane z przepływem turbulentnym, takie jak porównanie do przepływu uwarstwionego, jego właściwości, metody modelowania, krótki rys historyczny badań przepływów tego rodzaju. Ponadto pokazane zostały, wraz z omówieniem, przykłady występowania przepływów turbulentnych i zastosowania modeli turbulencji.

Słowa kluczowe: mechanika płynów, przepływ turbulentny, modele turbulencji

Turbulent flows in real-world

Summary
There are two different types of fluid flows – laminar flows and turbulent flows. While the laminar flow occurs very rarely, turbulent flows are surrounding us every day. Nowadays there are many of studies on turbulence and these are being continuosly developed. In this paper we discuss some of turbulence issues such as comparison to the laminar flow, its properties, modelling methods, short historical overview of research on turbulent flows. Furthermore we showed some examples of appearances of turbulence together with the discussion and applications of turbulence modeling.

Keywords: fluid mechanics, turbulent flow, turbulence modelling

1. Wstęp

Jeśli przyjrzymy się otaczającym nam przepływom, zauważymy, że dzielą się one na dwa rodzaje. Pierwszy z nich to przepływ regularny, w uporządkowanych, niezakłócających się warstwach – tzw. przepływ laminarny. Z tym przepływem mamy rzadko do czynienia, gdyż występuje on tylko przy niewielkich prędkościach przepływu. Drugi z nich jest to przepływ bardziej skomplikowany, chaotyczny, w którym występują wiry i inne struktury koherentne oraz fluktuacje prędkości, tzw. przepływ turbulentny (zwany też burzliwym). Prędkość oraz ciśnienie mają losowy charakter zarówno w czasie, jak i przestrzeni. Rodzaj przepływu możemy ustalić na podstawie tzw. liczby Reynoldsa (bezwymiarowa wielkość kryterialna). Wartość krytycznej liczby Reynoldsa, powyżej której zachodzi przejście laminarno-turbulentne zależy od typu przepływu. Większość występujących w świecie przepływów ma charakter turbulentny i to właśnie im przyjrzymy się dokładniej w tym artykule.

Codzienne życie daje nam intuicyjną wiedzę na temat turbulencji w płynach: dym z papierosa lub znad ognia wykazuje nieuporządkowane zachowanie charakterystyczne dla

ruchu powietrza, które go przenosi. Wiatr podlega gwałtownym zmianom kierunku i prędkości, co może mieć dramatyczne konsekwencje dla marynarza lub lotniarza. Podczas podróży samolotem często słyszy się słowo „turbulencja", związane z zapinaniem pasów bezpieczeństwa. Turbulencja jest również używana do opisu przepływu strumienia, ma to ważne konsekwencje m.in. w rzece w odniesieniu do transportu osadów i ruchu koryta. Szybki przepływ dowolnego płynu przechodzącego przez przeszkodę lub płat powoduje powstanie turbulencji w warstwach przyściennych i wywołuje turbulentny ślad, który zwiększa opór wywierany przez przepływ na przeszkodę - dlatego pożądanie jest uniknięcie turbulencji, aby uzyskać lepszą wydajność aerodynamiczną samochodów lub samolotów. Większości prądów atmosferycznych lub oceanicznych nie można dokładnie przewidzieć i należą one do kategorii przepływów turbulentnych, nawet w dużych skalach planetarnych. Małe turbulencje w atmosferze mogą stanowić przeszkodę w dokładności obserwacji astronomicznych, w związku z czym miejsca obserwacji muszą być umyślnie wybierane. Atmosfery planet, takich jak Jowisz i Saturn, atmosfera słoneczna oraz zewnętrzne jądro Ziemi są turbulentne. Galaktyki wyglądają uderzająco jak wiry, które są obserwowane w turbulentnych przepływach, takich jak warstwa mieszania między dwoma przepływami o różnej prędkości. Turbulencje powstają również w zewnętrznej magnetosferze Ziemi z powodu rozwoju niestabilności spowodowanej interakcją wiatru słonecznego z magnetosferą. Liczne inne przykłady przepływów turbulentnych powstają w lotnictwie, hydraulice, inżynierii nuklearnej i chemicznej, oceanografii, meteorologii, astrofizyce i geofizyce wewnętrznej. (Lesieur, 2008)

2. Historia

Myśliciele i filozofowie od zawsze byli zaintrygowani zachodzącymi w otaczającym nas świecie zjawiskami. Przepływy cieczy i gazów, ze względu na swą złożoną, a co za tym idzie – interesującą naturę stanowiły ważne pole badań. Już w starożytnych czasach w swoim dziele „Meteorologica" Arystoteles zapoczątkował badania nad zjawiskami atmosferycznymi. Kartezjusz obserwował ciała niebieskie i badał oddziaływanie wirów na ich ruch. Natomiast Leonardo da Vinci fascynował się burzliwym przepływem wody, porównując go do włosów, które wykazują dwa ruchy: te spowodowane swoim ciężarem oraz te spowodowane kierunkiem ich skręcenia.

Rys. 1. Leonardo da Vinci i jego rozmyślania nad burzliwie przepływającą wodą (źródło: https://smartwatermagazine.com/blogs/susan-broomhall/how-leonardo-da-vinci-master-water-explored-power-and-beauty-its-flow)

Dwa różne rodzaje przepływów pierwszy zauważył Ludwig Hagen w latach 30-stych XIX wieku i podjął się on badań nad zjawiskiem turbulencji.

W późniejszych latach, po sformułowaniu zasad dynamiki Newtona, stał się możliwy analityczny opis przepływów. Ostatecznie możliwe stało się podanie równania Naviera – Stokesa dla przepływu nieściśliwego:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla)\vec{u} = -\nabla p + v\nabla^2\vec{u} + \vec{F}$$

gdzie:

$\vec{u}$ – wektor prędkości

p – ciśnienie

v – lepkość kinematyczna

$\vec{F}$ – wektor jednostkowych sił masowych

∇ – operator nabla

Gdy dołączymy do tego równania odpowiednie warunki brzegowe oraz równanie ciągłości, otrzymamy zamknięty układ równań, czyli taki, w którym mamy tę samą liczbę równań, co niewiadomych. Jednak układ ten nie jest analitycznie rozwiązywalny dla każdego przepływu. Przy zastosowaniu metody DNS (Direct Numerical Simulation) jesteśmy w stanie uzyskać pełne, trójwymiarowe, chwilowe pole rozważanego przepływu. Jednak metoda ta wymaga ogromnych nakładów obliczeniowych, dlatego rozwija się metody przybliżone. (Błoński, 2009)

W 1883 roku Osborne Reynolds wykonał kluczowe dla dalszego rozwoju badań turbulencji doświadczenia. Obserwując przepływ wody w przezroczystych rurkach, umieścił on na osi rurki kryształek nadmanganianu potasu, który rozpuszczał się i w konsekwencji

barwił strugę przepływającej cieczy na fioletowo. Zauważył on, że w zależności od prędkości przepływu, struga zachowywała się w różny sposób. Przy małej prędkości zabarwiona struga cieczy tworzyła kształt linii prostej równoległej do osi rurki. Oznaczało to ruch laminarny cieczy. Jednak po przekroczeniu pewnej wartości krytycznej ruch zabarwionego płynu ulegał zmianie – widoczne były rozproszenia i zamącenie wody. Oznaczało to, że płyn przeszedł w ruch turbulentny.

Stan przepływu płynu zależy od bezwymiarowego parametru, znanego dziś jako liczba podobieństwa Reynoldsa:

$$Re = \frac{vl}{\nu},$$

gdzie:

v – prędkość cieczy

ν – lepkość kinematyczna cieczy

l – długość charakterystyczna zagadnienia,

Liczba ta określa występujący podczas przepływu stosunek sił bezwładności do sił lepkości.

Zachodzi zależność:

$$v_{kr} = Re_{kr} \frac{\nu}{R},$$

gdzie:

v_{kr} – wartość prędkości krytycznej

R – promień rurki, w której odbywa się przepływ

Rozróżniamy dwie wartości krytyczne liczby Reynoldsa, przy których ruch laminarny przechodzi w burzliwy: dolną oraz górną. Wartość dolną oznaczamy Re_d i w zagadnieniach technicznych dla przepływu w rurze przyjmujemy $Re_d \approx 2300$. Powyżej drugiej wartości krytycznej – wartości górnej Re_g - nie jest możliwe utrzymanie przepływu laminarnego. Dla przepływu w rurze przyjmuje się $Re_g \approx 50000$.

Z dalszych badań, m.in. L. Schillera, V. W. Ekmana, wynika, że tylko dolna wartość krytyczna stanowi wiarygodne kryterium przejścia przepływu z laminarnego w burzliwy. Wartości krytycznych liczb Reynoldsa nie są uniwersalne, zależą one od rodzaju płynu oraz kanału, w jakim odbywa się przepływ.

Doświadczenia Reynoldsa dały początek dalszym licznym badaniom turbulencji. (Troskolański, 1967)

Reynolds zaproponował również statystyczną metodę rozwiązania układu równań Naviera-Stokesa. Potraktował on turbulentne wiry tak, jak traktuje się cząsteczki

w termodynamice statystycznej. Chaotyczność przepływów turbulentnych sprawia, że nie poszukujemy chwilowego rozwiązania, tylko, jak w przypadku termodynamiki statystycznej, pożądane są uśrednione wielkości opisujące przepływ. Wprowadził on do opisu podział, w którym rozróżnił część średnią przepływu oraz jego wahania (fluktuacje). Podział ten nazywamy dekompozycją Reynoldsa. W wyniku owego podziału w równaniach ruchu pojawiły się dodatkowe naprężenia (tzw. naprężenia Reynoldsa). Musimy, zatem stosować dodatkowe założenia w celu domknięcia układu.

W rozwiniętym przepływie burzliwym występują skale przestrzenne o szerokim zakresie. Skale duże przenoszą większość energii, odpowiadają, zatem za transport masy, pędu oraz ciepła. Natomiast małe skale rozpraszają energię w ciepło. Energia przepływu głównego jest przenoszona przez największe struktury wirowe. Te, w wyniku oddziaływań inercyjnych, rozpadają się tworząc mniejsze wiry, które mogą nadal się rozpadać i tworzyć coraz to mniejsze struktury. W praktyce prowadzi to do zmniejszenia stosunku oddziaływań bezwładnościowych do oddziaływań lepkościowych.

W 1942 roku Kołmogorow, jako pierwszy wprowadził kompletny model turbulencji. Teoria Kołmogorowa opisuje rozkład przestrzenny energii kinetycznej turbulencji. Opiera się ona na dwóch założeniach. Po pierwsze: przy małych wartościach lepkości kinematycznych ν szybkość dyssypacji lepkościowej ε nie zależy od lepkości. Po drugie, turbulencja drobnoskalowa przy dostatecznie dużych liczbach Reynoldsa jest niezależna statystycznie od skal dużych. Zgodnie z teorią Kołmogorowa, najmniejsze skale są określane statystycznie tylko poprzez dwa parametry: ν oraz ε, a dla dużych liczb Reynoldsa jedynie przez jeden parametr: ε. (Błoński, 2009)

3. Definicja i charakter turbulencji

Można powiedzieć, że przepływ turbulentny jest przepływem nieuporządkowanym w czasie i przestrzeni. Ale oczywiście nie jest to dokładna definicja matematyczna. Przepływy, które nazywamy „turbulentnymi", mogą mieć całkiem różną dynamikę, mogą być trójwymiarowe lub czasami quasi-dwuwymiarowe, mogą wykazywać dobrze zorganizowane struktury albo wręcz przeciwnie. Wymagana od nich wspólna właściwość polega na tym, że powinny być w stanie mieszać transportowane ilości znacznie szybciej niż gdyby zaangażowane były tylko procesy dyfuzji molekularnej. Właściwość ta jest z pewnością ważniejsza dla osób zainteresowanych turbulencją ze względu na jej praktyczne zastosowania: na przykład inżynier zajmuje się głównie znajomością turbulentnych współczynników dyfuzji ciepła lub turbulentnego oporu (w zależności od turbulentnej dyfuzji

pędu w przepływie). Można, zatem wstępnie zaproponować następującą definicję turbulencji i może ona przyczynić się do uniknięcia nieco semantycznych dyskusji na ten temat:

- Po pierwsze, przepływ turbulentny musi być losowy w tym sensie, że niewielka niepewność warunków początkowych lub brzegowych prowadzi do bardzo dużych zmian pola przepływu.
- Po drugie, musi charakteryzować się intensywnością mieszania większą w porównaniu z przepływem laminarnym.
- Po trzecie, musi obejmować szeroki zakres długości skal przestrzennych.

Przepływ turbulentny jest z natury niestabilny: niewielkie zaburzenie będzie się nasilało z powodu nieliniowości równań ruchu. Przeciwnie dzieje się w laminarnym przepływie, gdzie linie przepływu, zakłócone przez małą przeszkodę, „powracają" na swoje miejsce. (Lesieur 2008)

Skale w przepływie turbulentnym oddziałują na siebie w nieskończonej liczbie interakcji. W konsekwencji możemy zaobserwować szybkie powiększanie się wirów, widoczne np. na zdjęciu satelitarnym wycieku oleju z tankowca Argo Merchant. Po kilku dniach wiry te pokryły obszar o rozmiarze 100 x 200 km. Taki duży wir składa się z niezliczonej ilości mniejszych wirów. W praktyce skale turbulentnych wirów osiągają rozmiary od nanometrów do nawet setek tysięcy kilometrów. Ze względu na różnorodność występujących skal mówimy, że przepływ turbulentny ma wieloskalowy charakter. (Drobniak i in., 2010)

Rys. 2. Wyciek oleju z tankowca Argo Merchant (źródło: https://response.restoration.noaa.gov/argo-merchant-what-if-it-happened-today)

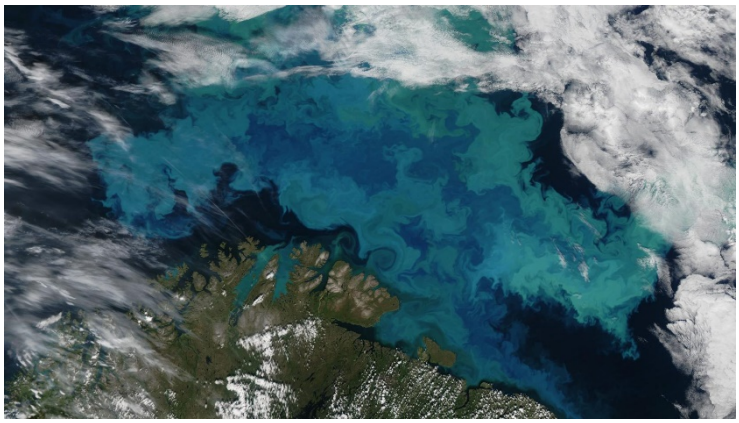
4. Modelowanie turbulencji

Rozkład wielkości średnich dla przepływu turbulentnego opisany jest układem czterech równań różniczkowych: równaniem ciągłości oraz trzema równaniami Reynoldsa. W równaniach Reynoldsa pojawia się 6 dodatkowych niewiadomych, co oznacza, że układ równań nie jest zamknięty. Zagadnienie domknięcia tego układu nazywamy modelowaniem turbulencji.

Chaotyczność turbulentnych przepływów sprawia, że niezwykle trudno je zamodelować. W odróżnieniu od przepływów laminarnych, nie jesteśmy, i pewnie długo jeszcze nie będziemy, w stanie przewidzieć dokładnego ruchu cząstki płynu w tym przepływie - ze względu na ogromny koszt obliczeniowy takich symulacji. Dotychczas powstało wiele metod numerycznego modelowania przepływów turbulentnych. Najbardziej znane z nich to RANS (Reynolds-averaged Navier Stokes), LES (Large Eddy Simulation), czy DNS (Direct Numerical Simulation). Podczas gdy w metodzie DNS stosuje się bezpośrednie rozwiązywanie równań Naviera-Stokesa z uwzględnieniem wszystkich skal turbulencji, w pozostałych metodach stosuje się pewne założenia upraszczające. Uproszczenia te wpływają na dokładność wyniku, jednak stosowanie metody DNS na większą skalę jest współcześnie nadal niemożliwe ze względu na ograniczoną moc obliczeniową istniejących komputerów. Najmniejszej mocy obliczeniowej wymaga metoda RANS, jednak jest ona najmniej dokładna. W ostatnich latach intensywnie rozwija się metoda LES, która wymaga znacznie mniejszej mocy obliczeniowej niż DNS, a jest dokładniejsza niż RANS. Nie ma uniwersalnego modelu turbulencji – wybór stosowanego modelu zależy od rodzaju przepływu oraz celu analizy.

5. Przykłady występowania przepływów turbulentnych

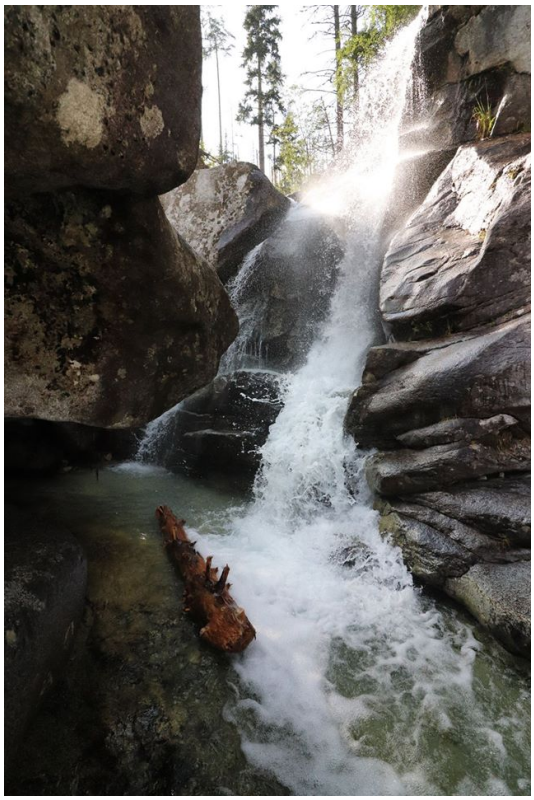
- Morza, oceany, rzeki



Rys. 3. Wiry powstałe w Morzu Barentsa uwidocznione przez rozkwit glonów (żródło: NASA)

Wody morskie zajmują ok. 70,8% powierzchni Ziemi i występują w nich pełne wirów przepływy turbulentne, co wskazuje na olbrzymią skalę przepływów turbulentnych na naszej planecie. W wodach obserwujemy wiry o dużych rozmiarów, jak te widoczne na zdjęciu satelitarnym morza Barentsa, oraz wiry drobnoskalowe. Jednak nie tylko w wielkich zbiornikach wodnych możemy obserwować przepływy turbulentne, pojawiają się one również w mniejszych zbiornikach wodnych. Wodospady, strumienie - to kolejne przykłady występowania przepływów turbulentnych, w których gołym okiem możemy zaobserwować pojawiające się wiry i chaotyczność przepływu.

Rys. 4. Wiry powstałe w przepływie strumienia górskiego (źródło własne)



Rys. 5. Wiry powstałe w wyniku spadku wody w wodospadzie (źródło własne)

- Tornada

Wiry tworzące tornada (trąby powietrzne) mogą osiągać prędkość do 480 km/h, a szerokość leja mierzy do 75 metrów i przemierza kilka kilometrów będąc w kontakcie z ziemią. Badania przepływów turbulentnych tworzących tornada są niezwykle ważne i mają na celu zminimalizowanie zniszczeń przez niewywoływanych. W przeszłości przeprowadzano badania właściwości tornad oraz ich wpływu na obiekty z uwzględnieniem wrażliwości na kształty budynków, działania ciśnienia wewnętrznego, prędkości translacyjnej itp. Jednak badania te nie były w stanie w pełni wyjawić pewnych cech tornad. Zastosowanie meteorologicznych modeli do przepływu tak blisko ziemi okazało się skuteczne w rozwiązaniu struktur turbulencji. Lundquist i in. zaprezentowali metodę wprowadzenia złożonych, trójwymiarowych miejskich terenów do meteorologicznego modelu WRF (Weather Research and Forecasting). (Kawaguchi, 2019)

- Turbulencje w kosmosie

W kosmosie również mamy do czynienia z przepływami turbulentnymi, czego przykładem są mgławice, czyli obłoki gazu i pyłu międzygwiazdowego, czy chmury tworzące się na powierzchniach planetach.

Rys. 6. Wirujące chmury gazowe na Jowiszu (źródło: NASA)

Rys. 7. Mgławica (źródło: NASA)

- Erupcje wulkanów

Wybuchy wulkanów są jednym z najbardziej katastrofalnych w skutkach zjawisk na Ziemi. Dynamika chmur tworzących się podczas erupcji również jest przykładem turbulencji. Podczas eksplozji z komina wulkanicznego są wyrzucane do atmosfery gorące gazy wulkaniczne wraz z piroklastami, które mieszają się z powietrzem, unoszą i tworzą kolumnę dymu. Po erupcji rozpływa się ona w poziomie tworząc tzw. chmurę parasolową (Suzuki, 2008)

Rys. 8. (źródło: https://www.cnnphilippines.com/news/2020/1/13/Taal-Volcano-eruption-volcanic-earthquakes-tsunami.html)

- Dym papierosowy

Bardzo powszechnym zjawiskiem, w którym obserwujemy przepływ burzliwy jest smuga dymu unosząca się nad papierosem. Na słynnym zdjęciu Humphreya Bogarta z papierosem obserwujemy przejście z przepływu laminarnego w burzliwy. Również przy wypuszczaniu dymu z ust występują turbulencje przepływu.

Rys. 9. Humphrey Bogart. Początkowo laminarny przepływ smugi dymu przeradza się w przepływ turbulentny (źródło: https://www.smh.com.au/entertainment/movies/cigarettes-on-screen-leave-us-breathless-20160209-gmozx5.html)

6. Zastosowania modeli turbulencji

Modele turbulencji wykorzystuje się m.in. do analizy procesów spalania cieczy i gazów, umożliwiając tym samym budowę układów tłokowych oraz układów wtrysku paliwa w samochodach, znajdują one również szerokie zastosowanie w wielu zagadnieniach geofizycznych, w prognozowaniu pogody oraz w lotnictwie (np. badania w zakresie sterowności samolotu z uwzględnieniem turbulencji powietrza).

Poza tym, modele turbulencji stosuje się do konstruowania przyrządów pomiarowych, które umożliwiają np. pomiar stanu zastawek sercowych oraz pomiar prędkości krwi w żyłach, wykorzystując w tym celu widmo akustyczne szumów płynącej w sposób turbulentny krwi. (*Rodzaje przepływu płynu*, 2019)

7. Podsumowanie

Z przepływami turbulentnymi mamy styczność, na co dzień, stanowią one powszechny i nieodłączny element naszego życia, jednak ich opis jest zagadnieniem niezwykle trudnym. Badania turbulencji są dziedziną nauki stosunkowo młodą i prężnie się rozwijającą. Powstałe metody modelowania przepływów turbulentnych mają szerokie zastosowanie, jednak wciąż wymagają udoskonalenia.

8. Literatura

Błoński S., 2009. Analiza przejścia laminarno-turbulentnego w mikrokanałach, IPPT PAN, s. 13-16.

Bogusławski A., Drobniak S., Tyliszczak A., 2008. Turbulencja – od losowości do determinizmu, Modelowanie Inżynierskie 36, s.41-47

Drobniak S., Kowalewski T.A., 2010. Mechanika płynów – dlaczego tak trudno przewidzieć ruch płynu?, IMC Politechnika Częstochowska, IPPT PAN, s. 389-428.

Kawaguchi M., Tamura T., Kawai H., 2019. Analysis of tornado and near-ground turbulence using a hybrid meteorological model/engineering LES method, Elsevier, s. 1-8.

Lesieur M., 2008. Turbulence in Fluids. Fourth revised and Enlarged Edition, Springer, s. 1-4.

Rodzaje przepływu płynu, 2019. https://pdfslide.net/documents/7-rodzaje-przeplywu-plynu-gazu-lub-cieczy-rozroznia-siedwa-rodzaje.html

Suzuki Y., Koyaguchi T., 2008. Numerical Simulations of Turbulent Flow in Volcanic Eruption Clouds, Institute for Research on Earth Evolution, Annual Report of the Earth Simulator Center, s. 114.

Troskolański A., 1967. Hydromechanika, WNT, s. 245-250.

https://pl.wikipedia.org/wiki/Tornado

Adsorpcja miedzi na wermikulicie i haloizycie

Rajczykowski Krzysztof [(1)], Loska Krzysztof [(1)]

[1] Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Śląska
Krzysztof Rajczykowski: krzysztof.rajczykowski@polsl.pl

Streszczenie
Celem badań była analiza skuteczności sorpcyjnej wermikulitu, jako innowacyjnego i przyjaznego dla środowiska adsorbentu, przy jednoczesnym porównaniu z innym przedstawicielem powszechnie stosowanych sorbentów, tj. haloizytem. Badania przeprowadzono na czystych roztworach miedzi, a sam proces prowadzono w reaktorach okresowych. Stężenie miedzi w roztworach początkowych i równowagowych oznaczano przy pomocy wysoce dokładnego spektrometru masowego F-AAS. Uzyskane wyniki wskazują, że wartość całkowitej pojemności monowarstwy adsorpcyjnej, dla procesów adsorpcji miedzi na wermikulicie jest prawie pięciokrotnie wyższa w porównaniu z tą, uzyskiwaną dla haloizytu. Ponadto, zaobserwowano wyraźny wpływ pH mieszaniny reakcyjnej na skuteczność wspomnianych procesów sorpcyjnych, uznając jednocześnie, że najlepsze warunki do prowadzenia procesu adsorpcji odpowiadają odczynowi pH równemu 6. Tak, więc, w wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że wermikulit może stanowić doskonałą alternatywę dla powszechnie stosowanych adsorbentów w procesach usuwania miedzi z roztworów wodnych.

Słowa kluczowe: adsorpcja na zeolitach; adsorpcja miedzi; wermikulit; haloizyt.

Adsorption of copper on vermiculite and halloysite

Summary
Aim of the presented research was the analysis of vermiculite, as an innovative and environmentally friendly adsorbent, in comparison to halloysite, which is one of the commonly used sorbents in metal removal processes. Analyses were carried out for pure solutions of copper. The adsorption process was conducted in batch reactors and metal concentration, both in the initial and equilibrium solutions was determined by F-AAS mass spectrometer. Results of the study prove, that the capacity values of the adsorption monolayers for copper adsorption processes on vermiculite is almost five times higher compared to the values obtained for halloysite. Also, a clear impact of the reaction pH on the adsorption processes was observed showing, that the best conditions for the mentioned metal removal processes are at pH 6. As a result of the conducted research, it was concluded that vermiculite can be an excellent alternative to commonly used adsorbents in a different kind of copper removal processes.

Keywords: adsorption on zeolites; copper adsorption; vermiculite; halloysite.

1. Wstęp

Problem zanieczyszczenia środowiska metalami ciężkimi jest jednym z najistotniejszych wyzwań stojących przed współczesną inżynierią środowiska. Rozwój licznych gałęzi przemysłu bazujących na wykorzystaniu różnego rodzaju metali doprowadził w wielu miejscach Europy oraz Świata do wystąpienia znacznych skażeń zarówno gleby jak i wód gruntowych a nawet podziemnych (Akpor & Muchie, 2010; Momodu & Anyakora, 2010). Dodatkowo, ze względu na występujące w Polsce, a zwłaszcza na terenie Dolnego Śląska, znaczące pokłady miedzi, problem jej przedostawania się do środowiska może być szczególnie istotny. Pomimo, iż miedź zaliczana jest do grupy mikroelementów, które w niewielkich ilościach są niezbędne do prawidłowego funkcjonowania zarówno organizmów

zwierzęcych jak i roślinnych, to akumulowanie się tego metalu w większych ilościach może prowadzić do zahamowania wzrostu roślin, uszkodzenia układu nerwowego u ludzi i zwierząt a w dalszych konsekwencjach także śmierci (Solomons, 1985; Zheng et al., 2004).

W związku z powyższym, niesłabnącym zainteresowaniem cieszą się badania związane z opracowywaniem nowych, bardziej skutecznych metod usuwania wspomnianych metali, zwłaszcza ze ścieków przemysłowych, które stanowią jedno z podstawowych źródeł metali ciężkich w środowisku. Pośród licznych procesów stosowanych w celu zmniejszenia ilości metali odprowadzanych do środowiska na szczególną uwagę zasługują procesy adsorpcyjne. Pomimo, że ich popularność nie jest tak duża jak w przypadku metod strąceniowych, to umożliwiają one często znacznie wyższe wartości usunięcia metali. Ponadto, oczyszczanie ścieków przy użyciu metod adsorpcyjnych nie wpływa tak mocno na właściwości fizykochemiczne wód i ścieków, jak ma to miejsce w przypadku chemicznych metod strąceniowych czy też koagulacji. Ponadto, coraz częściej spotykać można instalacje, w przypadku, których skutecznym materiałem adsorpcyjnym jest odpowiednio spreparowana biomasa odpadowa czy też odpady po produkcyjne powstające np. w przemyśle papierniczym, czy ceramicznym, co znacząco redukuje koszty procesu (Bilal et al., 2013; Jain et al., 2003; Ulmanu et al., 2003).

Wśród adsorbentów pochodzenia naturalnego ważną grupę stanowią zeolity, będące minerałami zbudowanymi na bazie glinokrzemianów. Do grupy tej możemy zaliczyć takie minerały jak: mezolit, natrolit, klinoptylolit czy też wykorzystywany w trakcie niniejszych badań wermikulit. Jedną z podstawowych zalet wymienionych minerałów, czyniących je doskonałymi adsorbentami jest ich niska reaktywność, brak toksyczności, niska cena a także relatywnie wysokie wartości uzyskiwanych pojemności adsorpcyjnych dla różnego rodzaju związków (Kraus et al., 2018; Meng et al., 2017). W przypadku wermikulitu jednak, zdecydowana większość przeprowadzonych dotychczas badań skupiała się raczej na jego zastosowaniu w procesach adsorpcji związków organicznych takich jak WWA czy związki benzenu, toluenu i ksylenu (Du et al., 2017; Liu et al., 2017; Stawiński et al., 2017).

2. Materiał i Metody

- Odczynniki i metody pomiarowe

Stosowanymi w trakcie badań adsorbentami były wermikulit oraz haloizyt. Oba rodzaje adsorbentu zostały zakupione w sklepach branżowych zajmujących się ogrodnictwem, a więc były to komercyjnie dostępne materiały o nieznanej czystości i parametrach fizykochemicznych. Przed przystąpieniem do badań oba adsorbenty przesiewano przy użyciu sit analitycznych, w celu ujednolicenia stopnia uziarnienia frakcji stosowanej w trakcie

dalszych analiz. W efekcie, dla obu minerałów wyodrębniono frakcję o wielkości ziaren z zakresu 0,45-3 mm. Roztwory wzorcowe oraz początkowe przygotowywano przez rozpuszczenie odpowiednich ilości analitycznie czystego azotanu miedzi firmy Chempur (*Piekary Śląskie, Polska*) w wodzie demineralizowanej. Dodatkowo, w celu określenia wpływu pH na skuteczność procesu adsorpcji, początkowe roztwory posiadały różne pH, w zakresie od 2 do 6. Nie stosowano wyższych wartości pH ze względu na możliwość powstawania trudno rozpuszczalnych wodorotlenków miedzi. W celu uzyskania właściwych, początkowych wartości pH do roztworów dodawano 1 molowy roztwór wodorotlenku sodu lub też kwasu azotowego, uzyskiwany przez odpowiednie rozcieńczenie stężonego 68% HNO3 firmy JT Baker (*Phillipsburg, USA*). Proces adsorpcji prowadzony był w naczyniach szklanych, o pojemności 30 ml, przez okres 60 minut dla każdego z pomiarów. Objętość roztworu o ustalonym wcześniej stężeniu stosowana w trakcie każdej z analiz wynosiła 20 ml a masa dodawanego adsorbentu zależna była od stosowanego minerału. Ze względu na fakt, że gęstość usypowa wermikulitu była zdecydowanie niższa niż w przypadku haloizytu, w celu zapewnienia w porównywalnych warunków reakcji, ilości dodawanego adsorbentu różniły się znacząco, wynosząc 0,1 g i 0,5 g odpowiednio dla wermikulitu i haloizytu. Z kolei pomiar stężenia metali w badanych próbkach przeprowadzano za pomocą metod absorpcyjnej spektroskopii atomowej (F-AAS) przy użyciu płomieniowego spektrometru masowego *SpectrAA 880* firmy Varian (*Palo Alto, USA*).

