

Spis treści

Recenzenci 2016 – Podziękowania Recenzentom <i>Reviewers 2016 – Editorial Acknowledgment</i>	5
Anna BERNATOWICZ Analiza parametrów mechaniki pęknięcia betonu z wykorzystaniem nowoczesnych technik komputerowych <i>The high-tech, computer-based analysis of crack mechanics parameters</i>	7
Błażej GAZE, Michał KAMIŃSKI, Agnieszka BIERNACIK, Arkadiusz DYJAKON Analiza ekonomiczno-środowiskowa rozwiązań grzewczych budynku jednorodzinnego w perspektywie zmian legislacyjnych <i>Analysis of economic and environmental solutions of heating systems of single-family building in the perspective of legislative changes</i>	13
Robert GRYGO, Marta KOSIOR-KAZBERUK Zbrojenie konstrukcji betonowych niemetalicznymi prętami kompozytowymi FRP <i>Reinforcing concrete structures with non-metallic composite FRP bars</i>	21
Agata JABŁOŃSKA-TRYPUĆ, Elżbieta WOŁEJKO, Urszula WYDRO, Andrzej BUTAREWICZ Zastosowanie hodowli <i>in vitro</i> komórek ludzkich w badaniach pestycydów <i>The application of the human cell culture in the studies of pesticides impact on the human organism</i>	29
Katarzyna KALINOWSKA-WICHROWSKA Stosowanie spoiwa recyklingowego jako przykład redukcji CO ₂ <i>Applying recycling cement binder as an example of CO₂ reduction</i>	41
Dorota Anna KRAWCZYK, Antonio RODERO SERRANO, Katarzyna GŁADYSZEWSKA-FIEDORUK <i>The technical infrastructure details in the old towns in Spain</i>	47
Joanna STACHNIEWICZ, Marta KOSIOR-KAZBERUK, Julita KRASSOWSKA Nośność na ścinanie belek wykonanych z włóknobetonu <i>Shear capacity of fibre reinforced concrete beams</i>	53

ANALIZA PARAMETRÓW MECHANIKI PĘKANIA BETONU Z WYKORZYSTANIEM NOWOCZESNYCH TECHNIK KOMPUTEROWYCH

Anna BERNATOWICZ*

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

Streszczenie: Wykorzystanie parametrów mechaniki pęknięcia umożliwia bardziej ekonomiczne podejście do projektowania konstrukcji. Tradycyjne badania doświadczalne dostarczają wielu istotnych informacji dotyczących zarysowań oraz koncentracji naprężeń w obciążanych elementach. Wymagają one jednak dużej liczby czasochłonnych prób. Wstępne obliczenia przeprowadzone za pomocą programów komputerowych, pozwalają ograniczyć je do niezbędnego minimum. W niniejszej pracy przedstawiono przegląd dostępnych programów komputerowych wykorzystywanych do analizy parametrów mechaniki pęknięcia. W ramach badań własnych, wykonano model próby rozciągania przy rozłupywaniu w programie Robot Structural Analysis oraz przeprowadzono weryfikację obliczeń w programie Abaqus. Przedmiotem badań był betonowy dysk osłabiony szczeliną prostą lub skośną, symulujący prosty lub złożony stan naprężeń w elemencie betonowym.

Słowa kluczowe: mechanika pęknięcia, model pęknięcia, odporność na pęknięcie, trwałość konstrukcji.

1. Wprowadzenie

Historia mechaniki pęknięcia sięga pierwszej połowy XX wieku, a intensywny rozwój tej dziedziny datowany jest na okres powojenny. Znajomość jej parametrów stała się nadrzędnym celem ówczesnych inżynierów po szeregu katastrof budowlanych, które miały miejsce w tym okresie. Wynikały one z projektowania konstrukcji z pominięciem konieczności zapewnienia ich trwałości w zróżnicowanych warunkach środowiska (Neimitz, 1998). Aspekt ten pozostał kluczowy aż po współczesne czasy, ponieważ jest jednym z naczelných założeń zintegrowanego projektowania. Idea ta zjednała sobie szereg zwolenników, bowiem oprócz właściwości funkcjonalno-konstrukcyjnych, uwzględnia także czynniki środowiskowe oraz wspomnianą trwałość konstrukcji. Jest ona niezwykle istotna w przypadku budownictwa betonowego, ponieważ zachowanie właściwego stanu budowli podczas eksploatacji przyczynia się do ochrony środowiska. Naprawy, które są wynikiem obniżonej trwałości są nie tylko kosztowne, ale także wiąże się z nimi zużycie materiałów, energii oraz zanieczyszczenie środowiska (Ajdukiewicz, 2011).

Wykorzystanie parametrów mechaniki pęknięcia umożliwia nowe podejście do projektowania konstrukcji. Tradycyjne badania doświadczalne dostarczają wielu istotnych informacji dotyczących inicjacji i propagacji zarysowań oraz koncentracji naprężeń w obciążanych elementach. Wymagają one jednak dużej liczby czasochłonnych prób. Z pomocą przychodzą tutaj

programy komputerowe, które wykorzystując założenia metody elementów skończonych, pozwalają na wstępne oszacowanie wartości i rozkładu naprężeń w modelowanych elementach. Wówczas liczbę prób doświadczalnych można ograniczyć do niezbędnego minimum. Aktualnie dostępne na rynku programy komputerowe pomocne są w interpretacji rezultatów otrzymanych w wyniku tradycyjnych badań.

W niniejszej pracy przedstawiono przegląd dostępnych programów komputerowych wykorzystywanych do analizy parametrów mechaniki pęknięcia, umożliwiających minimalizację liczby tradycyjnych badań laboratoryjnych poprzez wykonanie wstępnych analiz w programie komputerowym. Wykonano model próby rozciągania przy rozłupywaniu w programie Robot Structural Analysis oraz jego weryfikację w programie Abaqus. Dokonano porównania otrzymanych wyników naprężeń oraz omówiono możliwości tych dwóch programów w odniesieniu do analizy parametrów mechaniki pęknięcia betonu. Przedmiotem badań był betonowy dysk o średnicy 100 mm i grubości 50 mm osłabiony szczeliną o zaokrąglonych brzegach szerokości 2 mm i długości: 10 mm, 30 mm oraz 50 mm. Szczelina była modelowana jako prosta oraz skośna, w celu zbadania prostego, jak również złożonego stanu naprężeń.

2. Parametry mechaniki pęknięcia

Wyróżniane są dwa podejścia do projektowania konstrukcji z wykorzystaniem mechaniki pęknięcia.

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: krajewskaanna0@gmail.com

Pierwsze z nich zakłada kryterium energetyczne. Jego podstawowe założenia opracował A.A. Griffith. Obliczana jest w nim prędkość uwalniania energii G . Jej wartość zależy od modułu Younga materiału, długości szczeliny pierwotnej oraz występującego naprężenia rozciągającego. Drugie podejście skupia się natomiast na parametrze zwanym współczynnikiem intensywności naprężeń K_I określającym pola naprężeń w wierzchołku szczeliny przy założeniu liniowo-sprężystego charakteru pracy materiału w tym obszarze. Dla płaskiego stanu naprężeń współczynnik intensywności naprężeń K_I obliczany jest według wzoru (1), którego związek z podejściem energetycznym (G) ilustruje wzór (2) (Anderson, 2005).

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (1)$$

gdzie: σ jest naprężeniem rozciągającym w wierzchołku szczeliny w N/m^2 , natomiast a jest połową długości szczeliny w m.

$$G = \frac{K_I^2}{E} \quad (2)$$

gdzie E jest modułem Younga w N/m^2 .

Znanym i wykorzystywanym w opisie badań, parametrem mechaniki pęknięcia jest także rozwarcie wierzchołka szczeliny *CTOD* (*crack tip opening displacement*). Wartość ta, tak jak i pozostałe parametry mechaniki pęknięcia, wyznaczana jest empirycznie wykorzystując próbki z zainicjowanymi już wstępnie szczelinami (Kosior-Kazberuk, 2012). Obecnie stosuje się również programy komputerowe, jako narzędzia wspomagające badania doświadczalne. Dzięki nim, można wstępnie oszacować wartości naprężeń, a następnie, za pomocą wzorów analitycznych, obliczyć wartości parametrów mechaniki pęknięcia. Wówczas badania laboratoryjne wykonywane są w celu weryfikacji otrzymanych wyników lub opracowanych modeli.

3. Stany naprężeń oraz modele obciążenia betonu

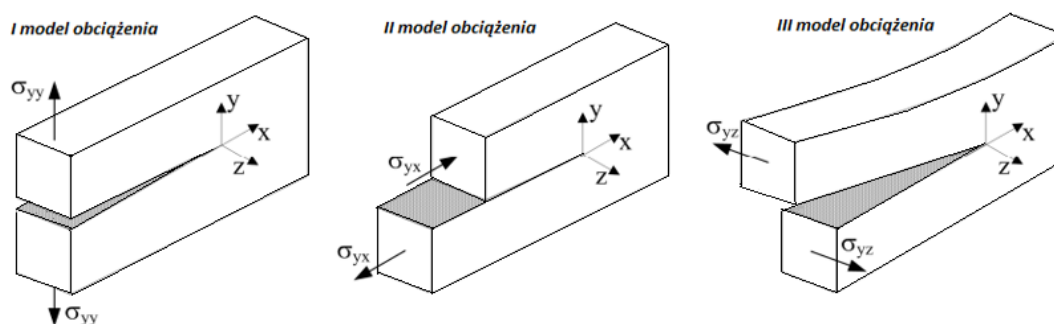
W mechanice pęknięcia złożone zagadnienia przestrzenne dotyczące elementów wykonanych z betonów, w celu uproszczenia analiz, rozpatrywane są najczęściej jako składowe wybranych spośród trzech podstawowych modeli obciążenia. Schematy te zwane są także modelami

pęknięcia. Zostały one przedstawione na rysunku 1 (Golewski, 2015; Neimitz, 1998).

W I modelu pęknięcia zachodzi czyste rozciąganie. Przyłożone prostopadle do płaszczyzny szczeliny obciążenie powoduje powstanie naprężeń σ_{yy} i jej propagację w kierunku y . II model pęknięcia charakteryzuje przypadek ścinania podłużnego, w którym obciążenie styczne do brzegów szczeliny powoduje powstanie naprężeń σ_{yx} . Natomiast w III modelu pęknięcia zachodzi ścinanie poprzeczne i powstają naprężenia σ_{yz} . W przypadku II i III modelu pęknięcia powstają tak zwane rysy skośne charakterystyczne dla obciążeń ścinających (Golewski, 2015). Złożoność powstających w dzisiejszych czasach konstrukcji oraz konieczność napraw już istniejących niejako zmusiła naukowców do przeprowadzania badań na próbkach o niestandardowych kształtach oraz poddawanych nietypowym układom obciążeń. Wówczas powstają złożone stany naprężeń. W przypadku badań laboratoryjnych parametrów mechaniki pęknięcia istotne są także położenie i wielkość zainicjowanych rys, które powodują koncentrację naprężeń. Przykładem mogą być tutaj badania opisane w pracach Golewskiego i in. (2012) oraz Smarzewskiego i Sapeczyńskiej (2012).

4. Programy komputerowe wykorzystywane do analizy parametrów mechaniki pęknięcia

Znanym w środowisku inżynierskim programem komputerowym wspomagającym proces projektowania jest Robot Structural Analysis. Przy obliczaniu sił wewnętrznych oraz wymiarowaniu konstrukcji korzysta on z Metody Elementów Skończonych. Umożliwia on obliczanie różnego rodzaju układów płaskich i przestrzennych oraz pozwala przeprowadzać analizy statyczne, wyboczeniowe oraz dynamiczne (Ambroziak i Kłosowski, 2016). Ze względu na panel pozwalający na analizę naprężeń, program Robot Structural Analysis wykorzystywany jest również do określania wartości parametrów mechaniki pęknięcia (Kuliński i Major, 2014). Kolejnym zastosowaniem tego programu są także obliczenia wykonywane podczas projektowania wzmocnień oraz napraw konstrukcji. Na podstawie inwentaryzacji stanu faktycznego obiektu budowlanego wykonuje się w programie Robot Structural Analysis model oraz oszacowuje się dalszy postęp ewentualnych



Rys. 1. Podstawowe schematy obciążeń elementów ze szczeliną (Golewski, 2015)

zniszczeń przy zmienionych warunkach obciążenia. Dzięki temu można zaproponować skuteczne rozwiązania naprawcze (Podolski i in., 2013).

Kolejnym programem komputerowym, który może być wykorzystywany do analizy parametrów mechaniki pęknięcia jest Abaqus CAE. Program ten stosuje w swoich algorytmach Metodę Elementów Skończonych. Stosowane są elementy 2D oraz 3D, w zależności od geometrii oraz charakteru pracy konstrukcji. Program Abaqus umożliwia również graficzną prezentację wyników obliczeń. Został zastosowany, między innymi przez Golewskiego (2015) do wykonania obliczeń numerycznych trzech modeli zniszczenia betonu. Swoją geometrią oraz schematami obciążeń odpowiadały one elementom badawczym. Uzyskane wyniki z programu komputerowego oraz badań laboratoryjnych były zbliżone (Golewski, 2015).

Do wyznaczenia parametrów mechaniki pęknięcia, na podstawie analizy numerycznej, można wykorzystać także inne programy komputerowe: ANSYS, SOLIDWORKS czy T-FLEX (Golewski, 2010 a i b).

Aktualnie dostępne programy komputerowe wspomagają także interpretację wyników uzyskanych w badaniach doświadczalnych parametrów mechaniki pęknięcia. Przykładem jest system optycznej analizy 3D ARAMIS, który służy do bezdotykowych pomiarów przemieszczeń i odkształceń w płaskich oraz przestrzennych elementach poddanych działaniu obciążeń. System ARAMIS wykorzystywany jest między innymi w badaniach zarysowań próbek betonu, co umożliwia dokładną analizę propagacji rys (Golewski, 2010 a i b). Pozwala to zrozumieć mechanikę pęknięcia oraz zaobserwować kierunek działania złożonych naprężeń wewnątrz materiału.

5. Model numeryczny próby rozciągania przy rozłupywaniu

5.1. Opis modelu próbki oraz założeń

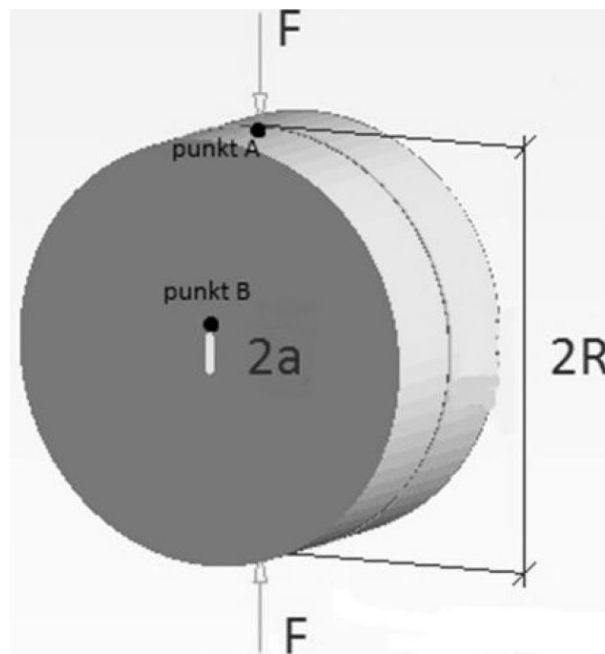
Przesłanką do wykonania modelu próby rozciągania przy rozłupywaniu w programie komputerowym była praca Karihaloo (2003), w której przedstawiono analizę wyników badań parametrów mechaniki pęknięcia przeprowadzonych na betonowym dysku osłabionym szczeliną. Półka, będąca w płaskim stanie naprężeń, poddana została obciążeniu w postaci dwóch sił skupionych o przeciwnych zwrotach, które przyłożone były wzdłuż średnicy (Karihaloo, 2003). Taki schemat doświadczenia stosuje się także w tak zwanej „próbce brazylijskiej”, którą przeprowadza się w celu określenia wytrzymałości na rozciąganie betonu przy rozłupywaniu (Mańkowski i Ciężkowski, 2012).

Celem niniejszej pracy było określenie rozkładu naprężeń w dysku poddanym numerycznej symulacji próby rozciągania przy rozłupywaniu z zastosowaniem elementów skończonych o różnej wielkości.

Do analizy przyjęto dyski ze szczelinami prostymi oraz skośnymi. Badania wykonano w programie komputerowym – Robot Structural Analysis oraz

przeprowadzono weryfikację obliczeń w programie Abaqus CAE. Następnie, na podstawie otrzymanych wartości naprężeń obliczono współczynniki intensywności naprężeń K_I w poszczególnych wariantach. Schemat obciążenia elementu próbnego przedstawiono na rysunku 2, a warianty obliczeniowe na rysunku 3.

Do przeprowadzenia obliczeń w obu wybranych programach komputerowych zaproponowano dysk o średnicy 100 mm i grubości 50 mm w sześciu wariantach: dysk ze szczeliną prostą lub skośną o grubości 2 mm, przy wskaźnikach a/R (a jest długością połowy szczeliny, a R jest promieniem dysku) równych: 0,1; 0,3; 0,5.