- Analiza uzyskanych wyników eksperymentalnych

W celu zapewnienia odpowiedniej istotności statystycznej danych pomiarowych, wszystkie analizy przeprowadzane były w trzykrotnym powtórzeniu, a raportowane w niniejszym opracowaniu wartości, dotyczą uzyskanej wartości średniej. W celu właściwego porównania możliwości adsorpcyjnych w przeliczeniu na jednostkę masy adsorbentu postanowiono posłużyć się czterema najpopularniejszymi modelami izoterm adsorpcji. Pierwszym spośród wspomnianych modeli był najczęściej pojawiający się w tego typu badaniach model izotermy adsorpcji Langmuira, dla którego równanie przebiegu funkcji podane jest następującym wzorem (Tran et al., 2017):

$$q_e = q_{max} * \frac{K * C_e}{1 + K * C_e} \tag{1}$$

Gdzie: $\boldsymbol{C_e}$ – Stężenie adsorptywu w stanie równowagi [mg/dm^3]

$\boldsymbol{K_L}$ – stała Langmuira [dm^3/mg]

$\boldsymbol{q_e}$ – zapełnienie monowarstwy adsorpcyjnej przez cząsteczki adsorbatu [mg/g]

$\boldsymbol{q_{max}}$ – Teoretyczna całkowita pojemność monowarstwy adsorpcyjnej [mg/g]

W modelu tym szczególnie istotny jest parametr q_{max}, gdyż jego obliczenie pozwala na niezależne porównywanie dwóch różnych adsorbentów, o ile oczywiście usuwane związki i warunki procesu są toż same, bądź mocna zbliżone. Wadą modelu Langmuira są wymagania jakie musi spełnić proces adsorpcji takie jak równomierny rozkład centrów aktywnych na powierzchni adsorbentu, brak adsorpcji wielowarstwowej, brak oddziaływań między cząsteczkami adsorbatu, itp. Dlatego też, ze względu na fakt, że w procesach adsorpcyjnych niejednokrotnie pojawiają się odstępstwa od wspomnianych założeń, zwłaszcza w kwestii monowarstwowego charakteru adsorpcji, na przestrzeni lat proponowano alternatywne modele opisu wspomnianych zjawisk. Drugą najczęściej pojawiającą się izotermą adsorpcji jest izoterma adsorpcji Freundlicha. Model adsorpcji Freundlicha jest modelem czysto empirycznym i opiera się na założeniu, że w miarę wzrostu stężenia adsorbatu na powierzchni adsorbentu, cząsteczki adsorbatu zaczynają silnie oddziaływać ze sobą, co prowadzi do powstawania kolejnej warstwy adsorbatu. Równanie opisujące model izotermy Freundlicha przybiera następującą postać:

$$q_e = K_f * C_e^{\left(\frac{1}{n}\right)} \tag{2}$$

Gdzie:

$\boldsymbol{K_f}$– Stała Freundlicha $\left[\frac{mg}{g} \times \left(\frac{mg}{\mathrm{dm}^3}\right)^{\frac{1}{n}}\right]$

$\boldsymbol{n}$ – współczynnik niejednorodności energetycznej powierzchni adsorbentu

Użycie izotermy adsorpcji Freundlicha pozwala na określenie stopnia niejednorodności energetycznej powierzchni na podstawie parametru n występującego w równaniu modelu. Zakłada się, że dla $0 < n \leq 1$ powierzchnia adsorbentu jest energetycznie jednorodna i trudno wyróżnić istotne centra energetyczne, a dla $n > 1$ przyjmuje się wysoką niejednorodność energetyczną powierzchni (Tran et al., 2017). Kolejnym stosowanym modelem była izoterma Dubinina-Radushkievicha, dedykowana przede wszystkim do prowadzenia analiz adsorpcji na silnie porowatych strukturach. Ponadto, przy pomocy izotermy Dubinina-Radushkievicha możliwe jest oszacowanie średniej energii adsorpcji towarzyszącej wiązaniu się cząsteczek adsorbatu na powierzchni mikroporów adsorbentu (Günay et al., 2007). Równanie izotermy Dubinina-Radushkievicha przyjmuje następującą postać ogólną:

$$q_e = q_{max} * \exp\left(-\beta\varepsilon^2\right) \tag{3}$$

Występującą w równaniu zmienną ε czyli tzw. potencjał Polanyi'ego dany jest wzorem:

$$\varepsilon = R * T * \ln\left(1 + \frac{1}{C_e}\right) \quad (4)$$

Gdzie:

$\boldsymbol{q_e}$ – Stężenie adsorbatu na jednostkę masy adsorbentu w stanie ustalonym [mg/g]

$\boldsymbol{q_{max}}$ – Teoretyczna maksymalna pojemność adsorpcyjna adsorbentu w danym układzie [mg/g]

$\boldsymbol{\beta}$ – Współczynnik powinowactwa energetycznego adsorbentu

$\boldsymbol{\varepsilon}$ – potencjał Polanyi'ego

$\boldsymbol{C_e}$ – Stężenie adsorbatu w roztworze w stanie ustalonym [mg/dm^3]

$\boldsymbol{R}$ – Stała gazowa [J/mol*K]

$\boldsymbol{T}$ – temperatura układu [K]

Dzięki wyznaczeniu przedstawionego w równaniu parametru β związanego z wartością energii wiązania adsorbatu można wyznaczyć właściwą energię wiązania cząsteczek adsorbatu przez struktury mikroporowate adsorbentu w danym układzie przy danej temperaturze procesu, na podstawie wzoru (Günay et al., 2007):

$$E = \sqrt{\frac{1}{2\beta}} \quad (5)$$

Gdzie:

$\boldsymbol{E}$ – Średnia energia wiązania adsorbatu w danych warunkach [J/mol]

Ostatnim stosowanym w trakcie badań modelem była izoterma adsorpcji Temkina, łącząca w sobie podejście teoretyczne i fenomenologiczne. Model ten zakłada, że energia adsorpcji zależy jedynie od oddziaływań pomiędzy cząsteczkami adsorbatu i adsorbentu, a ponadto, maleje ona w sposób liniowy a nie logarytmiczny wraz z kolejnymi warstwami adsorbatu na powierzchni adsorbentu (Özacar, 2003). Równanie izotermy Temkina zapisuje się w postaci:

$$q_e = \frac{R*T}{b}\ln(A_T * C_e) \quad (6)$$

Gdzie:

$\boldsymbol{A_T}$ – Stała w izotermie Temkina [dm^3/g]

$\boldsymbol{b}$ – Parametr stały dla danego układu w modelu izotermy Temkina

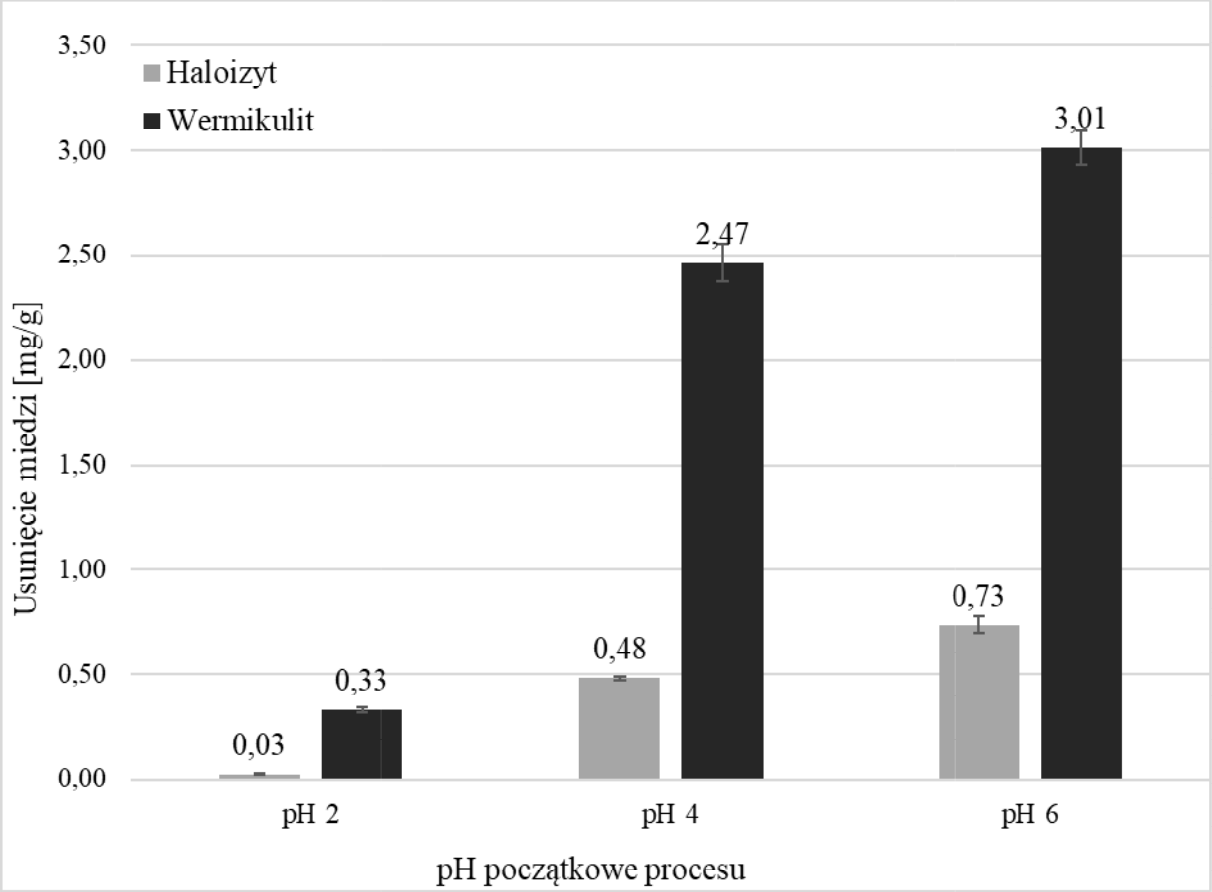
$\boldsymbol{R}$ – Stała gazowa ≈ 8,314 [J/(mol×K]

$\boldsymbol{T}$ – temperatura [K]

Wszystkie przedstawione modele wykorzystywano do oszacowania najważniejszych parametrów procesu adsorpcji miedzi dla obu adsorbentów a następnie porównania uzyskanych wyników.

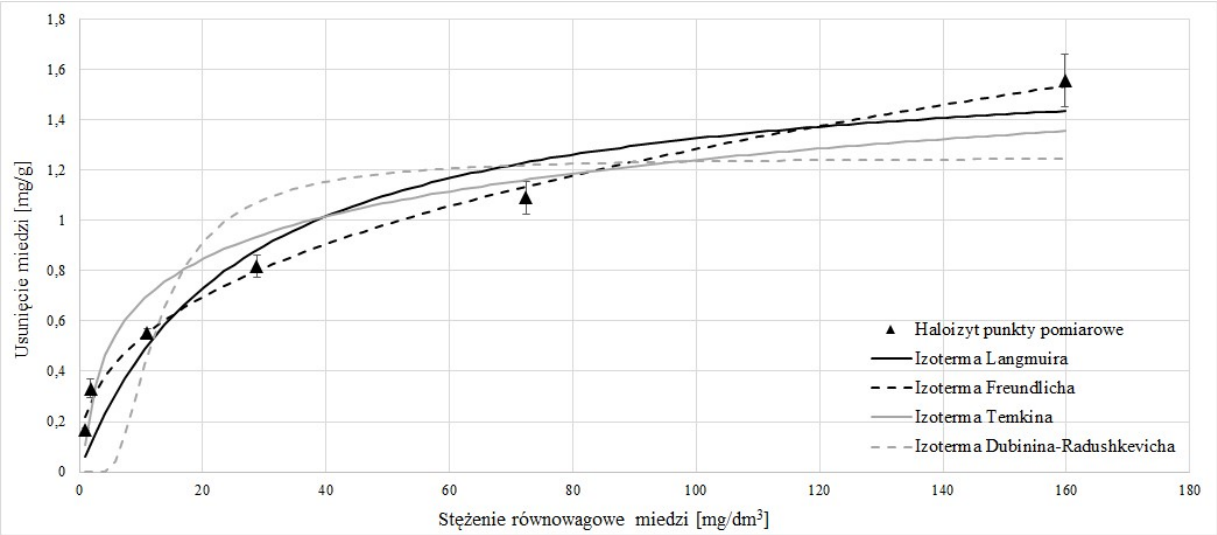
3. Wyniki

W wyniku przeprowadzonych analiz, stwierdzono istotny wpływ pH roztworu na wartości uzyskiwanego usunięcia miedzi w przypadku obu stosowanych adsorbentów. Wykres przedstawiający zależność pomiędzy skutecznością procesu adsorpcji a odczynem roztworu przy stężeniu początkowym na poziomie 10 mg/dm^3 przedstawiono na rysunku (Rys.1). Zaprezentowane wyniki wyraźnie wskazują, że spośród wybranych w trakcie badań wartości pH, najlepsze efekty osiągano dla pH równego 6. Dlatego też, dalsze badania, dotyczące przebiegu poszczególnych izoterm adsorpcji, prowadzono przy tym właśnie odczynie mieszaniny początkowej.



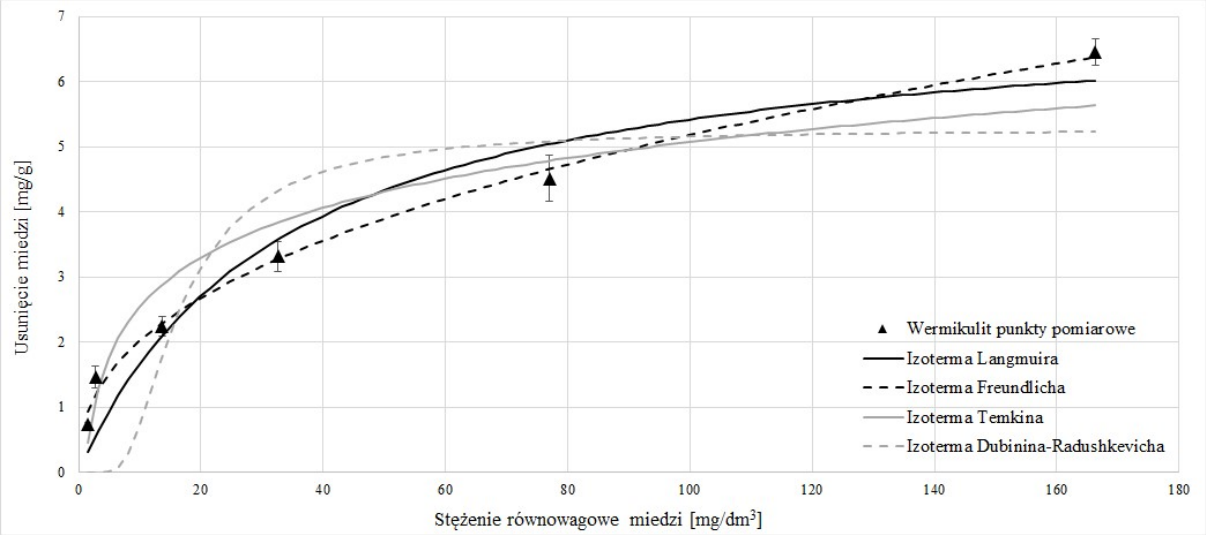
Rys. 1. Wpływ początkowej wartości pH mieszaniny reakcyjnej na skuteczność procesu adsorpcji miedzi

Kolejnym i jednocześnie najważniejszym etapem badań było wykreślenie izoterm adsorpcji miedzi dla obu rodzajów adsorbentu. Przebieg wspomnianych izoterm przedstawiono na Rys.2 w przypadku adsorpcji na haloizycie oraz Rys.3 dla wermikulitu jak adsorbentu.



Rys. 2. Izotermy adsorpcji miedzi na powierzchni haloizytu

W przypadku haloizytu, analiza przedstawionych na wykresie powyżej izoterm adsorpcji, wskazuje na wyraźne różnice w przebiegu pomiędzy modelem izotermy Freundlicha, najlepiej opisującej uzyskane wyniki pomiarowe a pozostałymi modelami, zwłaszcza modelem izotermy Dubinina-Radushkievicha.



Rys. 3. Izotermy adsorpcji miedzi na powierzchni wermikulitu

Przebiegi izoterm adsorpcji dla wermikulitu, ponownie wskazują na najlepsze dopasowanie w przypadku izotermy adsorpcji Freundlicha oraz zdecydowanie najgorsze dla izotermy Dubinina-Radushkievicha. Warto zauważyć, że pomimo znacznie wyższych wartości usunięcia miedzi w przypadku wermikulitu, co widać na skali stosowanej na osi rzędnych, to kształty poszczególnych modeli izoterm adsorpcji są niemalże identyczne. W celu lepszego porównania wyników, w tabeli poniżej, zestawiono również najważniejsze parametry każdego z pośród stosowanych modeli (Tab.1).

Tabela 1. Wartości parametrów wybranych modeli izoterm adsorpcji dla procesów adsorpcji miedzi

Model izotermy	Parametr	Jednostka	Wermikulit	Haloizyt
Langmuira	R^2	----------	0,912	0,922
	q_{max}	[mg/g]	7,224	1,663
	K_L	[dm^3/mg]	0,029	0,039
Freundlicha	R^2	----------	0,992	0,993
	n	----------	2,441	2,624
	K_F	$\left[\frac{mg}{g} \times \left(\frac{mg}{dm^3}\right)^{\frac{1}{n}}\right]$	0,785	0,222
Temkina	R^2	----------	0,928	0,915
	T	[K]	293,15	293,15
	A_T	[dm^3/g]	1,006	1,592
	b	----------	2216,6	9962,1
Dubinina-Radushkevicha	R^2	----------	0,675	0,690
	q_{max}	[mg/g]	5,267	1,250
	β	[mol^2/kJ^2]	0,963	0,587
	E	[kJ/mol]	0,720	0,542

Przedstawione w tabeli 1 wartości parametru R^2, przekraczające wartość 0,95 potwierdzają najlepsze dopasowanie modelu Freundlicha do wyników eksperymentalnych. Niemniej, względnie dobre dopasowanie modelu Langmuira (wartości $R^2 > 0,9$) pozwala założyć, że otrzymane wartości parametru q_{max}, można uznać za reprezentatywne i posłużyć się nimi w celu porównania właściwości sorpcyjnych obu rodzajów adsorbentów.

4. Dyskusja

Porównanie wartości teoretycznej całkowitej pojemności mono-warstwy adsorpcyjnej wermikulitu i haloizytu wskazuje, że w przypadku tego pierwszego pojemność ta jest ponad 4 krotnie wyższa. Niemniej, bardzo zbliżone kształty samych izoterm adsorpcji jak i zgodności ich dopasowania do wyników eksperymentalnych, wskazują, że wspomniane różnice w stopniu usunięcia miedzi, nie wynikają raczej z różnych mechanizmów sorpcyjnych. Zarówno poziom niejednorodności energetycznej powierzchni (*n*) w modelu Freundlicha, jak i powinowactwo energetyczne adsorbentu i adsorbatu w modelu Dubinina-Radushkievicha (*β*) przyjmowały zbliżone wartości dla obydwu stosowanych adsorbentów. Dodatkowo, niewielka zgodność modelu izotermy Dubinina-Radushkievicha z uzyskanymi wynikami pozwala założyć, że struktura obu stosowanych adsorbentów cechowała się niewielkim udziałem mikroporów, co ponownie może wskazywać na wysokie podobieństwo strukturalne adsorbentów. W celu wytłumaczenia różnic w pojemności sorpcyjnej obu minerałów zasadnym wydaje się porównanie ich ciężaru właściwego deklarowanego przez producenta. W przypadku haloizytu wartość ciężaru właściwego mieściła się w granicach 2,4-2,7 g/cm^3, podczas gdy dla wermikulitu, zakres ten wynosił jedynie 0,7-1,0 g/cm^3. Niemniej, można zauważyć, że różnice w usunięciu miedzi nie są całkowicie proporcjonalne do różnic w ciężarze właściwym, co oznacza, że wyższa

pojemność sorpcyjna wermikulitu musi wiązać się z niewielkimi choćby różnicami w strukturze czy też właściwościach obu adsorbentów.

5. Wnioski

Przeprowadzone badania udowodniły, że wermikulit może stanowić doskonały adsorbent pozwalający na skuteczniejsze usuwanie miedzi z roztworów wodnych niż stosowany w niektórych instalacjach haloizyt. Co więcej udało się określić, że mechanizmy adsorpcji dla obu adsorbentów były bardzo zbliżone i jedynie częściowo zgodne z założeniami idealnego modelu adsorpcji Langmuira. Zdecydowanie wyższa skuteczność sorpcyjna wermikulitu może być w dużej mierze związana z jego znacznie niższym ciężarem właściwym, co przekłada się na większą objętość roboczą złoża w danej jednostce masy. Reasumując, możliwość wykorzystania wermikulitu, jako skutecznego adsorbentu w procesach usuwania metali może być szczególnie ważna dla krajów posiadających duże zasoby tego minerału. W rezultacie może on stanowić nie tylko materiał eksportowy, lecz również tanie źródło wysokiej, jakości adsorbentów do oczyszczania wód oraz ścieków. Warto przy tym zauważyć, że światowe złoża wermikulitu mieszczą się przede wszystkim w krajach Afryki, Chinach oraz Brazylii, a więc regionach świata mniej zamożnych, w których często brakuje funduszy na zastosowanie innych, droższych i bardziej wyszukanych metod oczyszczania ścieków oraz wód powierzchniowych z niebezpiecznych związków metali.

6. Podziękowania

Badania prowadzone w ramach projektu o numerze rejestracyjnym *2017/25/N/ST8/02391*, realizowanym z funduszy Narodowego Centrum Nauki w ramach konkursu *PRELUDIUM 13.*

7. Literatura

Akpor, O. B., & Muchie, M. (2010). Remediation of heavy metals in drinking water and wastewater treatment systems: Processes and applications. *International Journal of Physical Sciences*, *5*(12), 1807–1817.

Bilal, M., Shah, J. A., Ashfaq, T., Gardazi, S. M. H., Tahir, A. A., Pervez, A., Haroon, H., & Mahmood, Q. (2013). Waste biomass adsorbents for copper removal from industrial wastewater—A review. *Journal of Hazardous Materials*, *263*, 322–333. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.07.071

Du, Z., Deng, S., Zhang, S., Wang, W., Wang, B., Huang, J., Wang, Y., Yu, G., & Xing, B. (2017). Selective and Fast Adsorption of Perfluorooctanesulfonate from Wastewater by Magnetic Fluorinated Vermiculite. *Environmental Science & Technology*, *51*(14), 8027–8035. https://doi.org/10.1021/acs.est.6b06540

Günay, A., Arslankaya, E., & Tosun, I. (2007). Lead removal from aqueous solution by

natural and pretreated clinoptilolite: adsorption equilibrium and kinetics. *Journal of Hazardous Materials*, *146*(1–2), 362—371. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.12.034

Jain, A. K., Gupta, V. K., Bhatnagar, A., & Suhas. (2003). Utilization of industrial waste products as adsorbents for the removal of dyes. *Journal of Hazardous Materials*, *101*(1), 31–42. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0304-3894(03)00146-8

Kraus, M., Trommler, U., Holzer, F., Kopinke, F.-D., & Roland, U. (2018). Competing adsorption of toluene and water on various zeolites. *Chemical Engineering Journal*, *351*, 356–363. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.06.128

Liu, S., Wu, P., Yu, L., Li, L., Gong, B., Zhu, N., Dang, Z., & Yang, C. (2017). Preparation and characterization of organo-vermiculite based on phosphatidylcholine and adsorption of two typical antibiotics. *Applied Clay Science*, *137*, 160–167. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.12.002

Meng, Q., Chen, H., Lin, J., Lin, Z., & Sun, J. (2017). Zeolite A synthesized from alkaline assisted pre-activated halloysite for efficient heavy metal removal in polluted river water and industrial wastewater. *Journal of Environmental Sciences*, *56*, 254–262. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.10.010

Momodu, M. A., & Anyakora, C. A. (2010). Heavy metal contamination of ground water: the surulere case study. *Research Journal of Environmental and Earth Sciences*, *2*(1), 39–43.

Özacar, M. (2003). Equilibrium and Kinetic Modelling of Adsorption of Phosphorus on Calcined Alunite. *Adsorption*, *9*(2), 125–132. https://doi.org/10.1023/A:1024289209583

Solomons, N. W. (1985). Biochemical, metabolic, and clinical role of copper in human nutrition. *Journal of the American College of Nutrition*, *4*(1), 83–105. https://doi.org/10.1080/07315724.1985.10720069

Stawiński, W., Węgrzyn, A., Dańko, T., Freitas, O., Figueiredo, S., & Chmielarz, L. (2017). Acid-base treated vermiculite as high performance adsorbent: Insights into the mechanism of cationic dyes adsorption, regeneration, recyclability and stability studies. *Chemosphere*, *173*, 107–115. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.01.039

Tran, H. N., You, S.-J., Hosseini-Bandegharaei, A., & Chao, H.-P. (2017). Mistakes and inconsistencies regarding adsorption of contaminants from aqueous solutions: A critical review. *Water Research*, *120*, 88–116. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.04.014

Ulmanu, M., Marañón, E., Fernández, Y., Castrillón, L., Anger, I., & Dumitriu, D. (2003). Removal of Copper and Cadmium Ions from Diluted Aqueous Solutions by Low Cost and Waste Material Adsorbents. *Water, Air, and Soil Pollution*, *142*(1), 357–373.

https://doi.org/10.1023/A:1022084721990

Zheng, Y., Wang, L., & Dixon, M. A. (2004). Response to Copper Toxicity for Three Ornamental Crops in Solution Culture. *HortScience HortSci*, *39*(5), 1116–1120. https://doi.org/10.21273/HORTSCI.39.5.1116

Numerical simulation of flow around a square cylinder

Szymanek Ewa [(1)]

[1] Department of Thermal Machinery, Faculty of Mechanical Engineering and Computer Science, Czestochowa University of Technology, Poland
Ewa Szymanek: ewaszym@imc.pcz.pl

Summary
The intensive development of research on the properties of granules, including strength and thermal conductivity, is dictated by their widespread use in many industries. This article is devoted to numerical research CFD (Computational Fluid Dynamics) processes of heat and mass exchange around granular elements in the form of square cylinders. Numerical simulations were carried out using an academic SAILOR code, which uses a calculation algorithm that allows us to analyze both heat and fluid flows. This code is based on approximation for flows with a low Mach number and a projection algorithm for determining the pressure field, velocity and scalar quantities. Integration in time is performed using the predictor-corrector method based on Adams-Bashforth / Adams-Moulton schemes. Spatial discretization is performed using high-order compact methods on partially shifted grids. Calculations are performed on Cartesian grids, and the objects are modeled using the IB (immersed boundary) method. The results obtained were compared with the results obtained using the commercial Ansys Fluent code.

Keywords: square cylinders, heat transfer, IB method, CFD simulation.

Numeryczne symulacje przepływu wokół elementu sześciennego

Streszczenie
Intensywny rozwój badań nad właściwościami granulatów, między innymi nad wytrzymałością i przewodnością cieplną, podyktowany jest powszechnym ich zastosowaniem w wielu gałęziach przemysłu. Niniejszy artykuł poświęcony jest badaniom numerycznym CFD (Computational Fluid Dynamics) procesów wymiany ciepła i masy wokół elementów granularnych w formie elementów sześciennych. Symulacje numeryczne zostały przeprowadzone za pomocą akademickiego kodu SAILOR, w którym zastosowano algorytm obliczeniowy pozwalający analizować zarówno przepływy ciepła, jak i płynów. Kod ten bazuje na aproksymacji dla przepływów z niską liczbą Macha i algorytmie rzutowania dla wyznaczenia pola ciśnień, prędkości i wielkości skalarnych. Całkowanie w czasie wykonywane jest za pomocą metody predyktor-korektor w oparciu o schematy Adamsa-Bashfortha/Adamsa-Moultona. Dyskretyzacja przestrzenna dokonywana jest za pomocą metod kompaktowych wysokiego rzędu na siatkach częściowo przesuniętych. Obliczenia wykonywane są na siatkach kartezjańskich, a obiekty modelowane są za pomocą metody IB (Immersed Boundary). Uzyskane wyniki zostały porównane z wynikami uzyskanymi przy wykorzystaniu komercyjnego kodu Ansys Fluent.

Słowa kluczowe: elementy sześcienne, przepływ ciepła, metoda IB, symulacje CFD.

1. Introduction

The flow characteristics around a square cylinder is an interesting topic for engineers and scientists because of its practical significance, including in the aviation, automotive and shipbuilding industries, for forecasting and optimization of aerodynamic performance, when designing tall buildings or suspension bridges. These are just some of the many applications. The interaction of fluids and structures creates a complex flow field, and understanding this interaction is of big importance in design. When a solid body is immersed in a flow, it can cause oscillations that damage the structure. Vibrations have a negative impact on structures and should be minimized. Therefore, many researchers studied the flow characteristics around

square cylinders. Although such square elements have a simple geometry, simulation of flow fields around tchem is still very difficult due to flow separation, flow transition, instability and vortex shedding. Due to the fact that the computing power of computers has increased in recent decades, computational fluid dynamics (CFD) has become an efficient and cost-effective method of predicting complex flow fields in 3D geometries. In the work at Sharma (Sharma, Eswaran 2004) one can find analyzes of the flow structure and heat transfer properties of an insulated square cylinder in cross-flow for both constant and unstable periodic laminar flow in two dimensions, for Reynolds numbers from 1 to 160. Most research is focused on circular cylinders. Although the flow past a square cylinder is similar to the flow past a circular one the separation mechanism and the consequent dependence of the vortex shedding frequency on the Reynolds number differ significantly. Furthermore, the width of the wake immediately behind the square cylinder is at least one diameter, whereas it is less than half a diameter in the case of the circular cylinder. Consequently, the Karman vortex formation region is significantly longer and broader for the square cylinder than for the circular cylinder (Sharma, Eswaran 2004). From an engineering point of view, flow around structures that typically have rectangular or near-rectangular cross sections, i.e., buildings, electronic equipments, etc. are more akin to flow around square cylinders than circular ones. Thus, the flow around the square cylinder is an important fundamental problem of engineering interest. The isothermal, nonconfined flow past a cylinder with rectangular cross section has been investigated both numerically and experimentally (Robichaux et al., 1999; Saha et al., 2003). Zaki et al. (1994) has done numerical investigation at low Reynolds number and experimental investigation at high Reynolds number for flow past a square cylinder. Sohankar (Sohankar et al., 1995) has done numerical simulations of two-dimensional flow past a square cylinder at Re = 45–250. Quantities such as drag and lift coefficients, various surface pressure coefficients, and the mean vortex formation length behind the cylinder have been calculated. He also studied the effect of blockage, onset of vortex shedding, and influence of outlet boundary conditions for the flow past the square cylinder at angle incidence of 0–45°. Okajima (Okajima et al., 1997) studied the effect of blockage on a stationary and oscillating cylinder.

In the present article, the IB-VP (Immersed Boundary volume penalization) method in combination with a high-order compact approximation scheme is used. In this method the fluid is penalized from entering a solid part of a domain by adding a continuous forcing term to the equations governing the heat and fluid flow. The high-order compact scheme is formulated on a half-staggered mesh. The solution algorithm is applied for modeling flows

with the heat transfer around separated objects. It has been shown that IB-VP method can be successfully used in simulation of flow around granular objects (Szymanek Tyliszczak, 2018). This paper aims to numerically simulate the flow next to a square cylinder and two identical square cylinders for Reynolds numbers 10, 100 and 1000. The simulations are carried out using an in-house Sailor code and aim to investigate the flow dynamics around the square cylinders. The results were analyzed to examine temperature and velocity distribution infunction of the Reynolds number. The study supplements the verification perfomed using the commercial Ansys Fluent program.