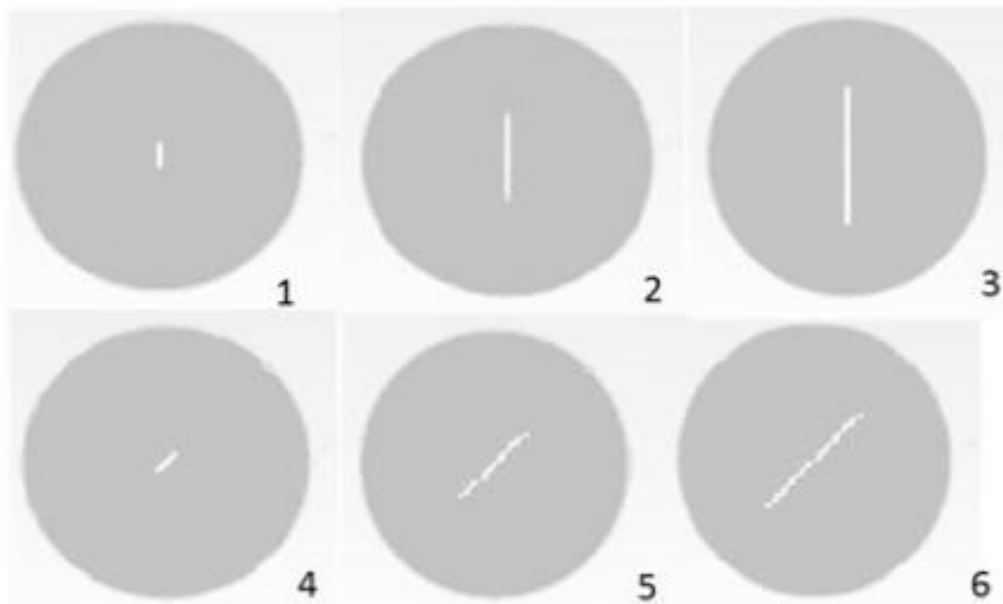


Rys. 2. Schemat obciążenia elementu próbnego w programie komputerowym

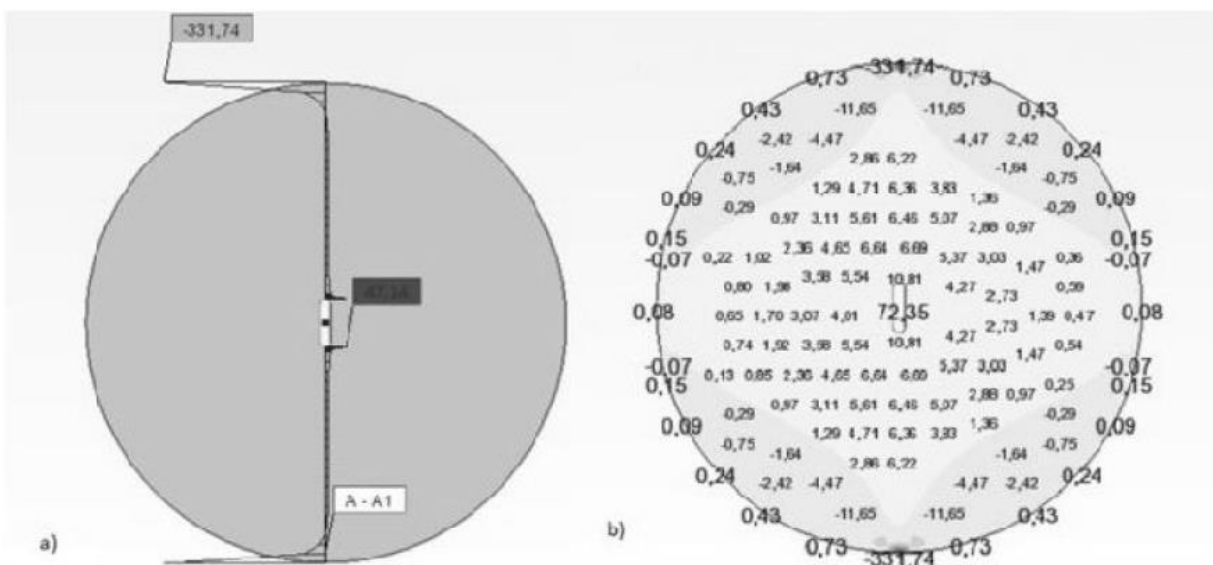
5.2. Analiza za pomocą programu Robot Structural Analysis

W programie Robot Structural Analysis wybrano moduł do projektowania konstrukcji w płaskim stanie naprężeń. Zastosowano siatkowanie metodą Coons oraz wyjściowe elementy skończone o długości boku równej 1 mm. Miejscowo, w sąsiedztwie brzoju szczeliny zagęszczono siatkę dwu-, cztero-, ośmio- i szesnastokrotnie. W tabeli 1 zestawiono odczytane z programu Robot Structural Analysis naprężenia w sąsiedztwie punktu B oraz obliczone wartości współczynników intensywności naprężeń K_I oraz prędkości uwalniania energii G w poszczególnych wariantach przeprowadzonych analiz.

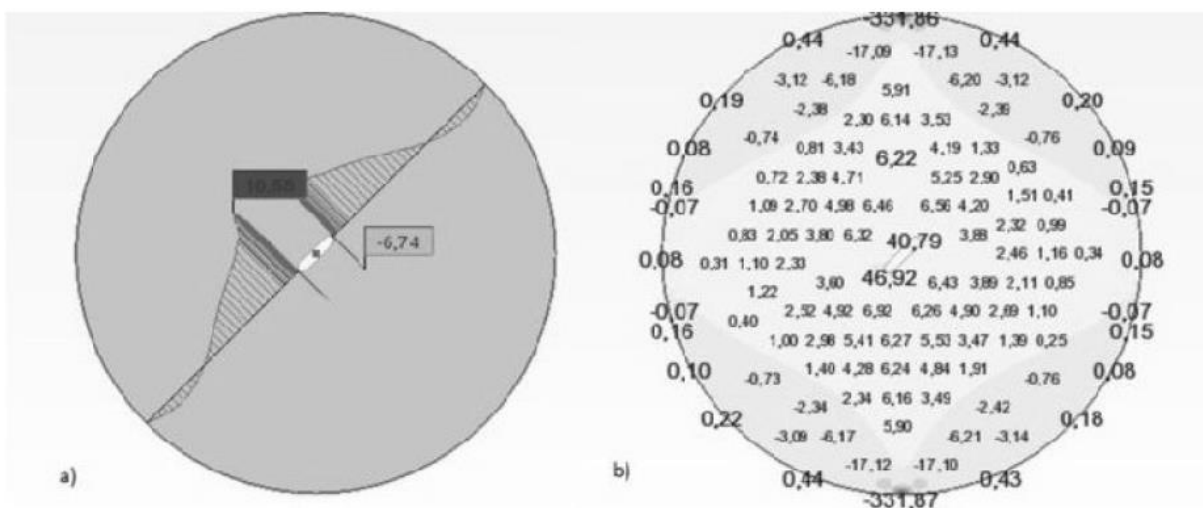
Na rysunkach 4 oraz 5 przedstawiono odpowiednio wykresy i mapy naprężeń na kierunku prostopadłym do kierunku działania obciążenia dla wariantu numer 1 (prosta szczelina) odpowiadającemu pierwszemu modelowi obciążenia opisanego w punkcie 3 niniejszej pracy oraz wariantu numer 4 (skośna szczelina), w którym uzyskano złożony stan naprężeń.



Rys. 3. Warianty obliczeniowe próby rozciągania przy rozłupywaniu w programie komputerowym



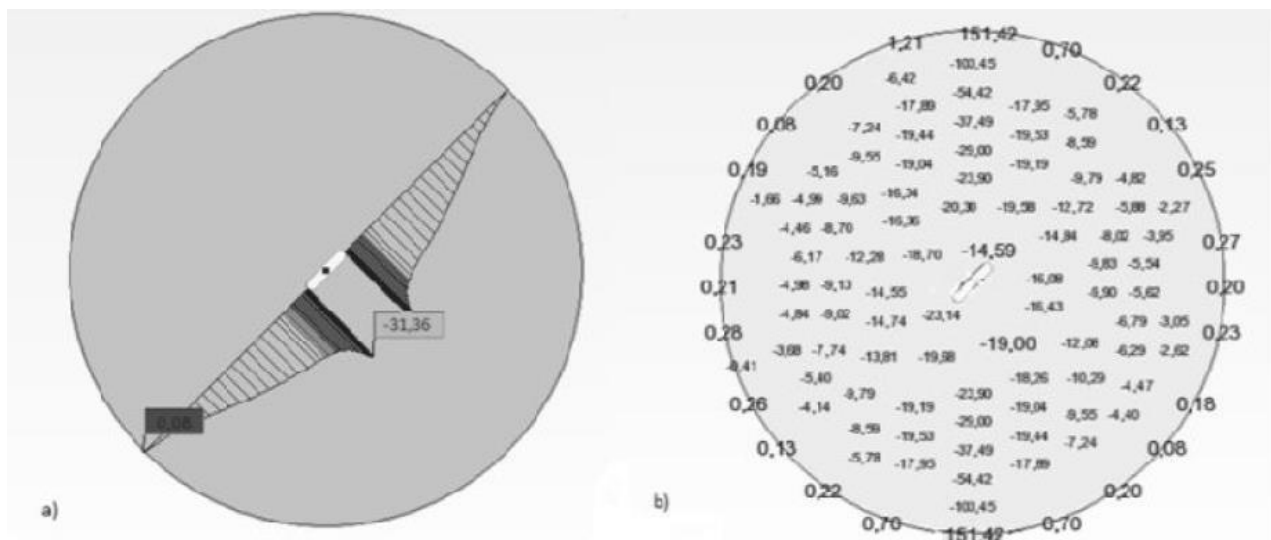
Rys. 4. Wariant numer 1 symulacji próby rozciągania przy rozłupywaniu: a) wykres naprężeń, b) mapa naprężeń



Rys. 5. Wariant numer 4 symulacji próby rozciągania przy rozłupywaniu: a) wykres naprężeń, b) mapa naprężeń

Tab. 1. Wartości naprężeń oraz parametrów mechaniki pęknięcia w punkcie B dla poszczególnych wariantów symulacji próby rozciągania przy rozłupywaniu.

Nr	Krotność zagęszczenia siatki w pobliżu punktu B	Odległość od brzegu szczeliny [mm]	Naprężenie w sąsiedztwie punktu B σ_x [MPa]	Naprężenie w sąsiedztwie punktu B σ_y [MPa]	Współczynnik intensywności naprężeń K_I [MPa \sqrt{m}]	Prędkość uwalniania energii G [kgJ/m ²]
1	1	0,5	25,67	-4,18	1,815	0,106
	2	0,25	35,9	1,92	2,539	0,208
	4	0,125	43,57	3,98	3,081	0,306
	8	0,0625	46,13	3,31	3,262	0,343
	16	0,03125	47,14	3,57	3,333	0,536
2	1	0,5	33,28	-2,93	4,076	0,922
	2	0,25	43,64	2,64	5,345	1,235
	4	0,125	50,52	4,87	6,187	1,371
	8	0,0625	53,22	4,11	6,518	1,438
	16	0,03125	54,51	4,58	6,676	0,536
3	1	0,5	68,09	2,59	10,766	3,739
	2	0,25	88,41	9,95	13,979	6,303
	4	0,125	101,65	10,64	16,072	8,333
	8	0,0625	106,17	10,29	16,787	9,090
	16	0,03125	108,2	11,17	17,108	9,441
4	1	0,5	5,65	-24,60	0,400	0,005
	2	0,25	3,22	-26,57	0,228	0,002
	4	0,125	-2,18	-28,60	0,154	0,001
	8	0,0625	-6,74	-31,36	0,477	0,007
	16	0,03125	-10,30	-33,59	0,728	0,017
5	1	0,5	5,46	-36,96	0,669	0,014
	2	0,25	2,67	-43,51	0,327	0,003
	4	0,125	-9,01	-49,67	1,103	0,039
	8	0,0625	-13,05	-53,15	1,598	0,082
	16	0,03125	-14,09	-59,77	1,726	0,096
6	1	0,5	2,92	-49,53	0,462	0,007
	2	0,25	-15,28	-56,40	2,416	0,188
	4	0,125	-28,04	-58,17	4,434	0,634
	8	0,0625	-37,06	-62,59	5,860	1,108
	16	0,03125	-42,93	-69,58	6,788	1,486



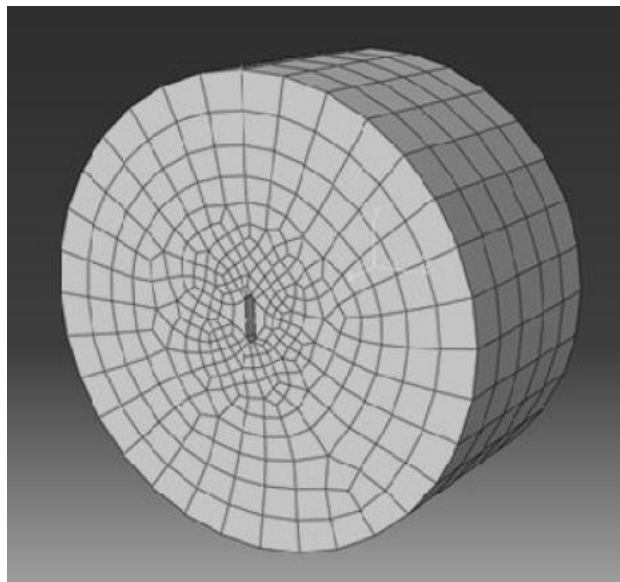
Rys. 6. Wariant numer 4 symulacji próby rozciągania przy rozłupywaniu: a) wykres naprężeń, b) mapa naprężeń ścinających

W przypadku wariantów ze szczeliną prostą (numer 1-3) w wierzchołku szczeliny powstaje czyste rozciąganie (udział naprężenia σ_y jest znikomy). Sytuacja ta odpowiada założeniom I modelu pęknięcia betonu. Natomiast dla wariantów ze szczeliną skośną (numer 4-6) obserwujemy złożony stan naprężeń. Dzieje się tak, ponieważ przy takim położeniu wstępnie zainicjowanej rysy, uzyskuje się kombinację I i II modelu pęknięcia betonu. Naprężenia pojawiają się zarówno na kierunku prostopadłym do działania sił ściskających dysk, jak i w kierunku do wewnątrz dysku (σ_y). Przy takim układzie uzyskuje się naprężenia rozciągające i ścinające w wierzchołku szczeliny. Wykres oraz mapę naprężeń σ_y w wariantcie numer 4 symulacji próby rozciągania przy rozłupywaniu przedstawiono na rysunku 6.

5.3. Weryfikacja wyników badań w programie Abaqus CAE

W programie Abaqus CAE wykonano model wariantu numer 1 symulacji próby rozciągania przy rozłupywaniu. W wyniku przeprowadzonej analizy otrzymano w odległości 1 mm od punktu B naprężenie o wartości 19,89 MPa. Na rysunku 7 przedstawiono wykonany w programie Abaqus CAE model dysku z zaznaczonym podziałem na elementy skończone.

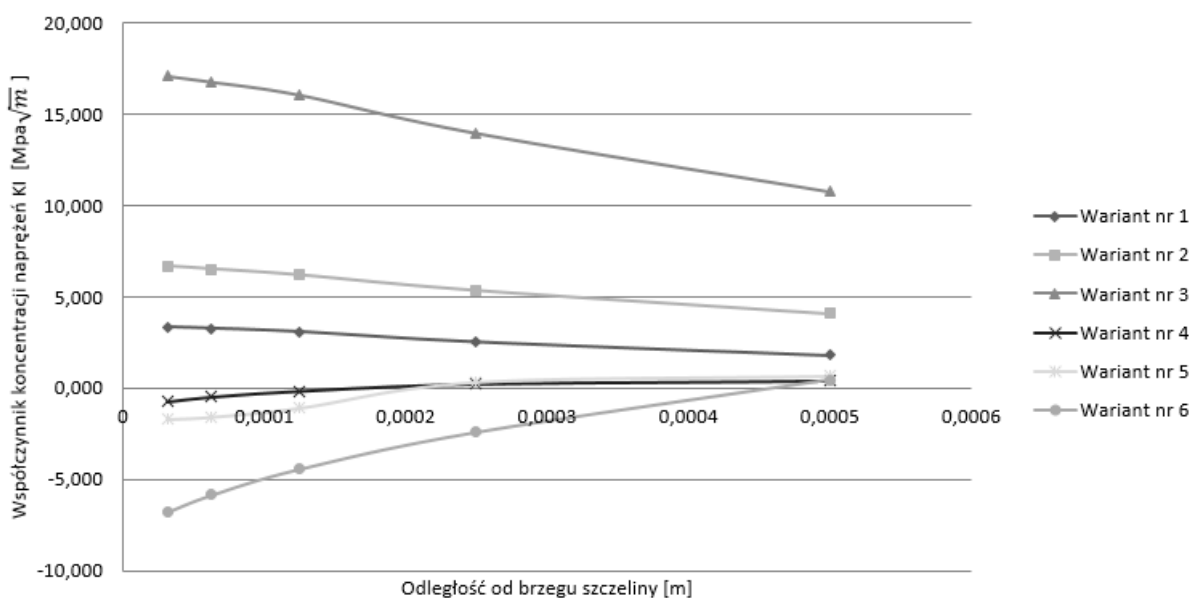
Obliczenia wykonano za pomocą wersji edukacyjnej programu – ograniczonej do 1000 węzłów. W związku z tym, niemożliwe było większe zagęszczenie siatki elementów. Otrzymana wartość naprężenia rozciągającego w wierzchołku szczeliny jest jednak zbliżona do wartości otrzymanej w programie Robot Structural Analysis.