2. Mathematical modeling

In this paper we consider variable temperature and variable density flows. The changes of density are caused by increasing/decreasing wall temperature and they are larger than acceptable by Boussinesq approximation. We consider a low Mach number flow described by the continuity equation, the Navier-Stokes equations and the energy equation, which in the framework of an IB-VP approach are defined as:

$$\partial_t \rho + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \qquad 1$$

$$\rho(\partial_t u + (u \cdot \nabla)u + \nabla p = \nabla \cdot \tau + f^{IB} \qquad 2$$

$$\rho C_p(\partial_t T + (u \cdot \nabla)T = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) + f_T^{IB} \qquad 3$$

where ρ stands for the density, T - temperature, p - hydrodynamic pressure, u - velocity vector, Cp - heat capacity and κ - heat conductivity. The set of Eqs. (1)-(3) is complemented with

the equation of state $p_0 = \rho RT$, where p_0 denotes the thermodynamic pressure and R - is the specific gas constant. In open flows with inlet/outlet boundaries p_0 is constant in space and time (Tyliszczak 2016) and in this work it is assumed to be 101325Pa. The molecular viscosity (μ) within the viscous stress tensor τ is computed from the Sutherland law.

2.1 Solution algorithm

The solution algorithm for Eqs. (1-3) is formulated in the framework of a projection method (Fletcher 1991) for pressure-velocity coupling. The time integration is based on a predictor-corrector approach (Adams-Bashforth/Adams Moulton) and the spatial discretisation is performed using 6th/5th order compact difference and WENO (Weighted Essentially Non-Oscilatory) schemes on half-staggered meshes (Tyliszczak, 2014; Tyliszczak, 2016). In the framework of the IB-VP approach the solution algorithm is defined as follows.

Predictor step

Generally, we assume that the time-step (Δt) can vary as the flow velocity changes in the successive time-steps, …,n-1,n,n+1,… With this assumption the 2nd order Adams-Bashforth method is given as:

$$\frac{\rho u^* - \rho u^n}{\Delta t^n} = (1 + \frac{\Delta t^n}{2\Delta t^{n-1}})\mathrm{Res}(u^n) - \frac{\Delta t^n}{2\Delta t^{n-1}}\mathrm{Res}(u^{n-1})\text{-}\nabla p^n + f^{IB}$$

$$\frac{T_i^* - T_i^n}{\Delta t^n} = (1 + \frac{\Delta t^n}{2\Delta t^{n-1}})\mathrm{Res}(T^n) - \frac{\Delta t^n}{2\Delta t^{n-1}}\mathrm{Res}(T^{n-1}) + \frac{1}{\rho C_p} f_T^{IB}$$

where Res(u), Res(T) represent the convection and diffusion terms of the Navier-Stokes and Energy equations. The computed velocity field u^* does not fulfil the continuity equation (i.e.$\partial_t \rho + \nabla \cdot (\rho u^*) \neq 0$) and according to the projection method (Fletcher, 1991) it must be corrected using the gradients of pressure correction (p') according to the following formula:

$$\rho u^{**} = \rho u^* - \Delta t^n \nabla p'$$

where p' is computed from the Poisson equation:

$$\nabla \cdot (\nabla p') = \frac{1}{\Delta t^n}[\nabla \cdot (\rho u^*) + \partial_t \rho^*]$$

resulting from the condition $\partial_t \rho + \nabla \cdot (\rho u^{**}) = 0$. The density is computed from the equation of state $p_0 = \rho^* R T^*$ and its time derivative needed in $\nabla \cdot (\nabla p') = \frac{1}{\Delta t^n}[\nabla \cdot (\rho u^*) + \partial_t \rho^*]$ is discretized using 2nd order formula

$$\partial_t \rho^* = \frac{(\Delta t^n - \Delta t^{n-1})^{-1}}{\Delta t^n \Delta t^{n-1}}\{[(\Delta t^n + \Delta t^{n-1})^2 - (\Delta t^n)^2]\rho^* - (\Delta t^n + \Delta t^{n-1})^2 \rho^n + (\Delta t^n)^2 \rho^{n-1}\}$$

Correctorstep

The 2nd order Adams-Moulton method is defined as:

$$\frac{\rho u^* - \rho u^n}{\Delta t^n} = \frac{1}{2}(Res(u^{**}) + Res(u^n)) - \nabla p^n + f^{IB}$$

$$\frac{T^{n+1} - T^n}{\Delta t^n} = \frac{1}{2}(Res(T^{**}) + Res(T^n)) + \frac{1}{\rho C_p} f_T^{IB}$$

Again, the velocity field u^* does not fulfil the continuity equation and its correction is defined as:

$$\rho u^{n+1} = \rho u^* - \Delta t^n \nabla p'.$$

The equation $\rho_t + \nabla \cdot (\rho u^{n+1}) = 0$ leads to the Poisson equation. Its solution allows us to correct the velocity using $\rho u^{n+1} = \rho u^* - -\Delta t^n \nabla p'$ and to update the pressure field as:

$$p^{n+1} = p^n + p'.$$

The density is computed from $p_0 = \rho^* R T^{n+1}$ and the next time step begins.

IB-VP source term

The IB-VP method works through penalizing a difference between the actual and assumed velocity and temperaturę of the solid body. The role of the source terms f^{IB} and f_T^{IB} is to mimmic the presence of solid objects in the flow domain. In the volume penalization variant of the IB method they are defined as:

$$f^{IB} = -\frac{\rho}{\eta}\Gamma(x)(u - u_s)$$

$$f_T^{IB} = -\frac{\rho C_p}{\eta}\Gamma(x)(T - T_s)$$

Where $u_s$and T_s are the velocity and temperature of the solid body. The symbol $\eta \ll 1$ is the so-called penalization parameter with dimension of time unit and Γ – the phase indicator defined as:

$$\Gamma(x) = \begin{cases} 0, for\ x \in \Omega_f \\ 1, for\ x \epsilon \Omega_s \end{cases}$$

For $\Gamma(x) = 1$ with $\eta \ll 1$ the equations for velocity and temperature reduce to $u^* \approx \frac{\Delta t^n u_s}{(\eta + \Delta t^n)}$ and $T^* \approx \frac{\Delta t^n T_s}{(\eta + \Delta t^n)}$ which for $\eta \ll \Delta t^n$ leads to $u^* \approx u_s$ and $T^* \approx T_{s.}$

Thus, the forcing terms enforces the no-slip boundary conditions and set the required temperaturę of thr solid objects. Simplicity of the IB-VP method has, however, direct conseuences in ower accuracy. Theory of the IB-VP method can be found in (Khadra et al. 2000, Kadoch et al. 2012). More details of its implementation in the applied code along with test computation were presented in (Tyliszczak, Szymanek 2019).

3. Computational domain

The geometry of the model for which the simulations were carried out is shown in Figure 1. In the left part of the channel (INLET) there is a medium inlet, and in the right part (OUTLET) there is an outflow. The dimensions of the channel are H = 0.15 m, L = 0.3 m, S = 0.15 m, respectively. Inside, a cube with a wall length of h = 0.01 m was placed. The uniform flow velocity in the inlet section is determined according to the Reynolds number. Simulations were carried out for Reynolds number Re = Uh / ν = 10 (U - inlet velocity, ν- viscosity) and for Re = 100 and Re = 1000.

The view of the computational grids is presented in Fig. 2. In the calculations performed both using the ANSYS program and the Sailor code, Cartesian type grids were used. In the former case near the square cylinder, mesh was compacte. Away from the square cylinder, the density of the mesh elements increases. Using the Sailor code, the calculations were

performed on Cartesian grids and the objects were modeled using the IB (Immersed Boundary). The advantage of the IB method over classic approaches is that fluid and heat flows can be solved on Cartesian meshes, and there is no need to design a mesh precisely suited to sometimes complex shapes of the analyzed objects. The numerical grid used consisted of 1570000 elements for Ansys Fluent and 121x320x121 nodes for the Sailor code.

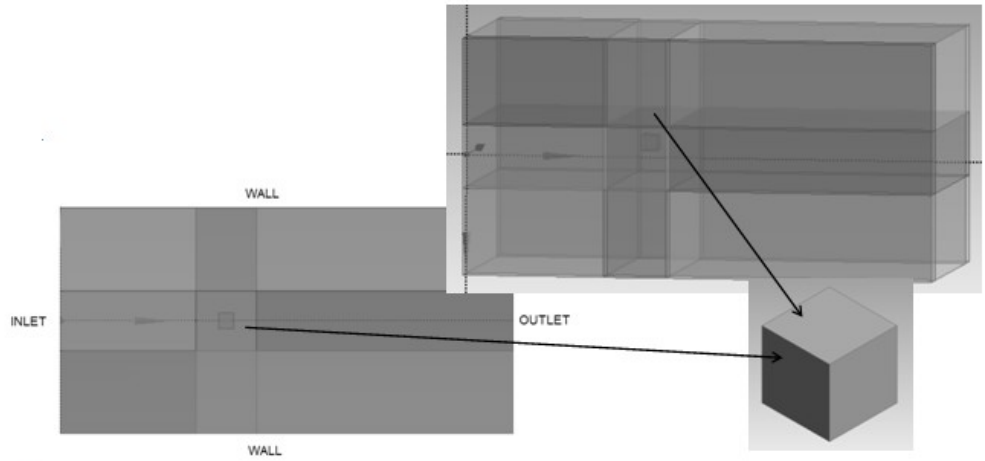


Fig.1 Computational domain for the flow around a square cylinder

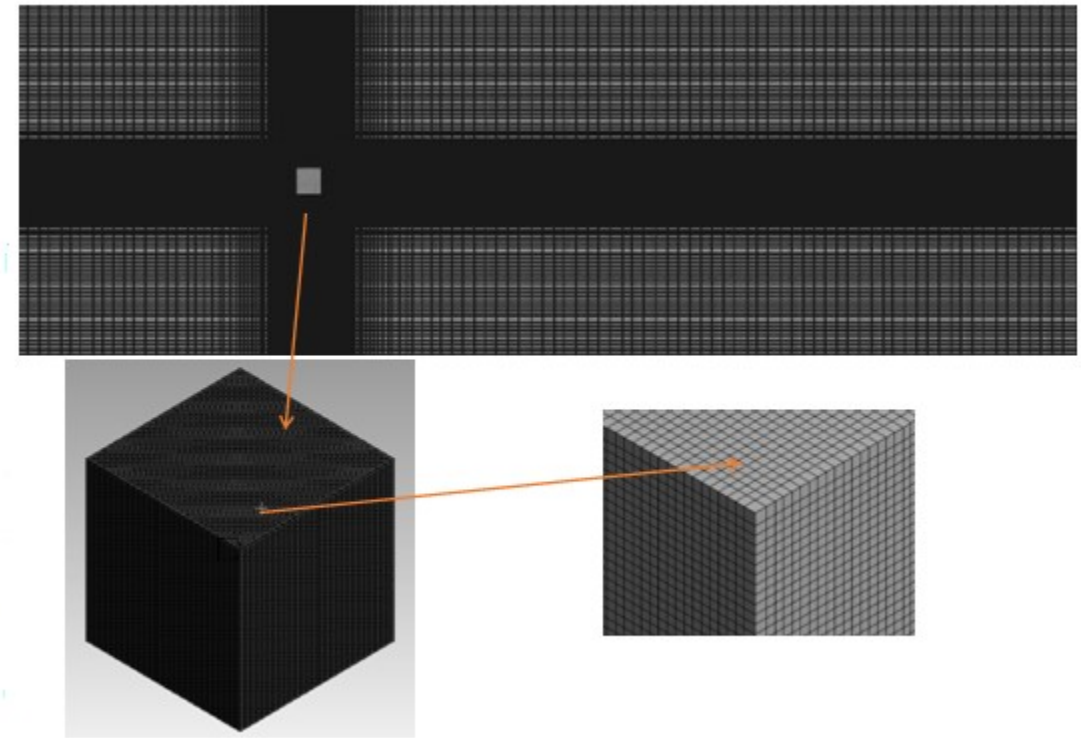


Fig.2 Non-uniform computational grid structure

4. Results

4.1 Simulation on the flow around one square cylinder

The simulation results are presented along the main axis of the flow domain (y=0) and along the „x – coordinate" of the different „y" locations, i.e. y=0.09 (accross the cylinder) and y=0.12, 0.13 (behind the cylinder), see Fig.5.

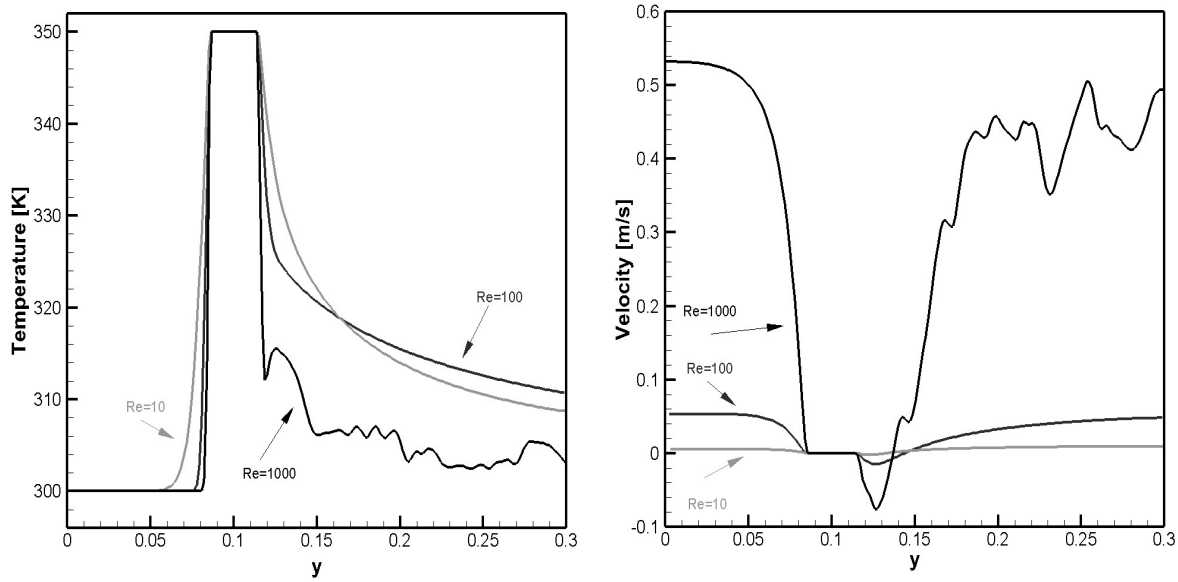


Fig.3 Temperature and velocity profile along the x axis

Figures 3-4 shows temperature and velocity distributions depending on the Reynolds number. As can be seen with the increase in the Reynolds number, i.e. with the increase of the inlet velocity, the flow is more complex and for Re = 1000 it becomes turbulent, which can be deduced from unsteady character of the profiles.

It can be seen that the agreement between the results obtained with the help of Sailor and Ansys Fluent code is very good, both the temperature field and the velocity of both simulations are almost identical. This proves that the IB-VP method and solution algorithm used are accurate and correctly formulated. The Fig.5 show the contours of velocity and temperature at Re = 10, 100 and 1000, respectively. It can be observed that the thermal wake behind the cylindre largerly depends on the Reynolds number. It is the widest for Re=10. This is related to the flow velocity which has the smallest value for this Reynolds number. In such a case the medium has "more time" to heat-up.

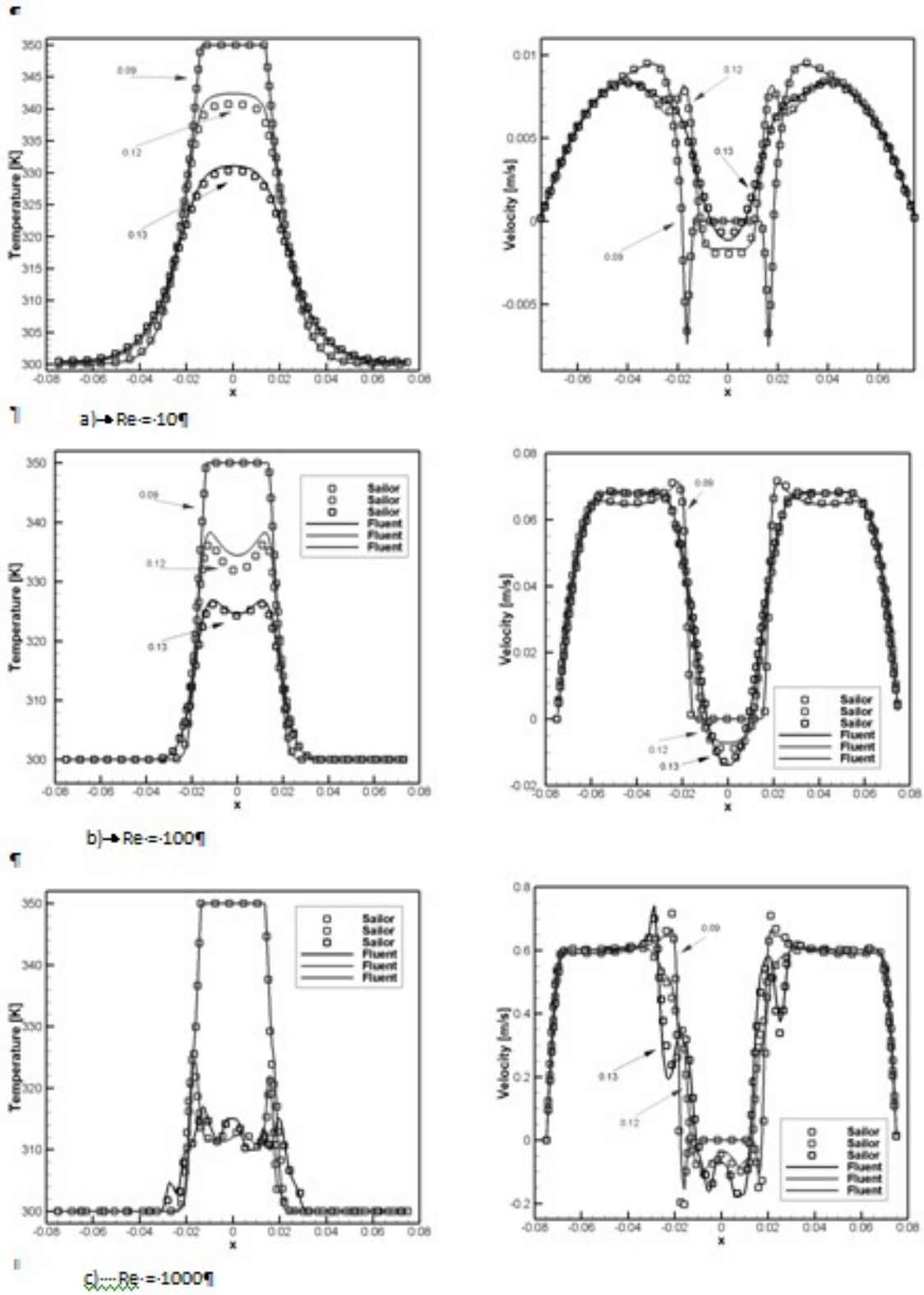


Fig.4.Temperature and velocity profile along the y coordinate

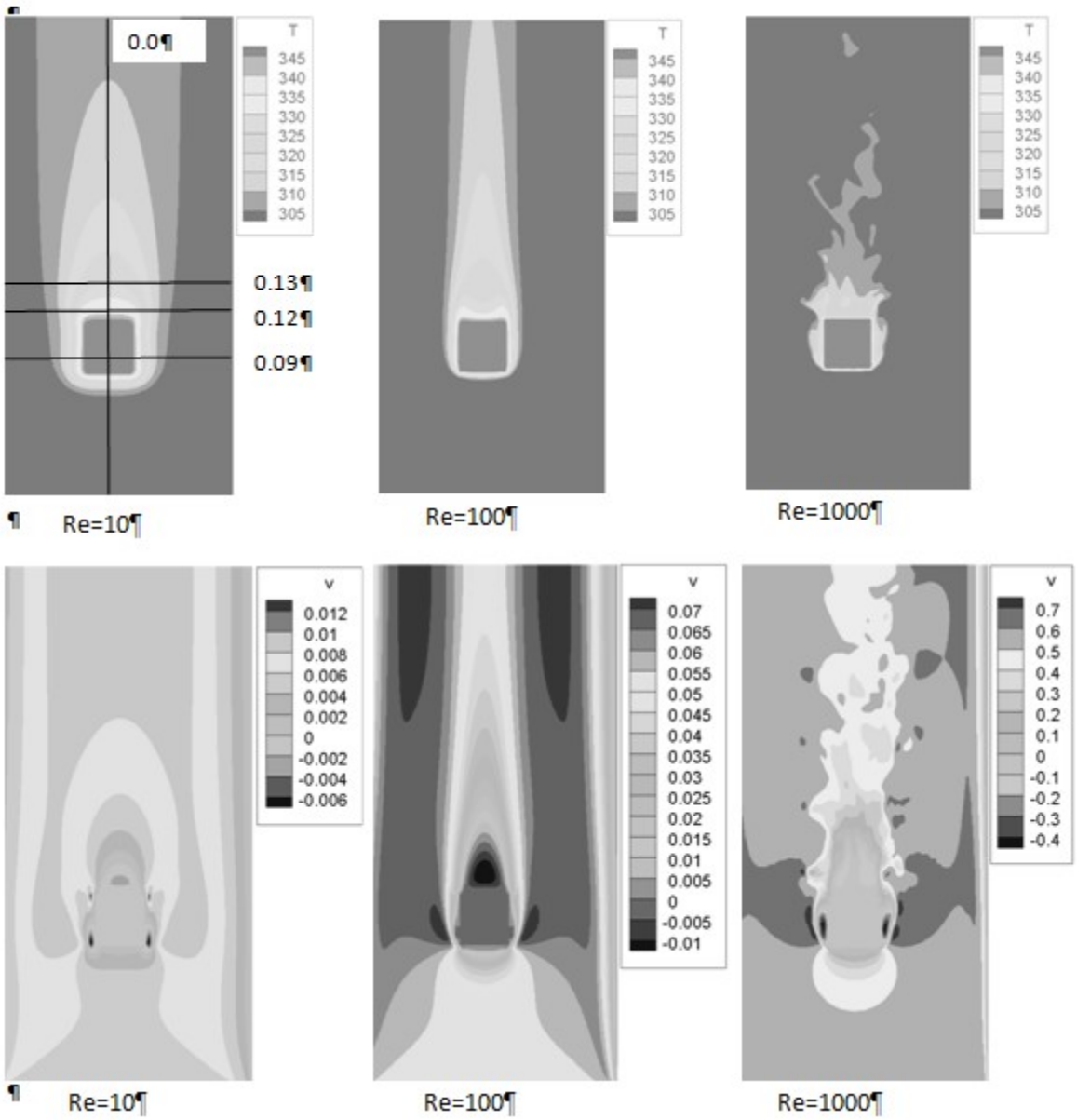


Fig.5 Temperature and velocity contours for square cylinder

4.2 Simulation on the flow around two square cylinder

The flow around two square cylinders is analyzed as the second problem. Both elements were identical with the side length as before 0.01 m. They had the following coordinates respectively: (X, Y, Z) = (-0.0225, 0.0, 0.145), (X, Y, Z) = (0.0225, 0.0, 0.145). The flow rate was assigned in a manner analogous to the previous case. The Reynolds number was based on the inlet velocity and the side length of the square cylinder. Again three cases were analyzed with Re = 10, 100 and 1000. In these simulation, the grids contained 121x320x121 nodes for the SAILOR code and approximately 1,630,000 cells for simulation using the ANSYS Fluent code. The results of the calculations are shown in Fig.6 and Fig.7.

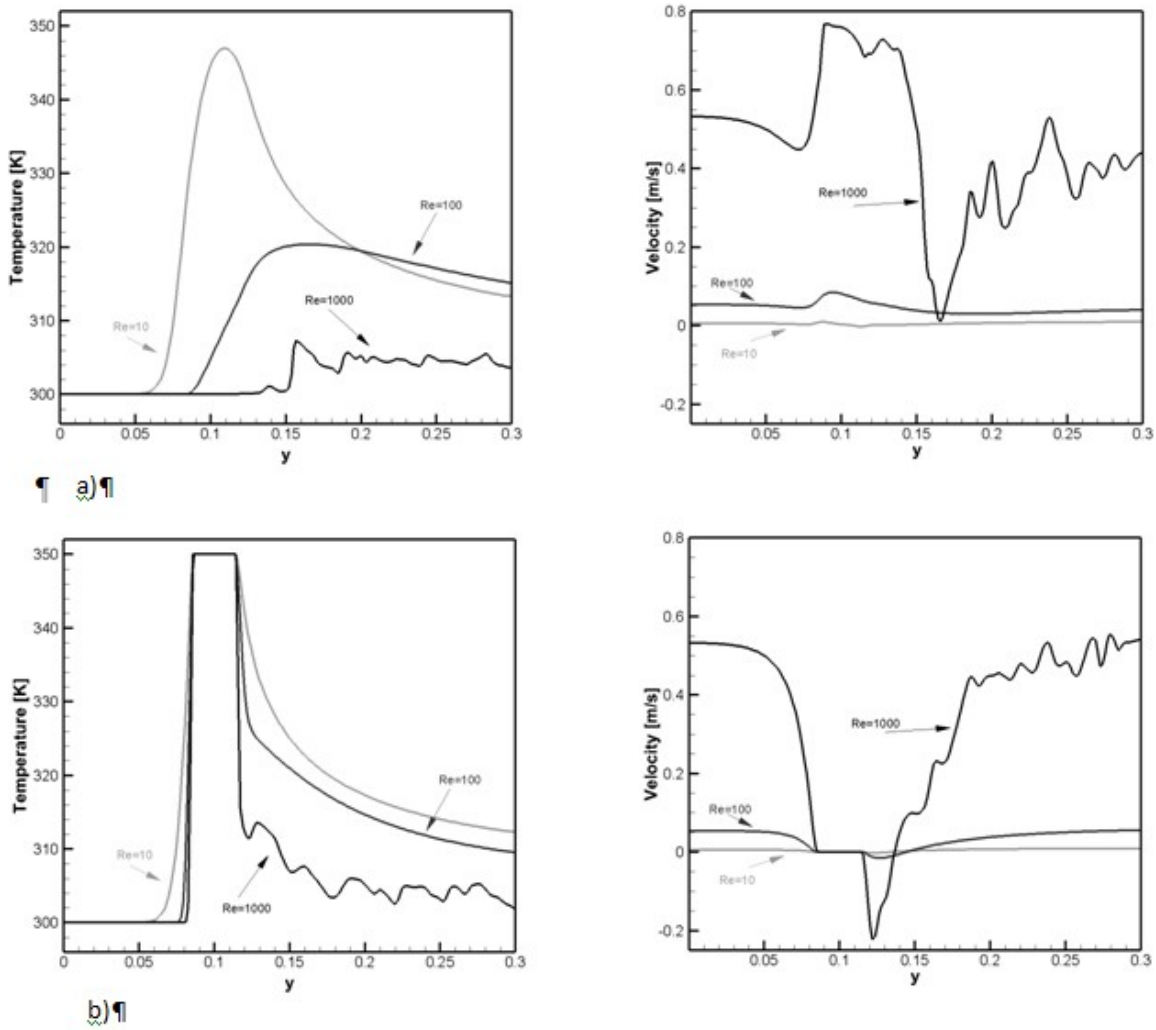


Fig.6. Temperature and velocity profile along the x axis: a) next to the square cylinder, x = 0 b) through the square cylinder (x = 0.0225). See Fig.8 for the locations of the „x"-lines.

Looking at the simulation results (Fig. 4 and 7), it can be seen the compliance with the numerical results from Ansys Fluent is very good. Figure 5 and 8 show visualisation of the temperature contours in all analysed cases. It can be seen that its distribution is different depending on the Reynolds number. In the places where the air hits the square cylinders the fluid slows down. This causes the formation of recirculation zones, which lead to a more intensive heat transfer.