Rys. 7. Model wariantu numer 1 próby rozciągania przy rozłupywaniu z zaznaczonym podziałem na elementy skończone

5.4. Interpretacja i porównanie wyników

W przypadku dysków ze szczelinami prostymi, podczas wykonywania próby rozciągania przy rozłupywaniu w obszarze wierzchołków szczelin występują naprężenia rozciągające. Wraz ze zmniejszeniem odległości od wierzchołka naprężenia rosną. W konsekwencji zwiększają się także wartości współczynników koncentracji naprężeń K_I – co ilustruje rysunek 8 oraz prędkości uwalniania energii G . Pozwala to wnioskować, że w przypadku długotrwałego obciążenia o zadanej wartości, bądź też jego zwiększenia, zarysowania propagowałyby w zainicjowanym kierunku, aż do zniszczenia próbki. Biorąc pod uwagę warianty symulacji próby rozciągania przy rozłupywaniu z dyskami ze szczelinami skośnymi, które odzwierciedlają złożony stan naprężeń w betonowym elemencie, można zauważyć,



Rys. 8. Wartości współczynników K_I [$\text{MPa}\cdot\text{m}^{-2}$] w poszczególnych wariantach symulacji próby rozciągania przy rozłupywaniu

że w obszarze wierzchołka szczeliny pojawiają się naprężenia ściskające. Im bliżej punktu B tym ich wartości są większe. Oznacza to, że w przypadku wykonywania badań rzeczywistych zainicjowana szczelina rozszerzałaby się na wysokości średnicy poziomej dysku, a domykała się w wierzchołkach. Zarówno w przypadku szczelin prostych, jak i skośnych, zwiększenie ich długości powodowało wzrost wartości naprężeń w ich wierzchołkach.

Analizując rysunek 8 można zauważyć, że wartości współczynników koncentracji naprężeń w poszczególnych wariantach symulacji dość znacznie różnią się (odchylenie standardowe σ wynosi 5,441). W swoim badaniu Karihaloo (2003) otrzymał zbliżone wartości K_t , niezależnie od długości i położenia szczeliny. Różnica pomiędzy wynikami z programu komputerowego, a badaniami laboratoryjnymi wynika z kształtu elementów skończonych (czworokąty o ostrych krawędziach) służących do zamodelowania zaokrąglonej szczeliny. Ponadto, odczytane naprężenia są wartościami występującymi w pewnej odległości od wierzchołka szczeliny (środek elementu skończonego leżącego jak najbliżej węzła, którym jest ten wierzchołek). Program komputerowy nie daje możliwości odczytywania naprężeń w węzłach, a jedynie, zgodnie z założeniami Metody Elementów Skończonych, w środkach elementów, na które został podzielony analizowany model.

Weryfikacja obliczeń w programie Abaqus CAE potwierdziła poprawność wyników uzyskanych w programie Robot Structural Analysis. Oba systemy korzystają z założeń Metody Elementów Skończonych. Zakładają one także jedynie sprężysty charakter pracy dysku, nie uwzględniając strefy plastycznej tworzącej się w obszarze wierzchołka szczeliny.

6. Podsumowanie

Programy komputerowe służą obecnie jako narzędzie wspomagające analizę parametrów mechaniki pęknięcia. Wykonane w programie komputerowym symulacje pozwalają na oszacowanie wstępne wartości naprężeń ograniczając liczbę prób w badaniach laboratoryjnych i związanych z nimi odpadów do niezbędnego minimum. Każdorazowo analizy te, w celu uzyskania precyzyjnych wyników, powinny być jednak weryfikowane w tradycyjnych doświadczeniach. Pomiary z programów komputerowych mogą być obarczone niewielkimi błędami. Wynikają one z braku mechanizmów analizujących mieszane strefy – sprężystą w całym dysku oraz plastyczną w obszarze wierzchołka. Poza tym, obciążenie skupione przyłożone jest jedynie w węzle, w rzeczywistości rozkłada się ono na pewną strefę styku z dyskiem. Również nie bez znaczenia pozostają ostre wierzchołki elementów skończonych, które jedynie w zbliżony sposób modelują zaokrągloną szczelinę, co potwierdzono w tym artykule.

Literatura

- Ajdukiewicz A. (2011). Aspekty trwałości i wpływu na środowisko w projektowaniu konstrukcji betonowych. *Przegląd budowlany*, nr 2, 20-29.
- Ambroziak A., Kłosowski P. (2016). Autodesk Robot Structural Analysis Wymiarowanie konstrukcji stalowych i żelbetowych. *Wyd. Politechniki Gdańskiej*.
- Anderson T.L. (2005). *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*, Third Edition. *Taylor&Francis Group, USA*.
- Golewski G.L. (2010a). Współczynnik intensywności naprężeń jako podstawowy parametr oceny odporności na pęknięcie kompozytów betonowych. *Drogownictwo*, 1/2010, 31-35.
- Golewski G.L. (2010b). Wykorzystanie systemu Aramis do analizy propagacji rys pierwotnych w betonach z dodatkiem popiołów lotnych. *Przegląd budowlany*, 11/2010, 30-35.
- Golewski G.L. (2015). Procesy pęknięcia w betonie z dodatkiem krzemionkowych popiołów lotnych. *Wyd. Politechnika Lubelska*, Lublin.
- Golewski G.L., Golewski P., Sadowski T. (2012). Numerical modeling crack propagation under Mode II fracture in plain concretes containing siliceous fly-ash additive using XEFM method. *Computation Materials Science*, Vol. 62, 75-78.
- Karihaloo B. (2003). Comprehensive structural integrity. *Failure of Concrete*, Vol. 2, 478-545.
- Kosior-Kazberuk M. (2012). Ocena parametrów mechaniki pęknięcia betonu cementowego. *Przegląd budowlany*, 11/2012, 20-23.
- Kuliński K., Major M. (2014). Analiza porównawcza przemieszczeń i naprężeń obliczonych w programach komputerowych wspomagających projektowanie konstrukcji budowlanych, *Zeszyty naukowe Politechniki Częstochowskiej. Budownictwo*, Z. 20, nr 170, 112-119.
- Mańkowski J., Ciężkowski P. (2012). Modelowanie osłabienia materiału na przykładzie symulacji próby brazylijskiej. *Zeszyty naukowe Instytutu Pojazdów*, Zeszyt 3/89, 101-107.
- Neimitz A. (1998). *Mechanika pęknięcia*. *Wydawnictwo Naukowe PWN*, Warszawa.
- Podolski B., Podolski M., Bartosik T. (2013). Analiza przyczyn awarii żelbetowego, wielokomorowego zbiornika oczyszczalni ścieków oraz zrealizowane wzmocnienie. *Przegląd budowlany*, R. 80, 5/2013, 35-40.
- Smarzewski P., Spaczyńska R. (2012). Analiza stanów granicznych tarcz żelbetowych z otworami z betonu wysokowartościowego z dodatkiem włókien. *Budownictwo i Architektura*, 10/2012, 27-36.

THE HIGH-TECH, COMPUTER-BASED ANALYSIS OF THE FRACTURE MECHANICS PARAMETERS

Abstract: The use of the parameters of fracture mechanics presents a new way of designing in civil engineering. Traditional laboratory research provides lots of important information connected to cracks and tension - concentration in loaded elements. On the other hand, tests are very time - consuming. Initial calculations by means of computer programmes allow to decrease amount of laboratory tests only to extreme minimum. The paper contains the overview of the most common computer programmes used for the analysis of parameters of fracture mechanics . Moreover, the own model of Brazilian test in computer programme called Robot Structural Analysis was created. The model verification was made in Abaqus CAE. Concrete discs with straight or inclined crack in the middle, which simulates simple – or mixed – tension conditions in concrete element, were used as the subject of the study.

ANALIZA EKONOMICZNO-ŚRODOWISKOWA ROZWIĄZAŃ GRZEWCZYCH BUDYNKU JEDNORODZINNEGO W PERSPEKTYWIE ZMIAN LEGISLACYJNYCH

Błażej GAZE*, Michał KAMIŃSKI, Agnieszka BIERNACIK, Arkadiusz DYJAKON

Wydział Przyrodniczo-Technologiczny, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, ul. C. K. Norwida 25, 50-375 Wrocław

Streszczenie: W dniu 1 stycznia 2017 roku weszły w życie nowe przepisy dotyczące warunków technicznych nowo powstających budynków. W pracy przeanalizowano trzy rodzaje budynków, które odpowiadają starym i nowym przepisom. Rozpatrzono przykładowe trzy warianty rozwiązania systemu grzewczego, podgrzewania ciepłej wody użytkowej i źródła pochodzenia energii elektrycznej dla typowego domu jednorodzinnego. Porównano efekt ekonomiczny i środowiskowy przedstawionych wariantów. Określony został także prosty okres zwrotu inwestycji. Omówiono wady oraz zalety poszczególnych rozwiązań.

Słowa kluczowe: efektywność energetyczna, budownictwo pasywne, domy energooszczędne, prawo budowlane.

1. Wprowadzenie

Z dniem 1 stycznia 2017 roku weszło w życie zaostrzenie przepisów dotyczących maksymalnego rocznego obliczeniowego zapotrzebowania budynku na energię nieodnawialną *EP* (Dz.U. 2013 poz. 926), jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. Nowe wymagania dotyczą budynków których pozwolenie na budowę zostało/zostanie wydane po 1 stycznia 2017 roku. Celem końcowym nowych przepisów jest obniżenie ilości energii niezbędnej do zaspokojenia zapotrzebowania na ciepło w nowych budynkach do poziomu pełnej samowystarczalności (dla budynków użyteczności publicznej do roku 2019, a dla pozostałych budynków mieszkalnych do roku 2021). W przepisach określone są wartości graniczne dla współczynnika przenikania ciepła *U* oraz wskaźnika rocznego zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną (*EP*). Docelowo, każdy nowy budynek w 2021 roku musi osiągnąć wskaźnik *EP* na poziomie nie wyższym niż $70 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$ dla budownictwa niskoenergetycznego (Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 6 listopada 2008 roku zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, Dz. U. Nr 201 z 2008r, poz. 1238). W wyniku zmian prawa wpływającego na sektor budownictwa w niniejszej pracy rozpatrzone zostaną trzy warianty budynku posiadające różne wskaźniki *EP*. Głównym celem jest pokazanie, iż dom pasywny jest najlepszym rozwiązaniem wedle zmieniających się przepisów oraz pod względem ekonomiczno-środowiskowym.

2. Klasyfikacja energetyczna budynków jednorodzinnych

Klasyfikacja budynków oparta jest o wartości powierzchniowego wskaźnika sezonowego zapotrzebowania na ciepło (tab. 1). Budynki pasywne charakteryzują się niskim zapotrzebowaniem energii zużywanej przez ogrzewanie (do $15 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$). Roczne zapotrzebowanie odpowiada wartości energii powstałej ze spalania $1,5 \text{ dm}^3$ oleju opałowego, $1,7 \text{ m}^3$ gazu lub $2,3 \text{ kg}$ węgla. Obecne standardy budynków sprawiają, iż ich zapotrzebowanie energetyczne wynosi około $100\text{-}180 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$ (Foit, 2010).

Tab. 1. Klasyfikacja energetyczna budynków (Żurawski, 2011)

Klasa energetyczna	Rodzaj budynku	E_a
		$\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$
A++	Zeroenergetyczny	poniżej 5
A+	Pasywny	5 - 15
A	Nisko energooszczędny	15 - 45
B	Energooszczędny	45 - 80
C	Średnio energooszczędny	80 - 100
D	Średnio energochłonny	100 - 150
E	Energochłonny	150 - 200
F	Wysoko energochłonny	ponad 200

Objaśnienia: E_a - wartość powierzchniowego wskaźnika zapotrzebowania na ciepło.

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: blazej.gaze@upwr.edu.pl

3. Założenia projektowe

W celu dokonania obliczeń i symulacji przyjęto następujące założenia projektowe:

- lokalizacja budynku – okolice Wrocławia,
- liczba mieszkańców – 4 osoby,
- powierzchnia – 192 m²,
- kubatura – 500 m³.

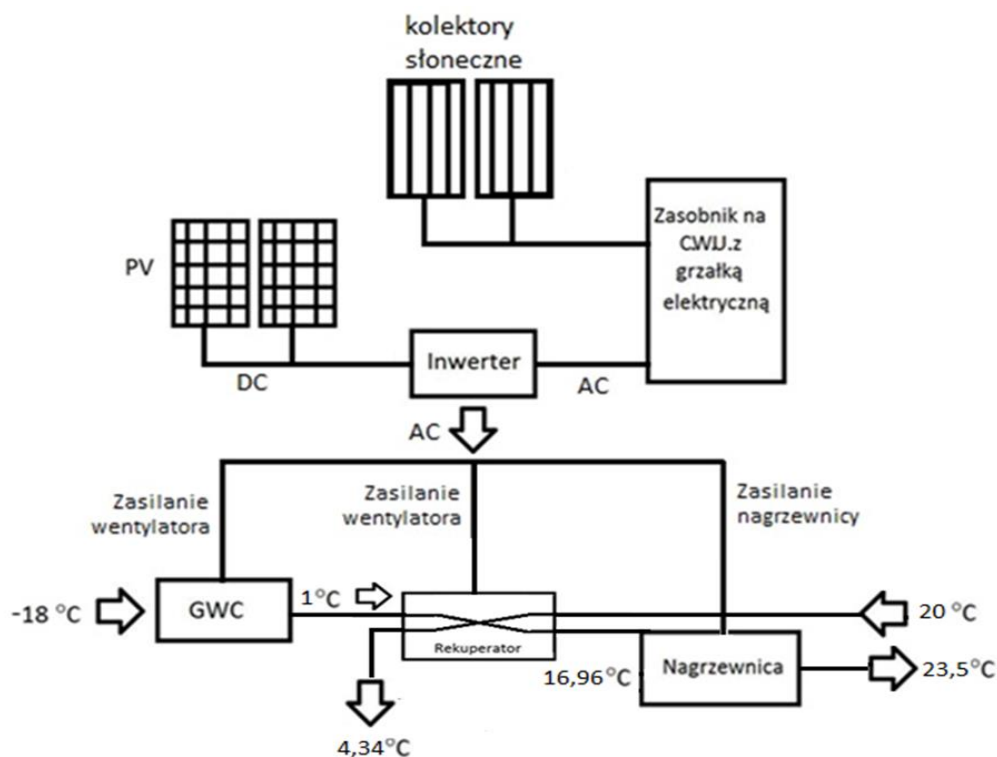
Zapotrzebowanie na energię elektryczną wyznaczono biorąc pod uwagę wszystkie sprzęty AGD i RTV oraz inne urządzenia, oświetlenie i tym podobne, niezbędne do funkcjonowania współczesnego domu jednorodzinne. Do obliczeń przyjęto cenę za 1 kWh energii elektrycznej w wysokości $Z = 0,65$ PLN. Całkowite zapotrzebowanie gospodarstwa domowego na energię elektryczną wyniosło 4 422 kWh·rok⁻¹.

4. Charakterystyka trzech proponowanych wariantów budynków

4.1. Wariant I-budynek zeroemisyjny

W proponowanym rozwiązaniu zastosowano mechaniczną

wentylację. Pierwszym elementem układu jest gruntowy wymiennik ciepła, którego zadaniem jest wstępne podgrzanie powietrza. W kolejnym etapie, powietrze przepływa do rekuperatora i nagrzewnicy elektrycznej, gdzie jego parametry temperaturowe zostają doprowadzone do wartości wymaganych przez użytkownika. Następnie, powietrze kanałami wentylacyjnymi rozprowadzane jest do odpowiednich pomieszczeń w budynku. Ciepła woda użytkowa zapewniona zostanie przez system kolektorów słonecznych, których zadaniem będzie podgrzewanie wody w buforze ciepła. Z kolei, zainstalowane na dachu panele PV pokrywają całkowicie zapotrzebowanie na energię elektryczną danego wariantu budynku, w którego skład wchodzi zapotrzebowanie na prąd urządzeń RTV i AGD, oświetlenia, wentylacji, instalacji przygotowania c.w.u. (grzałka elektryczna wspomagająca prace kolektorów w pochmurne dni). Zeroenergetyczność rozpatrywanego wariantu zależy od odpowiedniej konfiguracji i pracy wszystkich systemów zintegrowanych z centralą sterowniczą (rys. 1). Zadaniem centrali jest regulowanie pracy poszczególnych instalacji w taki sposób, aby utrzymać zadane warunki wewnętrzne budynku na odpowiednim poziomie.



Rys. 1. Schemat wentylacji mechanicznej z rekuperacją oraz przygotowania ciepłej wody użytkowej dla budynku zeroemisyjnego

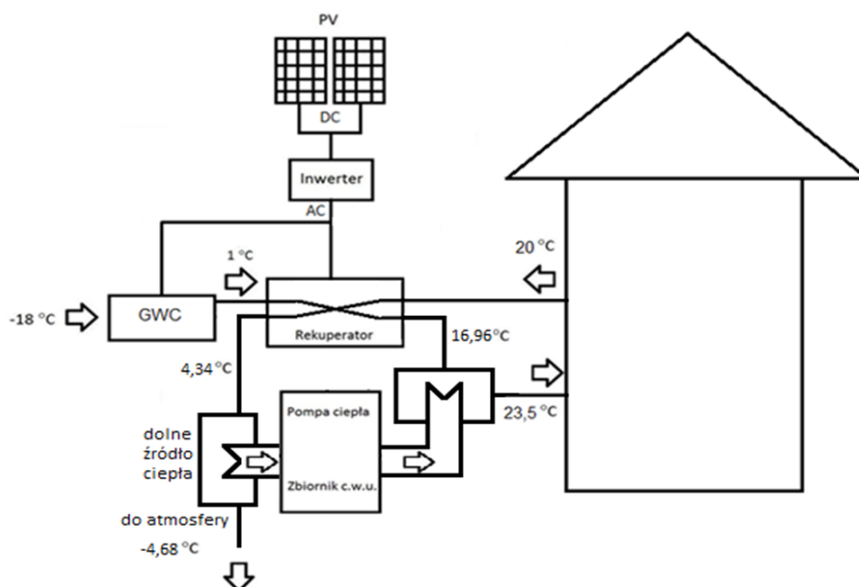
4.2. Wariant II-budynek niskoemisyjny

Budynek niskoemisyjny jest wyposażony w mechaniczną wentylację pomieszczeń. System składa się z GWC, który wstępnie podgrzewa powietrze pobierane z zewnątrz. Rekuperator i nagrzewnica wylotowa zasilana przez powietrzną pompę ciepła zapewnia wymagana temperaturę powietrza, które poprzez kanały wentylacyjne wdmuchiwane jest do pomieszczeń. Dolnym źródłem ciepła dla powietrznej pompy jest zużyte powietrze wyrzucane za rekuperatorem. Dodatkowym zadaniem pompy jest zapewnienie c.w.u. mieszkańcom, która podgrzewana jest w wbudowanym zbiorniku o pojemności 300 dm³. W sytuacji, gdy instalacja z różnych przyczyn nie jest w stanie zapewnić odpowiedniej temperatury powietrza i c.w.u. różnice są niwelowane przy pomocy grzałek elektrycznych. W proponowanym rozwiązaniu (rys. 2) wykorzystany jest także system paneli PV, którego zadaniem jest pokrycie zapotrzebowania na energię

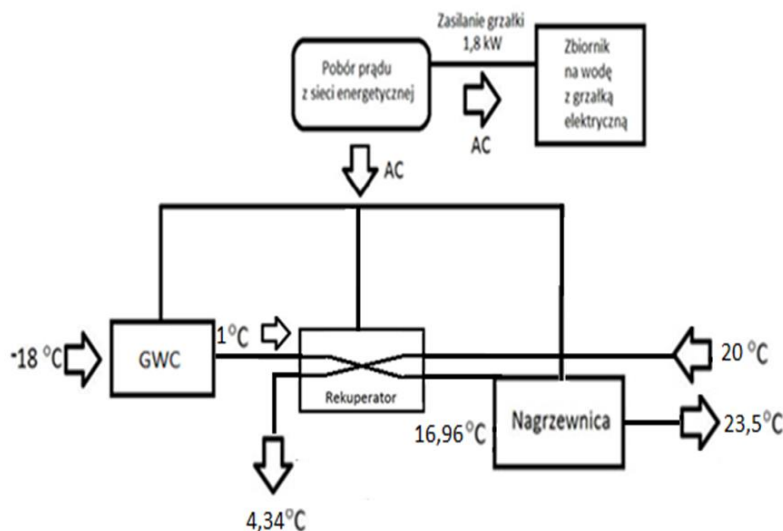
elektryczną wszystkich urządzeń systemu wentylacji z odzyskiem ciepła oraz przygotowania c.w.u. Reszta zapotrzebowania na energię elektryczną pokrywana jest przez energię pobraną z sieci energetycznej.

4.3. Wariant III-budynek wysokoemisyjny

Wariant tego budynku (rys. 3) zakłada zastosowanie mechanicznej wentylacji, która współpracuje z GWC, jako wstępnym podgrzewaczem powietrza zewnętrznego. Kolejno, powietrze kierowane jest do rekuperatora, a następnie do nagrzewnicy elektrycznej celem dogrzenia do zadanej temperatury. Ciepła woda użytkowa podgrzewana jest w zbiorniku przy pomocy grzałki elektrycznej. Całkowite zapotrzebowanie na energię elektryczną instalacji grzewczych, przygotowania c.w.u., jak i innych urządzeń (AGD, RTV i oświetlenia) pokrywana jest z sieci energetycznej. Wariant ten wykorzystuje najprostsze rozwiązania.



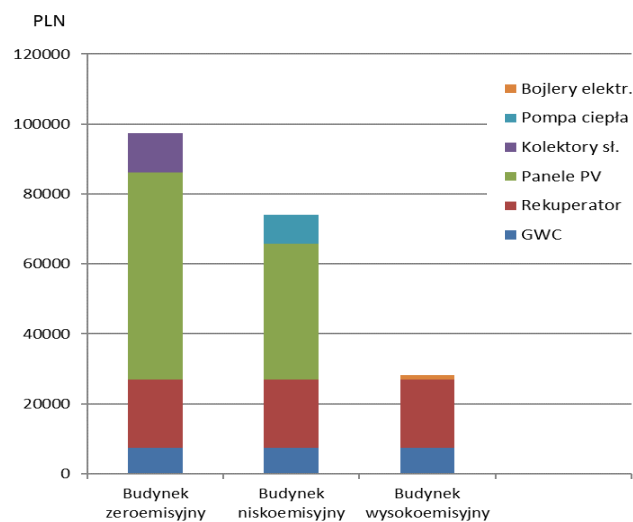
Rys. 2. Schemat instalacji wentylacji mechanicznej z rekuperacją, przygotowania c.w.u. oraz paneli PV



Rys. 3. Schemat instalacji GWC, rekuperatora i przygotowania ciepłej wody użytkowej

5. Kosztorys instalacji energetycznych dla trzech wariantów budynków

Koszty poszczególnych instalacji (rys. 4) zależą głównie od ich złożoności oraz urządzeń, z których są zbudowane. Wycena rozpatrywanych instalacji została przeprowadzona w oparciu o oferty rynkowe i rozmowy z przedstawicielami handlowymi. W kosztorysie wariantów uwzględniono także cenę montażu danych systemów oraz koszty eksploatacyjne.



Rys. 4. Koszt urządzeń oraz montażu poszczególnych elementów w omawianych budynkach

Najbardziej kosztownym wariantem jest budynek zeroemisyjny. Jest to wariant posiadający największą ilość urządzeń wchodzących w skład układu ogrzewania i przygotowania c.w.u. Największy koszt został poniesiony na instalację paneli PV, które pokrywają w całości zapotrzebowanie budynku na energię elektryczną. Koszt wykonania instalacji dla tego wariantu wynosi 97 000 PLN. Budynek ten jest jednak samowystarczalny energetycznie.

Drugim, tańszym rozwiązaniem jest wariant budynku niskoemisyjnego, w którym zastosowano układ ogrzewania powietrza wykorzystującego GWC, rekuperator i pompę ciepła. Instalacja paneli fotowoltaicznych zapewnia pokrycie zapotrzebowania na energię wyłącznie instalacji ogrzewania i przygotowania c.w.u. Reszta zapotrzebowania pokrywana jest przez energię elektryczną pobieraną z sieci. Wariant w pewnym stopniu zależny od zewnętrznych źródeł zasilania. Koszt wykonania instalacji dla tego budynku wynosi 73 000 PLN.

Ostatnim i najtańszym wariantem jest budynek energochłonny, którego instalacja grzewcza i przygotowania c.w.u. jest najmniej skomplikowana. Wszystkie rozwiązania (na przykład bojler elektryczny) są dużo tańsze w porównaniu z urządzeniami zastosowanymi w dwóch poprzednich wariantach. Budynek ten jest jednak w całości uzależniony od energii pobieranej z sieci energetycznej. Wykonanie instalacji proponowanej w tym wariantcie wynosi 28 000 PLN.

6. Aspekt środowiskowy trzech rozpatrywanych wariantów budynków

Redukcja szkodliwych substancji dla środowiska powstałych podczas procesów spalania, to jest CO₂, CO, SO₂, NO_x i pyłów wiąże się ściśle z efektywnością energetyczną budynków. Najbardziej rozpowszechnionym problemem klimatycznym w Europie, jak i w Polsce jest emisja CO₂. Unia Europejska dąży do obniżenia emisji CO₂ o 40% do 2030 roku. Aby osiągnąć taki rezultat niezbędne jest zwiększenie efektywności energetycznej budynków i wzrost udziału OZE w sektorze wytwarzania energii elektrycznej i ciepła. Zastosowanie instalacji energetycznych z udziałem odnawialnych źródeł energii w budynkach pozwala znacząco zmniejszyć emisję CO₂ do atmosfery (www.instants.pl).

Na podstawie wartości zapotrzebowania na energię elektryczną poszczególnych wariantów obliczono emisję dla wszystkich szkodliwych substancji przy poborze energii elektrycznej z sieci. W Polsce, energetyka zawodowa oparta jest głównie o spalanie węgla. Stąd, wykorzystane w pracy wskaźniki dotyczą emisji pochodzącej ze spalania tego rodzaju paliwa. Wszystkie obliczenia wykonano na podstawie wzoru (1), a wykorzystywane przy obliczeniach współczynniki emisji (tab. 2) pochodzą z aktualnych danych Krajowego Ośrodka Bilansowania i Zarządzania Emisjami (KOBiZE, 2015).

Tab. 2. Wskaźniki emisyjności szkodliwych substancji do powietrza (KOBiZE, 2015)

Wskaźniki emisji dla energii elektrycznej u odbiorców końcowych (KOBiZE, 2015)	
Emitowany związek	Wielkość emisji [kg·kWh ⁻¹]
CO ₂	0,823
SO ₂	0,00157
NO _x	0,00104
CO	0,000233
Pyły	0,0000638

Emisję szkodliwych substancji obliczono na podstawie wzoru:

$$E_{z_i} = W_e \cdot E_n \quad (1)$$

gdzie: E_{z_i} jest emisją wybranego zanieczyszczenia – CO₂, CO, SO₂, NO_x, pyłów – w kg·rok⁻¹, W_e jest wskaźnikiem emisji (przyjęty według danych KOBiZE (2015), tab. 4) w kg CO₂·kWh⁻¹, natomiast E_n jest zużyciem energii elektrycznej przez budynek w kWh·rok⁻¹.

7. Wyznaczenie emisji dla poszczególnych typów budynków:

W wariantcie I – budynku zeroemisyjnego zastosowano rozbudowany system energetyczny, który składa się z gruntowego wymiennika ciepła, wentylacji

mechanicznej z odzyskiem ciepła, kolektorów słonecznych oraz paneli PV. Zastosowanie wyżej wymienionych instalacji pozwoliło pokryć zapotrzebowanie na energię elektryczną mieszkańców oraz systemów energetycznych, ogrzewanie/klimatyzację oraz przygotowanie ciepłej wody użytkowej. Roczne zapotrzebowanie na energię elektryczną wyniosło 11 449 kWh·rok⁻¹ i zostało w całości pokryte energią wyprodukowaną przez panele fotowoltaiczne. W ten sposób nie odnotowano emisji szkodliwych substancji oraz kosztów związanych z zakupem energii elektrycznej z sieci elektroenergetycznej.

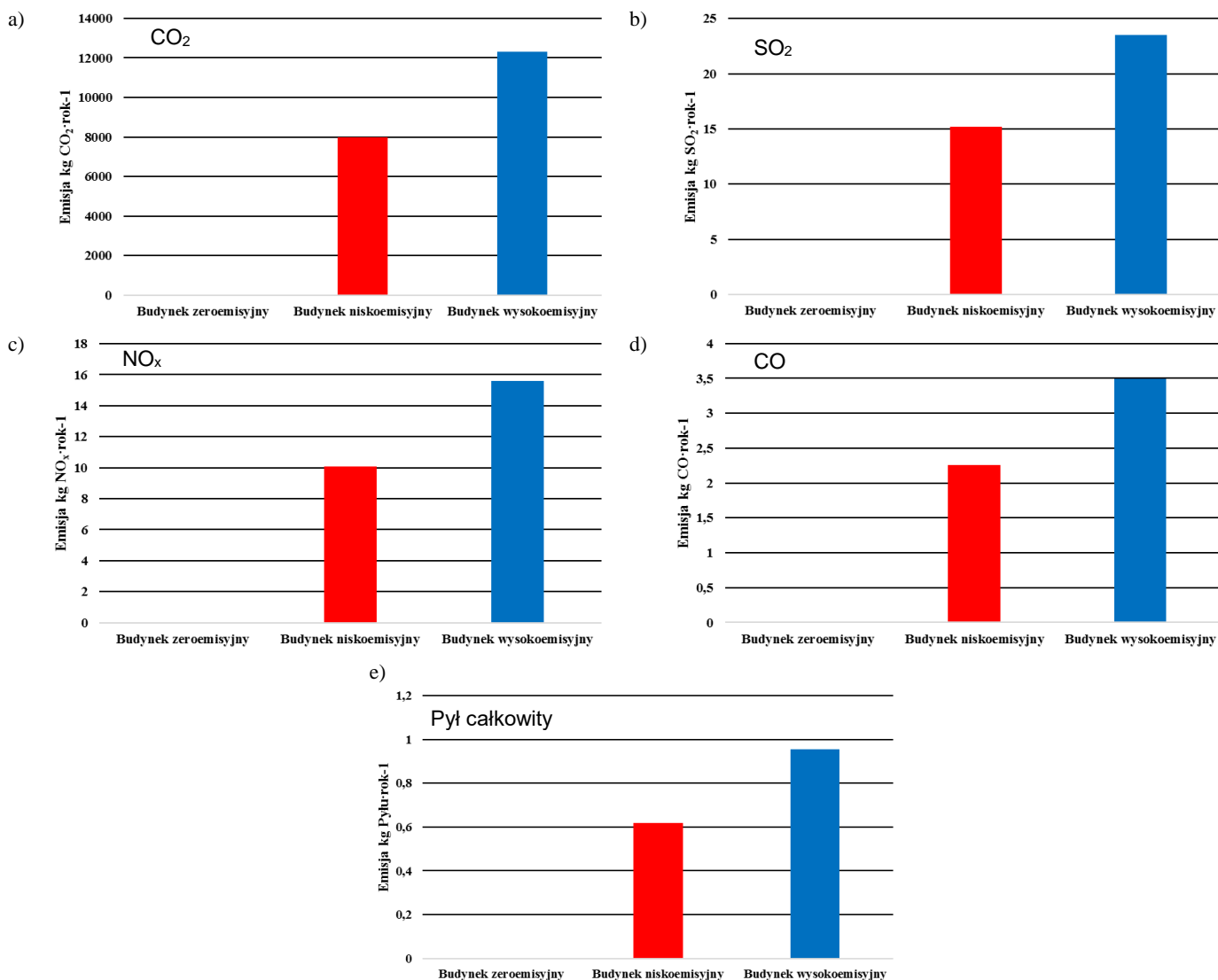
Wielkość emisji dla poszczególnych wariantów zależy od zużycia energii elektrycznej przez dany budynek oraz stopnia pokrycia zapotrzebowania ze źródeł odnawialnych.

W wariantcie II zastosowano mniej skomplikowany system energetyczny, którego zapotrzebowanie na energię elektryczną zostało częściowo pokryte przez panele PV.

Zapotrzebowanie budynku wynikające z bytowania mieszkańców (sprzęt RTV, AGD i oświetlenie) pokrywane jest z sieci energetycznej. Jest to wariant o umiarkowanej emisji szkodliwych substancji i średnich kosztach poniesionych z tytułu pobierania energii elektrycznej w wysokości 9 682 kWh·rok⁻¹ z sieci.

Ostatni wariant cechuje się zużyciem energii na poziomie 14 979 kWh·rok⁻¹. Wszelkie użyte w tym budynku urządzenia pobierają prąd z zewnętrznej sieci energetycznej, co powoduje zwiększoną emisję szkodliwych substancji. Rozwiązanie to charakteryzujące się prostą budową jednak w największym stopniu jest niekorzystne dla środowiska. Również koszt eksploatacji jest najwyższy ze wszystkich rozpatrywanych wariantów.

Wyniki obliczeń (rys. 5a-e) dotyczące emisji dla poszczególnych wariantów zależą od zużycia energii elektrycznej przez dany budynek oraz stopnia pokrycia zapotrzebowania ze źródeł odnawialnych.



Rys. 5. Roczne emisje obliczone dla poszczególnych budynków: a) CO₂, b) SO₂, c) NO_x, d) CO, e) pyłu całkowitego

8. Zwrot inwestycji w perspektywie 25 lat eksploatacji

Aspekt zwrotu kosztów (rys. 6) poniesionych na zakup i wykonanie instalacji jest jednym z głównych czynników, który wpływa na podjęcie decyzji, co do wybrania odpowiedniego wariantu przez inwestora. Do obliczeń dodano również koszty eksploatacyjne poniesione z tytułu funkcjonowania danej instalacji. Według wytycznych projektowych okres analizy został wyznaczony na 25 lat, co stanowi średni okres projektowy żywotności tego rodzaju rozwiązań technicznych.

Z przeprowadzonej symulacji wynika, że najdroższy w fazie inwestycji wariant zeroemisyjny jest najtańszy w eksploatacji. Zwrot inwestycji nastąpi po 15 latach od zakupu. Spowodowane jest to oszczędnościami, które powstają w wyniku uzyskania samowystarczalności energetycznej. Brak kosztów ponoszonych z tytułu zakupu energii z sieci generuje oszczędności. Ponadto, w przypadku nadprodukcji energii elektrycznej, może być ona odsprzedana do sieci energetycznej generując dodatkowe przychody pieniężne. Po około 7 latach od daty zakupu instalacji wariant I oraz wariant II uzyskują sumaryczne koszty na podobnym poziomie, to jest około 50 000 PLN.

Dla wariantu II (budynek niskoemisyjny) zwrot poniesionych nakładów początkowych osiągnięty zostanie dopiero pod koniec okresu eksploatacyjnego, czyli po 25 latach. Jest to spowodowane mniejszymi oszczędnościami związanymi z częściowym pokryciem zapotrzebowania na energię elektryczną przez panele PV. Większość kosztów eksploatacyjnych pochodzi z zakupu energii pobranej z sieci wykorzystanej do pokrycia reszty zapotrzebowania budynku. Po 13 latach od daty zakupu, koszty ponoszone na potrzeby wariantu II i III wyrównują się, osiągając wartość około 38 000 PLN.