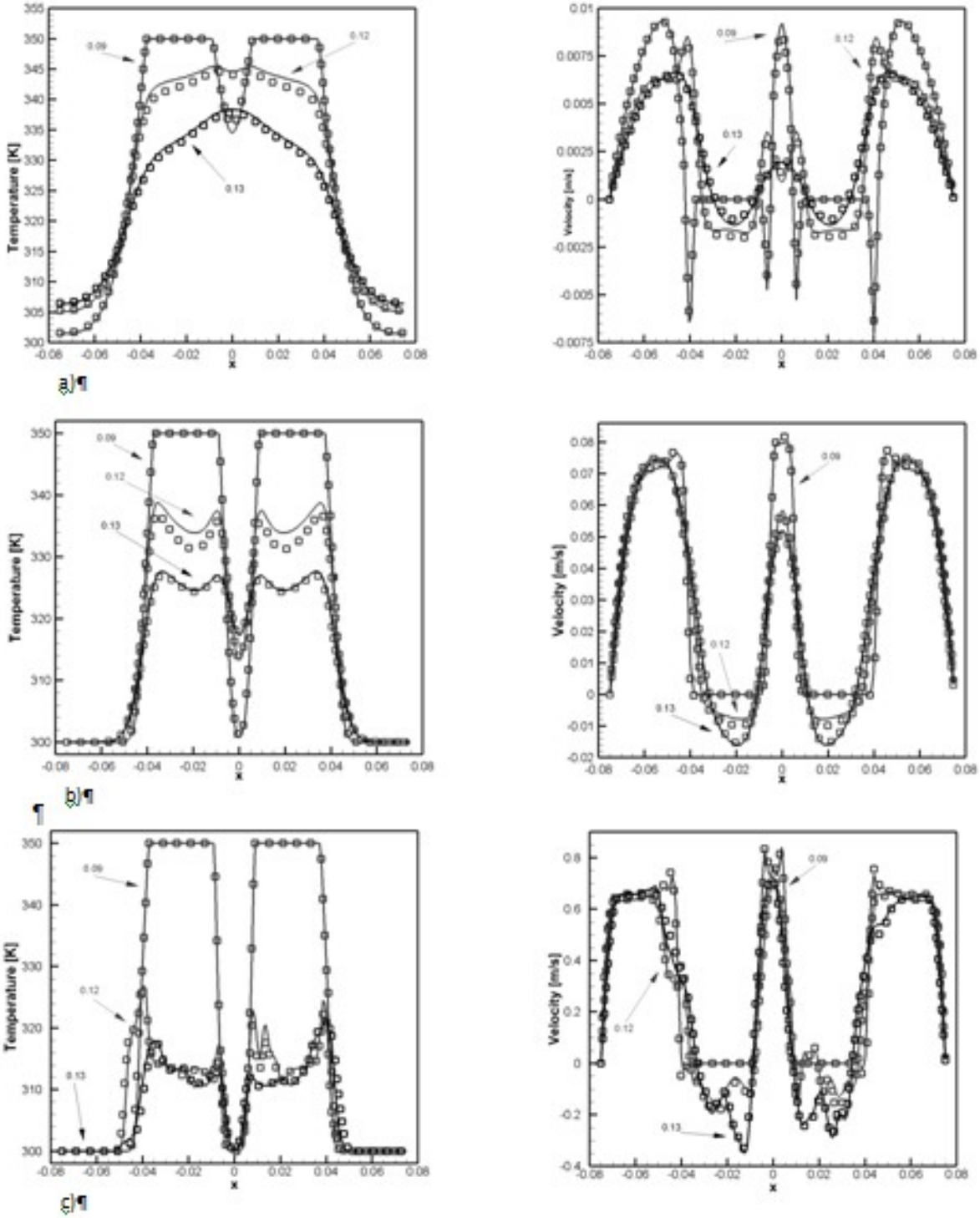


Fig.7. Temperature and velocity profile along the y coordinate

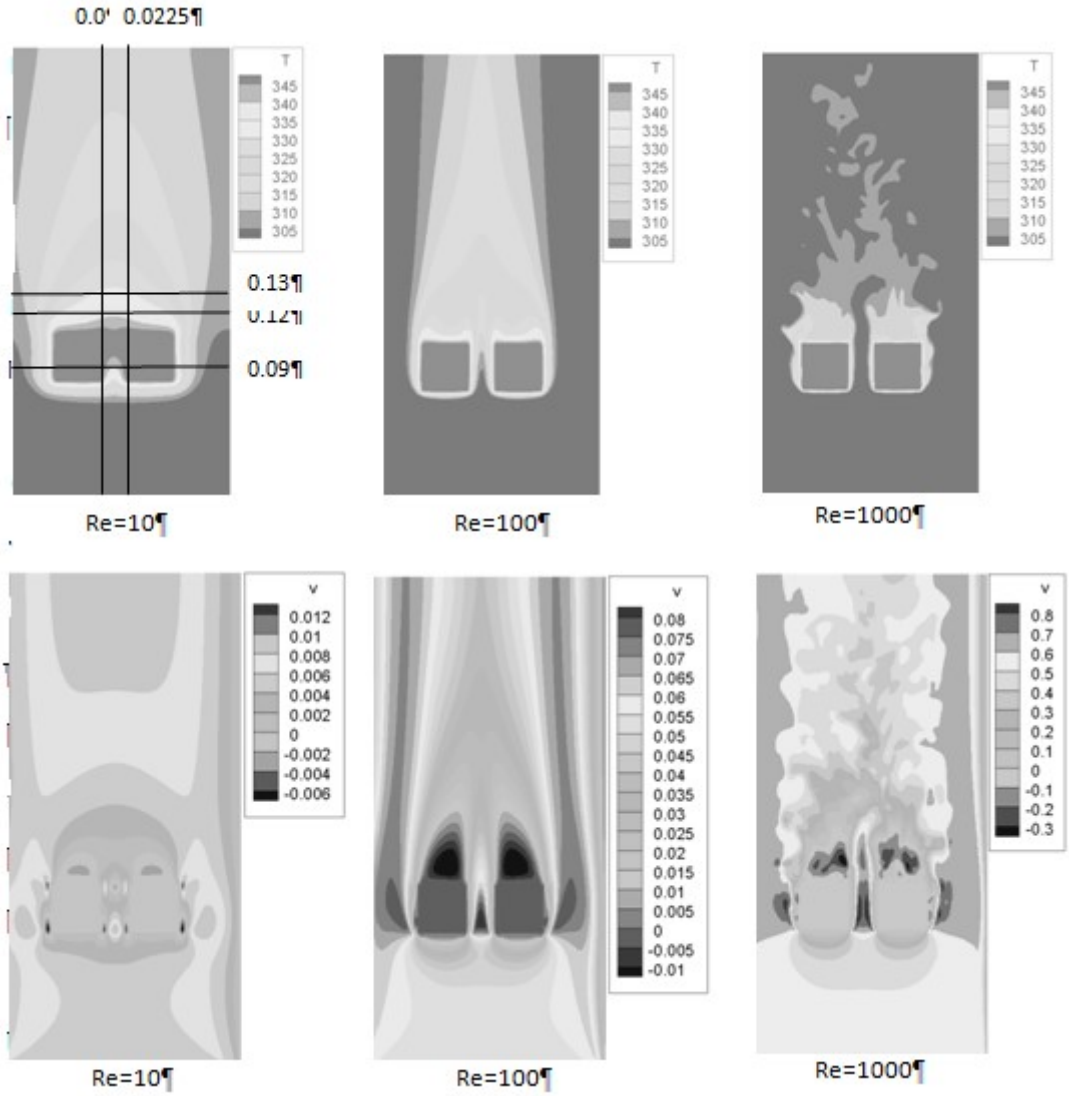


Fig.8 Temperature and velocity contours for two square cylinders

5. Conclusions

The paper presented results of simulation of the heat and fluid flow around square cylinder in two configurations (i) isolated cylinder, (ii) two cylinders places a side. The simulations were performed using a Sailor code and Ansys Fluent. The results obtained were in very good agreement. The simulations were performer for three Reynolds number: 10, 100 and 1000. In the case of flow next to square cylinders, separation of the boundary layer occurs and recirculation region occur in the area behind the body. At a low Reynolds number, the flow is laminar, and the vortices on the left remain attached to the object. As the Reynolds number increases, the flow changes from laminar to transient and turbulent. Transitional flows are a very complex processes not been fully understood yet. Simulation of the around simple geometries such as square cylinder, where such phenomena occur allows for deep insight into its driving mechanisms.

Acknowledges

This work was supported by National Science Centre, Poland (Grant no. 2017/27/N/ST8/02318). PL-Grid infrastructure was used to carry out the computations.

6. References

Sharma A., Eswaran V., 2004. Heat and fluid flow across a square cylinder In the two-dimensional laminar flow regime, Numerical Heat Transfer, Part A, Vol.: 45, 247–269.

Robichaux J., Balachandar S., Vanka S. P., 1999. Two-Dimensional Floquet Instability of the Wake of Square Cylinder, Physical Fluids, Vol.: 11, 560–578.

Saha A. K., Biswas G., Muralidhar K., 2003. Three-Dimensional Study of Flow past a Square Cylinder at Low Reynolds numbers, Interantional Journal Heat Fluid Flow, Vol.: 24, 54–66.

Zaki T. G., Sen M., Gad-el-Hak M., 1994. Numerical and Experimental Investigation of Flow past a Freely Rotatable Square Cylinder, Journal Fluids Structure, Vol.: 8, 555–582.

Sohankar A., Davidson L., Norberg C., 1995. Numerical Simulation of Unsteady Flow around a Square Two-Dimensional Cylinder, Proc. 12th Australian Fluid Mechanics Conf., Sydney, Australia, pp. 517–520.

Okajima A., Yi D., Sakuda A., Nakano T., 1997. Numerical Study of Blockage Effects on Aerodynamic Characteristics of an Oscillating Rectangular Cylinder, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol. 67–68, 91–102.

Tyliszczak A., 2016. High-order compact difference algorithm on half-staggered meshes for low Mach numer flows. Comput.Fluids, Vol.: 127, 131-145.

Fletcher C.A.J., 1991. Computational Techniques for Fluid Dynamics, Springer-Verlag.

Tyliszczak A., 2014. A high-order compact difference algorithm for half-staggered grids for laminar and turbulent incompressible flows. J. Comp.Phys., Vol.: 276, 438-467.

Khadra K., Angot P., Parneix S., 2000. Fictitious domain approach for numericalmodelling of Navier-Stokes equations, Caltagirone JP. Int. J. Numebr. Meth. Fluids, Vol.: 34, 651684.

Kadoch B., Kolomenskiy D., Angot P., Schneider K., 2012. A volume penalization method for incompressible flows and scalar advection diffusion with moving obstacles. J. Comp. Phys., Vol. 231, 4365-4383.

Szymanek E., Tyliszczak A., 2018. Experimental and numerical research on heat and air flow through a granular material, Journal of Physics: Conference Series, Vol.: 1101 (1), 012043

Tyliszczak A., Szymanek E., 2019. Modeling of heat and fluid flow in granular layers using high-order compact schemes and volume penalization method, Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, Vol.: 76 (10), 737-759.

O pewnych wskaźnikach percepcyjnych, wykorzystywanych do tworzenia perspektywy obrazów wzrokowych i słuchowych

Szymański Witold [(1)], Jasińska Alicja [(2)], Kin Maurycy [(2)]

[1] Wydział Architektury Politechniki Wrocławskiej,
[2] Wydział Elektroniki Politechniki Wrocławskiej
Witold Szymański: witoldszymanski@o2.pl

Streszczenie
W pracy omówiono środki kształtowania perspektywy wizualnej oraz audialnej, które można stosować w nagraniach dźwiękowych. Wskazano na podobieństwa w ocenie głębi obrazu oraz przedstawiono wskaźniki lokalizacyjne, służące do tworzenia wrażenia perspektywy. Artykuł jest więc przeglądem stanu wiedzy w temacie percepcji głębi obrazów wizualnych i dźwiękowych, a także odnosi się do podstaw psychologii odbioru.

Słowa kluczowe: perspektywa, zjawisko pogłosu, percepcja wizualna i słuchowa

On the some perceptual cues used for perspective creation of sound and vision images

Summary
In the paper the basic methods of audio-visual perspective creation are presented. The similarities of both kinds of the depth impressions are pointed out, and the basic cues used by human sensors for localization in sound- and visual domains are described Thus, this paper is an overview of the knowledge of perceptual and interpretative mechanisms of a sensation of a depth in audio-visual domain.

Keywords: the depth of image, reverberation, audio-visual perception

1. Wprowadzenie

Rzeczą zauważoną i dowiedzioną we wszystkich sferach ludzkiej działalności jest fakt, że żadna teoria z góry postawiona, nie może mieć skutku, jeżeli jej nie odpowiadają przymioty ludzi chcących się nią posługiwać. Można według pewnego schematu wypełniać rubryki i zadania, jednak z chwilą, w której czynność pewna wymaga udziału indywidualnej umysłowości, teoria jest w zupełności na łasce tej ostatniej (Witkiewicz, 1904). W dziejach myśli artystycznej można odnotować zjawisko czerpania z dorobku form i środków artystycznych innych kultur i środowisk, a niewyłonionych z potrzeb i charakteru ówczesnego środowiska. Powstały nowe możliwości konstrukcyjne, które wygenerowały nowe, niespotykane dotąd formy i dzieła (np. wieża Eiffla). Sztuki piękne oraz wytwory należące do tak zwanej sztuki użytkowej mogą wprawdzie być przykładem naśladownictwa i kompilacji, niemniej jednak są w stanie zapoczątkować nowe trendy i myśli artystyczne, mające swoje odbicie w przedmiotach codziennego życia i użytku (Machniewicz, 1934). Do dyskusji pozostaje natomiast wartość estetyczna takich przedmiotów, czyli zespół cech dostępnych kontroli empirycznej. Swoisty „pluralizm" koncepcji sprawia, że takich zespołów jest kilka,

a co za tym idzie: możliwe jest występowanie kilku płaszczyzn ocen estetycznych, prowadząc do panestetyzmu. Ocena estetyczna takiego „wieloestetycznego" przedmiotu powinna, zatem uwzględnić wszystkie sprawdzalne cechy i zespoły cech (ocena klasyfikująca) oraz określić jego wartość w porównaniu do innego przedmiotu (ocena porównawcza). Społeczną zgodę, co do prawdziwości i wartości oceny osiąga się w wyniku historycznego procesu kulturowego. Wówczas percepcja przedmiotu ocenianego stwarza szansę przeżycia estetycznego (Pawłowski, 1986).

Dzieła sztuki są przedmiotami fizycznymi ukształtowanymi świadomie przez twórcę z zamiarem wywołania u odbiorcy pewnej określonej reakcji psychicznej i emocjonalnej, i mającymi zdolność wywoływania takiej reakcji. Taka możliwość występuje, ponieważ te przedmioty fizyczne są znakami, które bądź wywołują wprost myśli o pewnych przedmiotach psychicznych, bądź wywołują myśli o pewnych przedmiotach fizycznych pozostających w określonych związkach z pewnymi przedmiotami psychicznymi i budzą, przeto myśli o tych przedmiotach lub innych wydarzeniach. W pierwszym przypadku mamy przedstawianie życia psychicznego przy pomocy informacji, w drugim – przedstawianie życia psychicznego przy pomocy przedstawienia objawów i warunków (Wallis, 1968). Zgodnie z teorią postrzegania rzeczywistości, wobec dzieła sztuki możemy wyróżnić etapy poznawania i przeżywania estetycznego: 1. dokonywane w miarę tego, jak percypujemy kolejne części tego dzieła, przy czym mamy w pamięci części percypowane wcześniej, a niekiedy też postrzegamy pewne elementy faz, które będziemy percypować później; 2. dokonywane po percypowaniu całości dzieła, kiedy reagujemy na jego całość, pamiętając elementy składowe i syntezując niejako całe dzieło. Taki sposób odbioru i kształtowania wrażeń u odbiorcy prowadzi do wyodrębnienia dwóch modów percepcyjnych: odbioru analitycznego oraz holistycznego, czego doskonałym przykładem jest percepcja utworów muzycznych: słuchacz najpierw „zmierza się" z materią muzyczną (i dźwiękową w ogóle), a dopiero po gruntownym zapoznaniu się z dziełem analizuje jego poszczególne części składowe i wystawia ocenę (Szuman, 1969).

2. Emocje zawarte w dziele sztuki i ich kształtowanie

Można wykazać, że na finalny kształt i emotywność dzieła mają skojarzenia uczuciowe, występujące w procesie poznawczym, szczególnie rozpatrując zjawisko słyszenia barwnego i w ogóle synestezji. Podobieństwo dwóch różnorodnych wrażeń, np. pewnej barwy i pewnego dźwięku, polega na tym samym, lub podobnym, tonie uczuciowym, który może stać się pośrednikiem w kojarzeniu bodźców (Sobeski, 1917). W kreowaniu zamierzonych wrażeń u odbiorcy może też wystąpić czynnik formotwórczy, którego przykład można

znaleźć choćby w muzyce, gdzie występuje czynnik scalający polegający na ustosunkowaniu wielości elementów prostych, (jako pojedynczych zdarzeń dźwiękowych) w pewną jedność. Wówczas cały utwór muzyczny będzie takim scałkowaniem, ale miejsce elementów prostych zajmą dłuższe, złożone jedności formalne. Taka konstrukcja polega na tym, że pewna wielość elementów wywiera wrażenie jedności, nie zatracając przy tym poczucia wielości elementów składowych. Złudzeniem słuchowym jest fakt, że słyszymy szereg następujących po sobie i niezależnych grup dźwiękowych, natomiast każdy następny moment dźwiękowy słyszymy na tle poprzednich, trwających w pamięci odbiorcy. Dlatego też każdy element dzieła jest kompleksem składającym się z aktualnych w danej chwili brzmień, a także z momentów poprzedzających, występujących, jako tło coraz mniej wyraźne, ale osadzające rozpatrywaną figurę. Skutkiem tego będzie stworzenie swoistej fluktuacji dynamiki oraz wzrost napięć emocjonalnych wytwarzających u odbiorców pewien, zamierzony przez twórcę dynamizm kierujący uwagą słuchacza (Regamey, 1933). Wszystko, co zostało wspomniane tworzy swoisty obraz dźwiękowy w wyobraźni słuchacza, co jest bezpośrednio związane z imersją słuchową, która opisuje zjawisko zanurzenia się w dźwiękowej rzeczywistości.

3. Fenomeny perspektywy

3.1. Perspektywa wizualna

Jednym z przejawów postępu w sztuce i technice jest rozwój teorii i praktyki perspektywy, a także badanie jej percepcji. Śledząc dzieje sztuki z punktu przedstawiania rzeczywistości trójwymiarowej w dwóch wymiarach, można stwierdzić, że rozwój wiedzy o perspektywie i sposobów jej tworzenia ma ogromne znaczenie.

W literaturze przedmiotu spotyka się dwie, pozornie niezależne sfery postrzegania: sfera wizualna – wzrokowa, oraz audialna – słuchowa (Bregman, 1990; Smith, 1989). Owa niezależność może być rozpatrywana wyłącznie w aspektach odbioru bodźców i ich przetwarzania przez określone obszary kory mózgowej, ale jeśli chodzi interpretację i wyobrażenie przestrzeni, rzecz się nieco komplikuje. Przykładem może być choćby fenomen percepcji słuchowiska radiowego, czy zarejestrowanego w danych warunkach wydarzenia artystycznego: słyszymy dźwięki dobiegające z dwóch źródeł, (jeśli rozpatrujemy klasyczny system stereofonii 2-kanałowej), a w naszej wyobraźni rozgrywa się „akcja dźwiękowa" w przestrzeni 3-wymiarowej. Dla określenia tego zjawiska w literaturze funkcjonuje określenie „akuzja" (Blausztein, 1938), wprowadzone właśnie dla potrzeb „widzenia" w wyobraźni sfery dźwiękowej.

Perspektywa, w jakiej człowiek widzi trójwymiarową przestrzeń to rzut środkowy punktów i obiektów przestrzeni wizualnej na dwuwymiarową siatkówkę oka. Własnością

perspektywy naszego oka jest to, że niezakrzywioną przestrzeń naszego otoczenia postrzegamy, jako zdeformowaną. Nasz mózg modyfikuje ten efekt tak, abyśmy dostrzegali zgodność obiektu z jego obrazem (Szymański i in., 2018). Związki pomiędzy perspektywą ludzkiego oka, a perspektywą uzyskiwaną poprzez stosowanie bezpośredniej obserwacji (oraz stosowanie schematów lub konstrukcji z użyciem elementów geometrycznych) zauważyli już starożytni Grecy. Prawdopodobnie nie wiedzieli, że perspektywa ludzkiego oka powstaje na sferycznej siatkówce, ale byli świadomi tego, iż obrazami wzrokowymi linii prostych są łuki krzywych. Można zauważyć, że podziały lub spory w zakresie metod i definiowania perspektywy na gruncie geometrii, optyki, psychofizjologii i teorii widzenia wynikają z różnej interpretacji i pojmowania tego samego zjawiska – rzutu środkowego, i to niezależnie od tego czy rozpatrujemy je w przestrzeni geometrycznej czy przestrzeni wizualnej człowieka. Obraz perspektywiczny obiektów przestrzeni geometrycznej (dla określonego punktu, środka rzutu) lub fizycznej (dla ich obserwatora w tym punkcie) jest zawsze taki sam i nie zależy od powierzchni (tła perspektywicznego), na którym obrazy owych obiektów powstały (w tym także na siatkówce oka ludzkiego). Oko jest narządem wzroku, ale „widzenie" odbywa się w mózgu. Przetwarzanie odbywa się w tej części układu nerwowego (pola wzrokowe kory mózgowej), która interpretuje informacje, docierające tam za pośrednictwem nerwu wzrokowego. Widzenie rozpatrywane, jako działanie kamery jest nieskomplikowane. Soczewka skupia trójwymiarowy świat na dwuwymiarowej powierzchni. Soczewka każdego oka skupia otrzymywany obraz na siatkówce, ale ta część układu widzi w nie większym stopniu, niż każda kamera fotograficzna. Właściwe widzenie, którego zasadniczym etapem jest interpretacja impulsów elektrycznych biegnących wzdłuż nerwu wzrokowego, odbywa się w mózgu. Informacja z siatkówki, początkowo prosta, ulega niezmiernemu przemieszaniu na swej drodze ku korze mózgu. Neurony muszą ją tu rozszyfrować, nadać jej sens i odtworzyć ją dla nas w postaci trójwymiarowego wyobrażenia. Własnością perspektywy naszego oka jest to, że linię prostą widzimy, jako krzywą. Niezakrzywioną przestrzeń naszego otoczenia postrzegamy, jako zdeformowaną. Nasz mózg modyfikuje zakrzywienia obrazów powstających na siatkówce tak, abyśmy dostrzegali zgodność obiektu z jego obrazem. Ta własność naszego mózgu, była jednym z ważnych warunków przystosowania się naszego gatunku do środowiska naturalnego. Wrażenie głębi przestrzennej uzyskujemy na poziomie odruchu wykorzystując jedną z własności perspektywy - zbieżność. Istnieją jednak perspektywy pozbawione tej własności zwane równoległymi albo rzutami ukośnokątnymi. Obrazowanie przestrzeni, i jej obiektów za ich pomocą, pozbawione jest w istocie iluzji (wrażenia) głębi. W zwykłych warunkach układ wzrokowy człowieka używa różnych

sposobów, by lepiej ocenić odległość, takich jak na przykład paralaksa uzyskiwana przez ruch głowy, wobec czego poruszająca się głowa widzi lepiej niż głowa nieruchoma, zwłaszcza, gdy używa się tylko jednego oka. Zdumiewającą zdolnością ludzkiego wzroku jest nie ocena odległości, lecz jej dokładne i zdecydowane określenie nawet wtedy, gdy brak jest innych wskazówek.

Należy też zwrócić uwagę na podstawowe elementy psychologii postrzegania, a mianowicie na zasadę „figura – tło" oraz na zjawisko rytmu i jego percepcję. Każdy kształt stanowi bodziec optyczny o pewnej sile, a kolejność następujących po sobie bodźców tworzy rytm, który będzie jednolity, gdy odległości między kształtami będzie stała. Stosowanie jednolitego rytmu nie daje jednak takiego natężenia formy, jak system kontrastów; zapewnia jednak większą jednoznaczność i stabilność. W systemie rytmu zjawisk przestrzennych głównym wyznacznikiem jest budowa przestrzeni, jako całości i wbudowanie w nią przedmiotu, jako części tej całości (Strzemiński, 1936). Rytm polega, więc na szeregowaniu form na zasadzie jednej i tej samej wytycznej i mających tę samą wielkość, co się przejawia w łączeniu się form w układy uformowań podobnych. Ponadto rytm jest tym bardziej spoisty (spójny) im bardziej jednoznacznie łączą się w nim części składowe, natomiast forma jest tym bardziej spoista, im bardziej jednoznacznie narzuca nam się jej rysunek w płaszczyźnie pionowej i poziomej. W formę rytmu mogą się łączyć takie formy – części, które mają wspólną wytyczną formalną i wspólną wielkość przy rozmaicie uformowanych częściach poszczególnych elementów figury (Żórawski, 1962). Działając na intensywności poszczególnych elementów takiej struktury rytmicznej, można uzyskać wrażenie głębi poprzez iluzję oddalania się poszczególnych elementów od odbiorcy.

3.2. Perspektywa słuchowa

W ogólnej historii wiedzy, akustyka, a zwłaszcza percepcja dźwięku, zajmuje jedno z dalszych miejsc. Z pozoru jest to mały obszar wiedzy, o którym ludzie niezwiązani zawodowo z dźwiękiem wiedzą niewiele, lecz istotnie nic bardziej mylnego, jeśli chodzi o wagę dziedziny, jaką jest akustyka. Każda z pod dziedzin czy to związana z zakresem dźwięków niesłyszalnych dla człowieka, czy urządzeniami audio po psychoakustykę ma znaczący wpływ w codziennym życiu człowieka, bez czego nie bylibyśmy w stanie funkcjonować z takim komfortem, jaki mamy w ostatnich latach. Wprawdzie starożytni uczeni zdawali sobie sprawę ze znaczenia faktu, iż pobudzenie strun o tym samym naprężeniu, których długości pozostają w ściśle określonych stosunkach matematycznych, powoduje powstawanie dźwięków tworzących interwały (Pitagoras), czy też uznawali dźwięk za drganie powietrza (Arystoteles), to znalezienie korelacji pomiędzy bodźcem fizycznym a

wrażeniem słuchowym wydawało się niemożliwe. Psycholodzy przez dłuższy czas bardzo ostrożnie traktowali subiektywne doznania u odbiorców, występujące pod wpływem prezentowanych bodźców, ponieważ w powszechnym mniemaniu funkcjonował (i nadal funkcjonuje) fakt, że ludzie do pewnego stopnia słyszą i widzą to, co spodziewają się usłyszeć lub zobaczyć. Nie można też zapominać o ograniczeniach zmysłów postrzegania oraz interpretacji odebranych bodźców, a także o trudnościach w dokładniejszym opisaniu tego, co się w danym momencie słyszy (Pierce i in., 1967). W warunkach naturalnych do uszu człowieka docierają dźwięki z różnych kierunków. Układ słuchowy umożliwia lokalizację położenia danego źródła, to znaczy pozwala określić jego azymut, kąt elewacyjny (wzniesienia) a także odległość. Ponieważ umiejscowienie percypowanych źródeł dźwięku określone jest poprzez trzy niezależne współrzędne, do prawidłowej lokalizacji niezbędne są co najmniej trzy niezależne wskaźniki położenia źródła dźwięku, zawarte w sygnale akustycznym (Renowski, 1974). Odniesienie tych wskaźników do uprzednio nabytego doświadczenia w zakresie lokalizacji, odbywające się niejako samoczynnie w mózgu człowieka, pozwala umiejscawiać położenie źródeł w obrazie słuchowym (Stevens i in., 1968).

Do określenia położenia źródła, lub kierunku padania fali dźwiękowej na słuchacza w płaszczyźnie poziomej wystarczającymi wskaźnikami są międzyuszna różnica czasów dojścia fali akustycznej oraz międzyuszna różnica natężeń dźwięku (lub poziomów sygnału), występujące pomiędzy uchem prawym i lewym (Fastl i in., 2007). Dźwięki docierające do słuchacza różnią się zatem czasem (fazą) oraz głośnością, a głowa słuchacza znajdująca się w polu akustycznym powoduje powstawanie cieni akustycznych oraz spiętrzeń dźwięku. Dodatkowo, różnice natężeń wynikające z uginania fal powiększane są przez małżowiny uszne, które dodatkowo powodują zmiany ciśnienia dźwięków przychodzących z różnych kierunków. W warunkach naturalnych różnice natężeń oraz różnice czasowe zawsze występują razem, stanowiąc parę wskaźników lokalizacyjnych. Lokalizacja dźwięków o złożonej strukturze widmowej jest tym łatwiejsza, im widmo dźwięku jest bogatsze. Dlatego też niektóre osoby niewidome, które posiadają umiejętność echolokacji wydają z siebie dwa rodzaje sygnałów w celu odpowiednio dokładnej analizy otaczającej ich przestrzeni. Oba sygnały wspólnie pozwalają osobie, która jest echolokatorem na uzyskanie pełnego widma, jednym z tych sygnałów jest kląskanie, które jest sygnałem impulsowym a drugi sygnał to “kss…”, który odpowiada za sygnał szerokopasmowy. Widmo, które zawiera więcej składowych charakteryzuje się tym, iż podczas odbioru wspomnianych dźwięków występuje różnica barwy dźwięku, spowodowana zależnością występowania różnic

natężenia od częstotliwości: ucho skierowane w stronę źródła odbiera wszystkie składowe widmowe we właściwych proporcjach, podczas gdy ucho odwrócone od źródła słabiej „słyszy" dźwięki o częstotliwościach wyższych (Renowski, 1974). Należy także wspomnieć, że w zależności od kontekstu i semantyki źródła, lokalizacja ta może być nieco zaburzona, zwłaszcza w muzyce, gdzie prócz treści mamy dodatkowo do czynienia z powstawaniem skojarzeń rozumianych pod postacią znaków i symboli, które mogą być skojarzone z określonym kierunkiem (Wallis, 1968). Ilustracją tego faktu będzie mimowolne skojarzenie odgłosów ptaków, lub też dźwięków ich naśladujących z kierunkiem przychodzenia dźwięków z góry w stosunku do obserwatora.

W przestrzeni otwartej ocena odległości opiera się przede wszystkim na odczuwaniu zmiany barwy dźwięku, spowodowanej nierównomiernym pochłanianiem energii akustycznej przez atmosferę, które rośnie wraz ze wzrostem częstotliwości. Odległość źródeł określa się zatem przez porównanie głośności wyższych składowych, które odpowiedzialne są z kolei za wyrazistość dźwięku, co ma wpływ na zrozumiałość i wyrazistość źródeł (Brachmański, 2015; Flanagan, 1965). Pomocna jest także znajomość ocenianego źródła dźwięku (Woodworth i in., 1963). W pomieszczeniach zamkniętych odległość ocenia się także na podstawie barwy dźwięku oraz na proporcjach pomiędzy dźwiękiem bezpośrednio przychodzącym od źródła i dźwiękiem odbitym od powierzchni ograniczających (ściany, sufit, podłoga itp.) (Szymański i in., 2018). Należy także wspomnieć, że w sytuacjach rzeczywistych lokalizując źródło dźwięku człowiek mimo woli wykonuje drobne ruchy głową, co także znacznie ułatwia umiejscowienie źródła w przestrzeni, zwłaszcza położonego poza płaszczyzną poziomą. Dodatkowe ułatwienie w procesie lokalizacji występuje wtedy, gdy źródło dźwięku jest widoczne przez słuchacza. Możemy wówczas założyć, że mózg dokonuje swego rodzaju fuzji bodźców i występuje proces wspomagania percepcji dźwiękowej przez percepcję wizualną, i odwrotnie. Tego rodzaju synergia występuje przy każdym rodzaju bodźca: w sferze smaku, dotyku, czy też zapachu (Smith 1989). Należy także dodać, że mechanizm takiego „łączenia" bodźców w celu spotęgowania wrażenia zawsze odnosi się do pamięci, czyli do znajomości obiektu.

4. Podsumowanie

W pracy przedstawiono podstawowe sposoby kształtowania perspektywy wizualnej oraz audialnej. Omówiono podobieństwa oraz zależności w ocenie głębi obrazu wizualnego oraz dźwiękowego. Przedstawiono także podstawowe wskaźniki lokalizacyjne używane przez zmysły postrzegania człowieka, a wykorzystywane przez artystów i reżyserów do kreowania wrażenia perspektywy i głębi. Należy także wspomnieć o wykorzystywaniu podstawowych

właściwości oka i ucha ludzkiego, a także aparatu percepcyjnego człowieka w pracach nad różnymi procesami stosowanymi w technice, między innymi nad kodowaniem percepcyjnym, służącym do ograniczenia objętości rozmiaru sygnałów, tak wizualnych, jak i dźwiękowych, a wykorzystywanym powszechnie w telekomunikacji, gdzie poszukuje się metod nie tyle bezstratnego przesyłania informacji, co sposobów, aby takowe ograniczenie nie było percypowane przez odbiorców. Ponadto istotnym w ostatnich latach tematem badań jest umiejętność echolokacji u osób niewidomych. U niektórych osób, będących echolokatorami zauważono reakcję ośrodka w mózgu, odpowiadającego za kreowanie przestrzeni poprzez bodziec wzroku na bodźce słuchowe, czyli analogicznie tak jak występuje cień poprzez padanie światła na przeszkodę, tak samo może powstać cień akustyczny, takie zjawisko mózg może interpretować bliźniaczo.

Podziękowania

Niniejsza praca została wykonana w ramach działalności statutowej finansowanej przez Wydziały Architektury oraz Elektroniki Politechniki Wrocławskiej.

5. Literatura

Blausztein L., 1938. O percepcji słuchowiska radiowego, w: Wybór pism estetycznych, Kraków, Universitas, 2005, 145-196.

Brachmański S., 2015. Wybrane zagadnienia oceny jakości transmisji sygnału mowy, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 127-143.

Bregman A. S., 1990. Auditory scene analysis, MIT Press, Cambridge, MA, 595-607.

Fastl H., Zwicker E., 2007. Psychoacoustics. Facts and Models, Springer, Berlin, 159-233.

Flanagan J. L., 1965. Speech analysis, synthesis and perception, Springer, Berlin - Heidelberg - New York, 234-239.

Machniewicz S., 1934. Estetyka życia codziennego, w: Wybór pism estetycznych, Kraków, Universitas, 2012, 139-177.

Pawłowski T., 1986. Obiektywizm panestetyczny, w: Wybór pism estetycznych, Kraków, Universitas, 2010, 86-96.

Pierce J. R., David E. E., 1967. Świat dźwięków, PIW, Warszawa, 116-117.

Regamey K., 1933. Treść i forma w muzyce, w: Wybór pism estetycznych, Kraków, Universitas, 2010, 7-31.

Renowski J., 1974. Akustyka psychofizjologiczna – ćwiczenia laboratoryjne, Skrypt Politechniki Wr., Wrocław, 136-147.

Smith A., 1989. Umysł, Państwowy Zakład Wyd. Lekarskich, Warszawa, 1989, 251-265.

Sobeski M., 1917. Filozofia sztuki, w: Wybór pism estetycznych, Kraków, Universitas, 2010, 119-121.

Stevens S. S., Davis H., 1968. Hearing, Wiley & Sons, New York, 173-197.

Strzemiński W., 1936. Przedmiot i przestrzeń, w: Wybór pism estetycznych, Kraków, Universitas, 2006, 34-36.

Szuman S., 1969. O słuchaniu i przeżywaniu muzyki, w: Wybór pism estetycznych, Kraków, Universitas, 2008, 163-187.