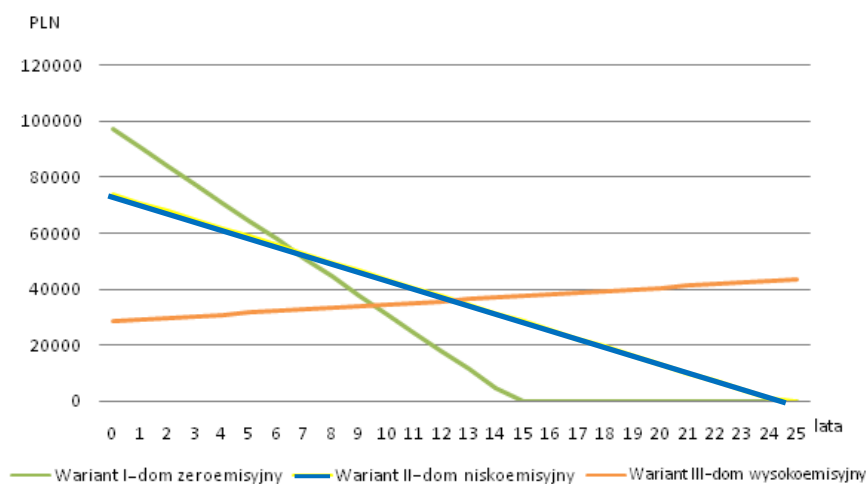
Budynek energochłonny nie generował żadnych oszczędności, gdyż całe zapotrzebowanie na energię było pokrywane z sieci. Na podstawie przeprowadzonej symulacji, zauważono, że w 10-tym roku zwrotu inwestycyjnego, koszt budynku zeroemisyjnego i wysokoemisyjnego będzie na tym samym poziomie.

Podsumowując, w krótkim okresie czasu korzystnym

rozwiązaniem jest wariant III z uwagi na niskie koszty inwestycyjne. Biorąc jednak pod uwagę wieloletnią eksploatację, najbardziej opłacalną staje się instalacja wariantu I (budynek zeroemisyjny), ze względu na generowane oszczędności i niezależność energetyczną. Mimo wysokich kosztów początkowych, zwrot inwestycji nastąpi najszybciej. Uwzględniając prawdopodobny stopniowy wzrost cen energii elektrycznej w przyszłości, pierwszy wariant staje się najatrakcyjniejszy pod względem ekonomicznym w perspektywie długoterminowej.

9. Podsumowanie

Wybór rozwiązania zależy głównie od świadomości ekologicznej i możliwości finansowych inwestorów. Potwierdzono, że pod względem ekologicznym, jak i również ekonomicznym najbardziej korzystny jest budynek zeroemisyjny (brak emisji oraz zwrot kosztów po upływie 15 lat). Ważnym jest jednak uświadomienie i przekonanie inwestorów do rozpatrywania pewnych kwestii w dłuższej perspektywie czasu. Należy podkreślić fakt, że wybór poszczególnego wariantu przez inwestora pomnożony przez liczbę nowobudowanych budynków może znacząco wpływać na jakość środowiska. Wykorzystanie systemów OZE w budownictwie powoduje obniżenie bądź całkowite uniezależnienie od energetyki konwencjonalnej, co ma duże znaczenie dla ochrony klimatu. Istnieją możliwości pośrednie, takie jak wariant II – niskoemisyjny (emisja na poziomie 8 000 kg CO₂·rok⁻¹ oraz okres zwrotu inwestycji 25 lat), w którym zastosowane systemy OZE pokrywają w pewnym zakresie potrzeby energetyczne. Rozwiązanie to wymaga jednak ponoszenia dodatkowych kosztów eksploatacyjnych. Wariant III-budynek wysoko emisyjny wypada negatywnie pod względem ekonomicznym i środowiskowym (emisja 12 327 kg CO₂·rok⁻¹, okres zwrotu inwestycji przekraczający czas eksploatacji instalacji). Nowoczesne budownictwo domów jednorodzinnych będzie się więc opierało o pierwsze dwa warianty, które są korzystne dla użytkownika i środowiska naturalnego.



Rys. 6. Zwrot inwestycji w perspektywie 25 lat

Literatura

- Foit H. (2010). Zastosowanie odnawialnych źródeł ciepła w ogrzewnictwie i wentylacji. *Wydawnictwo Politechniki Śląskiej*, Gliwice.
- Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami (2015). Wskaźniki emisyjności dla energii elektrycznej u odbiorców końcowych. *Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami*, Warszawa.
- Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 6 listopada 2008 roku zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. Dz. U. Nr 201 z 2008 r., poz. 1238.
- Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 5 lipca 2013 roku zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. Dz. U. 2013 poz. 926.
- Żurawski J. (2011). Kiedy energooszczędność jest opłacalna? <http://www.izolacje.com.pl/arttykul/id944,kiedy-energooszczednosc-jest-oplacalna?p=2>, dostęp 20.02.2016. www.instsani.pl/PV7.htm, dostęp 22.06.2016.

ANALYSIS OF ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL SOLUTIONS OF HEATING SYSTEMS OF SINGLE-FAMILY BUILDING IN THE PERSPECTIVE OF LEGISLATIVE CHANGES

Abstract: In Poland on 1 January 2017 a new legal regulation relating to the technical conditions for new buildings has begun to be obligatory. The paper aim is to analyze buildings designed according to old and new regulations. The study examined examples of three variants of solution of the heating system, domestic hot water and a source of electricity for a typical single-family home. The economic and environmental effects of presented solutions were compared. A simple payback period was determined for each solutions. The advantages and disadvantages of each solution were discussed.

ZBROJENIE KONSTRUKCJI BETONOWYCH NIEMETALICZNYMI PRĘTAMI KOMPOZYTOWYMI FRP

Robert GRYGO, Marta KOSIOR–KAZBERUK*

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

Streszczenie: W artykule przedstawiono rodzaje, właściwości i metody określania cech mechanicznych zbrojeniowych prętów kompozytowych FRP. Na podstawie analizy wyników badania właściwości wytrzymałościowych prętów z włóknem szklanym GFRP i prętów z włóknem bazaltowym BFRP zaprezentowano metody określania gwarantowanej wytrzymałości na rozciąganie i gwarantowanego modułu sprężystości zbrojenia niemetalicznego według standardów ACI 440.1R oraz CSA-S807. Jako przykład procedury projektowania elementu betonowego zbrojonego prętami FRP omówiono metodę obliczania nośności na zginanie według ACI 440.1R. Do obliczeń wykorzystano wyniki badań właściwości mechanicznych prętów GFRP i BFRP.

Słowa kluczowe: pręty zbrojeniowe typu FRP, konstrukcje zbrojone, właściwości mechaniczne, badania doświadczalne, metody obliczeniowe.

1. Wprowadzenie

Stosowanie zbrojenia kompozytowego FRP (*fiber-reinforced polymer*) w budownictwie, szczególnie przy wznoszeniu budynków i obiektów mostowych, staje się co raz bardziej powszechne (Artemenko, 2003; Bank, 2006). Biorąc pod uwagę wymagania odpowiedzialnego projektowania obiektów inżynierskich ze szczególnym naciskiem na trwałość konstrukcji, wykorzystanie zbrojenia niemetalicznego w konstrukcyjnych elementach betonowych zbrojonych pozwala na redukcję kosztów związanych z utrzymaniem budowli, a także kosztów związanych z utrzymaniem obiektów i ewentualnymi remontami. Większość rodzajów prętów niemetalicznych charakteryzuje się wysoką odpornością na korozję, co pozwala wydłużyć cykl życia obiektu zbrojonego (Ceroni i in., 2006; Park i in., 2008; Robert i in., 2009; Zhou i in., 2011). Zastosowanie prętów FRP pozwala zredukować grubość otuliny wokół zbrojenia, co umożliwia również zmniejszenie wymiarów i ciężaru własnego elementu konstrukcyjnego. Większa wytrzymałość na rozciąganie prętów kompozytowych, w porównaniu do typowych stalowych, umożliwia zmniejszenie średnicy prętów, a mniejszy ciężar objętościowy materiału również wpływa na zmniejszenie całkowitego ciężaru konstrukcji (Baena i in., 2009; Elgabbas i in., 2015). W procesie montażu zbrojenia w warunkach budowy, lub w zakładzie prefabrykacji konstrukcji zbrojonych ważną rolę ogrywa również łatwość transportu szkieletu zbrojeniowego. W przypadku zbrojenia FRP transport może odbywać się za pomocą

lekkich podnośników z pominięciem dźwigów i suwnic. Istotną zaletą jest również możliwość implementacji wybranych rodzajów zbrojenia kompozytowego w konstrukcjach fundamentowych, narażonych na wpływ pól elektromagnetycznych. Pręty kompozytowe FRP wykorzystywane są często do realizacji betonowych elementów konstrukcyjnych narażonych na silną agresję środowiska, takich jak fundamenty falochrony i inne konstrukcje nadmorskie oraz zbiorniki w oczyszczalniach ścieków (Barris i in., 2012; Chen i in., 2007; Fiore i in., 2011, Robert i in., 2009).

Obecnie w budownictwie stosuje się trzy typy prętów kompozytowych jako zbrojenie elementów konstrukcyjnych: pręty z włóknami węglowymi (CFRP), szklanymi (GFRP) i aramidowymi (AFRP). Przydatność tych prętów jako zbrojenia elementów konstrukcyjnych z betonu została potwierdzona licznymi badaniami (Bank, 2006; Park i in., 2008; Robert i in., 2009; Sayed Ahmad i in., 2011). Wytyczne do projektowania elementów zbrojonych tymi prętami zawarto, między innymi, w normach ACI 440.1R (2006) oraz CSA-S806 (2007). Od kilku lat produkowane są również pręty z włóknem bazaltowym. Jednakże, nie zostały one jeszcze ujęte w normach projektowania elementów konstrukcyjnych ze zbrojeniem niemetalicznym.

Pomimo szerokiej gamy oferowanych rodzajów prętów niemetalicznych oraz przeprowadzonych licznych badań elementów zbrojonych tymi prętami, nadal ten rodzaj zbrojenia traktowany jest na rynku budowlanym jako niekonwencjonalny materiał konstrukcyjny. Jedną z przyczyn jest brak krajowych norm oraz jasnych

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

wytycznych projektowania konstrukcji zbrojonych prętami FRP. W odróżnieniu od tradycyjnego zbrojenia metalicznego, nie opracowano dotychczas norm dotyczących określania parametrów mechanicznych prętów zbrojeniowych typu FRP, co sprawia, że przy każdym wykorzystaniu tego rodzaju zbrojenia należy przeprowadzić odrębne badania właściwości mechanicznych. Jednakże, pręty niemetaliczne dzięki korzystnym właściwościom użytkowym, stanowią alternatywę dla zbrojenia konwencjonalnego. Należy zatem podejmować prace badawcze służące ich wdrożeniu i upowszechnieniu.

Celem badań eksperymentalnych, opisanych w pracy, było określenie właściwości mechanicznych prętów kompozytowych wykonanych przy zastosowaniu włókien szklanych (GFRP) oraz włókien bazaltowych (BFRP), a także zaprezentowanie sposobów ustalania wartości parametrów mechanicznych, stosowanych w projektowaniu konstrukcji inżynierskich, według dostępnych standardów. Normowe podejście do projektowania konstrukcji zbrojonych prętami FRP omówiono na przykładzie obliczania nośności na zginanie.

2. Rodzaje zbrojenia kompozytowego FRP oraz właściwości mechaniczne

Kompozytowe pręty FRP wykonywane są zwykle metodą pultruzji (ACI 440.1R, 2006). Metoda ta polega na przeciąganiu włókien przez odpowiednie sita, a następnie nasączeniu włókien w postaci splotów o zróżnicowanej średnicy, żywicą polimerową termoutwardzalną w warunkach wysokich temperatur i ciśnienia. W odróżnieniu do tradycyjnego zbrojenia metalicznego proces produkcji wymaga nieporównywalnie mniejszych nakładów energii i kosztów (Bank, 2006). Główną rolą włókien jest zapewnienie odpowiedniej wytrzymałości kompozytu na rozciąganie, natomiast żywica odpowiada za połączenie włókien z zachowaniem odpowiedniej odległości pomiędzy nimi, zabezpieczenie ich powierzchni przed uszkodzeniem oraz przekazywanie na nie naprężeń rozciągających (Artemenko, 2003).

W zależności od surowca wykorzystanego do produkcji wyróżnia się cztery podstawowe grupy zbrojenia FRP:

- pręty z włókien szklanych GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*),
- pręty z włókien węglowych CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*),
- pręty z włókien aramidowych AFRP (*Aramid Fiber Reinforced Polymer*),
- pręty z włókien bazaltowych BFRP (*Basalt Fiber Reinforced Polymer*).

Według ACI 440.1R (2006) w celu zapewnienia poprawnej współpracy zbrojenia FRP z betonem stosuje się trzy sposoby wykończenia powierzchni prętów w celu zwiększenia ich przyczepności do matrycy cementowej. Pierwszym sposobem, podobnie jak w przypadku prętów

stalowych, jest wykonanie żeber, drugim – powleczenie posypką piaskową, a trzecim – owinięcie wokół pręta dodatkowej warstwy włókien.

Parametry wytrzymałościowe prętów FRP znacząco różnią się od właściwości tradycyjnych prętów stalowych. Wytrzymałość na rozciąganie prętów kompozytowych zależy od surowca służącego do ich wykonania i waha się w przedziale od 483 MPa w przypadku prętów z włókien szklanych GFRP do nawet 3690 MPa dla prętów z włókien węglowych. Wytrzymałość na ściskanie stanowi natomiast od 20 do 78% wytrzymałości na rozciąganie. Ogólnie, wytrzymałość na ściskanie jest większa dla prętów o większej wytrzymałości na rozciąganie, z wyjątkiem przypadku, w którym włókna prętów aramidowych AFRP wykazują nieliniowe zachowanie podczas ściskania przy stosunkowo niskim poziomie naprężeń. Jednym z mankamentów kompozytowych prętów niemetalicznych jest niski moduł sprężystości podłużnej. W przypadku prętów GFRP moduł sprężystości waha się w przedziale od 35 do 51 GPa, a prętów AFRP od 41 do 125 GPa. Jedynie w przypadku kompozytowych prętów z włókien węglowych CFRP moduł sprężystości wynosi 580 GPa (Artemenko, 2003; Sim i in., 2005, Selejda i Brózda, 2016).

Pręty z włóknem bazaltowym (BFRP) są materiałem stosunkowo nowym i najmniej rozpoznany. Wytwarzane są z włókien bazaltowych, otrzymywanych w wyniku procesu topienia skały bazaltowej w temperaturze wyższej niż 1450°C. Włókna są nieszkodliwe dla środowiska, wolne od substancji rakotwórczych i innych składników, które mogą być przyczyną zagrożenia zdrowia. Proces wytwarzania włókien bazaltowych jest mniej złożony niż produkcja innych rodzajów włókien, a co za tym idzie, mniej energochłonny (Banibayat i Patnaik, 2014). Według nielicznych danych literaturowych (Branston i in., 2016; Wei i in., 2010, 2011) włókna charakteryzują się stabilnością termiczną, dobrą przyczepnością do matrycy żywicznej lub cementowej i małą nasiąkliwością. Ze względu na skład chemiczny są odporne na korozję, środowiska kwaśne i zasadowe. Ponadto włókna bazaltowe są odporne na niskie i wysokie temperatury, zakres roboczych temperatur ich stosowania waha się od -260°C do +750°C.

Badania prętów wykonanych przy zastosowaniu włókien bazaltowych, opisane między innymi przez Altamasa i in. (2015), Elgabbasa i in. (2015), Urbańskiego i in. (2013), Wanga i in. (2014), wykazały ich przydatność jako zbrojenia elementów betonowych. Pręty z włóknem bazaltowym charakteryzują się większą wytrzymałością niż pręty stalowe i pręty GFRP, nie korodują, są niepalne, ich współczynnik rozszerzalności cieplnej jest zbliżony do betonu i stali. W przeciwieństwie do prętów GFRP nie potrzebują powłoki chroniącej przez wysokim pH cieczy w porach betonu i nie wchłaniają wody. Jednakże, Urbański i in. (2013) zwrócili uwagę na problem zachowania stanu granicznego użytkowania konstrukcji zbrojonej prętami z włóknem bazaltowym. Z uwagi na relatywnie niższy moduł sprężystości prętów BFRP, w porównaniu do prętów stalowych zarówno ugięcie, jak i szerokość

rys mogą okazać się decydującymi parametrami przy projektowaniu belek zbrojonych BFRP.

Pomimo licznych korzystnych właściwości, zakres dotychczas przeprowadzonych badań nie pozwala na opracowanie standardowych wytycznych projektowania konstrukcji zbrojonych prętami BFRP.

3. Badania parametrów mechanicznych prętów FRP

3.1 Metodyka badań

W celu określenia charakterystyki wytrzymałościowej prętów niemetalicznych poddano rozciąganiu partię prętów z włóknem bazaltowym oraz szklanym o pomierzonej średnicy wynoszącej 7,6 mm i długości równej 400 mm. Przed każdym badaniem dokonywano pomiaru średnicy w trzech punktach na długości próbki.

Do wykonania próby rozciągania osiowego wykorzystano uniwersalną maszynę wytrzymałościową umożliwiającą szybką kontrolę odkształceń i regulację obciążenia, zaopatrzoną w specjalne wkładki do uchwytów hydraulicznych. Wyniki pomiarów były rejestrowane automatycznie. Próbki prętowe były obciążane ze stałą prędkością w taki sposób, aby czas badania zawierał się pomiędzy 1 a 10 min, zgodnie z zaleceniami ACI 440.3R (2004). W celu określenia deformacji badanych próbek posłużono się mackowymi ekstensometrami przyczepnymi. Stanowisko pomiarowe pokazano na rysunku 1.

3.2. Analiza wyników pomiarów

Ocena parametrów wytrzymałościowych prętów opiera się na statystycznej interpretacji wyników pomiarów. Ze względu na brak wytycznych dotyczących określania cech prętów BFRP, do wyznaczenia parametrów mechanicznych zarówno prętów z włóknem szklanym, jak i bazaltowym wykorzystano zalecenie zawarte

w standardach ACI 440.1R-06 oraz CSA S807-10 odnoszące się do prętów FRP.