Szymański W., Prygoń S., Kin M., 2018. Tworzenie głębi w przestrzeni audiowizualnej, w: Nauka, Badania i Doniesienia Naukowe 2018, Nauki techniczne i ścisłe cz. 2, Idea Knowledge Future, 172-180.

Wallis M., 1968. Przeżycie i wartość, w: Wybór pism estetycznych, Kraków, Universitas, 2004, 67-70.

Witkiewicz S., 1904. Pisma tatrzańskie I – Styl zakopiański, w: Wybór pism estetycznych, Kraków, Universitas, 2009, 262-287.

Woodworth R. S., Schlosberg H., 1963. Psychologia eksperymentalna, PWN, Warszawa, 254-261.

Żórawski J., 1962. O budowie formy architektonicznej, w: Wybór pism estetycznych, Kraków Universitas, 2008, 70-79.

Wpływ wykorzystania mikroplatform programistycznych na wydajność tworzonych serwisów REST API

Szymula Łukasz [(1)]

[1] Wydział Matematyki i Informatyki, Uniwersytet Im. Adama Mickiewicza w Poznaniu
Łukasz Szymula: lukaszszy@icloud.com

Streszczenie
Celem badania było sprawdzenie i porównanie wydajności platform oraz mikroplatform programistycznych pod względem tworzonych serwisów REST API. W pracy omówiono ogólną charakterystykę serwisów webowych, wykorzystywanego wzorca MVC oraz użytych sposobów implementacji warstwy dostępu do danych. Kolejny rozdział stanowi opis wykorzystywanych narzędzi. Wskazano w nim dwie platformy programistyczne oraz dwie mikroplatformy, które wykorzystano przy tworzeniu aplikacji webowych oraz narzędzie pozwalające na wykonywanie testów na wcześniej zaimplementowanym oprogramowaniu. W dalszej części pracy opisano funkcjonalności stworzonych aplikacji webowych z wykorzystaniem wcześniej opisanych platform oraz sposób tworzenia przypadków testowych. Kolejny rozdział prezentuje wyniki z przeprowadzonych badań. Porównano czasy wysłanych żądań dla podstawowych typów metod HTTP występujących w tworzonych web serwisach REST API. Ostatnia część pracy stanowi wnioski z przeprowadzonych badań.

Słowa kluczowe: platformy programistyczne, PHP, REST API, protokół HTTP, aplikacje webowe

The impact of using programming microframeworks on the performance of created REST API services

Summary
The aim of the study was to check and compare the performance of platforms and programming microplatforms in terms of created REST API services. The paper discusses the general characteristics of web services, the MVC pattern, and the methods used to implement the data access layer. The next chapter is a description of used tools. It indicates two programming platforms and two microplatforms that were used to create web applications and a tool that allows to perform tests on previously implemented applications. The rest of the work describes the functionality of web applications created using the previously described platforms and how to create test cases. The next chapter presents the results of the research. The times of sending requests were compared for basic types of HTTP methods found in created REST API web services. The last part of the work is the conclusions of the research.

Keywords: programming platforms, PHP, REST API, HTTP protocol, web applications

1. Wstęp

Rozwój informatyki, a w tym programowania przyniósł wiele powtarzających się problemów, które rozwiązywano i wdrażano wraz z rozwojem kolejnych systemów. Popularność i uniwersalność dostarczanych rozwiązań doprowadziła do powstania narzędzi, które mają na celu tworzenie nowych systemów, eliminując wcześniej istniejące problemy i wprowadzanie rozwiązań usprawniających i przyśpieszających prace zespołów programistycznych poprzez wykorzystanie tak zwanych platform programistycznych.

Platforma programistyczna to narzędzie do budowy aplikacji. Definiuje strukturę aplikacji oraz ogólny mechanizm jej działania, a także dostarcza zestaw komponentów

i bibliotek ogólnego przeznaczenia do wykonywania określonych zadań. Z punktu widzenia tworzenia aplikacji webowych wspiera proces tworzenia serwisów webowych, zasobów i interfejsów API. Platformy zapewniają standardowy sposób budowania i wdrażania aplikacji internetowych w sieci. Ich zadaniem jest zautomatyzowanie kosztów związanych z typowymi działaniami wykonywanymi przy tworzeniu stron internetowych.

Mikroplatformy to minimalistyczne wersje platform programistycznych pozbawione większości funkcji dostępnych w typowych platformach. Zazwyczaj nie posiadają bibliotek odpowiedzialnych za autoryzacje, uwierzytelniane i walidację danych wejściowych, techniki mapowania obiektowo-relacyjnego oraz silników szablonów webowych. Zostały one zaprojektowane z myślą o tworzeniu serwisów REST API (Garbar).

REST (ang. Representational State Transfer) to styl architektoniczny oprogramowania zdefiniowany przez Roy'a Fieldinga w jego rozprawie doktorskiej w 2000 roku, który definiuje zbiór wymuszeń przy tworzeniu serwisów webowych. API (ang. Application Programming Interface) odnosi się do zestawu reguł definiujących dostęp i postać zasobów przekazywanych pomiędzy programami komputerowymi. Serwisy webowe, które tworzone są z wykorzystaniem stylu REST (nazywane RESTful) dostarczają interoperacyjność między systemami komputerowymi w Internecie. Tak stworzone serwisy umożliwiają dostęp do tekstowych zasobów sieci i manipulację za pomocą jednolitego i predefiniowanego zestawu operacji bezstanowych.

Aby stworzone API mogło być uznane za REST musi spełnić następujące warunki:

1. Styl zerowy

Jest to zbiór pustego zestawu ograniczeń. Z perspektywy architektonicznej styl zerowy opisuje system, w którym nie ma wyraźnych granic między komponentami, w którym przyrostowo identyfikuje i stosuje się ograniczenia do elementów systemu.

2. Architektura klient-serwer

Architektura typu klient-serwer zakłada niezależność aplikacji klienta od aplikacji serwerowej. Zmiany wprowadzone w oprogramowaniu po stronie klienta nie wpływają na zmiany zachodzące po stronie serwera, a modyfikacje serwera nie powodują zmian w wersji systemu klienta. Dzięki zastosowaniu tego podejścia można niezależnie rozwijać aplikacje.

3. Bezstanowość

Każde jednorazowe połączenie z serwerem ze strony klienta powinno być całkowicie niezależne i zwierać wszystkie informacje potrzebne do tego, aby połączenie mogło zakończyć się sukcesem.

4. Cache

Ograniczenia pamięci podręcznej wymagają, aby dane w odpowiedzi na żądanie były domyślnie lub jawnie oznaczone, jako buforowane lub niebuforowane.

5. Warstwy

Warstwowy styl systemu pozwala na architekturę złożoną z warstw hierarchicznych poprzez ograniczenie zachowania komponentu, posiadając inny zakres odpowiedzialności z warstwą, z którą wchodzi w interakcje.

6. Jednolity interfejs

Separacja implementacji po stronie klienta oraz serwera poprzez zastosowanie jednolitego interfejsu (Fielding, 2000).

REST API zostało zaprojektowane z myślą o wykorzystywaniu dostępnych i znanych protokołów do komunikacji pomiędzy programami komputerowymi. Najpopularniejszym protokołem komunikacyjnym jest protokół HTTP (ang. Hypertext Transfer Protocol) będący podstawą komunikacji danych w sieci WWW (Brail, 2015).

Protokół HTTP posiada między innymi cztery metody, które pozwalają na zarządzanie danymi:

1. GET (pobranie danych z serwera)
2. POST (dodanie nowych danych na serwer)
3. PUT (modyfikacja istniejących danych)
4. DELETE (usunięcie danych z serwera)

Aplikacje korzystające z wyżej wymienionych metod w celu składowania danych w bazie danych wymagają implementacji odpowiedniej warstwy. Zarządzanie danymi umieszczonymi w bazie danych odbywa się z wykorzystaniem warstwy dostępu do danych nazywanej DAL (ang. Data Access Layer). Najczęściej wykorzystywaną techniką w platformach programistycznych do implementacji warstwy dostępu do danych jest wykorzystanie techniki mapowania obiektowo-relacyjnego ORM (ang. Object-Relational Mapping).

ORM polega na reprezentowaniu danych z postaci relacyjnej bazy danych na obiekty i na odwrót. Pozwala na automatyczne generowania kodu SQL na podstawie dostarczonych metadanych. W ORM aplikacja wykorzystuje jedynie stworzony interfejs oraz klasy modelu dziedzinowego. Wykonywanie działań może odbywać się bez użycia niskopoziomowego języka zapytań SQL oraz wielokrotnego określania połączenia z bazą danych w kodzie źródłowym programu dzięki użyciu odpowiednich konwencji i przypisaniu zmiennych środowiskowych w aplikacji.

Dwa najczęściej spotykane wzorce implementacji techniki ORM to wzorzec rekordu aktywnego (ang. ActiveRecord) oraz maper danych (ang. DataMapper). We wzorcu ActiveRecord każda klasa wzorca reprezentuje tabelę z relacyjnej bazy danych, której atrybuty reprezentowane są poprzez atrybuty tej klasy, a jej instancja reprezentuje wiersz tabeli. Data Mapper oddziela obiekty w pamięci od bazy danych. Jego zadaniem jest przesyłanie danych między nimi, a także izolowanie ich od siebie (Mincewicz, 2018).

Najczęściej stosowanym wzorcem w platformach programistycznych dla stworzenia warstwowego podziału systemu jest zastosowanie wzorca MVC (ang. Model, View, Controller). Jest to wzorzec architektoniczny, który wymusza separacje pomiędzy modelem, kontrolerem oraz widokiem. Umożliwia on podział aplikacji na mniejsze. Główną jego zaletą jest ułatwienie modyfikacji, rozszerzania oraz utrzymania aplikacji (Lockhart, 2015).

Celem wykonania badań było wykorzystanie mikroplatform i platform programistycznych do stworzenia aplikacji opartych o REST API, aby potwierdzić, bądź zaprzeczyć poglądowi mówiącemu o tym, że mikroplatformy jako narzędzia wpływają na polepszenie wydajności tworzonych serwisów.

2. Charakterystyka wykorzystanych narzędzi

- Laravel

Jest to platforma programistyczna służąca do tworzenia aplikacji webowych oparta na licencji MIT. Pierwsze wydanie miało miejsce na początku czerwca 2011 roku. Według zapewnień producenta Laravel ma za zadanie uczynić proces tworzenia aplikacji jak najwygodniejszym dla programisty, bez konieczności poświęcania funkcjonalności samej aplikacji. Wykorzystuje wzorce projektów znanych z języka PHP oraz Ruby on Rails, ASP.NET MVC i Sinatra (Laravel).

- Lumen

To mikroframework stworzony przez producentów platformy Laravel, który rozwijany jest od momentu wprowadzenia na rynek 5. wersji Laravel'a, czyli od 2015 roku. Wykonany z myślą o tworzeniu mikroserwisów oraz szybkiego API. Pozwala na wykorzystywanie komponentów znanych i dostępnych z platformy Laravel (Lumen).

- Symfony

To platforma programistyczna do tworzenia aplikacji webowych wydana na licencji X11, rozwijana od lipca 2011 roku. Symfony ma za zadanie dostarczać rozwiązania wspierające wykorzystanie najlepszych praktyk, standaryzację i interoperacyjność aplikacji (Symfony).

- Slim

Mikroplatforma na licencji MIT, która powstała w 2012 roku. Służy do tworzenia w pełni funkcjonalnych aplikacji webowych z wykorzystaniem interfejsu użytkownika, API oraz prototypowania. Zapewnia ograniczenia w ilości tworzonego kodu (Slim).

- Eloquent ORM

Narzędzie służące do implementacji techniki mapowania obiektowo-relacyjnego platformy programistycznej Laravel. Wykorzystuje wzorzec rekordu aktywnego (ang. ActiveRecord). Eloquent ORM reprezentuje tabele bazy danych, jako klasy, a ich instancje obiektów są powiązane z pojedynczymi rekordami (Malatesta, 2015).

- Doctrine ORM

Biblioteka służąca do implementacji techniki mapowania obiektowo-relacyjnego. Korzysta ona ze wzorca Data Mapper, który oddziela obiekty w pamięci od bazy danych. Jego zadaniem jest przesyłanie danych między nimi, a także izolowanie ich od siebie (Flower, 2005).

- Codeception

Platforma programistyczna służąca do tworzenia oraz przeprowadzania testów aplikacji napisanych w języku PHP. Pozwala między innymi na wykonywanie testów jednostkowych, automatycznych, elementów wewnętrznych w projektach tworzonych przy użyciu platform programistycznych oraz serwisów REST API (Codeception).

- DigitalOcean

Dostawca usług w chmurze, który oferuje platformę IaaS (Infrastructure as a Service) dla programistów. Jest trzecią co do wielkości firmą hostingową. Konkuruje z Amazon Web Services (AWS) i Google Compute Engine. Pozwala na korzystanie z wielu dostępnych dystrybucji Linux takich jak: Ubuntu, CentOs, Debian, Fedora, CoreOs, FreeBSD (DigitalOcean).

- Cloudways

Platforma służąca do zarządzania hostingiem w chmurze. Umożliwia wsparcie takich dostawców jak DigitalOcean, Linode, Vultr, Amazon Web Services oraz Google Cloud. Pozwala na tworzenie aplikacji z wykorzystaniem najpopularniejszych platform programistycznych języka PHP (Laravel, Symfony, CakePHP, Slim, Codeignitor, Yii i innych) (Cloudways).

3. Budowa środowiska do testów

- Implementacja aplikacji webowych

W celu wykonania badań pozwalających określić wydajność tworzonych serwisów REST API stworzone zostały cztery aplikacje webowe realizujące jednakowe funkcjonalności. Aplikacje zostały zaimplementowane przy użyciu platform Laravel v6.9 i Symfony v4.4 oraz mikroplatform Lumen v6.2 i Slim v4.1. Każda implementacja została wykonana w oparciu o wzorzec architektoniczny MVC. W celu zarządzania relacyjną bazą danych wykorzystano system MySQL.

Aplikacja służy do zarządzania notatkami użytkowników, które zawierają takie informacje jak tytuł, treść oraz typ notatki. Do funkcjonalności systemu należy:

- wyświetlenie przykładowego tekstu,
- utworzenie nowej notatki,
- wyświetlenie listy wszystkich notatek,
- wyświetlenie wybranej notatki,
- modyfikacja danych istniejącej notatki,
- usunięcie notatki.

Realizacja poszczególnych funkcjonalności odbywa się poprzez wysłanie konkretnego żądania HTTP (Tab. 1).

Tabela 1. Dostępne metody HTTP zaimplementowane w aplikacjach (opracowanie własne)

Typ metody	URI	Opis
Metoda pozwalająca na wykonywanie operacji odczytania przykładowego tekstu:		
GET	api/text	Wyświetlenie przykładowego tekstu
Metody pozwalające na wykonywanie operacji CRUD dla notatek:		
GET	api/note	Lista wszystkich notatek
GET	api/note/{id}	Dane notatki o wybranym numerze id
POST	api/note	Dodanie notatki
PUT	api/note/{id}	Modyfikacja notatki
DELETE	api/note/{id}	Usunięcie notatki

Na potrzeby składowania danych stworzono szablon bazy danych, zawierający tabele „users” oraz „notes”. Tabele zostały złączone przy użyciu relacji jeden do wielu (1N).

Implementacja oprogramowania testującego

Do przeprowadzenia testów serwisów REST API dla stworzonych aplikacji webowych wykorzystano platformę do testowania Codeception. Za pomocą pliku codeception.phar ([w:] https://codeception.com/install) zainstalowano wymagane środowisko. Kolejnym krokiem

było stworzenie odpowiednich katalogów i pliku api.suite.yml, w którym skonfigurowano moduł REST dla aktora „Api Tester”. Wprowadzono adres url aplikacji wraz z loginem i hasłem ze względu na wymogi poświadczenia BasicAuth, wskazano na moduł PhpBrowser w celu dostępu do serwisów przy użyciu klienta HTTP oraz określono typ zwracanego formatu danych, jako JSON.

Następnie przystąpiono do stworzenia odpowiednich pakietów testowych. Każdy pakiet składa się z odpowiednich przypadków testowych. Na potrzeby badania testom podlegały wybrane zapytania HTTP. W celu wysłania odpowiednich żądań HTTP skorzystano z metod: sendGET(), sendPOST(), sendPUT() oraz sendDELETE() w kodzie źródłowym odpowiednich klas. Aby sprawdzić status wysłanego żądania oraz zwrócony format danych użyto metod seeResponseCodeIs({kod}) oraz seeResponseIsJson(). Pakiety testowe zostały uruchomione wraz z opcją --json, która pozwoliła na wygenerowanie pliku .json zawierającego szczegółowe wyniki testu. Czas mierzony był od momentu wysłania wybranego żądania HTTP za pomocą odpowiedniej metody, a za zakończenie obsługi odpowiedniego zasobu przyjęto moment otrzymania i zaakceptowania danych w formacie json oraz uzyskanie odpowiedniego kodu odpowiedzi protokołu HTTP. Każdy pakiet testowy uruchomiono pięć razy, a następnie obliczono średni wynik.

Stworzone testy sprawdzały:

- czas wykonania żądania zwracającego wiadomość „Hello World”,
- czas wykonania żądania zwracającego listę wszystkich rekordów,
- czas wykonania żądania zwracającego pojedynczy rekord,
- czas wykonania żądania dodającego nowy rekord,
- czas wykonania żądania wprowadzającego zmiany w rekordzie,
- czas wykonania żądania usuwającego rekord.

- Wdrożenie aplikacji

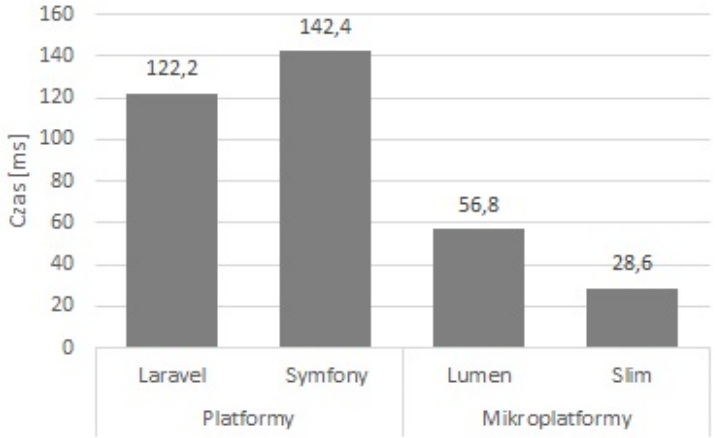
Aplikacje zostały wdrożone na hostingu dostawcy DigitalOcen z wykorzystaniem platformy zarządzającej CloudWays. W tym celu utworzono odpowiedni serwer DigitalOcen z systemem operacyjnym Debian, procesorem jednordzeniowym Intel Xeon 1.80GHz, 2GB pamięci RAM i 50 GB dyskiem SSD. Kolejnym krokiem było dodanie do istniejącego serwera odpowiednich aplikacji i wdrożenie kodu z repozytorium Git przy użyciu wcześniej wygenerowanego klucza SSH. Następnie wygenerowano bazę danych poprzez import skryptu. Na samym końcu zaktualizowano zmienne środowiskowe aplikacji.

4. Wyniki testów

Przypadek testowy 1: Czas wykonania żądania zwracającego wiadomość „Hello World”

Tabela 2. Wyniki pierwszego przypadku testowego (opracowanie własne)

	Czas [ms]					
Platforma	Wynik 1	Wynik 2	Wynik 3	Wynik 4	Wynik 5	Średnia
Laravel	124	121	119	127	120	122,2
Symfony	144	140	143	144	141	142,4
Lumen	55	58	57	58	56	56,8
Slim	29	28	30	29	27	28,6



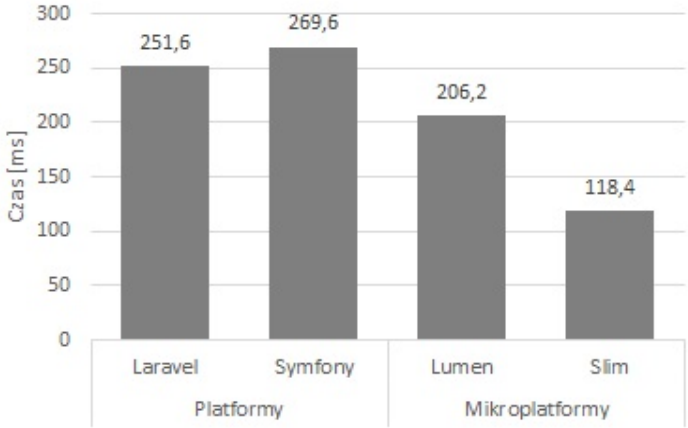
Rys. 1. Średni czas wykonania żądania zwracającego wiadomość „Hello World”

Na serwer wysłano żądanie GET, które zwróciło wiadomość „Hello World”. Najlepszy czas uzyskała aplikacja zaimplementowania w platformie Slim (28,6 ms), a najgorszy przy użyciu platformy Symfony (142,4 ms). Platformy zaliczane do grupy mikroplatform miały zdecydowanie krótszy czas wykonania żądania (Tab. 2, Rys. 1).

Przypadek testowy 2: Czas wykonania żądania zwracającego listę wszystkich rekordów

Tabela 3. Wyniki drugiego przypadku testowego (opracowanie własne)

	Czas [ms]					
Platforma	Wynik 1	Wynik 2	Wynik 3	Wynik 4	Wynik 5	Średnia
Laravel	253	246	254	249	256	251,6
Symfony	265	255	264	266	253	269,6
Lumen	204	211	205	202	209	206,2
Slim	121	119	120	117	115	118,4



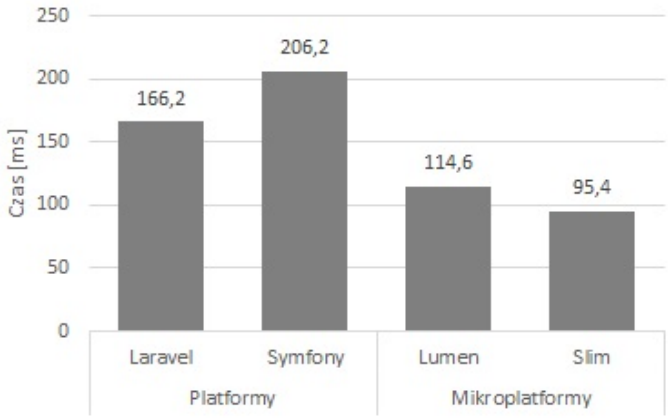
Rys. 2. Średni czas wykonania żądania zwracającego listę wszystkich rekordów

Na serwer wysłano żądanie GET, które zwróciło 1000 rekordów z tabeli notes. Najlepszy czas uzyskała aplikacja zaimplementowania w platformie Slim (118,4 ms), a najgorszy przy użyciu platformy Symfony (269,6 ms). Czas wykonania żądania przy użyciu platformy Laravel był krótszy o około 7,1 % (18 ms) niż Symfony. Platforma Lumen miała około dwukrotnie dłuższy czas przesłania żądania niż Slim (Tab. 3, Rys. 2).

Przypadek testowy 3: Czas wykonania żądania zwracającego pojedynczy rekord

Tabela 4. Wyniki trzeciego przypadku testowego (opracowanie własne)

	Czas [ms]					
Platforma	Wynik 1	Wynik 2	Wynik 3	Wynik 4	Wynik 5	Średnia
Laravel	167	163	169	167	165	166,2
Symfony	209	201	207	205	209	206,2
Lumen	110	115	117	119	112	114,6
Slim	93	100	94	93	97	95,4



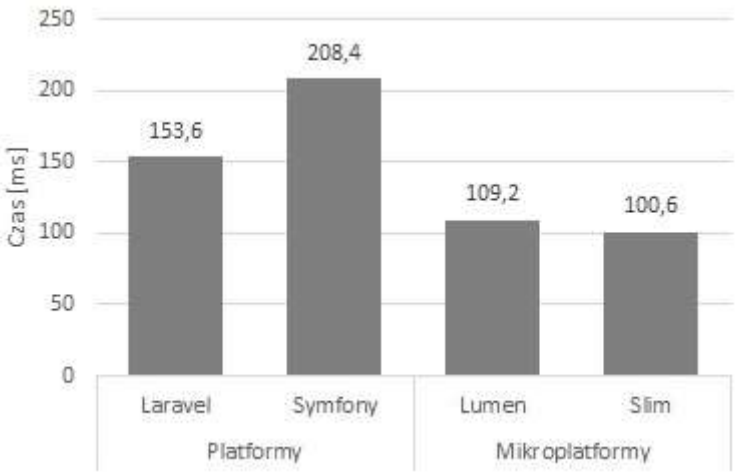
Rys. 3. Średni czas wykonania żądania zwracającego pojedynczy rekord

Na serwer wysłano żądanie GET, które zwróciło rekord z tabeli notes. Najlepszy czas uzyskała aplikacja zaimplementowania w platformie Slim (95,4 ms), a najgorszy przy użyciu platformy Symfony (206,2 ms). Wynik wysłanych żądań platformy Slim i Lumen jest około dwukrotnie lepszy od platformy Symfony i o około 50 % lepszy od środowiska Laravel (Tab. 4, Rys. 3).

Przypadek testowy 4: Czas wykonania żądania dodającego nowy rekord

Tabela 5. Wyniki czwartego przypadku testowego (opracowanie własne)

	Czas [ms]					
Platforma	Wynik 1	Wynik 2	Wynik 3	Wynik 4	Wynik 5	Średnia
Laravel	162	157	163	156	152	158
Symfony	218	224	219	213	216	218
Lumen	110	104	102	97	108	104,2
Slim	98	97	99	106	97	99,4



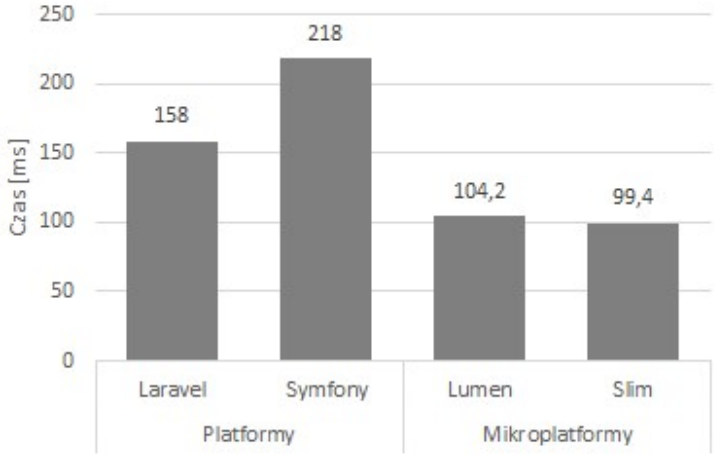
Rys. 4. Średni czas wykonania żądania dodającego nowy rekord

Na serwer wysłano żądanie POST, które dodawało nowy rekord do tabeli. Najlepszy czas uzyskała aplikacja zaimplementowania w platformie Slim (99,4 ms), a najgorszy przy użyciu platformy Symfony (218 ms). Mikroplatforma Lumen w porównaniu do Slim miała nieznacznie dłuższy czas wysłania żądania będąc o ok. 4,82 % wolniejsza (Tab. 5, Rys. 4).

Przypadek testowy 5: Czas wykonania żądania wprowadzającego zmiany w rekordzie

Tabela 6. Wyniki piątego przypadku testowego (opracowanie własne)

	Czas [ms]					
Platforma	Wynik 1	Wynik 2	Wynik 3	Wynik 4	Wynik 5	Średnia
Laravel	154	155	159	148	152	153,6
Symfony	209	207	213	208	205	208,4
Lumen	111	109	114	104	108	109,2
Slim	99	105	107	95	97	100,6



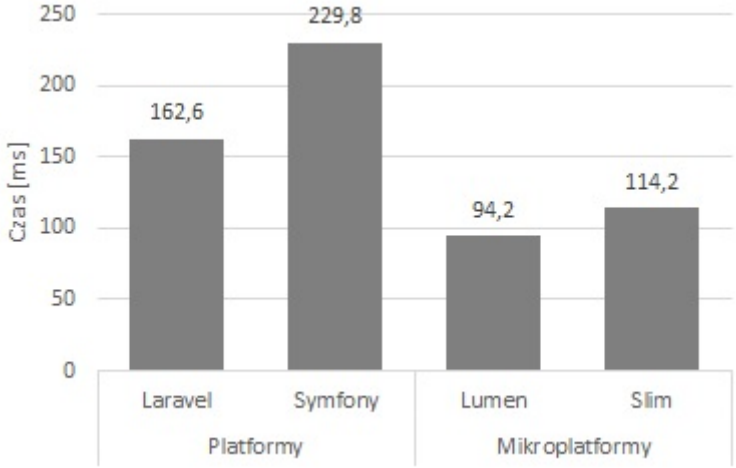
Rys. 5. Średni czas wykonania żądania wprowadzającego zmiany w rekordzie

Na serwer wysłano żądanie PUT, które modyfikowało istniejący rekord z tabeli. Najlepszy czas uzyskała aplikacja zaimplementowania w platformie Slim (100,6 ms), a najgorszy przy użyciu platformy Symfony (208,4 ms). Prezentowane wyniki metody PUT są zbliżone do wyników uzyskanych w testach metody POST (Tab. 6, Rys. 5).

Przypadek testowy 6: Czas wykonania żądania usuwającego rekord

Tabela 7. Wyniki szóstego przypadku testowego (opracowanie własne)

	Czas [ms]					
Platforma	Wynik 1	Wynik 2	Wynik 3	Wynik 4	Wynik 5	Średnia
Laravel	172	167	156	154	164	162,6
Symfony	233	232	230	226	228	229,8
Lumen	98	94	91	92	96	94,2
Slim	120	109	120	110	112	114,2



Rys. 6. Średni czas wykonania żądania usuwającego rekord

Na serwer wysłano żądanie DELETE, które usuwało wybrany rekord z tabeli. Najlepszy czas uzyskała aplikacja zaimplementowania w platformie Lumen (94,2 ms), a najgorszy przy użyciu platformy Symfony (229,8 ms). Platformy zaliczane do grupy mikroplatform posiadały średnio dwukrotnie krótszy czas wykonania żądania (Tab. 7, Rys. 6).

5. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że mikroplatformy programistyczne wpływają na poprawę wydajności serwisów opartych na REST API. Pozwalają na zredukowanie nawet dwukrotnie czasu potrzebnego na przesłane żądania w zależności od wybranej metody HTTP. Należy jednak pamiętać, że pod uwagę trzeba wziąć również inne parametry jak wykorzystywane algorytmy, wzorce projektowe oraz specyfikację techniczną i obciążenia serwera.

6. Literatura

Brail G., Woods D., Jacobson D., 2015, APIs: A Strategy Guide, O'reilly.

CloudWays, PHP Hosting, [w:] cloudways.com/en/php-hosting.php (dostęp 12.2019 r.).

Codeception, Introduction, [w:] codeception.com/docs/01-Introduction (dostęp 12.2019 r.).

DigitalOcean, Products Overview, [w:] digitalocean.com/products (dostęp 12.2019 r.).

Fielding R., 2000, Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures. Doctoral dissertation, University of California, Irvine.

Flower M., 2005, Patterns of Enterprise Application Architecture, Addison Wesley.

Garbar D., 2019, Laravel Microservices or Lumen vs Laravel, [w:] belitsoft.com/laravel-development-services/microservices-architecture-development, (dostęp 12.2019 r.).
Laravel, Laravel Philosophy, [w:] laravel.com/docs/4.2/introduction#laravel-philosophy (dostęp 12.2019 r.).
Lockhart J., 2015, Modern PHP: New Features and Good Practices, O'reilly.
Malatesta F., 2015 Learning Laravel's Eloquent, Packt Publishing.
Mincewicz P., Plechawska-Wójcik M., 2018, Performance and possibility analysis of Laravel tool dedicated to create modern web applications, JCSI 7: 108-115.
Symfony, What is Symfony, [w:] symfony.com/what-is-symfony (dostęp 12.2019 r.).