W opracowaniu ACI 440.1R (2006) podano następujące zależności do obliczenia gwarantowanej wartości wytrzymałości na rozciąganie f_{fu}^* i gwarantowanego modułu sprężystości E_f do celów obliczeniowych:

$$f_{fu}^* = f_{u,ave} - 3\sigma \quad (1)$$

$$E_f = E_{f,ave} \quad (2)$$

gdzie: $f_{u,ave}$ jest średnią wartością wytrzymałości na rozciąganie, σ jest odchyleniem standardowym, a $E_{f,ave}$ średnią wartością modułu sprężystości.

Zgodnie z normą kanadyjską CSA S807 (2010) gwarantowaną wartość wytrzymałości na rozciąganie oblicza się według wzoru:

$$f_{fu}^* = F_{t_{csa}} \cdot f_{u,ave} \quad (3)$$

gdzie

$$F_{t_{csa}} = \frac{1 - 1,645V}{1 + \left(\frac{1,645V}{\sqrt{n}} \right)} \quad (4)$$

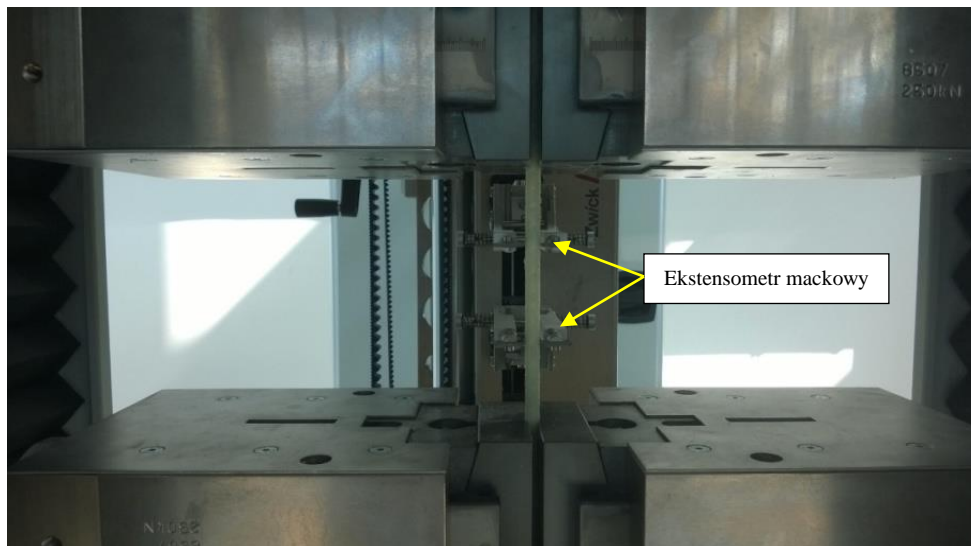
gdzie V jest wskaźnikiem zmienności wyrażonym wzorem $V = \sigma / \mu$, μ jest średnią wartością wyników próby, a n jest liczbą próbek w serii.

Wartość modułu sprężystości ustala się według następujących wzorów:

$$E_f = F_{e_{csa}} \cdot E_{f,ave} \quad \text{jeżeli } V > 5\% \quad (5)$$

gdzie $F_{e_{csa}}$ oblicza się analogicznie jak $F_{t_{csa}}$, biorąc pod uwagę odpowiednią wartość współczynnika zmienności V ,

$$E_f = E_{f,ave} \quad \text{jeżeli } V < 5\% \quad (6)$$



Rys. 1. Widok stanowiska pomiarowego podczas badania pręta GFRP

Zapisanie równań (1) i (3) w następujący sposób (Banibayat i Patnaik, 2014):

$$\frac{f_{fu}^*}{f_{u,ave}} = 1 - 3V \quad (7)$$

$$\frac{f_{fu}^*}{f_{u,ave}} = \frac{1 - 1,645V}{1 + \left(\frac{1,645V}{\sqrt{n}}\right)} \quad (8)$$

pozwala na porównanie podejść do wyznaczenia gwarantowanych wartości parametrów wytrzymałościowych proponowanych w obu normach. Uzależnienie wartości wytrzymałości, przede wszystkim od współczynnika V , wynika ze zmienności parametrów wytrzymałościowych materiałów kompozytowych. Według analiz opisanych przez Banibayat i Patnaik (2014), w przypadku obliczeń według normy CSA S807 (2010) wpływ liczby elementów próbnych w serii staje się zaniedbywalny dla $n > 15$.

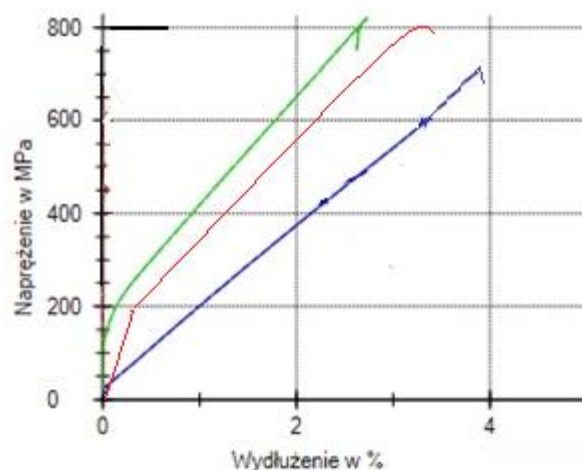
3.3. Wyniki badań parametrów wytrzymałościowych prętów FRP

Tabela 1 zawiera wyniki badań parametrów wytrzymałościowych serii prętów kompozytowych z włóknem szklanym GFRP. Podano również wartości średnie μ , odchylenie standardowe σ i współczynnik zmienności ν wyników pomiarów. Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe wykresy naprężeń w zależności od wydłużenia prętów kompozytowych GFRP.

Tab. 1. Wyniki badania parametrów wytrzymałościowych prętów z włóknem szklanym

Nr próbki	E	f_u	A_g	A_{gr}
	GPa	MPa	%	%
1	34,97	751	0,2	2,4
2	42,77	821	0,6	3,8
3	36,66	707	0,1	2,1
4	38,22	699	0,5	2,8
5	36,66	733	0,4	2,2
6	37,57	755	0,5	2,6
μ	37,81	744,33	0,43	2,42
σ	2,67	43,85	0,12	0,29
$\nu(COV)$	0,0705	0,0589	0,2794	0,1183

Oznaczenia: E jest modułem sprężystości, f_u jest wytrzymałością na rozciąganie, A_g jest wydłużeniem równomiernym, a A_{gr} jest to łączne wydłużenie odpowiadające największej sile rozciągającej.

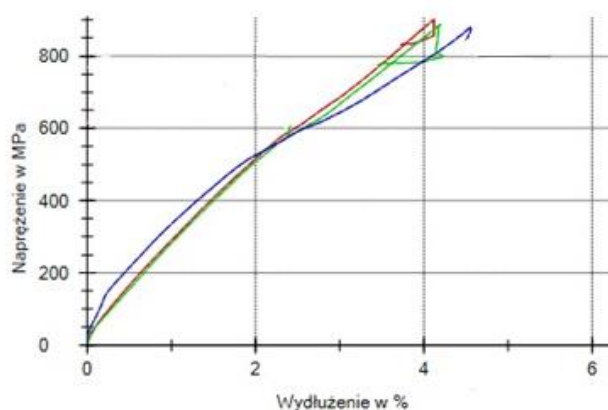


Rys. 2. Przykładowe zależności naprężenie-wydłużenie prętów GFRP

W tabeli 2 zaprezentowano wyniki badań parametrów wytrzymałościowych serii bazaltowych prętów kompozytowych (oznaczenia analogicznie jak w tabeli 1), natomiast na rysunku 3 przedstawiono przykładowe wykresy naprężeń w funkcji wydłużenia prętów BFRP.

Tab. 2. Wyniki badania parametrów wytrzymałościowych prętów z włóknem bazaltowym

Nr	E	f_u	A_g	A_{gr}
	GPa	MPa	%	%
1	32,76	901	0,7	4,1
2	32,5	888	0,8	4,2
3	34,58	879	1,1	4,6
4	34,97	851	0,9	3,3
5	35,75	892	0,4	4,1
6	39,13	866	0,7	4,2
μ	34,95	879,5	0,77	4,08
σ	2,41	18,36	0,23	0,43
$\nu(COV)$	0,0689	0,0208	0,3049	0,1043



Rys. 3. Przykładowe zależności naprężenie-wydłużenie prętów BFRP

W odróżnieniu od stali materiały kompozytowe charakteryzują się brakiem zakresu plastycznego, ich stan poprzedzający zniszczenie nie jest sygnalizowany, a zniszczenie następuje nagle, po przekroczeniu odkształceń granicznych. Rysunek 4 przedstawia pręt GFRP po wyczerpaniu nośności, natomiast rysunek 5 pręt BFRP.



Rys. 4. Pręt GFRP po próbie rozciągania osiowego



Rys. 5. Pręt BFRP po badaniach wytrzymałościowych

W tabeli 3 zaprezentowano wyniki obliczeń gwarantowanej wytrzymałości na rozciąganie f_{fu}^* oraz modułu sprężystości E_f według standardów ACI 440.1R (2006) oraz CSA S807 (2010). W przypadku gwarantowanej wytrzymałości na rozciąganie podejście zaproponowane w normie ACI 440.1R daje wyniki mniejsze niż obliczenia według CSA S807. Jednocześnie norma ACI 440.1R umożliwia przyjęcie do obliczeń większej wartości modułu sprężystości. Z uwagi na wartość współczynnika zmienności wyników badania

przekraczający 5% zarówno dla prętów GFRP, jak i BFRP moduł sprężystości wyznaczono zgodnie z warunkiem (5) uwzględniając zmniejszający współczynnik $F_{e\ csa}$.

4. Obliczanie nośności na zginanie elementu zbrojonego prętami FRP

4.1. Opis procedury obliczeniowej

Aktualnie nie ma jasnych wytycznych krajowych opisujących procedury wymiarowania ustrojów zbrojonych niemetalicznymi prętami kompozytowymi FRP. Selejda i Brózda (2016) podjęli próbę usystematyzowania wytycznych dotyczących projektowania elementów betonowych zbrojonych prętami polimerowymi. Z uwagi na odmiennosć parametrów mechanicznych w porównaniu do tradycyjnego zbrojenia, głównie podejmowane są próby wprowadzania modyfikacji współczynników w aktualnych normach dotyczących projektowania konstrukcji żelbetowych. Zmiany procedur projektowania uwzględniają dużo większą wytrzymałość na rozciąganie prętów FRP w porównaniu do prętów stalowych oraz liniowo-sprężystą charakterystykę pracy prętów kompozytowych w całkowitym zakresie wytrzymałości. Dostępne zalecenia (ACI, CSA) które podejmują problematykę zbrojenia prętami FRP bazują, między innymi, na rozwiązaniach analitycznych lub na popartych badaniami przeprowadzonymi na próbkach prętów FRP (Baena i in., 2009; Cosenza i in., 1997) równaniach empirycznych.

Jako przykład wymiarowania elementu konstrukcyjnego zbrojonego prętami niemetalicznymi analizowano procedurę według ACI 440.1R (2006). Procedura zakłada, że przy wymiarowaniu zbrojenia FRP w elementach zginanych uwzględnia się założenie tak zwanej idealnej przyczepności na styku prętów kompozytowych z betonem. Obowiązuje hipoteza płaskich przekrojów, zależność σ - ϵ dla rozciąganych prętów FRP jest liniowa, pomija się wytrzymałość betonu na rozciąganie, a wartość odkształceń granicznych w betonie ϵ_{cu} wynosi 0,003.

Wytyczne amerykańskie ACI 440.1R (2006) nakazują podejście ze szczególną ostrożnością do parametrów wytrzymałościowych podawanych przez producentów prętów FRP. W celu uwzględnienia długotrwałej ekspozycji prętów na warunki środowiskowe przy obliczaniu wytrzymałości na rozciąganie, należy zastosować redukujący współczynnik CE, którego wartości przytoczono w tabeli 4.

Tab. 3. Gwarantowane wartości parametrów mechanicznych prętów kompozytowych

Rodzaj pręta	f_{fu}^*		E_f	
	ACI	CSA	ACI	CSA
GFRP	612,78 MPa	646,55 MPa	37,81 GPa	31,91 GPa
BFRP	824,42 MPa	838,16 MPa	34,95 GPa	29,64 GPa

Tab. 4. Współczynnik redukujący C_E , zależnych od czynników środowiskowych i typu włókien

Warunki ekspozycji	Rodzaj włókien	Współczynnik C_E
Beton nie narażony na bezpośredni kontakt z czynnikami środowiskowymi	Węglowe	1,0
	Szklane	0,8
	Aramidowe	0,9
Beton narażony na bezpośredni kontakt z czynnikami środowiskowymi	węglowe	0,9
	szklane	0,7
	aramidowe	0,8

Obliczeniową wartość wytrzymałości na rozciąganie oblicza się według wzoru (9).

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \quad (9)$$

gdzie C_E jest współczynnikiem redukującym zależnym od czynników środowiskowych i typu włókien, według tabeli 4.

Nośność na zginanie elementów zbrojonych prętami FRP może być zdeterminowana zmiażdżeniem betonu lub zerwaniem prętów zbrojeniowych. Model zniszczenia można określić porównując rzeczywisty stopień zbrojenia prętami FRP ρ_f ze zrównoważonym stopniem zbrojenia ρ_{fb} , przy którym zmiażdżenie betonu i zerwanie pręta następują jednocześnie.

Zrównoważony stopień zbrojenia prętami kompozytowymi FRP należy określać według wzoru (10).

$$\rho_{fb} = 0,85 \beta_1 \frac{f'_c}{f_{fu}} \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fu}} \quad (10)$$

gdzie: β_1 jest współczynnikiem redukującym zależnym od klasy betonu, ε_{cu} jest granicznym odkształceniem betonu, E_f jest modułem sprężystości prętów FRP, określonym na podstawie prób laboratoryjnych, a f'_c jest wytrzymałością betonu na ściskanie.

Jeżeli rzeczywisty stopień zbrojenia $\rho_f > \rho_{fb}$ zniszczenie elementu zbrojonego jest inicjowane przez zmiażdżenie betonu. Przyjmuje się prostokątny rozkład naprężeń w betonie.

Naprężenia rozciągające w zbrojeniu FRP oblicza się według wzoru:

$$f_f = \left(\sqrt{\frac{(E_f \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0,85 \beta_1 f'_c}{\rho_f} E_f \varepsilon_{cu}} - 0,5 E_f \varepsilon_{cu} \right) \leq f_{fu} \quad (11)$$

Nośność na zginanie elementu belkowego zbrojonego prętami kompozytowymi FRP opisuje wzór (12):

$$M_n = \rho_f f_f \left(1 - 0,59 \frac{\rho_f f_f}{f'_c} \right) b d^2 \quad (12)$$

Ponieważ pręty FRP nie wykazują zakresu plastycznego, wytyczne ACI 440.1R nakazują stosowanie współczynnika redukującego nośność na zginanie ϕ . Wartość współczynnika określa się w zależności od stopnia zbrojenia zgodnie z zależnością (13) i wynosi

on 0,65 dla przekrojów niszczonech poprzez zmiażdżenie strefy ściskanej betonu oraz 0,55 w przypadku zerwania prętów FRP.

Współczynnik ϕ można określić w następujący sposób:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0,55 \text{ dla } \rho_f \leq \rho_{fb} \\ 0,3 + 0,25 \frac{\rho_f}{\rho_{fb}} \text{ dla } \rho_{fb} < \rho_f < 1,4 \rho_{fb} \\ 0,65 \text{ dla } \rho_f \geq 1,4 \rho_{fb} \end{array} \right. \quad (13)$$

4.2. Obliczenie nośności elementu zbrojonego prętami GFRP i BFRP

Opracowanie ACI 440.1R (2006) dotyczy zbrojenia elementów betonowych prętami z włóknem węglowym, szklanym i aramidowym. Ze względu na brak wytycznych dotyczących wymiarowania elementów prętami z włóknem bazaltowym, do celów obliczeniowych wykorzystano procedurę zaproponowaną w ACI 440.1R. Przyjęto element o przekroju poprzecznym 20×35 cm, wykonany z betonu o $f'_c = 28$ MPa. Pole przekroju zbrojenia wynosiło 6 cm². Przyjęto wysokość użyteczną przekroju $d = 31,4$ cm. Właściwości wytrzymałościowe – według tabeli 3 – prętów GFRP: $f_{fu}^* = 612,78$ MPa, $E_f = 37,81$ GPa; właściwości wytrzymałościowe prętów BFRP: $f_{fu}^* = 824,42$ MPa, $E_f = 34,95$ GPa. Założono, że element betonowy nie będzie miał kontaktu ze środowiskiem agresywnym, stąd dla prętów GFRP przyjęto $C_E = 0,8$. Natomiast, dla prętów BFRP przyjęto $C_E = 0,9$, ze względu na ich potwierdzoną badaniami większą odporność na długotrwałe oddziaływanie warunków środowiska w porównaniu do prętów GFRP (Artemenko, 2003; Elgabbas i in., 2015). Ponadto, wartość C_E zróżnicowano, aby wykazać jej wpływ na obliczeniową nośność elementu belkowego na zginanie.