Nowe „inteligentne” układy ciekłokrystaliczne stosowane jako nośniki teranostyków

Tokarek Beata [(1)], Bazylińska Urszula [(1)]

[1] Katedra Chemii Fizycznej i Kwantowej, Wydział Chemiczny, Politechnika Wrocławska
Beata Tokarek, beatatokarek@pwr.edu.pl

Streszczenie
Badania w dziedzinie nanotechnologii i chemii koloidów nieustannie koncentrują się na projektowaniu nanoskopowych układów dla efektywnego dostarczania substancji bioaktywnych do miejsca docelowego. Ciekłokrystaliczne nanostruktury wykazują ogromny potencjał, jako nośniki dostarczania leków ze względu na ich unikalne właściwości strukturalne. W ostatnich latach znaczące badania skupiły się na rozwoju inteligentnych nanokontenerów, które wykazują wrażliwość na różnego rodzaju bodźce zewnętrzne, przez co umożliwiają kontrolowane uwalnianie leku w chorych tkankach i komórkach. W niniejszym artykule wyjaśniona została idea inteligentnych ciekłokrystalicznych nanostruktur oraz przedstawione zostały najnowsze postępy i wyzwania w zakresie rozwoju i stosowania tych układów, jako potencjalnych nośników leków. Poruszona została także kwestia teranostyki, czyli połączenia terapii z diagnostyką, która umożliwia monitorowanie postępów w leczeniu oraz efektywności dostarczenia leku w miejsce docelowe.

Słowa kluczowe: struktury ciekłokrystaliczne, struktury inteligentne, nośniki leków, teranostyki

Novel smart liquid crystal systems used as theranostatic carriers

Summary
Nanotechnology and colloidal chemistry research are constantly focused on the design of nanoscopic carriers for efficient delivery of bioactive substances to the target site. Liquid crystal nanostructures possess great potential as drug delivery systems due to their unique structural properties. In recent years, significant investigation has focused on the development of smart nanocarriers, which are sensitive to various external stimuli, thus enabling controlled release of the drug at the treated tissues and cells. This article explains the idea of smart liquid crystal nanostructures and presents the latest advances and challenges in the development and use of these systems as drug carriers. The concept of theranostics is also explained, as it is the combination of therapy with diagnostics, it enables to monitor the treatment progress and effectiveness of drug delivery to the target site.

Keywords: liquid crystal systems, smart nanostructures, drug delivery systems, theranostics

1. Wstęp

W ostatnich latach nastąpił ogromny rozwój nanomateriałów, które stały się unikatowym narzędziem w terapii nowotworowej, ze względu na wielofunkcyjne właściwości, które umożliwiają efektywną diagnozę, monitorowanie oraz pomyślną terapie. Nowa generacja układów określana mianem “teranostyków” (ang. *therapy* + *diagnostics*) otwiera ogromną perspektywę na utworzenie kompleksowych nośników stosowanych w terapii przeciwnowotworowej. Platformy te mogą być stosowane do jednoczesnego dostarczania leku w miejsce docelowe oraz jego uwalniania, jak i diagnostyki obejmującej monitorowanie postępu choroby oraz odpowiedź na stosowaną terapię. Zastosowanie teranostyków umożliwia również zmianę tradycyjnej medycyny na bardziej

spersonalizowaną, umożliwiającą dobranie właściwego środka terapeutycznego oraz metody leczenia dopasowanej do wymogów pacjenta (Madamsetty i in., 2019).

Systemy oparte na lipidach są szeroko badanymi strukturami wykorzystywanymi do dostarczania teranostyków. Szczególnym zainteresowaniem wśród badaczy cieszą się fazy ciekłokrystaliczne (ang. *liquid crystalline*, LC), ponieważ wykazują one wiele cech niezawodnego nośnika: (i) doskonałą stabilność chemiczną i fizyczną, (ii) możliwość enkapsulacji czynników teranostycznych o różnej rozpuszczalności, ze względu na posiadanie w swej strukturze zarówno przestrzeni hydrofobowych jak i hydrofilowych, (iii) dostrajaną elastyczność oraz (iv) możliwość modyfikacji/funkcjonalizacji powierzchni w celu przyłączania odpowiednich ligandów (Madheswaran i in., 2019).

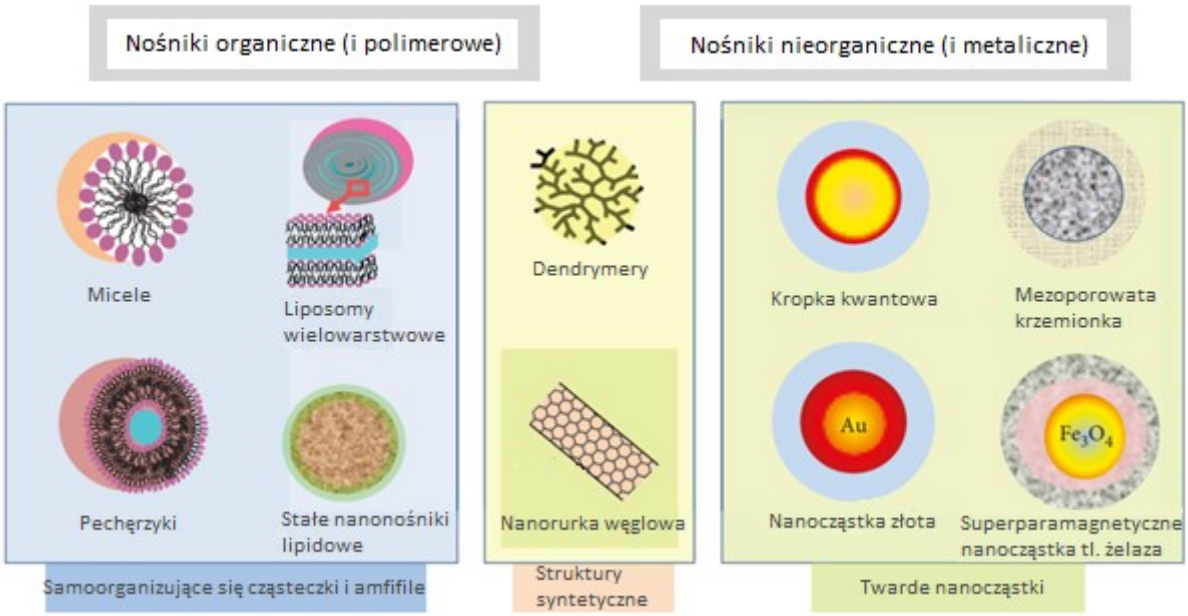
Rozwój innowacyjnych metod umożliwiających zaprojektowanie coraz to doskonalszych nośników leków przyczynił się także do rozpowszechnienia inteligentnych nanostruktur. Dzięki obecności odpowiednich ligandów (np. cząsteczek kwasu foliowego lub kwasu hialuronowego), które są rozpoznawane przez receptory nadekspresjonowane przez komórki nowotworowe (np. raka piersi lub jajnika), możliwe jest dostarczenie substancji aktywnych do miejsca docelowego (Aslan i in., 2013).

W niniejszym artykule wyjaśnione zostały główne pojęcia związane z inteligentnymi układami ciekłokrystalicznymi. Przedstawione zostały również wyzwania oraz ograniczenia w tej dziedzinie, gdyż pomimo znakomitego rozwoju tych struktur oraz ich obiecujących rokowań, zastosowanie nośników związane jest również z licznymi niepożądanymi skutkami. Istnieje, więc konieczność poprawy niektórych aspektów, które stanowią barierę w efektywnym zastosowaniu ciekłokrystalicznych nanostruktur, jako nośników substancji aktywnych.

2. Nanostruktury jako nośniki leków

Tradycyjne nośniki związków diagnostycznych i terapeutycznych wykazują liczne niedoskonałości związane z ich toksycznością, słabą specyficznością działania oraz niewielką efektywnością w dystrybucji leków do komórek nowotworowych. Układy transportu substancji aktywnych to często cząsteczki o submikronowym rozmiarze, które charakteryzują się dużą powierzchnią w stosunku do objętości. Celem nanonośników jest zwalczenie choroby z minimalnymi skutkami ubocznymi wobec tkanek prawidłowych, czyli usprawnienie efektywności terapeutycznej poprzez wykorzystanie fizjologii patologicznej środowiska tkanek nowotworowych tj. angiogeneza, hiperwaskularyzacja naczyń odżywiających guz, czy obniżone pH, które prowadzą do tzw. efektu EPR (ang. *enhanced and permeability and* retention) (Tosha i in., 2019; Basha i in., 2019).

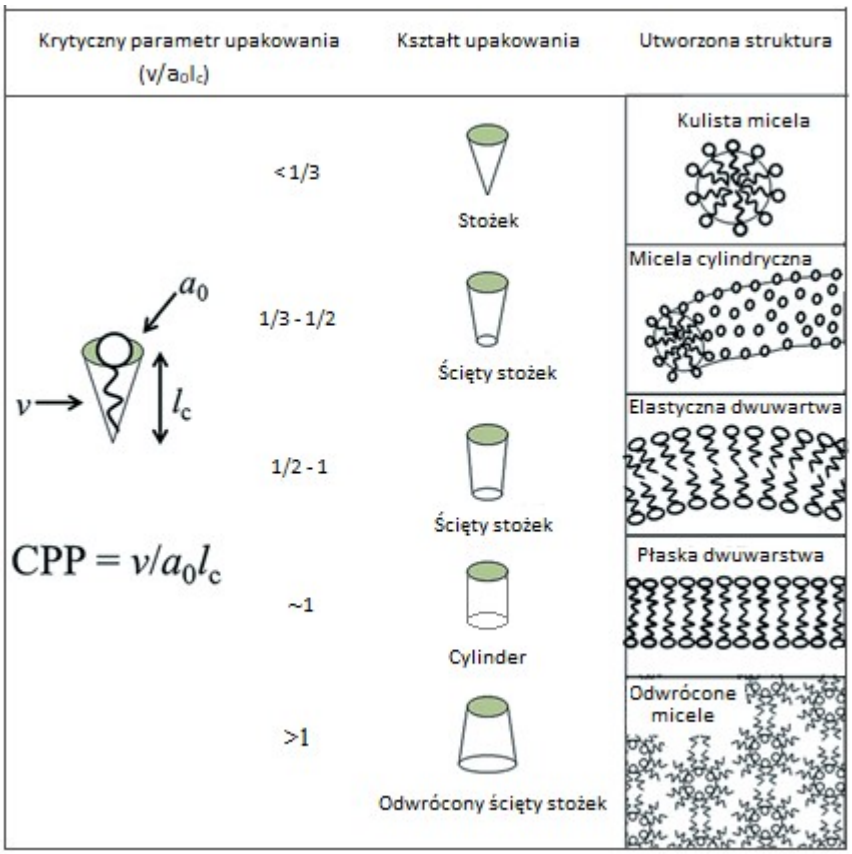
Współczesne inteligentne nanostruktury mogą być podzielone na organiczne (często tzw. „miękkie”) oraz nieorganiczne (tzw. „twarde”) (Rys.1). Co więcej, ich fizykochemiczne właściwości mogą zostać udoskonalone poprzez różne modyfikacje, tj. zmianę składu (organiczne, nieorganiczne, hybrydowe), rozmiaru, kształtu (sfery, struktury multilamelarne) oraz właściwości powierzchni (obecność grup funkcyjnych, zmiana ładunku, zastosowanie procesu przyłączania glikolu polietylenowego (ang. *polyethylene glycol*, PEG), bądź procesów powlekania) (Lombardo i in., 2019).



Rys.1. Przykłady organicznych i nieorganicznych nanostruktur stosowanych w terapii i diagnostyce (Lombardo i in. 2019)

W zależności od metody przygotowania możemy podzielić nanostruktury na dwie kategorie: układy, które wykazują skłonność do samoorganizacji (związki amfifilowe, często powierzchniowo czynne) oraz struktury uzyskane na drodze syntezy, których przykładami mogą być dendrymery, hydrożele czy nanowłókna węglowe (Lombardo i in., 2019).

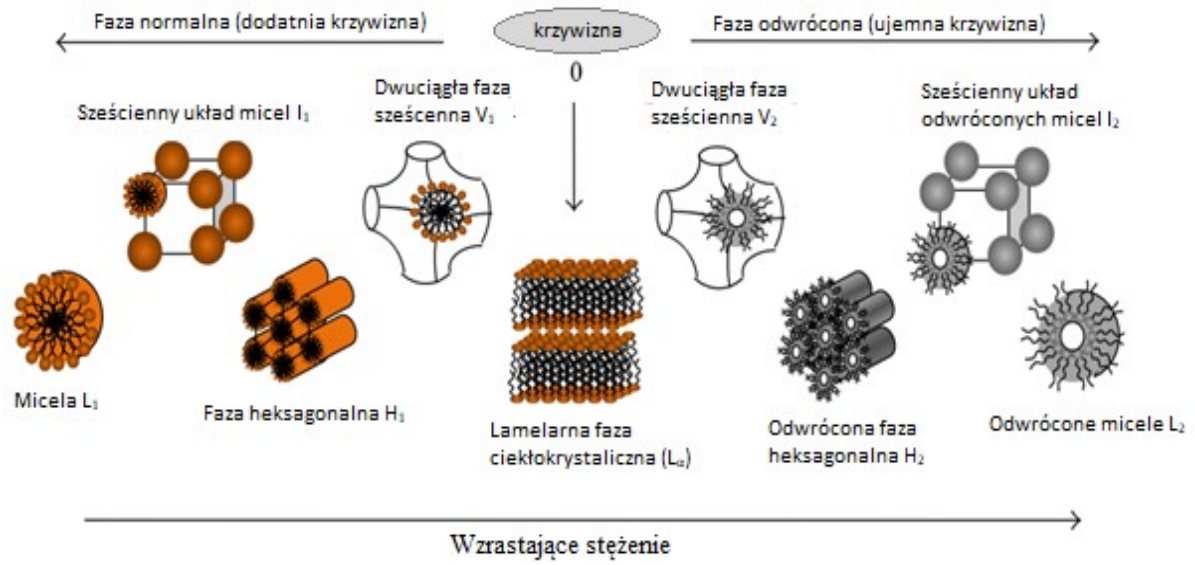
Surfaktanty (ang. *surface active agents*) to powierzchniowo czynne związki amfifilowe zbudowane z części hydrofobowej oraz hydrofilowej. W środowisku wodnym, po przekroczeniu odpowiedniego krytycznego stężenia micelizacji (ang. *Critical micelle concentration*, CMC) zarówno uwodnienie hydrofilowych składników, jak i łączenie się hydrofobowych ugrupowań powoduje separacje cząsteczek z utworzeniem agregatów. Możliwa jest kontrola kształtu tworzonych agregatów dzięki krytycznemu parametrowi upakowania (ang. *Critical packing parameter*, CPP) (Rys.2). Pozwala on na rozwinięcie oraz kontrolę odpowiedniej struktury otrzymanych nanocząstek począwszy od sferycznych micel aż do lamelarnych struktur (Lombardo i in., 2019).



Rys.2. Powiązanie krytycznego parametru upakowania związków amfifilowych z tworzonymi strukturami (v = objętość rdzenia węglowodorowego, a_o = efektywna powierzchnia grupy hydrofilowej, l_c = długość łańcucha węglowodorowego) (Dutt, 2017)

Kluczowym zagadnieniem przy tworzeniu faz ciekłokrystalicznych jest samoorganizacja cząsteczek amfifilowych, które tworzą różne mezofazy, w tym fazy heksagonalne, sześcienne i micelarne. Dzięki unikalnym strukturom wewnętrznym, fazy te stanowią obiecującą perspektywę, dla enkapsulacji związków o odmiennej polarności. Co więcej, różne struktury mogą wykazywać zwiększony współczynnik dyfuzyjny, wpływający na uwalnianie leku w miejscu docelowym. Dwuciągła faza sześcienna i faza heksagonalna są najczęściej otrzymywanymi fazami ciekłokrystalicznymi. Wspierają one kontrolę i uwalnianie związków aktywnych. Struktury te są podatne na wiele czynników fizykochemicznych, takich jak zawartość wody, temperaturę, pH czy obecność innych substancji (Huang i in., 2018).

Poprzez zmianę stężenia związku amfifilowego w obecności rozpuszczalnika następuje zmiana faz struktur ciekłokrystalicznych (Rys.3). W zależności od orientacji łańcucha węglowodorowego cząsteczek amfifilowych, fazy mogą być klasyfikowane jako normalne lub odwrócone. W fazach normalnych łańcuchy są zorientowane w kierunku rdzenia wewnętrznego, natomiast w fazie odwróconej, na przykładzie odwróconych micel – łańcuchy promieniują od centralnie zagregowanych grup hydrofilowych (Lombardo i in., 2015).



Rys.3. Przedstawienie postępu faz w funkcji stężenia związku amfifilowego (Lombardo i in., 2015)

3. Inteligentne nanonośniki

Obecnie wiele badań z zakresu opracowywania technik dostarczania leków koncentruje się na nanonośnikach, które są wrażliwe na różnego rodzaju bodźce, określając je przez to mianem inteligentnych ze względu na możliwość kontroli dostarczania oraz uwalniania leków w konkretnym miejscu w określonym czasie (Lombardo i in., 2019). Do tej pory powstały liczne prototypy nanonośników, które są wrażliwe na różnego rodzaju bodźce, w tym bodźce fizyczne (m.in. światło, temperatura, pole magnetyczne lub elektryczne, ultradźwięki), chemiczne (redox, pH), bądź biologiczne (np. enzymy) (Hossen, 2019).

Temperatura jest jednym z najbardziej wnikliwie zbadanych czynników wykorzystywanych przy dostarczaniu leków w terapiach przeciwnowotworowych. Wiele polimerów jest całkowicie rozpuszczalnych poniżej pewnej temperatury, określanej, jako LCST (ang. *Lower critical solution temperature*), a powyżej której polimer wytrąca się z roztworu. Ta zmiana fazy może być wykorzystywana do kontrolowanej destabilizacji struktur polimerowych oraz efektywnego dostarczania leku w miejsce docelowe. Jednym z najczęściej wykorzystywanych polimerów jest poli(N-izopropyloakryloamid) - PNIPAAm. Posiada on niższą krytyczną temperaturę roztworu, około 32°C, co stanowi odpowiednią temperaturę dla zastosowań biomedycznych, ponieważ jest ona zbliżona do temperatury ciała (37°C). Istnieje również możliwość dostosowania niższej krytycznej temperatury roztworu polimeru poprzez kopolimeryzację z hydrofilowymi lub hydrofobowymi monomerami, co powoduje, że ogólna hydrofilowość związku jest odpowiednio wyższa lub niższa (Ward i in., 2011).

Dużym zainteresowaniem cieszą się także nośniki wykazujące czułość na pH. Odczyn komórek nowotworowych wykazuje charakter kwasowy, natomiast komórki zdrowe mają charakter alkaliczny. Z tego też powodu określa się wartość pH jako fizjologiczną właściwość umożliwiającą zastosowanie inteligentnych nośników leków. Uwalnianie leku w odpowiednim środowisku możliwe jest dzięki różnym zabiegom, włączając w to zastosowanie związków posiadających zdolną do jonizowania grupę funkcyjną (np. aminy, kwas fosforowy, czy grupy karboksylowe) (Hossen, 2019).

4. Wyzwania oraz ograniczenia

Proces doskonalenia inteligentnych nanonośników jest związany z różnymi wyzwaniami oraz ograniczeniami. Problemy w ich stosowaniu stanowią między innymi: toksyczność nanonośników, polidyspersyjność nanostruktur, wysokie koszty tworzenia, różnorodność oraz heterogeneza komórek nowotworowych, a także konieczność doprecyzowania regulacji prawnych w związku z dopuszczeniem nanonośników na rynek (Hossen, 2019).

Jednym z wyzwań w obszarze nanoteranostyków jest powtarzalność produkcji. Ze względu na złożoność struktury produkcja nanonośników na dużą skale, umożliwiająca uzyskanie jednorodnej partii, nie należy do najłatwiejszych. Konieczna jest, zatem dokładna charakterystyka nanonośników na każdym etapie procesu produkcyjnego w celu zapewnienia odtwarzalności syntezy jak i skuteczności wytworzonych nanostruktur. Niezwykle ważna jest również odpowiednia trwałość uzyskanych układów, ponieważ ich niestabilność koloidalna może radykalnie zmienić działanie terapeutyczne w organizmie (Madheswaran i in., 2019).

Istotne znaczenie ma też miejsce eliminacji nośnika z organizmu pacjenta. Obszerne badania związane z biodystrybucją nanonośników wskazują, że większość nanostruktur nie jest wydzielana z organizmu. W zależności od składu chemicznego, rozmiaru, kształtu, pola powierzchni, bądź obecność powłoki, nanostruktury mogą kumulować się w podstawowych organach, takich jak płuca, nerki, serce, wątroba, czy śledziona (Hossen, 2019).

Ważną kwestią są również aspekty związane z regulacjami prawnymi umożliwiającymi wprowadzenie danego nośnika na rynek. Wymagania dotyczące oceny wydajności, bezpieczeństwa oraz przyspieszenia badań klinicznych są często niejednoznaczne, co dodatkowo wydłuża proces wdrażania preparatów (Tran i in., 2017).

Komórki nowotworowe wykazują szeroką różnorodność oraz heterogeniczność. Fizyczna natura komórek nowotworowych może różnić się w zależności od konkretnego organizmu. Dlatego też personalizacja terapii przeciwnowotworowych jest zarówno wielkim wyzwaniem, jak i koniecznością. W celu zlokalizowania komórek nowotworowych,

konwencjonalne nanonośniki napotykają wiele biologicznych barier uniemożliwiających dostarczenie leku w miejsce docelowe. Przykładem może być siateczkowy system śródbłonka (ang. *reticule endothelial system*, RES), który blokuje krążenie nanonośnika i przenosi leki nowotworowe do wątroby, śledziony lub szpiku kostnego. W celu pokonania tych trudności konwencjonalne nanonośniki są modyfikowane za pomocą różnych procesów, włączając w to proces przyłączania glikolu polietylenowego czy modyfikowania powierzchni specyficznym ligandem (Hossen, 2019).

5. Wnioski

Celem nanostrukturalnych systemów dostarczania leków jest transport substancji aktywnych do komórek nowotworowych w celu ich zniszczenia. Istotne jest również, by jednocześnie zdrowe komórki pozostały nienaruszone. Zaprojektowanie kompleksowego nośnika związane jest ze znajomością szeregu procesów biologicznych. Głębsza wiedza i zrozumienie rzeczywistych interakcji związanych z chorymi tkankami jest podstawą rozwoju nowych rozwiązań terapeutycznych oraz możliwości wykorzystania inteligentnych nanonośników, które umożliwiają pokonanie ograniczeń związanych z konwencjonalną terapią. Innowacyjne nośniki pozwalają rozwiązać trudności występujące w tradycyjnych metodach leczenia, które związane są z niesprecyzowaną dystrybucją oraz niekontrolowanym uwalnianiem leku, szybkim metabolizmem oraz niską biodostępnością.

Pojawiające się w ostatnich latach liczne możliwości wytwarzania złożonych struktur ciekłokrystalicznych rokują pozytywne perspektywy dla nanoteranostyki. W związku z tym prawdopodobne jest, że dzięki licznym badaniom w niedalekiej przyszłości wdrożona zostanie terapia przeciwnowotworowa dostępna dla każdego, wykazująca się niezwykłą selektywnością oraz skutecznością.

Podziękowanie

Praca finansowana z dotacji Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego na działalność statutową Wydziału Chemicznego Politechniki Wrocławskiej.

6. Literatura

Aslan B. i in., 2013. Nanotechnology in cancer therapy. Journal of Drug Targeting 21(10): 904–913.

Basha S.A. i in., 2019. Liposomes in active, passive and acoustically-triggered drug delivery. Mini-Reviews in Medicinal Chemistry 19: 961-969.

Dutt S. i in., 2017. Swollen liquid crystals (SLCs): A versatile template for the synthesis of nano structured materials. RSC Advances 7: 5733-5750.

Hossen S. i in., 2019. Smart nanocarrier-based drug delivery systems for cancer therapy and toxicity studies: A review. Journal of Advanced Research 15: 1-18.

Huang Y. i in., 2018. Factors affecting the structure of lyotropic liquid crystals and the correlation between structure and drug diffusion. RSC Advances 8: 6978–6987.

Lombardo D. i in., 2015. Amphiphiles Self-Assembly: Basic Concepts and Future Perspectives of Supramolecular Approaches, Advances in Condensed Matter Physics: 1-23.

Lombardo D. i in., 2019. Smart Nanoparticles for Drug Delivery Application: Development of Versatile Nanocarrier Platforms in Biotechnology and Nanomedicine. Journal of Nanomaterials: 1-26.

Madamsetty V.S. i in., 2019. Recent Trends of the Bio-Inspired Nanoparticles in Cancer Theranostics. Front Pharmacol 10(1264): 1-12.

Madheswaran T. i in., 2019. Current potential and challenges in the advances of liquid crystalline nanoparticles as drug delivery systems. Drug Discovery Today 24(7): 1405-1412.

Tosha P. i in., 2019. Liposomal formulations in cancer therapy: passive versus active targeting. Asian Journal of Pharmaceutical Research and Development 7(2): 35-38.

Tran S. i in., 2017. Cancer nanomedicine: a review of recent success in drug delivery, Clinical and Translational Medicine 6(1): 1-21.

Ward M.A. i in., 2011. Thermoresponsive Polymers for Biomedical Applications. Polymers 3(4) : 1215-1242.

Problemy w układach smarowania dzielarek do bułek

Towarnicki Krzysztof [(1)]

[1] Katedra Eksploatacji Systemów Technicznych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska
Krzysztof Towarnicki: krzysztof.towarnicki@pwr.edu.pl

Streszczenie
Wprowadzenie masowej produkcji dotyczy całego przemysłu, nie wyłączając przy tym przemysłu spożywczego. Zwiększenie produkcji poprzez wprowadzenie linii technologicznych, wymusiło wprowadzenie centralnego smarowania. Jego zaletą jest precyzyjne dostarczanie środków smarujących do węzłów kinetycznych. W urządzeniach przemysłu spożywczego należy rozróżnić dwa układy smarowania, gdyż jeden układ pozwala na smarowanie elementów napędowych, a drugi służy do smarowania elementów mających bezpośredni kontakt z materiałami spożywczymi. Głównym elementem układu smarowania jest pompa, a następnie rozdzielacze i przewody. Artykuł opisuje układy smarowania spotykane w maszynach przemysłu spożywczego. Zaliczyć je można do układów mikrohydraulicznych, gdyż średnica przewodów nie przekracza 6 mm. W tego typu układach niekorzystnym zjawiskiem jest obliteracja, która prowadzi do uszkodzenia układu smarowania, a to z kolei prowadzi do uszkodzenia elementów maszyny ze względu na brak smarowania.

Słowa kluczowe: pompa wyporowa, pompa wielotłoczkowa, smarowanie, obliteracja.

Problems in the lubrication systems of bread dividers

Summary
The introduction of mass production applies to the entire industry, including the food industry. Increasing production through the introduction of technological lines, forced the introduction of central lubrication. Its advantage is the precise supply of lubricants to kinetic nodes. In the food industry equipment, two lubrication systems should be distinguished, since one system allows lubrication of driving elements, and the other is used for lubrication of elements that have direct contact with food materials. The main element of the lubrication system is the pump, followed by manifolds and pipes. The article describes lubrication systems found in food industry machinery. They can be included in microhydraulic systems, as the diameter of the pipes does not exceed 6 mm. In this type of systems, obliteration is an unfavourable phenomenon, which leads to damage to the lubrication system, which in turn leads to damage to the machine components due to lack of lubrication.

Keywords: positive displacement pump, piston pump, lubrication, obliteration.

1. Wstęp

Obecnie obserwuje się rozwój automatyzacji niemal w każdej dziedzinie przemysłu. Odnosi się to również do przemysłu spożywczego. Pracownicy coraz częściej zastępowani są przez maszyny, a więc jednostanowiskowe maszyny stacjonarne wypierane są poprzez linie technologiczne. Nieprzerwana produkcja seryjna wymaga prawidłowego zabezpieczenia elementów kinetycznych przed nadmiernym zużyciem. Z tego względu nieodzowne staje się wprowadzanie centralnych systemów smarowania. Wymagania stawiane tym układom to precyzyjne dozowanie środków smarnych, uwzględniając jednocześnie dokładność i regularność ich dawkowania. Ze względu na kontakt elementów maszyny z materiałami przeznaczonymi do celów spożywczych, układy smarowania tłoczą oleje roślinne, które mogą być potem spożywane. Głównym elementem układu smarowania jest pompa, której zadaniem poza transportowaniem cieczy jest również generowanie ciśnienia. Z tego względu

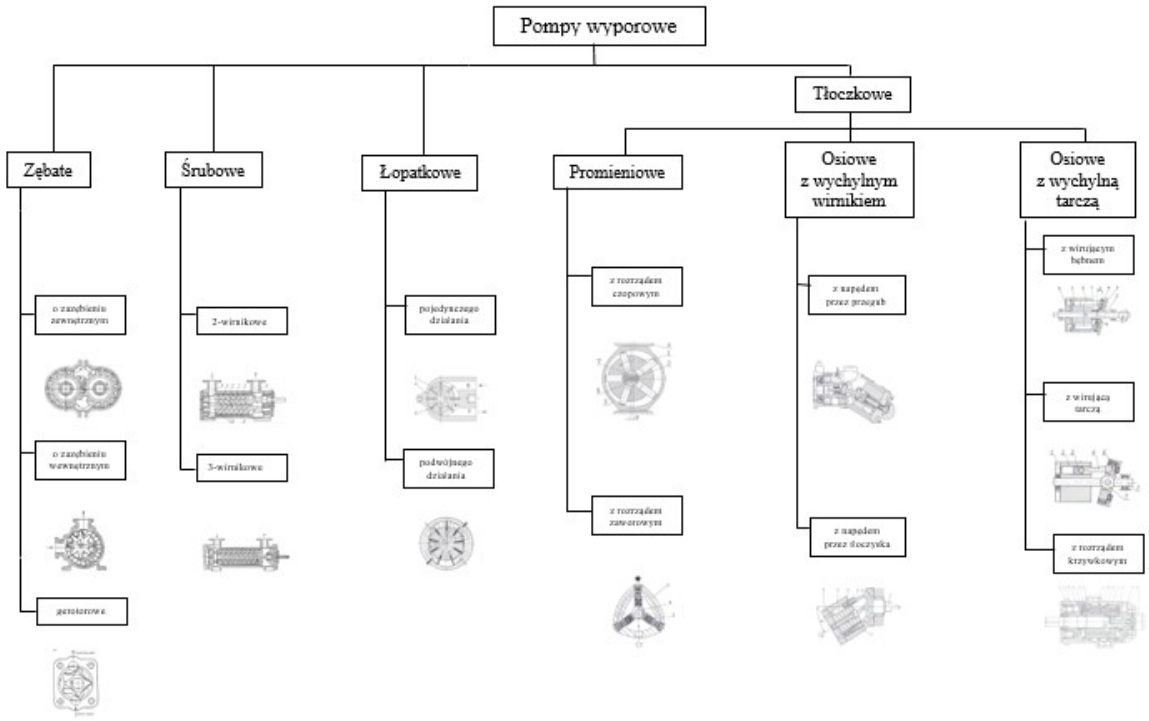
konstrukcja pomp do układów smarowania opiera się na konstrukcji pomp wyporowych. Pierwsze pompy budowane były już w starożytności, a około 200 lat przed nasza erą opracowano pompę ssąco-tłoczącą. Następnie w 1600 roku J. Kepler wynalazł pompę zębatą, która wówczas nie znalazła praktycznego zastosowania w napędach. Przez lata wprowadzano w niej kolejne udoskonalenia, a dziś zalicza się ją do najczęściej używanych pomp wyporowych w układach hydraulicznych. Teraźniejszy rozwój techniki hydraulicznej opiera się na rozpowszechnieniu systemów elektroniki i automatyki w budowie maszyn. Zaletą układów hydraulicznych układów jest rozległa możliwość sterowania zarówno natężeniem przepływu jak również ciśnieniem. Aktualnie dąży się do optymalizacji budowy elementów układów hydraulicznych, koncentrując się na dwóch kierunkach: poprzez zmniejszenie ich masy, a więc również gabarytów oraz redukcji emitowanego przez nie hałasu. Rozwój układów smarujących wiąże się z rozwojem mikrohydraulicznych układów napędowych gruntownie opisanych w lit. (Kollek i in., 2014). Warto wspomnieć, że główną zaletą hydrostatycznych układów napędowych jest przenoszenie dużych mocy oraz mała wrażliwość na zanieczyszczenia zewnętrzne. Dzięki temu wprowadzono tego typu napędy w maszynach przemysłu spożywczego, które pozwoliło na zastosowanie tego napędu do maszyn przemysłu spożywczego.