Porównanie wyników obliczeń zamieszczono w tabelicy 5. Zróżnicowana obliczeniowa wytrzymałość na rozciąganie f_{fu} prętów GFRP i BFRP, jak również moduł sprężystości E_f miały istotny wpływ na wartość zrównoważonego stopnia zbrojenia, który był ponad dwukrotnie większy w przypadku belki zbrojonej prętami z włóknem szklanym. Wartości naprężeń w zbrojeniu rozciągającym różniły się nieznacznie. Pomimo znacząco różnych wartości wytrzymałości obliczeniowych prętów

Tab. 5. Obliczenia nośności na zginanie według ACI 440.1R elementu zbrojonego prętami GFRP i BFRP

Obliczana wielkość	Element zbrojony prętami GFRP	Element zbrojony prętami BFRP
Obliczeniowa wytrzymałość na rozciąganie f_{fu} (9)	$f_{fu} = 490$ MPa	$f_{fu} = 742$ MPa
Rzeczywisty ρ_f i zrównoważony stopień zbrojenia FRP ρ_{fb} (10)	$\rho_f = 0,0096$ $\rho_{fb} = 0,0078$	$\rho_f = 0,0096$ $\rho_{fb} = 0,0038$
Naprężenia w zbrojeniu rozciągającym f_f (11)	$f_f = 435,5$ MPa	$f_f = 460,1$ MPa
Nośność na zginanie M_n (12)	$M_n = 81,7$ kNm	$M_n = 79,0$ kNm
Współczynnik redukcyjny ϕ (13)	$\phi = 0,61$	$\phi = 0,65$
Zredukowana nośność na zginanie ϕM_n	$\phi M_n = 51,5$ kNm	$\phi M_n = 51,35$ kNm

GFRP i BFRP zredukowane nośności na zginanie rozważanych belek, obliczone zgodnie z procedurą ACI 440.1R, nie różniły się.

5. Wnioski

Szerokie stosowanie zbrojenia FRP jako alternatywy dla zbrojenia stalowego w konstrukcjach inżynierskich wymaga ujednoliconego podejścia do wyznaczania parametrów mechanicznych, a także opracowania standaryzowanych procedur obliczeniowych. Jak dotąd nie opracowano krajowych wytycznych stosowania prętów niemetalicznych w konstrukcjach z betonu, a wytyczne ACI 440.1R-06 (ze względu na wartości współczynników bezpieczeństwa), należy uznać za zachowawcze. Obliczeniowa wytrzymałość na rozciąganie prętów FRP jest uzależniona od współczynnika C_E zdefiniowanego warunkami środowiska eksploatacji konstrukcji i rodzajem pręta. Ze względu na parametry wytrzymałościowe, elementy zbrojone różnymi rodzajami prętów istotnie różnią się wartością zrównoważonego stopnia zbrojenia ρ_{fb} . O obliczeniowej wartości nośności na zginanie decydują nie tylko wytrzymałość na rozciąganie prętów i moduł sprężystości, ale również zrównoważony stopień zbrojenia. W rozważanym przypadku stosując pręty GFRP oraz BFRP uzyskano zbliżone wartości nośności elementu zginanego. Dalszy rozwój konstrukcji z zastosowaniem prętów FRP zależy również od ulepszenia właściwości zbrojenia kompozytowego.

Literatura

- ACI 440.1R-06 (2006). Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars. ACI Committee 440. *American Concrete Institute*, USA.
- ACI 440.3R-04 (2004). A. Guide test methods for fiber-reinforced polymers (FRPs) for reinforcing or strengthening concrete structures. ACI Committee 440. *American Concrete Institute*, USA.
- Altalmas A., El Refai A., Abed F. (2015). Bond degradation of basalt fiber-reinforced polymer (BFRP) bars exposed to accelerated aging conditions. *Construction and Building Materials*, Vol. 81, 162-171.
- Artemenko S.E. (2003). Polymer composite materials made from carbon, basalt and glass fibers. Structure and properties. *Fiber Chemistry*, Vol. 35, 226-229.
- Baena M., Torres L., Turon A., Barris C. (2009). Experimental study of bond behavior between concrete and FRP bars using a pullout test. *Composites Part B: Engineering*, Vol. 40, 784-797.
- Banibayat P., Patnaik A. (2014). Variability of mechanical properties of basalt fiber reinforced polymer bars manufactured by wet-layup method. *Materials and Design*, Vol. 56, 898-906.
- Bank L.C. (2006). Composites for Construction: Structural design with FRP materials. Wyd. 1, *John Willey and Sons LTD*.
- Barris C., Torres L., Mias C., Vilanova I. (2012). Design of FRP reinforced concrete beams for serviceability requirements. *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol. 18, 843-857.
- Branston J, Das S., Kenno S., Taylor C. (2016). Mechanical behaviour of basalt fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 124, 878-886.
- Ceroni F., Cosenza E., Manfredi G., Pecce M. (2006). Durability issues of FRP rebars in reinforced concrete members. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 28, 857-868.
- Chen Y., Davalos J., Ray I., Kim H. (2007). Accelerated aging tests for evaluations of durability performance of FRP reinforcing bars for concrete structures. *Composites and Structures*, Vol. 78, 101-111.
- Cosenza E., Manfredi G., Realforzo R. (1997). Behavior and modeling of bond of FRP rebars to concrete. *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol. 1, 40-51.
- CSA-S806-02 (2007). Design and construction of building components with fibre-reinforced polymers. *Canadian Standard Association*, Canada.
- CSA-S807-10 (2010). Specification for fiber-reinforced polymer. *Canadian Standard Association*, Canada.
- Elgabbas F., Ahmed E., Benmokrane B. (2015). Physical and mechanical characteristics of new basalt-FRP bars for reinforcing concrete structures. *Construction and Building Materials*, Vol. 95, 623-635.
- Fiore V., Di Bella G., Valenza A. (2011). Glass-basalt epoxy hybrid composites for marine applications. *Material Design*, Vol. 32, 2091-2099.
- Li G., Wu J., Ge W. (2015). Effect of loading rate and chemical corrosion on the mechanical properties of large diameter glass/basalt-glass FRP bars. *Construction and Building Materials*, Vol. 93, 1059-1066.
- Park C., Jang C., Lee S., Won J. (2008). Microstructural investigation of long-term degradation mechanisms in GFRP dowel bars for jointed concrete pavement. *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 108, 3128-3137.

- Robert M., Cousin P., Benmokrane B. (2009). Durability of GFRP reinforcing bars embedded in moist concrete. *Journal of Composites for Construction*, Vol. 13, 66-73.
- Selejdak J., Brózda K. (2016). Zastosowanie kompozytów w budownictwie zrównoważonym. W: A. Rak, V. Bojchuk, W. Baran (red.). Wybrane zagadnienia inżynierii środowiska w budownictwie. *Wydawnictwo PZITB Oddział Opole*, Opole.
- Sim J., Park C., Moon D. (2005). Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures. *Journal of Composites B*, Vol. 36, 504-512.
- Sayed Ahmad F., Foret G., Le Roy R. (2011). Bond between carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) bars and ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPC): experimental study. *Construction and Building Materials*, Vol. 25, 479-485.
- Urbański M., Łapko A., Garbacz A. (2013). Investigation on concrete beams reinforced with basalt rebars as an effective alternative of conventional R/C structures. *Procedia Engineering*, Vol. 57, 1183-1191.
- Wang X., Wang Z., Wu Z., Cheng F. (2014). Shear behavior of basalt fiber reinforced polymer (FRP) and hybrid FRP rods as shear resistance members, *Construction and Building Materials*, Vol. 73, 781-789.
- Wei B., Cao H., Song S. (2010). Environmental resistance and mechanical performance of basalt and glass fibers. *Materials Science and Engineering A*, Vol. 527, 4708-4715.
- Wei B., Cao H., Song S. (2011). Surface modification and characterization of basalt fibers with hybrid sizings. *Composites: Part A*, Vol. 42, 22-29.
- Zhou J., Chen X., Chen S. (2011). Durability and service life prediction of GFRP bars embedded in concrete under acid environment. *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 241, 4095-4102.

REINFORCING CONCRETE STRUCTURES WITH NON-METALLIC COMPOSITE FRP BARS

Abstract: The paper presents the sorts, properties and designing methods for structures with FRP bars. The methods to determine the guaranteed tensile strength and guaranteed modulus of elasticity according to the guidelines for non-metallic reinforcement ACI 440.1R and CSA-S807 were presented, based on the analysis of strength parameters test results of GFRP bars and BFRP bars. As an example, the procedure of calculating the flexural capacity of structure reinforced with FRP bars according to ACI 440.1R was discussed. The results of the mechanical properties tests of GFRP bars and BFRP bars were used for calculation.

ZASTOSOWANIE HODOWLI *IN VITRO* KOMÓREK LUDZKICH W BADANIACH PESTYCYDÓW

Agata JABŁOŃSKA-TRYPUĆ*, Elżbieta WOLEJKO,
Urszula WYDRO, Andrzej BUTAREWICZ

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

Streszczenie: W celu zapewnienia zasobów żywności dla rosnącej populacji ludzkiej, powszechnie stosowane są środki ochrony roślin (ś.o.r.) zabezpieczające rośliny przed chorobami wirusowymi, bakteryjnymi, grzybowymi i szkodnikami oraz preparaty stymulujące ich wzrost i rozwój, zwane pestycydami. Celem pracy jest przedstawienie przeglądu literatury na temat sposobu działania ich substancji czynnych (s.cz.) oraz wpływu jaki wywierają na organizm człowieka na poziomie komórkowym. Obecnie powszechnie wykorzystywanym modelem badawczym są hodowle *in vitro* ludzkich linii komórkowych. Odpowiednio dobrane do eksperymentu linie komórkowe pozwalają na badanie absorpcji różnych substancji chemicznych, w tym pestycydów, poprzez nabłonek układu pokarmowego, oddechowego i skórę. Umożliwiają one ocenę wpływu pestycydów na podstawowe parametry stresu oksydacyjnego oraz funkcjonowanie układu hormonalnego na poziomie molekularnym.

Słowa kluczowe: pestycydy, linie komórkowe, stres oksydacyjny, układ hormonalny.

1. Wprowadzenie

Jednym z największych problemów współczesnej gospodarki jest zapewnienie odpowiednich zasobów żywności dla stale zwiększającej się populacji ludzkiej. Ograniczenie terenów uprawnych wymusza zwiększenie wydajności produkcji, a co za tym idzie częstsze i powszechniejsze stosowanie środków ochrony roślin (ś.o.r.) zabezpieczających rośliny przed chorobami wirusowymi, bakteryjnymi i grzybowymi oraz szkodnikami a także stymulujących ich wzrost i rozwój. Środki ochrony roślin powszechnie funkcjonują pod nazwą pestycydów, a definiowane są jako pojedyncze substancje czynne lub mieszaniny związków chemicznych. Według Zhang i in. (2011) pestycydy powinny wykazywać skuteczność zwalczanych organizmów przy jednoczesnym zachowaniu wysokiego poziomu bezpieczeństwa w stosunku do pozostałych organizmów i środowiska ich bytowania. Konsekwencją wpływu pestycydów na wzrost i rozwój organizmów żywych są zaburzenia w funkcjonowaniu całych ekosystemów a także poważne problemy związane ze zdrowiem, zarówno zwierząt jak i ludzi (Keikotlhaile i in., 2010; Dévier i in., 2011).

Obecność pestycydów w organizmie ludzkim jest spowodowana ich powszechnym stosowaniem w rolnictwie. Ze względu na trwałość i odporność na rozkład, ich pozostałości mogą być wykrywane w wielu

gatunkach roślin. Dlatego też, ludzie poprzez konsumpcję owoców i warzyw są dużo bardziej narażeni na ekspozycję na różne rodzaje pestycydów. Poza absorpcją w układzie pokarmowym, mogą one wnikać do organizmu ludzkiego przez drogi oddechowe i skórę. Te dwie drogi wnikania pestycydów do organizmu człowieka są niezwykle istotne dla osób, które pracują z pestycydami i są bezpośrednio narażone na ich działanie w czasie mieszania preparatów, napełniania sprzętu służącego do oprysków oraz podczas opryskiwania upraw. (Shadnia i in., 2005). Najwięksi producenci i użytkownicy pestycydów to Chiny, USA, Brazylia, Francja i Japonia (Zhang i in., 2011).

Biorąc pod uwagę zastosowanie pestycydów można podzielić je na kilka grup, główne to: insektycydy – substancje owadobójcze; herbicydy – związki chwastobójcze; fungicydy – preparaty grzybobójcze. Natomiast pod względem budowy chemicznej wyróżnić można związki nieorganiczne i organiczne. Pestycydy nieorganiczne stanowią nieliczną grupę związków do której należą między innymi herbicydy zawierające w swoim składzie substancje aktywne takie jak: amidosulfonian amonu, boraks, chloran sodu, a także fungicydy zawierające zasadowy chlorek miedzi (II) oraz ciecz bordowską jako substancje aktywne. Z kolei pestycydy organiczne to bardzo duża grupa około tysiąca związków czynnych charakteryzujących się różną strukturą chemiczną i właściwościami. Według Wrzosek

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: a.jablonska@pb.edu.pl

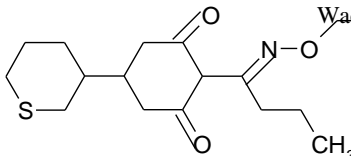
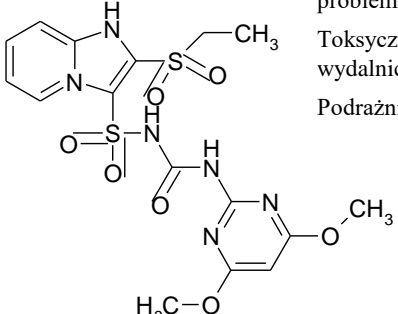
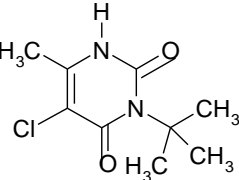
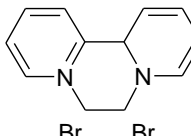
i in. (2009) niezwykle ważnym kryterium podziału tych związków jest ich trwałość w środowisku i rozpuszczalność w wodzie.

2. Charakterystyka i sposób działania wybranych herbicydów

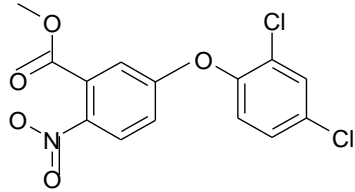
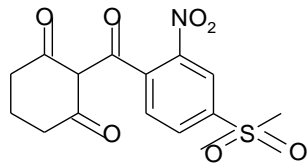
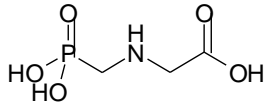
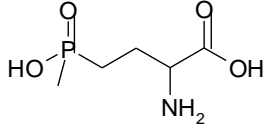
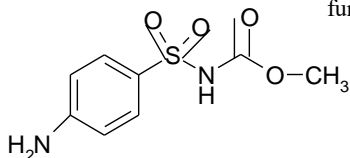
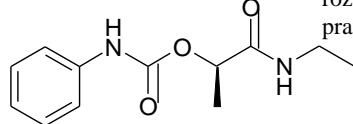
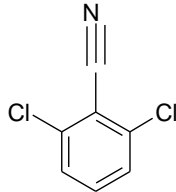
Herbicydy są najpowszechniej stosowaną grupą środków ochrony roślin w rolnictwie w celu regulacji zachwaszczenia, zapewniającą optimum wzrostu i rozwoju dla upraw. Odpowiednio stosowane herbicydy pozwalają osiągnąć wysoką wydajność upraw wskutek eliminacji szerokiego spektrum gatunków chwastów bez wyrządzania szkody roślinom uprawnym (Coble, 1996). W latach osiemdziesiątych dwudziestego wieku w wielu krajach, gdzie obserwowano intensywny rozwój gospodarstw rolniczych, pojawił się trend rozsądnego stosowania pestycydów, zwłaszcza herbicydów. Wynikiem tych działań była polityka proekologiczna

promowana w krajach Unii Europejskiej i Stanach Zjednoczonych, powiązana z nową strategią ochrony upraw, która określała redukcję dawek i częstotliwości użycia substancji chemicznych do niezbędnego minimum (Baandrup i Ballegaard, 1989). Redukcja zużycia herbicydów miała ogromne ekonomiczne i środowiskowe konsekwencje dla rozwoju rolnictwa, ponieważ ocena chwastów pod względem ich oporności na herbicydy wiązała się ze skomplikowanymi i drogimi procedurami (Paraviz i Saiema, 2014). W celu zwrócenia szczególnej uwagi na skutki stosowania herbicydów organizacja HRAC (*Herbicide Resistance Action Committee*) zaproponowała ich klasyfikację bazującą na celu działania herbicydów, efektach, podobieństwach powodowanych symptomów oraz strukturze chemicznej. Proponowany podział wraz z krótkim opisem toksykologicznym prezentuje tabela 1.

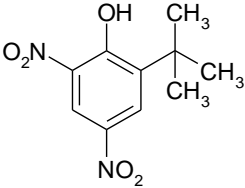
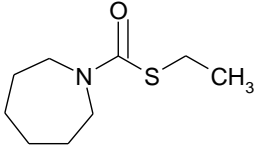
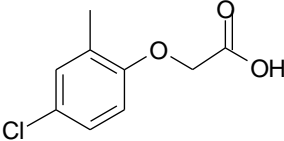
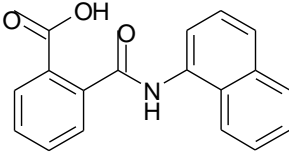
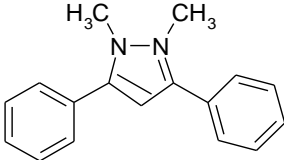
Tab. 1. Klasyfikacja herbicydów i właściwości toksykologiczne wybranych związków

Symbol grupy	Miejsce działania w komórce	Grupa chemiczna	Substancja czynna herbicydu	Działanie toksykologiczne
A	inhibicja acetylokarboksylazy CoA	Cykloheksadiony	Cykloksydym 	Podrażnienia skóry i oczu Wady rozwojowe
B	inhibicja syntazy acetomleczanowej ALS	Sulfonilomocznik	Sulfosulfuron 	Może powodować utratę wagi, problem z pęcherzem i nerkami. Toksyczny dla całego układu wydalniczego Podrażnienia oczu
C	inhibicja fotosyntezy	Uracyl	Terbacil 	Podrażnia układ oddechowy; podrażnia skórę i oczy; duże dawki powodują blednięcie i przyspieszony oddech
D	zaburzenia przepływu elektronów w fotosystemie I	Bipyridylium	Parakwat 	

c.d. Tab. 1.