2. Wprowadzenie, klasyfikacja pomp

Pompa stanowi elementarny komponent układu hydraulicznego. Jej zadaniem jest zamiana dostarczanej z zewnątrz energii mechanicznej (np. silnik elektryczny lub spalinowy), na energię hydrauliczną zmagazynowaną w ciekłym czynniku roboczym. Zadaniem pompy jest zasysanie cieczy z przestrzeni ssawnej, a następnie przetransportowanie dalej do przestrzeni tłocznej. Optymalne działanie pompy wiąże się z zagwarantowaniem nieprzepuszczalnego rozdzielenia obszaru ssawnego od tłocznego. Założeniem prawidłowego działania pompy jest zapewnienie dwóch funkcji: transportowanie cieczy z części ssawnej do części tłocznej oraz podniesienie jej ciśnienia. Aby spełnić ten warunek powinna posiadać poniższe cechy:

- stosunkowo niewielka zmiana wydajności wraz ze wzrostem ciśnienia tłoczenia,
- wysoka trwałość,
- generować wysokie ciśnienia pracy,
- nieprzepuszczalne rozdzielenie obszaru ssawnego od tłocznego (wysoka sprawność wolumetryczna),
- niewielkie straty związane z tarciem mechanicznym i lepkim (wysoka sprawność hydrauliczno-mechaniczna),
- możliwość samozasysania czynnika roboczego.

Podział pomp wyporowych biorąc pod uwagę ich konstrukcję przedstawiono na rys. 1 na podstawie lit. (Stryczek, 2003; Towarnicki, 2015).



Rys. 1. Klasyfikacja pomp wyporowych (Towarnicki, 2015)

3. Oleje stosowane w układach smarowania do kontaktu z żywnością

Pierwsze układy smarowania w dzielarkach do bułek stosowane były już w latach 70 XX wieku. Pierwszymi olejami wykorzystywanymi w tych układach był olej parafinowy. Tego typu olej używany był jako pierwszy ze względu na zjawisko obliteracji, które występuje w układzie hydraulicznym. Wiąże się ono ze zmniejszeniem przekroju przewodu układu hydraulicznego ze względu na osadzanie się wytrąconych cząstek cieczy, na powierzchni wewnętrznej przewodu. Później jednak olej tego rodzaju został zamieniony na inne oleje, które były przeznaczone do kontaktu z żywnością. Oleje przeznaczone do kontaktu z żywnością wytwarzane są na bazie olejów roślinnych. Jednak ich wadą jest szybsze starzenie się w porównaniu do olejów mineralnych. Parametry olejów roślinnych są zbliżone do najczęściej stosowanego mineralnego oleju hydraulicznego HLP 46, przedstawione na poniżej w tab. 1 (Skrzyńska i Matyja, 2011).

Tabela 1. Podstawowe właściwości fizykochemiczne tłuszczy (Skrzyńska i Matyja, 2011)

Oznaczenie* Producent	Surowiec tłuszczowy							
	Olej rzepakowy	Olej słonecznikowy	Olej sojowy	Olej lniany	Olej kukurydziany	Oliwa z oliwek	Olej rycynowy	Smalec wyborowy
	„Oleo", ZT Kruszwica SA, Kruszwica	„Bartek", ZPT Warszawa	Oleficio Zucchi S.p.A., Włochy#	Oleofarm, Pietrzykowice	Costanza, Oleificio Salvadori s.r.l., Włochy,	Carapelli Firenze s.p.a., Włochy	PPH Microfarm i Farmina Kraków	PPH Agro-Top Sp. z o.o., Wiśniew
$\overline{M}$, g/mol	838	859	880	889	888	878	893	894
$\rho_{15°C}$, kg/m³	923,0	924,3	925,3	926,0	925,5	920,0	965,2	918,1
ρ_T, kg/m³ (T, °C)	919,4 (20°C)	920,7 (20°C)	921,6 (20°C)	922,4 (20°C)	921,9 (20°C)	916,4 (20°C)	961,6 (20°C)	900,0 (40°C)
$\eta_{40°C}$, mm²/s	35,14	31,99	32,46	30,34	33,69	38,18	258,58	41,9
n_D^{20}	1,4747	1,4762	1,4758	1,4776	1,4762	1,4704	1,4795	1,4655
$T_{krzep.}$, °C	-23	-17	-14	-18	-20	-14	-15	+25
LK, mg KOH/g	1,15	1,14	1,21	2,43	0,9	1,51	0,91	2,71
LZ, mg KOH/g	200,9	196,1	191,6	190,2	189,6	192,0	188,7	189,3
LE, mg KOH/g	199,8	195,0	190,4	187,8	188,7	190,5	187,8	186,8
LJ, g I2/100g	105,1	128,6	136,6	150,6	117,4	97,4	87,1	35,5

*Oznaczenia wykonanych badań: *M*—— średnia masa molowa w przeliczeniu na trójglicerydy, obliczona na podstawie stechiometrii reakcji zmydlania z liczby estrowej, ρT – gęstość w temperaturze T, η40°C – lepkość kinematyczna w temperaturze T = 40°C, nD20 – współczynnik załamania światła, T_{krzep} – temperatura krzepnięcia, LK – liczba kwasowa, LZ – liczba zmydlania, LE – liczba estrowa, LJ – liczba jodowa.
dystrybutor Italmex Warszawa Sp. z o.o.

Niezaprzeczalnym jest fakt, że każda substancja podlega procesowi rozpadu. Czyli zepsuciu, utlenianiu i starzeniu. Dotyczy to również produktów spożywczych, jakimi są oleje roślinne czy zwierzęce. Gównie pod wpływem temperatury, promieni słonecznych i powietrza. Układy smarowania elementów mających kontakt z materiałami do spożycia, narażone są na kontakt powietrza, gdyż są układami otwartymi. Podwyższona temperatura wynikająca ze specyfiki warunków pracy piekarni ma niekorzystny wpływ na olej, który jest cieczą smarującą. Tłuszcze stanowią grupę artykułów podlegających rozkładowi przy udziale tlenu, a zjawisko to nazywa się jełczeniem. Większa ilość tłuszczu zmniejsza wytrzymałość na kontakt z tlenem atmosferycznym, istotnie przy podwyższonej temperaturze. Cechą charakterystyczną jełczenia jest pojawienie się nieprzyjemnego zapachu. Większość producentów maszyn do

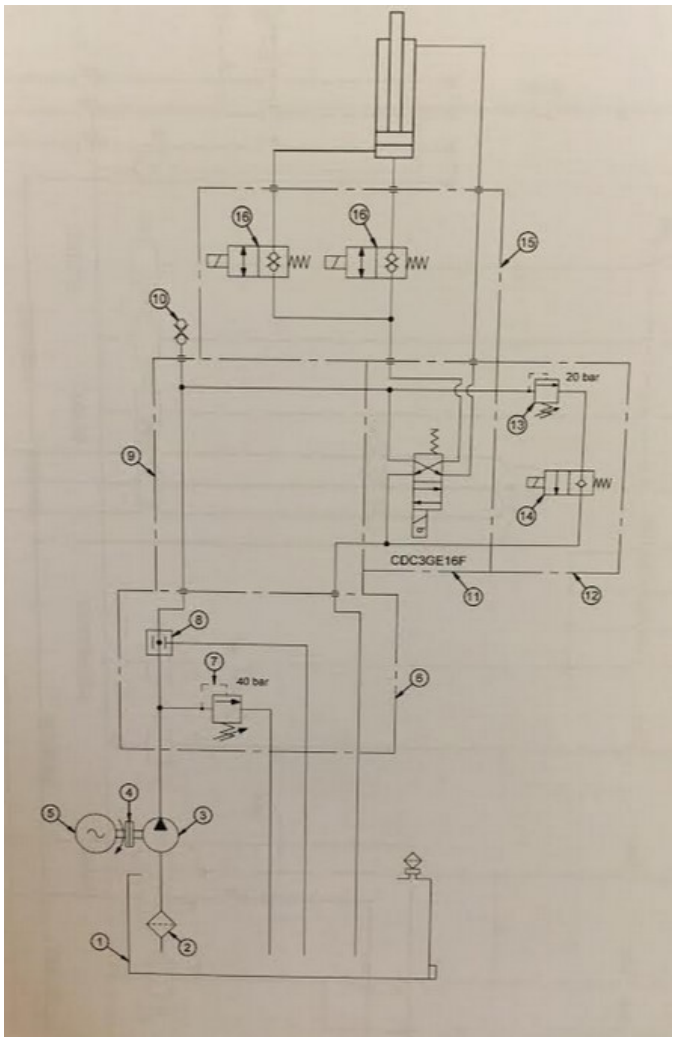
przemysłu piekarniczego zaleca stosowanie oleju z oliwek, do hydraulicznych układów smarowania.

4. Dzielarko-zaokrąglarki do bułek

Dzielarko-zaokrąglarka jest urządzeniem zaprojektowanym do pracy w piekarni. Jej zadaniem jest równomierny podział porcji urobionego ciasta oraz mechaniczne zaokrąglenie określonej liczby, w zależności od urządzenia, identycznych pod względem objętości porcji do wypieku bułek. Konstrukcja dzielarko-formierek jest zbliżona niezależnie czy jest to wersja półautomatyczna lub automatyczna.

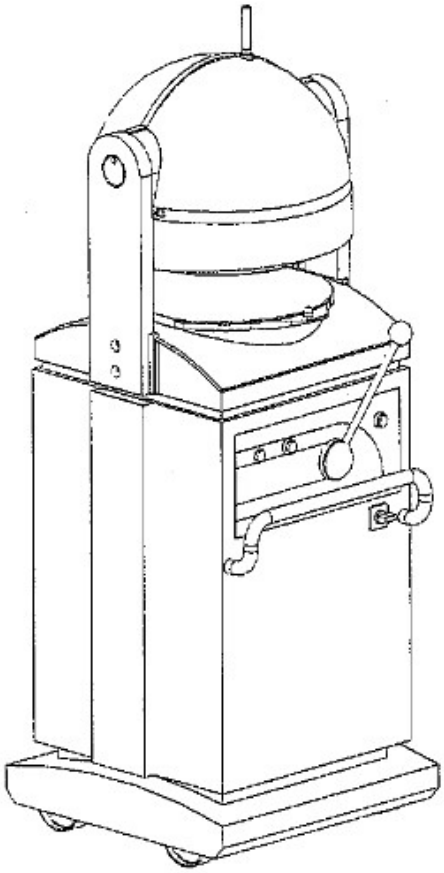
Zbudowana jest z dwóch głównych podzespołów:

- zespół dzielarki – kluczowym elementem jest głowica nożowa z umieszczonym wewnątrz wysuwanym w dół nożem wieńcowym. Przesuwanie w dół głowicy i noża jest realizowane przy pomocy odpowiednio dobranego mechanizmu w rozróżnieniu od producenta urządzenia. Opuszczenie głowicy skutkuje równomiernym rozprasowaniem ciasta, a kolejno przez wysunięcie noża dokonuje się podziału urobionego ciasta na równe kęsy biorąc pod uwagę objętość poszczególnych kęsów ciasta znajdujących się na palecie, umieszczonej na płycie górnej zaokrąglarki.
- zespół zaokrąglarki – tworzy go oddzielny napęd urządzenia, gdzie płyta górna zostaje wprawiona w ruch kołowy w wyniku naciśnięciu dźwigni sterującej przez operatora, lub w cyklu automatycznym po otrzymaniu sygnału zwrotnego niosącego informację o podzieleniu włożonego kęsa ciasta. Ruch płyty górnej doprowadza do zaokrąglenia uprzednio podzielonych porcji. W większości urządzeń napęd płyty górnej realizowany jest za pomocą przekładnię pasową napędzanej silnikiem elektrycznym, stolik obrotowy oraz suwak i łącznik. Wyróżnia się dzielarki z napędem mechanicznym i hydraulicznym. Pierwsze urządzenia tego typu posiadały napęd mechaniczny, jednak w obecnych czasach coraz większa ilość producentów wprowadza napęd hydrauliczny. Należy wyróżnić dwie konstrukcje dzielarek z napędem hydraulicznym. Pierwsza z nich do dzielarki z głowicą prasująca od dołu. Poniżej przedstawiono schemat hydraulicznego układu napędowego [młodzi].



Rys. 2. Schemat układu hydraulicznego dzielarki do bułek (Towarnicki, 2018)

W celu uzyskania ruchu posuwistego głowicy z nożem wprowadzono siłownik dwustronnego. W skład zasilacza hydraulicznego wchodzi pompa zębata napędzana silnikiem elektrycznym, zbiornik oleju, zawór bezpieczeństwa oraz rozdzielacz sterujący pracą siłownika. Cechą charakterystyczną tego typu dzielarek jest głowica mająca kształt kwadratu, przeznaczona do produkcji bułek kwadratowych. Drugim rodzajem dzielarek hydraulicznych są dzielarki z głowicą prasującą od góry, często dodatkowo wyposażone w zespół zaokrąglania. Swoją budową przypominają dzielarki z napędem mechanicznym składającym się z: głowicy roboczej, napędu prasowania, stoły formującego, napędu formowania, układu sterowania i automatyki, korpusu z osłonami oraz skrzynki elektrycznej. Poniżej został przedstawiony widok ogólny tego urządzenia.

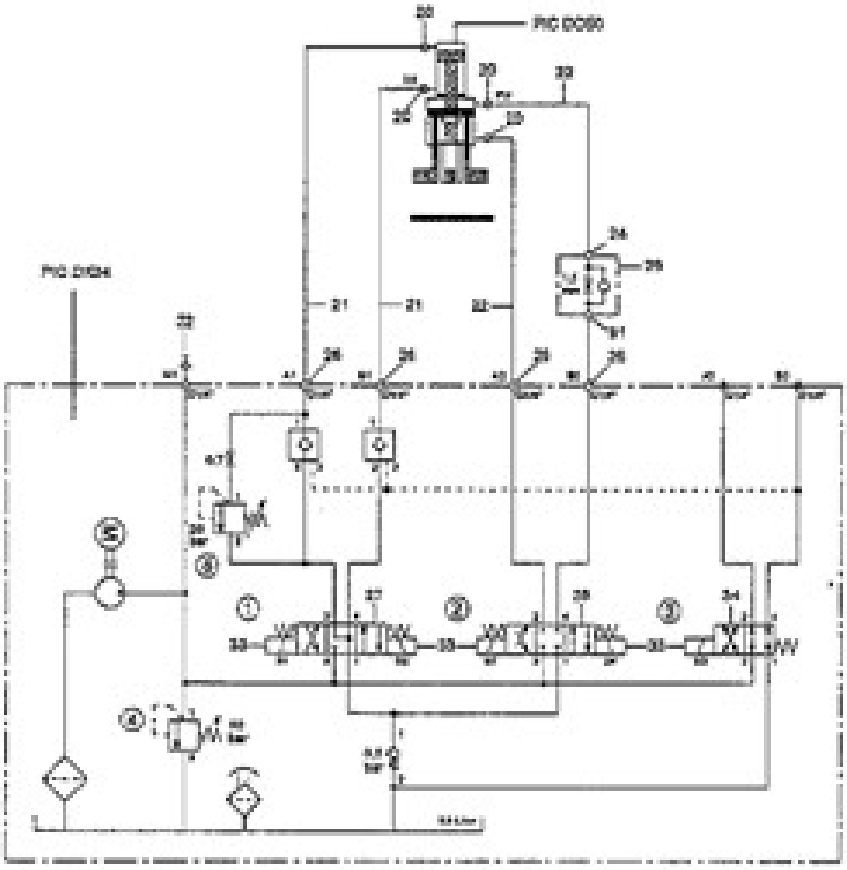


Rys. 3. Widok ogólny półautomatycznej dzielarko-zaokrąglarki (Towarnicki, 2018)

W wyniku pracy tego urządzenia otrzymuje się podzielone i zaokrąglone bułki uzyskane z wstępnego kęsa ciasta, widoczne poniżej na rys. 4

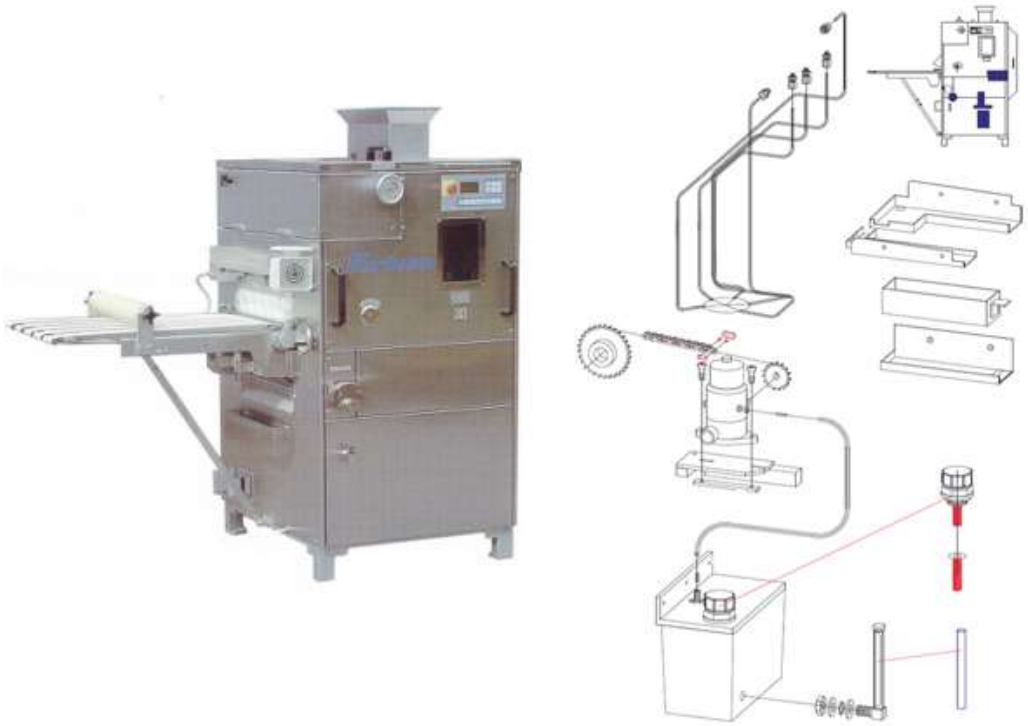
Rys. 4 Widok uzyskanych bułek w wyniku pracy dzielarki (opracowanie własne)

Napęd hydrauliczny jest bardziej rozbudowany niż w wyżej przedstawionym rozwiązaniu. Poniżej przedstawiono schemat układu hydraulicznego.



Rys. 5. Schemat układu hydraulicznego półautomatycznej dzielarko-zaokrąglarki (Towarnicki, 2018)

Powyżej przedstawiono dzielarki z napędem hydraulicznym, jako urządzenia jednostanowiskowe. W przypadku linii do produkcji bułek, dzielarka nieznacznie się różni od wcześniej przedstawionych. Zespół zaokrąglarki jest w bardzo zbliżony po poprzednich rozwiązań, różne się natomiast zespołem dzielącym. Wcześniejsze rozwiązania posiadały głowice dzielące, natomiast tego typu dzielarka posiada obrotowy bęben dzielący. Dodatkowo do poprzednich dzielarek należało umieszczać kęs ciasta o określonej masie, a w przypadku tej dzielarki, ciasto umieszcza się w leju, nie wymaga się wcześniejszego ważenia. Wymagane jest w tym urządzeniu zastosowanie układu smarowania elementów dzielących ciasto. Poniżej przedstawiono widok dzielarki wraz ze schematem układu smarowania.



Rys. 6 Dzielarka do bułek wraz ze schematem układu smarowania (Towarnicki, 2019)

Podstawowym elementem układu smarowania jest pompa widoczna powyżej na rys. 3. napędzana poprzez przekładnię łańcuchową. Kolejnym elementem układu smarowania jest zbiornik, który jest umieszczony pod pompą oraz przewody, którymi transportowana jest ciecz smarująca. Szczegółowy opis konstrukcyjny dzielarek można znaleźć w lit. (Towarnicki, 2018).

4. Problemy związane z działaniem układów smarowania

Należy rozróżnić dwa rodzaje układów smarowania, pierwsze którymi tłoczy się ciecz mającą kontakt z produktami do spożycia oraz drugie które smarują połączenia kinetyczne bez kontaktu z materiałami do spożycia. W obu rodzajach coraz większy nacisk kładzie się na ekologię poprzez zmiany w olejach smarujących, coraz częściej składnikiem bazowym jest olej roślinny. Do smarowania połączeń mechanicznych maszyn roboczych stosuje się olej biodegradowalny szerzej opisany w literaturze (Poprawski, 2014; Rogoś i Urbański, 2009; Sacha, 2013). Dużym problemem w smarowania napędowych układów mechanicznych, jest fakt, że urządzenia piekarnicze pracują w otoczeniu zapylenia mąką, która w kontakcie z olejem powoduje powstawanie mazi blokującej pracę układu. W układach smarowania mechanizmów mających kontakt z żywnością większość producentów zaleca stosowanie oleju z oliwek, gdyż jest bardziej odporny na proces jełczenia dotyczący olejów roślinnych w stosunku do oleju rzepakowego lub słonecznikowego. Również ten rodzaj oleju podlega procesom starzenia i wytrącania się cząstek, które osiadają na elementach hydraulicznego

układu smarowania. Z tego powodu dochodzi do zatrzymania pracy pompy wyporowej dozującej olej smarujący. Poniżej przedstawiono widok częściowo rozebranej pompy do ukłądu smarowania dzielarki.

Rys. 7. Widok układu rozrządu pompy wielotłoczkowej osiowej z wirującą tarczą (opracowanie własne)

W wyniku długotrwałej pracy powyższej pompy przestrzeń robocza została zaklejona fragmentami cieczy. Spowodowało to brak możliwości dalszej pracy pompy. Cząstki cieczy utworzyły twardą materię, którą można było usunąć jedynie w sposób obróbki mechanicznej, co zostało przedstawione na poniższym rysunku.

Rys. 8. Usuwanie zanieczyszczeń z przestrzeni roboczej pojedynczego tłoczka pompy (opracowanie własne)

Podobne zanieczyszczenie jak przedstawione powyżej przestrzeni roboczej, dotyczyło również przestrzeni ssawnej. Aby ponownie uruchomić pompę, należało ją rozebrać na poszczególne elementy oraz wyczyścić. Po wyczyszczeniu została złożona i uruchomiona. Starzenie się oleju doprowadziło do zatrzymania układu smarowania, a to z kolej spowodowało zatrzymanie zespołu dzielącego maszyny, ze względu na wzrost tarcia między

elementami współpracującymi. Uszkodzenie tego typu doprowadziło do zatrzymania linii produkcyjnej na kilkanaście godzin, powodując znaczne straty finansowe. Głównym powodem doprowadzenia do tej awarii, stanowi nieprawidłowa obsługa techniczna. Olej, co prawda był dolewany do układu, ale nie był zmieniany. W konsekwencji cząstki starego oleju pozostawały na dnie zbiornika powodując szybkie starzenie się, dolanego świeżego oleju oraz wytrącanie się stałych cząstek cieczy, które następnie były zasysane przez pompę. Pompa wyposażona była w filtr ssawny, jednak pozwolił on na zatrzymanie większych cząstek.

5. Podsumowanie

W powyższym artykule krótko opisano urządzenia do dzielenia oraz formowania bułek. Pierwsze produkowane maszyny na początku XX wieku posiadały zazwyczaj napęd ręczny. Potem wprowadzono napędy mechaniczne. Z czasem jednak zmieniała się receptura wyrobów piekarskich i napęd mechaniczny był już niewystarczający. Wprowadzono, zatem napęd hydrauliczny do tego typu urządzeń. Przyczyniła się do tego niewątpliwa zaleta układów hydraulicznych to znaczy odporność na zabrudzenia i zapylenia w stosunku do napędów hydraulicznych. Dodatkowo prowadzenie na rynek kompletnych zasilaczy hydraulicznych, dzięki czemu projektant nie musiał się już borykać z problemem doboru współpracujących elementów hydraulicznych. Łatwość automatyzacji i sterowania w napędach hydraulicznych umożliwiło pracę maszyn w linii technologicznej. Rozwój linii produkcyjnych dla tego zakresu wytwarzania produktów spożywczych wymusiło wprowadzenie hydraulicznego centralnego układu smarowania. Ze względu na brak doświadczenia w smarowaniu olejami roślinnymi, zbudowano układy, których konstrukcje oparte były na klasycznych układach smarowania olejami mineralnymi. Powoduje to częste uszkodzenia, których przykład przedstawiono w powyższym artykule. Należałoby się zastanowić nad sposobem zapobiegania podobnych usterek w przyszłości. Brak świadomości o odpowiedzialnej obsłudze technicznej również przyczynia się do powstania tego typu problemów. Nieodzownym wydaje się minimum, co roczne zlewanie pełnej zawartości oleju ze zbiornika, następnie jego wyczyszczenie oraz zalanie świeżym olejem. Należy również przeszkolić operatorów tego typu urządzeń o zachowaniu czystości przy dolewaniu oleju smarującego do zbiornika, aby nie dostawały się zanieczyszczenia z zewnątrz. Obecne doświadczenie wymusza podjęcie kolejnych kroków, aby poprawić pracę tego typu układów. Przyjęło się powiedzenie, że „ jesteśmy tym co jemy”. Skoro jednak w maszynach do produkcji artykułów spożywczych dochodzić będzie do zacierania się elementów współpracujących, a cząstki powstałe w wyniku zużycia ściernego trafiać będą do artykułów spożywczych, może to powodować liczne problemy zdrowotne w przyszłości. Należy szerzej przyjrzeć się tego typu

problemom w urządzeniach do produkcji artykułów spożywczych. Masowa produkcja powoduje, że większy nacisk kładzie się na wyprodukowanie jak największej ilości artykułów, niż na ich, jakości. Wprowadzanie na rynek urządzeń nieposiadających odpowiednich certyfikatów o wykonaniu podzespołów z materiałów dopuszczonych do pracy z żywnością należałoby objąć kontrolą. Wysoce prawdopodobnym staje się jednak stwierdzenia, ż brakuje osób odpowiednio wykwalifikowanych, które mogłyby się zająć taką kontrolą.

6. Literatura

Kollek W., Osiński P., Stosiak M., Wilczyński A., Cichoń P., 2014. Problems relating to highpressure gear micropumps, Archives of civil and Mechanical Engineering (14) 2014: 88-95

Poprawski W., 2014 Biodegradowalne smary w zastosowaniu do węzłów łożyskowych elementów wykonawczych maszyn roboczych, Inżynieria Maszyn (2)2014: 99-107.

Rogoś E., Urbański A., 2009. Biodegradowalny olej hydrauliczny o podwyższonych właściwościach smarnych, Tribologia (2)2009: 201-212.

Sacha D., 2013. Nowe metody oceny właściwości olejów hydraulicznych i turbinowych wprowadzone w specyfikacjach produktowych według PN-ISO, NAFTA-GAZ (3)2013: 263-270.

Skrzyńska E., Matyja M., 2011. Porównanie właściwości fizykochemicznych wybranych tłuszczy naturalnych oraz ich estrów metylowych, CHEMIK 2011, 65**,** 10, 923-935

Stryczek S.: Napęd hydrostatyczny, tom I , elementy. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa 2003: 20-35.

Towarnicki K., 2015.Projekt wstępny pompy zębatej, Wrocław: Praca inżynierska. Wydział Mechaniczny Politechniki Wrocławskiej 2015: 7-14.

Towarnicki K., 2018. Hydrauliczne układy napędowe w dzielarkach do bułek. W: Nauki techniczne i inżynieryjne. Cz. 5 Poznań: Młodzi Naukowcy: 120-135.

Towarnicki K., 2019. Pompy wyporowe stosowane w przemyśle spożywczym. W: Nauka, badania i doniesienia naukowe 2019: nauki techniczne i ścisłe, część I / [red. Tobiasz Wysoczański]. Świebodzice: Idea Knowledge Future, 2019. s. 290-301.

Modyfikowane układy lipidowo-polimerowe do transportu substancji biologicznie czynnych

Waglewska Ewelina [(1)], Bazylińska Urszula [(1)]

[1] Katedra Chemii Fizycznej i Kwantowej, Wydział Chemiczny, Politechnika Wrocławska
Ewelina Waglewska: ewelina.waglewska@pwr.edu.pl

Streszczenie
Ograniczenia w klinicznym zastosowanie wielu substancji terapeutycznych są spowodowane licznymi skutkami ubocznymi, niekorzystną farmakokinetyką czy ograniczoną rozpuszczalnością w wodzie. W związku z tym układy transportu leków pełnią istotną rolę w tworzeniu nowych, bezpiecznych i skutecznych formulacji farmaceutycznych. Do kluczowych nośników związków aktywnych zalicza się liposomy, które dzięki pęcherzykowatej budowie wykazują zdolność do enkapsulacji zarówno substancji o charakterze lipofilowym, jak i hydrofilowym. Liczne modyfikacje dwuwarstwy lipidowej pozwalają m.in. na zwiększenie ich stabilności oraz precyzyjne dostarczenie leku do tkanki docelowej. Z tego względu głównym celem niniejszej pracy jest scharakteryzowanie nowych generacji liposomów, jako transporterów substancji aktywnych. Istotnym elementem jest również opisanie mechanizmów dostarczania nanostruktur do tkanki docelowej oraz metod uwalniania leków w nich zamkniętych.

Słowa kluczowe: funkcjonalizowane liposomy, transport aktywny i pasywny, nośniki leków

Modified lipid-polymeric systems for the transport of biologically active substances

Summary
The clinical application of many therapeutic substances have been limited due to their potential side effects, unfavorable pharmacokinetics or limited water solubility. Therefore, nanocarriers play an important role in creating novel, safe and effective drug system. Liposomes are recognized as one of the innovative delivery systems of active substances. Due to their vesicular structure, they can encapsulate both lipophilic and hydrophilic substances. Numerous modifications of the lipid bilayer allow, among others to increase stability of liposomes and targeted drug delivery. For this reason, the main goal of this work is to characterize the new generation of liposomes as transporters of active cargo. An important element is also to describe the mechanisms of nanostructures delivery to the target tissue and ways to releasing drugs enclosed in liposomes.

Keywords: functionalized liposomes, active and passive transport, nanocarriers

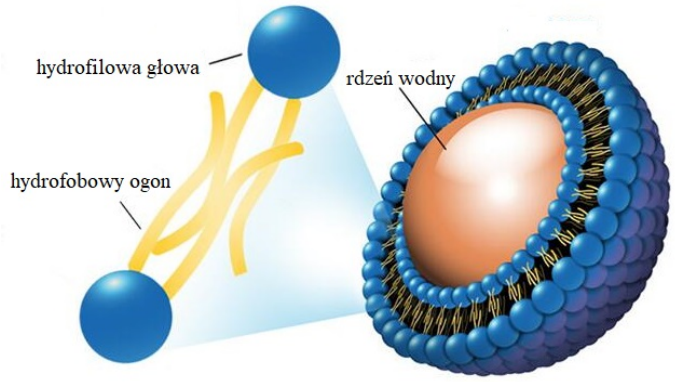
1. Wstęp

Liposomy, po raz pierwszy opisane w latach 60-tych przez brytyjskiego hematologa Aleca Bangham'a, należą obecnie do najczęściej badanych systemów dostarczania substancji biologicznie czynnych. (Olusanya i in., 2018). Liposomy to kuliste struktury pęcherzykowe, których głównym składnikiem budulcowym są związki amfifilowe – tzw. fosfolipidy. Wysoka biokompatybilność, niewielkie rozmiary, nietoksyczność, zdolność do łatwego ulegania procesowi biodegradacji czy transport zarówno substancji hydrofilowych, jak i rozpuszczalnych w tłuszczach, czyni je niemal idealnymi nośnikami związków o znaczeniu terapeutycznym i diagnostycznym (Karewicz, 2014; Torchilin, 2005). Z drugiej strony stosowanie pęcherzyków fosfolipidowych może wiązać się z pewnymi ograniczeniami, które

wynikają przede wszystkim z ich niskiej stabilności. Wydłużenie okresu półtrwania liposomów w układzie krążenia jest możliwe dzięki chemicznym modyfikacjom powierzchni tych struktur, polegającym m.in. na opłaszczaniu jej różnymi polimerami. Inne podejście polega na przyłączaniu ligandów (m.in. przeciwciał, białek) do dwuwarstwy lipidowej, które odpowiadają za ukierunkowany transport formulacji liposomalnych (Sercombe i in., 2015).

2. Struktura liposomów

Liposomy nazywane są sferycznymi pęcherzykami składającymi się z wodnego rdzenia otoczonego pojedynczą warstwą lipidową lub też kilkoma dwuwarstwami. Otoczka liposomów zbudowana jest z naturalnych składników błon biologicznych – fosfolipidów, które ze względu na charakter amfifilowy posiadają w swojej strukturze zarówno region hydrofilowy (głowa), jak i hydrofobowy (ogon) (Rys.1).



Rys.1. Budowa liposomu (https://www.creative-biostructure.com/liposomes-for-nutrients-623.htm, dostęp: 16.12.2019)

Najbardziej znanymi lipidami stosowanymi w formulacjach liposomalnych jest fosfatydylocholina (PC, ang. *phosphatidylcholine*), fosfatydyloglicerol (PG, ang. *phosphatidylglycerol*), fosfatydyloetanoloamina (PE, ang. *phosphatidylethanolamine*) oraz fosfatydyloseryna (PS, ang. *phosphatidylserine*). Cholesterol jest również kluczowym składnikiem błony liposomalnej, ponieważ wpływa na jej płynność, a tym samym na poprawę stabilności pęcherzyków (Olusanya i in., 2018).

3. Mechanizm powstawania pęcherzyków fosfolipidowych

Fosfolipidy, jako związki amfipatyczne wykazują zdolność do tworzenia błon w środowisku wodnym. Płaska dwuwarstwa lipidowa jest energetycznie niekorzystna, dlatego też dochodzi do „zaginania się" powstałych dwuwarstw w celu zminimalizowania interakcji pomiędzy hydrofobowymi łańcuchami węglowodorowymi lipidów a roztworem wodnym. W rezultacie prowadzi to do utworzenia metastabilnych struktur zamkniętych o kształcie kulistym (Kozubek, 2004).

Proces powstawania dwuwarstw lipidowych jest szybki oraz spontaniczny, co związane jest zarówno z obecnością związków amfifilowych, jak i występowaniem przede wszystkim oddziaływań hydrofobowych. Ponadto obecne pomiędzy łańcuchami hydrofobowymi siły van der Waalsa, wpływają na ścisłe upakowanie lipidów we wnętrzu dwuwarstwy. Duże znaczenie mają również oddziaływania elektrostatyczne, które występują między hydrofilowymi głowami fosfolipidów a cząsteczkami wody oraz wiązania wodorowe mogące pojawiać się pomiędzy grupami polarnymi niektórych lipidów (Bozzuto i in., 2015).

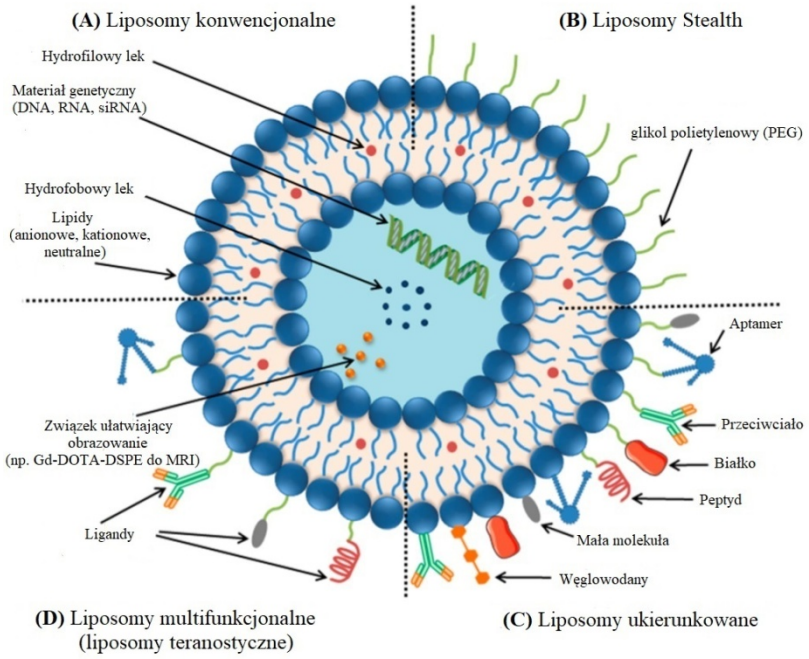
Powstawanie pęcherzyków fosfolipidowych opisują dwa modele:

- Model „pączkowania" – liposomy powstają w wyniku stopniowego uwadniania suchego filmu lipidowego, utworzonego na skutek odparowania rozpuszczalnika organicznego. W trakcie uwadniania następuje wnikanie roztworu wodnego pomiędzy poszczególne dwuwarstwy lipidowe, co prowadzi do ich pęcznienia, rozdzielenia i „odpączkowania" powstających pęcherzyków. W trakcie mechanicznego wytrząsania dochodzi do oderwania się tych struktur, w wyniku, czego powstają wielowarstwowe liposomy MLV (ang. *multilamellar large vesicles*). Poddanie tych pęcherzyków różnym technikom rozdrabiania pozwala na powstanie małych, jednowarstwowych liposomów SUV (ang. *small unilamellar vesicles*) (uzyskiwanych za pomocą sonifikacji, prasy Frencha) oraz dużych, jednowarstwowych pęcherzyków LUV (ang. *large unilamellar vesicles)* (otrzymywanych w wyniku ekstruzji przez poliwęglanowe filtry membranowe);
- Model „fuzji fragmentów dwuwarstwy fosfolipidowej" – powstawanie pęcherzyków liposomalnych związane jest z fuzją fragmentów różnej wielkości dwuwarstwy lipidowej, na skutek, czego tworzą się zamknięte pęcherzyki (Kozubek i in., 1996).

4. Rodzaje liposomów

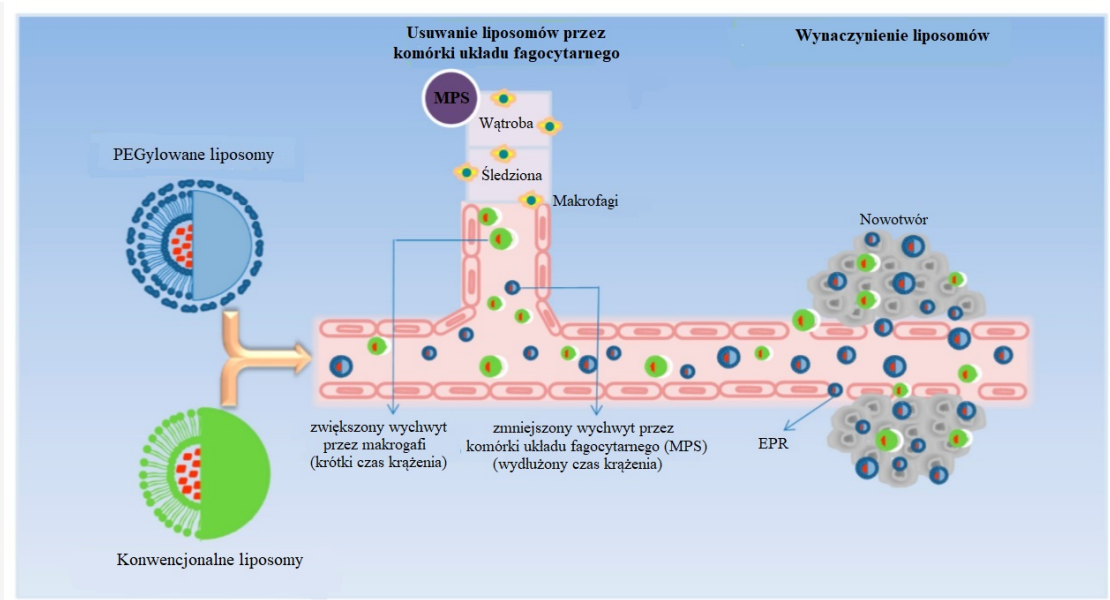
Ze względu na skład, właściwości fizykochemiczne liposomów oraz mechanizm dostarczania substancji terapeutycznych do komórek docelowych, można wyróżnić cztery główne typy pęcherzyków (Rys.2):

A) Liposomy konwencjonalne – pierwsza generacja liposomów, których dwuwarstwa może składać się z fosfolipidów kationowych, anionowych lub neutralnych, z dodatkiem cholesterolu lub bez niego. Jednakże liposomy te są błyskawicznie usuwane przez komórki układu fagocytarnego (MPS, ang. *mononuclear phagocyte system*), co obniża skuteczność ich działania (Sercombe i in., 2015);



Rys.2. Rodzaje liposomów terapeutycznych (Riaz i in., 2018)

B) Liposomy „Stealth" – w celu wydłużenia czasu krążenia, powierzchnię liposomów pokrywa się biokompatybilnym glikolem polietylenowym (PEG, ang. p*olyethylene glycol*). Formułowanie polimerowego płaszcza ochronnego wokół liposomów przeciwdziała interakcji tych nanonośników ze składnikami otoczenia (m.in. białkami osocza), wskutek czego chroni je przed zbyt wczesnym usunięciem (Rys.3). Oprócz PEG-u do stabilizacji struktur liposomowych można stosować naturalne polimery (tj. chitozan, dekstran czy kwas hialuronowy) oraz syntetyczne polimery (m.in. alkohol poliwinylowy) (Karewicz, 2014);

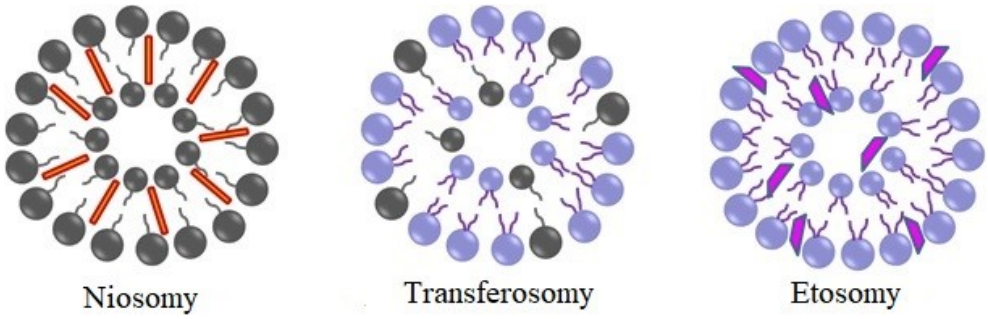


Rys.3. Farmakokinetyka PEGylowanych i niepegylowanych liposomów (Bulbake i in., 2017)

C) Liposomy ukierunkowane – nośniki zwiększające skuteczność terapeutyczną transportowanych substancji biologicznie aktywnych w wyniku zwiększonej akumulacji w komórkach docelowych. Za ukierunkowany transport pęcherzyków fosfolipidowych odpowiedzialne są ligandy (m.in. przeciwciała, białka, kwas foliowy), które skierowane są przeciwko określonym receptorom, wykazującym nadekspresję na powierzchni komórek nowotworowych (np. raka jajnika czy nowotworu piersi). Ligandy te mogą być przyłączone bezpośrednio do powierzchni liposomów, jak i do końca łańcucha PEG (Riaz i in., 2018);

D) Liposomy teranostyczne – nanostruktury o właściwościach zarówno diagnostycznych, jak i terapeutycznych, które umożliwiają rozpoznanie tkanki chorobowej, dostarczenie do niej substancji aktywnej oraz monitorowanie skutków działania leku, np. podczas rezonansu magnetycznego (MRI, ang. *magnetic resonance imaging*).

Ponadto, w celu poprawienia stabilności i elastyczności liposomów wykorzystuje się szereg innych modyfikacji, które związane są z wprowadzeniem do ich struktury nie tylko fosfolipidów, ale również innych surfaktantów, czyli związków powierzchniowo czynnych o strukturze amfifilowej. Do tak zmodyfikowanych układów możemy zaliczyć trzy nowe generacje nowoczesnych liposomów (Rys.4):



Rys.4. Nowe generacje liposomów (materiał własny)

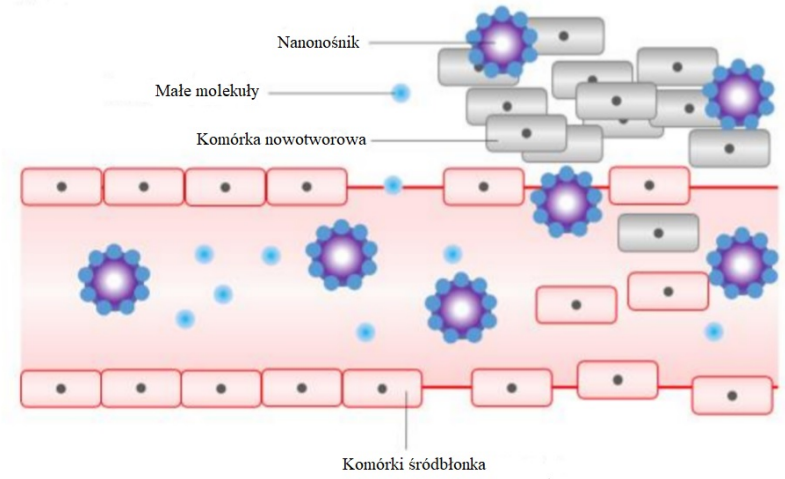
- Niosomy (I generacja) – w porównaniu do klasycznych liposomów, zbudowane głównie z surfaktantów niejonowych oraz cholesterolu;
- Transferosomy (II generacja) – elastyczne liposomy zawierające w swojej strukturze fosfolipidy i surfaktanty niejonowe (np. cholan sodu, deoksycholan sodu);
- Etosomy (III generacja) – elastyczne pęcherzyki zbudowane z fosfolipidów z dodatkiem etanolu (20-45%) (Tran i in., 2019).

5. Docelowy system dostarczania leków

Dostarczanie substancji biologicznie aktywnych zamkniętych w liposomach zmienia profil ich dystrybucji oraz poprawia indeks terapeutyczny, co związane jest ze zwiększoną

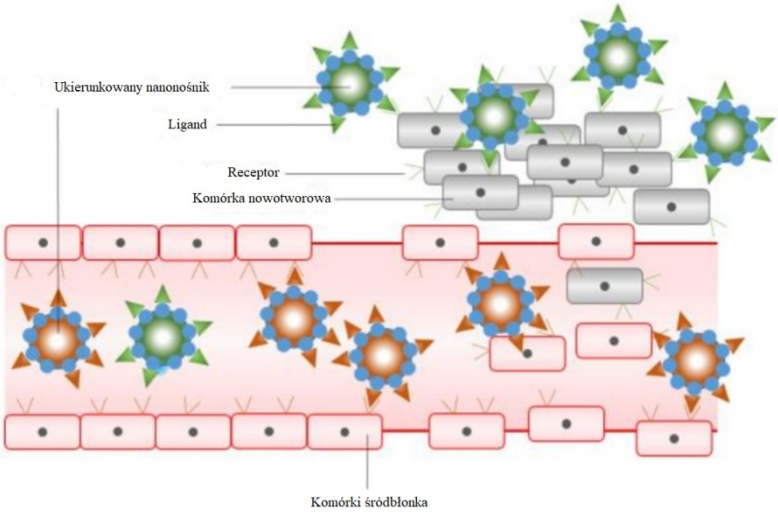
akumulacją leków w tkance docelowej (Tosha i in., 2019). Wyróżnia się dwa główne mechanizmy:

A) Transport pasywny (bierny) - opiera się przede wszystkim na wykorzystaniu zwiększonej przepuszczalności komórek śródbłonka naczyń włosowatych w miejscach nowotworzenia (Rys.5). Ponadto słaby drenaż limfatyczny w obrębie guza prowadzi do zatrzymania i magazynowania leku w miejscu docelowym (efekt EPR, ang. *enhanced vascular permeability and retention*). Związane jest to z szybkim procesem angiogenezy, który objawia się powstawaniem nowych, zdefektowanych, nieszczelnych naczyń włosowatych z już istniejących. Zakres wielkości szczelin pomiędzy komórkami śródbłonka naczyń odżywiających guz nowotworowy może wynosić od 100 nm do nawet 2000 nm, co pozwala nośnikom załadowanym lekiem na migrację do chorych tkanek. Proces angiogenezy przyczynia się również do powstawania przerzutów w innych narządach. Z kolei w prawidłowo rozwiniętym śródbłonku naczyń, szczeliny pomiędzy komórkami wynoszą maksymalnie 6 nm, co powoduje, że nośniki mogą wnikać tylko do tkanki nowotworowej omijając tą prawidłową, w przeciwieństwie do niskocząsteczkowych leków (Basha i in., 2019).



Rys.5. Pasywny transport nanonośnika (Olusanya i in., 2018)

B) Transport aktywny – odpowiedzialny jest za ukierunkowanie i selektywne wiązanie się liposomu z określoną tkanką, co jest możliwe dzięki zmodyfikowaniu powierzchni tego nanonośnika specyficznym ligandem (m.in. przeciwciałem, aptamerem) (Rys.6). Jak wspomniano powyżej (Rozdział 4), związki te są rozpoznawane przez określone receptory znajdujące się na powierzchni chorych komórek, wskutek czego wzrasta skuteczność terapeutyczna leków transportowanych w liposomach.



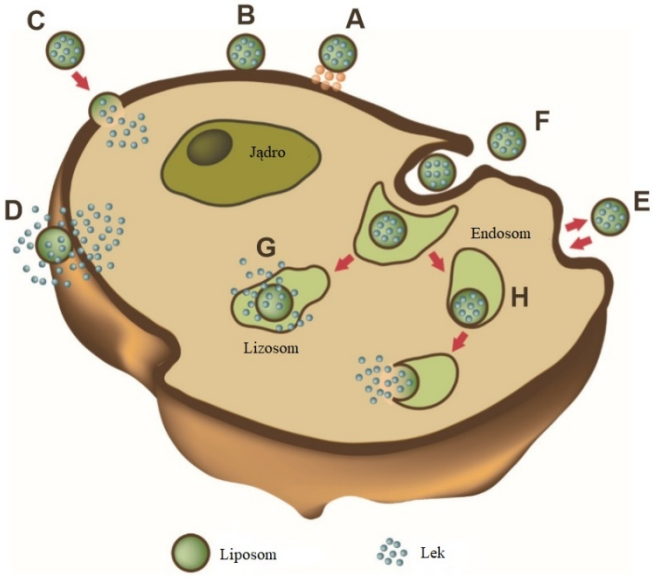
Rys.6. Transport aktywny nanonośnika (Olusanya i in., 2018)

Mechanizm ten minimalizuje efekty uboczne związane z niespecyficznym gromadzeniem się nanonośników w niepożądanych miejscach (np. w obszarze zdrowych tkanek) (Basha i in., 2019).

6. Sposoby uwalniania związków aktywnych zamkniętych w liposomach

Uwolnienie substancji aktywnej zamkniętej w nośnikach liposomowych odbywa się na skutek interakcji pomiędzy komórkami a pęcherzykami fosfolipidowymi (Rys.7). Wśród nich wyróżnia się:

- Adsorpcję na powierzchni błony komórkowej, gdzie dwuwarstwa lipidowa nanonośnika jest rozkładana m.in. przez enzymy (tj. lipazy). Prowadzi to do uwolnienia składników aktywnych do płynu pozakomórkowego, gdzie następnie mogą one dyfundować przez błonę komórkową i cytoplazmę;
- Fuzję błony liposomalnej z błoną komórkową komórki docelowej, której wynikiem jest uwolnienie zawartości nanonośnika bezpośrednio do cytoplazmy;
- Endocytozę za pośrednictwem receptorów, podczas której pęcherzyki fosfolipidowe (< 150 nm) są wchłanianie do wnętrza komórki, gdzie dochodzi do uwolnienia ich zawartości. Proces fagocytozy jest również możliwy, ale obejmuje tylko nanostruktury o średnicy większej niż 150 nm. W tym przypadku nośniki liposomowe są fagocytowane przez wyspecjalizowane komórki układu immunologicznego (tj. makrofagi, komórki Kupffera czy monocyty) (Lombardo i in., 2016).



Rys.7. Interakcja liposom-komórka: (a) adsorpcja specyficzna; (b) adsorpcja niespecyficzna na powierzchni komórki; (c) fuzja nanonośnika z błoną komórkową; (d) dezintegracja dwuwarstwy lipidowej przez określone składniki błony komórki docelowej; (e) wymiana składników lipidowych pomiędzy błoną komórki a liposomem; (f) endocytoza, która może zachodzić w różnych kierunkach - (g) dostarczenie nanonośnika do lizosomu za pomocą endosomu, gdzie niskie pH indukuje degradację błony liposomalnej; (h) destabilizacja endosomu przez nośnik liposomowy i uwolnienie leku do cytoplazmy (Lombardo i in., 2016)

Wzrost zainteresowania liposomami, jako nośnikami leków przyczynił się do prowadzenia licznych badań związanych z możliwością kontrolowanego uwalniania substancji terapeutycznych na skutek działania konkretnego czynnika. Błona liposomalna może ulec destabilizacji i zwiększyć swoją przepuszczalność na skutek czynników zewnętrznych (m.in. światła, działania ultradźwięków czy pola magnetycznego), jak i czynników wewnętrznych (tj. zmiana pH lub działanie enzymów występujących w tkankach nowotworowych) (Raza i in., 2019). Formułowanie wrażliwych na zmianę pH nośników liposomowych związane jest z kwaśnym środowiskiem komórek nowotworowych. Liposomy są coraz częściej wykorzystywane również do transportu fotouczulaczy w terapii fotodynamicznej (PDT, ang. *photodynamic therapy*), która staje się uzupełnieniem klasycznych metod leczenia chorób nowotworowych (m.in. chemioterapii). W tym przypadku światło o odpowiedniej długości fali jest inicjatorem destabilizacji błony liposomalnej, co prowadzi do uwolnienia substancji leczniczej zawartej w nośnikach i zniszczenia tkanki nowotworowej (Kilian i in., 2019).

7. Liposomy jako nanonośniki substancji aktywnych

Liposomy zaliczane są do najintensywniej badanych nanonośników transportujących różnorodne substancje biologicznie czynne. Próby projektowania nowych generacji funkcjonalizowanych preparatów liposomalnych poświęcone są głównie leczeniu chorób nowotworowych. Leki przeciwnowotworowe takie jak doksorubicyna, daunorubicyna,

cisplatyna, paklitaksel czy winkrystyna są jednym z najszerzej badanych środków zamykanych w pęcherzykach fosfolipidowych. Stosowanie tych substancji w postaci wolnej wiązało się z występowaniem licznych efektów ubocznych, zagrażających zdrowiu pacjenta, w związku, z czym rozpoczęto prowadzenie badań nad liposomalnym systemem dostarczania tych leków do tkanki docelowej.

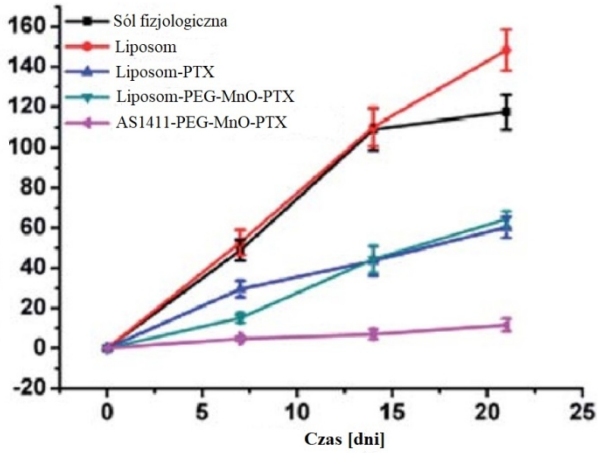
Obecnie na rynku istnieje kilka preparatów liposomalnych, zaakceptowanych do leczenia chorób nowotworowych. Doxil® jest pierwszym lekiem opartym na technologii PEGylowanych liposomów, zawierającym doksorubicynę, jako substancję aktywną. Został on zatwierdzony do użytku w 1995 roku w USA przez Agencję Żywności i Leków (FDA, ang. *Food and Drug Administration*). Preparat ten znalazł zastosowanie w leczeniu raka jajnika, raka piersi i mięsaka Kaposiego (Bulbake i in., 2017). Innymi dopuszczonymi przez FDA preparatami, wykorzystującymi technologię liposomów modyfikowanych glikolem polietylenowym są:

- Lipodox® (2013 r.) – nośnik transportujący doksorubicynę. Wykorzystywany w leczeniu raka jajnika, raka piersi, mięsaka Kaposiego i szpiczaka mnogiego;
- Onivyde® (2015 r.) – układ zawierający irynotekan, jako substancję czynną. Stosowany w leczeniu przerzutowego raka trzustki (Basha i in., 2019).

Ostatnio prowadzone prace badawcze skupiają się na projektowaniu wielofunkcyjnych preparatów liposomalnych, zdolnych do wykonywania określonego zestawu zadań biomedycznych. Istnieją próby jednoczesnego obrazowania i leczenia chorób nowotworowych. W związku z tym konieczne jest prowadzenie licznych badań pozwalających na stworzenie nowych, skutecznych nanonośników, które w sposób ukierunkowany doprowadzą do zabicia komórek nowotworowych, bez ingerencji w komórki zdrowe. Najnowsze doniesienia literaturowe opisują m.in. badania przeprowadzone przez J. Li i jego współpracowników (Li i in., 2019), które pozwoliły na stworzenie teranostycznych liposomów AS1411-liposom-PEG-MnO-PTX do jednoczesnej diagnostyki i leczenia raka nerki. Preparat ten składał się z DSPC (ang. *1,2-distearoyl-sn-glycero-3-phosphocholine*), DSPE-mPEG2000 (ang. *1,2-distearoyl-sn-glycero-3-phosphoethanolamine-N-[methoxy(polyethylene glycol)-2000*), DSPE-mPEG2000-COOH, cholesterolu, PEG-MnO, paklitakselu (PTX) oraz aptameru AS1411. Wykorzystany środek kontrastowy oparty na manganie charakteryzuje się dobrą biokompatybilnością. Jednakże nanocząstki MnO mogą być wychwytywane przez układ siateczkowo-śródbłonkowy, a następnie akumulowane w śledzionie i wątrobie, co może doprowadzić do działań toksycznych wywołanych przez

Mn^{2+}. Powłoka z glikolu polietylenowego może znacznie poprawić stabilność tych nanocząstek (Li i in., 2019).

Podczas całego cyklu wykonywano skany rezonansu magnetycznego (MRI) w celu monitorowania zmian wzrostu guza *in vivo*. Pokazały one, że zaprojektowany nanonośnik AS1411-liposom-PEG-MnO-PTX poprawił skuteczność przeciwnowotworową - wykazywał najlepszy efekt hamowania wzrostu guza w porównaniu z innymi nanokompleksami. Umieszczenie ligandu AS1411 sprzężonego z PEG na powierzchni liposomu polepszyło akumulację nośnika w komórkach nowotworowych nerki oraz dodatkowo wzmocniło efekt MRI, co pozwoliło na lepsze uwidocznienie zmian chorobowych. Wyniki zmian objętości guza przedstawiono na Rysunku 8.



Rys.8. Wyniki zmian objętości guza w czasie (Li i in., 2019)

Podsumowując, wyniki otrzymane przez J. Li i współpracowników sugerują, że teranostyczny liposom AS1411-liposom-PEG-MnO-PTX mógłby być wykorzystany do jednoczesnego wykrycia zmian nowotworowych, jak i ich leczenia (Li i in., 2019).

8. Podsumowanie

Działalność badawcza w zakresie ukierunkowanego dostarczania substancji biologicznie czynnych została ogromnie rozszerzona o wiele nowych możliwości efektywnego transportu leków do tkanek docelowych. Ogólny wskaźnik terapeutyczny preparatów liposomowych jest wyższy w porównaniu z lekami transportowanymi w wolnej postaci. Jest to związane z minimalizacją ekspozycji tkanek zdrowych na zamknięty w liposomach lek, który przyczyniał się do występowania wielu skutków ubocznych.

Prowadzenie licznych badań pozwala dokładnie zrozumieć sposób działania pęcherzyków fosfolipidowych oraz wprowadzić pewne zmiany w ich budowie. W rezultacie możliwe jest uzyskanie selektywnych i bezpiecznych preparatów. Funkcjonalizowane liposomy dają obecnie nadzieję na opracowanie nowych generacji leków, które będą zdolne

skutecznie diagnozować i zwalczać wiele chorób, w tym przede wszystkim tych nowotworowych.

Podziękowanie

Praca finansowana z dotacji Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego na działalność statutową Wydziału Chemicznego Politechniki Wrocławskiej.

9. Literatura

Basha S.A. i in., 2019. Liposomes in active, passive and acoustically-triggered drug delivery. Mini-Reviews in Medicinal Chemistry 19: 961-969.

Bozzuto G., Molinari A., 2015. Liposomes as nanomedical devices. International Journal of Nanomedicine 10: 975-999.

Bulbake U. i in., 2017. Liposomal formulations in clinical use: An updated review. Pharmaceutics 9: 1-33.

Karewicz A., 2014. Polymeric and liposomal nanocarriers for controlled drug delivery. Biomaterials for Bone Regeneration 11: 351-373.

Kilian H.I. i in., 2019. Photoactivatable drug release methods from liposomes. Handbook of *In Vivo* Chemistry in Mice: From Lab to Living System 15: 433-449.

Kozubek A., 2004. Wstęp do technologii liposomowej. Wydawnictwo Uniwersytetu Wrocławskiego.

Kozubek A. i in., 1996. Molekularna organizacja komórki II. Lipidy, liposomy i błony biologiczne. Wydawnictwo Uniwersytetu Wrocławskiego, 90-93.

Li J. i in., 2019. AS1411 aptamer-modified theranostic liposomes co-encapsulating manganese oxide nano-contrast agent and paclitaxel for MRI and therapy of cancer. Royal Society of Chemistry 9, 34837-34846.

Lombardo D. i in., 2016. Soft interaction in liposome nanocarriers for therapeutic drug delivery. Nanomaterials 6: 1-26.

Olusanya T.O.B. i in., 2018. Liposomal drug delivery systems and anticancer drugs. Molecules 23(4): 1-17.

Raza A. i in., 2019. Endogenous and exogenous stimuli-responsive drug delivery systems for programmed site-specific release. Molecules 24: 1-21.

Riaz M.K. i in., 2018. Surface functionalization and targeting strategies of liposomes in solid tumor therapy: A review. International Journal of Molecular Sciences 19: 1-27.

Sercombe L. i in., 2015. Advanced and challenges of liposome assisted drug delivery. Frontiers in Pharmacology 6: 1-13.

Torchilin V.P., 2005. Recent advances with liposomes as pharmaceutical carriers. Nature Reviews Drug Discovery 4: 145-160.

Tosha P. i in., 2019. Liposomal formulations in cancer therapy: passive versus active targeting. Asian Journal of Pharmaceutical Research and Development 7(2): 35-38.

Van Tran V. i in., 2019. Liposomes for delivery of antioxidants in cosmeceuticals: Challenges and development strategies. Journal of Controlled Release 300: 114-140.

Wykaz stron internetowych

https://www.creative-biostructure.com/liposomes-for-nutrients-623.htm, dostęp: 16.12.2019

NAUKI TECHNICZNE
I ŚCISŁE

Część I

ISBN 978-83-953882-7-9