Symbol grupy	Miejsce działania w komórce	Grupa chemiczna	Substancja czynna herbicydu	Działanie toksykologiczne
E	inhibicja oksydazy protoporfirynogen u	Difenyleter	Bifenoks 	Średnio toksyczny; brak danych
F	wybielenie	Triketon	Mezotrion 	Neurotoksyczny, podrażnia skórę i oczy; powoduje uszkodzenia i zmętnienie rogówki
G	inhibicja syntazy EPSP	Glicyna	Glifosat 	Karcinogen typu 2A; toksyczny dla wątroby i pęcherza moczowego; podrażnia oczy i skórę; może powodować poważne uszkodzenia oczu
H	inhibicja syntazy glutaminianowej	Kwas fosfinowy	Glufosynat amonowy 	Wpływ na procesy rozwoju i reprodukcji; neurotoksyczny; szkodliwy jeżeli zostanie połknięty, zainhalowany lub zaabsorbowany przez skórę; możliwe toksyczne działanie na nerki, pęcherz moczowy, krew i płuca
I	inhibicja syntazy DHP	Karbaminiany	Asulam 	Podrażnia skórę i oczy, zaburza funkcjonowanie hormonów
K	inhibicja mitozy	Karbaminiany	Karbetamid 	Możliwy wpływ na procesy rozwoju i reprodukcji; prawdopodobnie karcinogen
L	inhibicja syntezy celulozy wchodzącej w skład ścian komórkowych	Nitryle	Dichlobenyl 	Wpływa na procesy reprodukcji i rozwoju, możliwie toksyczny dla wątroby, nerek, żołądka, przytarczyc; może powodować zapalenie skóry; chroniczna ekspozycja może powodować senność, utratę apetytu i poważne problemy z układem oddechowym

c.d. Tab. 1.

Symbol grupy	Miejsce działania w komórce	Grupa chemiczna	Substancja czynna herbicydu	Działanie toksykologiczne
M	uszkodzenia błon komórkowych	Dinitrofenol	Dinoterb 	Bardzo toksyczny; wpływa na rozwój i reprodukcję
N	inhibicja syntezy lipidów	Tiokarbaminiany	Molinat 	Wpływa na procesy rozwoju i reprodukcji; inhibitor cholinesterazy; neurotoksyczny; podrażnia układ oddechowy, oczy i skórę; po połknięciu powoduje nudności wymioty i biegunkę; po wdychaniu może powodować niewydolność oddechową
O	działa jak kwas indoliloctowy	Kwas fenoksykarboksylowy	MCPA 	Bardzo toksyczny; może powodować niedociśnienie; możliwie toksyczny dla wątroby; podrażnia oczy; możliwy karcinogen
P	inhibicja transpotu auksyn	Phthalamate	Naptalam 	Podrażnia skórę, możliwe działanie toksyczne na wątrobę
Z	Nieznane; Możliwe że różnią się mechanizmem działania nawet w obrębie grupy	Związki pyrazolowe	Difenzokwat 	Średnio toksyczny; może powodować nieodwracalne uszkodzenia oczu

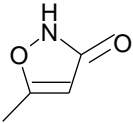
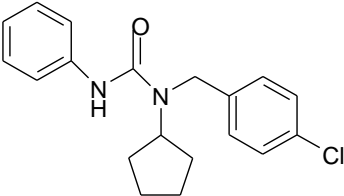
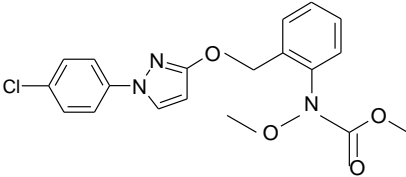
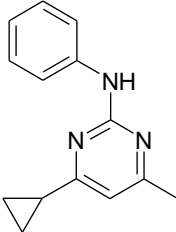
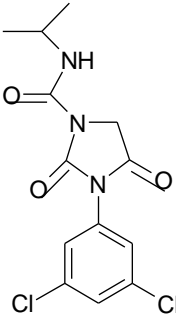
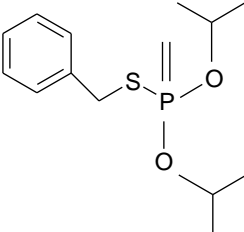
3. Charakterystyka i sposób działania wybranych fungicydów

Jedną z najważniejszych i najpowszechniej stosowanych grup pestycydów są fungicydy dla których prawie połowa światowego zużycia przypada na Europę. Fungicydy są używane w rolnictwie w celu zabezpieczenia roślin uprawnych przed chorobami grzybowymi. Zużycie pestycydów w Europie w 2010 roku obliczone przez Europejskie Stowarzyszenie Ochrony Roślin (ECPA – *European Crop Protection Association*) – organizację, która reprezentuje producentów środków ochrony roślin z 28 europejskich krajów, jest szacowane na więcej niż 100 tysięcy ton (Sułowicz i Piotrowska-Seget, 2016).

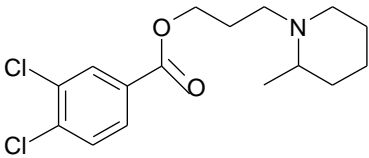
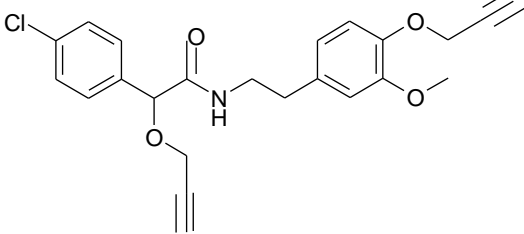
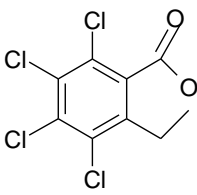
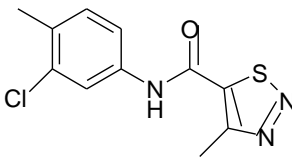
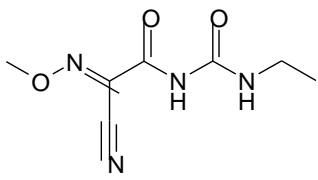
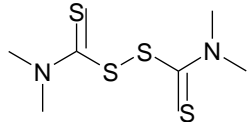
Jest wiele rodzajów klasyfikacji fungicydów. Jednym z kryteriów podziału jest miejsce docelowe działania związku w komórce patogenu grzybowego, innym –

struktura chemiczna składnika grzybobójczego bądź jego toksyczność. W 1981 roku powstała organizacja FRAC (*Fungicide Resistant Action Committee*), której zadaniem jest monitorowanie nowych, odpornych na fungicydy gatunków grzybów. FRAC klasyfikuje fungicydy ze względu na 10 możliwych mechanizmów ich działania. Ta klasyfikacja również bierze pod uwagę aktywne fungicydy z określonymi wieloma celami w komórkach oraz takie, które nie mają zdefiniowanego mechanizmu działania (lista FRAC 2014). Ten podział z uwzględnieniem fungicydów oraz sposobu ich działania z krótką charakterystyką toksykologiczną jest przedstawiony w tabeli 2.

Tab. 2. Klasyfikacja fungicydów i właściwości toksykologiczne wybranych związków

Symbol grupy	Miejsce działania w komórce	Grupa chemiczna	Substancja czynna fungicydu	Działanie toksykologiczne
A	Synteza kwasów nukleinowych	Izoksazole	Hymeksazol 	Bardzo toksyczny; ryzyko poważnych uszkodzeń oczu; toksyczny dla wątroby, tarczycy i nerek
B	Mitoza, podziały komórki, cytoszkielet	Fenylomocznik	Pencykuron 	Podrażnia układ oddechowy
C	Oddychanie	Metoksykarbaminiany	Pyraklostrobina 	Podrażnia skórę
D	Synteza aminokwasów i białek	Anilino-pyrimidyny	Cyprodynil 	Podrażnia układ oddechowy
E	Transdukcja sygnału	Dikarboksyimidy	Iprodion 	Może powodować problem z płucami; toksyczny dla wątroby, nadnerczy, jąder, prostaty i śledziony; hepatotoksyczność stwierdzona u myszy
F	Synteza lipidów, stabilność i integralność błon komórkowych	Fosforotiolany	Iprobenfos (IBP) 	Neurotoksyczny; podrażnia układ oddechowy, skórę i oczy; szkodliwy w przypadku połknięcia

c.d. Tab. 2.

Symbol grupy	Miejsce działania w komórce	Grupa chemiczna	Substancja czynna fungicydu	Działanie toksykologiczne
G	Biosynteza steroidów	Piperydyny	Piperalina 	Podrażnia układ oddechowy, skórę i oczy
H	Biosynteza składników ścian komórkowych	Amidy kwasu migdałowego	Mandipropamid 	Podrażnia skórę; toksyczny dla wątroby
I	Biosynteza melaniny	Izobenzofuranony	Ftalid 	Podrażnia układ oddechowy i oczy
P	Indukcja obrony rośliny żywicielskiej	Tiodiazolokarboksamidy	Tiadinil 	Brak danych
-	Niezany sposób działania	Cjanoacetamidoksymy	Cymoksanil 	Wpływa na rozwój i reprodukcję; uwrażliwia skórę, podrażnia oczy
-	Aktywność kontaktowa wielostronna	Ditiokarbaminiany i ich pochodne	Tiram 	Duże dawki mogą powodować nadpobudliwość, ataksję, duszności i drgawki; karcinogen 3 grupy według IARC; powoduje nadwrażliwość skóry

4. Kultury komórkowe *in vitro* jako nowy model badawczy wpływu pestycydów na organizm człowieka

Mechanizm działania pestycydów w ludzkim organizmie jest związany z zaburzeniami hormonalnymi oraz podwyższeniem poziomu stresu oksydacyjnego. Pestycydy

zostały zidentyfikowane nawet w ludzkim łożysku, gdzie były odpowiedzialne za obniżoną masę urodzeniową dziecka, wpływały hamująco na wzrost płodu wewnątrz macicy oraz powodowały wzrost poziomu stresu oksydacyjnego. U kobiet w ciąży, które miały kontakt z pestycydami zaobserwowano podwyższony poziom peroksydacji lipidów oraz uszkodzenia oksydacyjne DNA

(Rastogi i in., 2009). Wyniki badań prowadzonych na ssakach z użyciem pestycydów, które bezpośrednio łączą toksyczność tych substancji i stres oksydacyjny są bardzo nieliczne. Dlatego też eksperymenty wykorzystujące ludzkie linie komórkowe zyskały dużą popularność jako alternatywa do badań na zwierzętach. Wykorzystując jako model badawczy ludzkie linie komórkowe wykazano zmiany w układzie hormonalnym i zwiększony poziom stresu oksydacyjnego pod wpływem określonych pestycydów.

Kultury komórkowe *in vitro* prowadzone w wyspecjalizowanych laboratoriach stały się głównym, rutynowo stosowanym modelem badawczym w wielu gałęziach biologii i biotechnologii. Ich wykorzystanie w praktyce laboratoryjnej ma wiele zalet, co przedstawiono w tabeli 3. Kultury komórkowe pozwalają na badanie absorpcji związków chemicznych, również pestycydów, przez nabłonek przewodu pokarmowego, nabłonek oddechowy oraz przez inne bariery fizjologiczne żywego organizmu, co jest istotne podczas oceny właściwości biologicznych oraz toksyczności badanego pestycydu. Odpowiednie wyselekcjonowanie linii komórkowej do eksperymentu pozwala na szybkie i precyzyjne uzyskanie wyników wstępnych badań toksykologicznych. Dzięki kulturom komórkowym *in vitro* możliwe jest badanie mechanizmów absorpcji danego związku, określenie minimalnego stężenia toksycznego, interakcje badanego związku z innymi cząsteczkami, oraz wpływ substancji pomocniczych na stopień absorpcji przez bariery biologiczne. Kultury komórkowe prowadzone w warunkach w pełni kontrolowanych pozwalają również na badania przesiewowe („screening”) wielu grup nowo zsyntetyzowanych związków, przy jednoczesnej znaczącej redukcji kosztów jakie generują drogie i czasochłonne badania *in vivo* na zwierzętach, związane również z problemami natury etycznej tych działań. Gwałtowny wzrost rozwoju biotechnologii umożliwił izolację oraz kultywowanie wielu różnych rodzajów linii komórkowych, które wykazują różny stopień podobieństwa do żywych organizmów, czyli w różny

sposób odzwierciedlają warunki *in vivo*. W ten sposób uzyskano narzędzie pozwalające na skrócenie czasu przeznaczonego na eksperymenty. Może to również pomóc w osiągnięciu powtarzalnych wyników i zapewnić wysoką ich korelację z warunkami *in vivo*.

Badanie absorpcji pestycydów drogą oddechową powinno wiązać się z zastosowaniem jako modelu badawczego komórek pobranych z nabłonka oddechowego, które bardzo dobrze reprezentują charakterystyczne warunki związane z wchłanianiem substancji na drodze inhalacji. Natomiast podczas analizowania przenikania pestycydów przez skórę należy zastosować dostępne linie komórkowe skóry i ekwiwalentów skóry właściwej oraz naskórka. Te dwie drogi wnikania pestycydów są istotne dla osób związanych zawodowo z rolnictwem, dystrybucją bądź rozprzestrzenianiem pestycydów. Jednakże, większość pestycydów dostaje się do ludzkiego organizmu poprzez układ pokarmowy w trakcie konsumpcji pożywienia. Ta droga wnikania pestycydów do organizmu ludzkiego dotyczy wszystkich, nie tylko osób związanych zawodowo z rolnictwem (Al-Gubory, 2014).

5. Badania stresu oksydacyjnego powodowanego przez pestycydy w wybranych kulturach komórkowych *in vitro*

Jednym ze skutków oddziaływania pestycydów na organizm człowieka jest zwiększanie poziomu stresu oksydacyjnego w komórkach. Stres oksydacyjny jest definiowany jako konsekwencja zwiększonego poziomu wolnych rodników przy jednoczesnej zmniejszonej fizjologicznej ochronie antyoksydacyjnej. Wolne rodniki pod względem struktury chemicznej są molekułami z jednym lub większą ilością niesparowanych elektronów, co powoduje ich dużą niestabilność i wysoką reaktywność, na przykład: nadtlarki, tlenki azotowe czy rodniki peroksydowe powstające wskutek procesu peroksydacji lipidów (Cochran, 1991). Ze względu na swoją budowę chemiczną i właściwości wykazują one

Tab. 3. Zalety i ograniczenia kultur komórkowych jako modeli badawczych *in vitro* (Forbes, 2000)

Wady i zalety modelu <i>in vitro</i> kultur komórkowych w badaniu transportu chemicznego i metabolizmu	
Zalety	Wady
1. ilość związku wymaganego do badania jest znacząco mniejsza niż w przypadku modelu zwierzęcego	1. badania na selektywnych typach komórek
2. eliminacja zwierząt eksperymentalnych	2. komórki nowotworowe o nietypowych fenotypach
3. łatwość w użyciu	3. poszczególne komórki nie odzwierciedlają dostatecznie funkcjonowania danej tkanki
4. szybka analiza	4. możliwość wpływu cyklu komórkowego na metabolizm i transport badanych związków
5. oszczędności	
6. możliwość badania transportu międzykomórkowego	
7. możliwość kontroli warunków środowiska (temperatura, pH)	

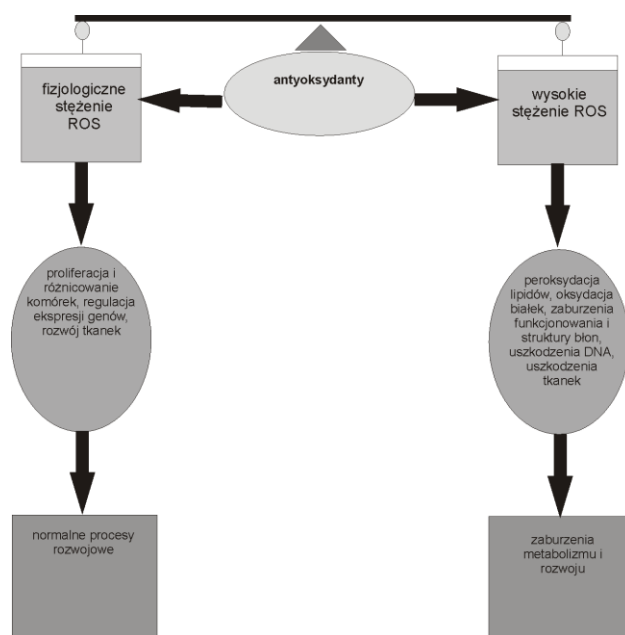
bardzo duże powinowactwo do sąsiadujących cząsteczek, przez co powodują uszkodzenia w strukturze i funkcjonowaniu ważnych makromolekuł takich jak białka, cukry, tłuszcze i kwasy nukleinowe (Halliwell, 1994 a i b). W normalnych, fizjologicznych warunkach jednym ze źródeł wolnych rodników jest poprawnie funkcjonujący metabolizm ludzki. Inne źródła to nadmierna ekspozycja na światło słoneczne, ozon, dym papierosowy, niektóre leki i narkotyki, zanieczyszczenia powietrza, chemikalia przemysłowe oraz pestycydy. Lista przyczyn stresu oksydacyjnego w środowisku jest przedstawiona w tabeli 4.

Tab. 4. Lista przyczyn stresu oksydacyjnego w środowisku (Abdollahi i in., 2004)

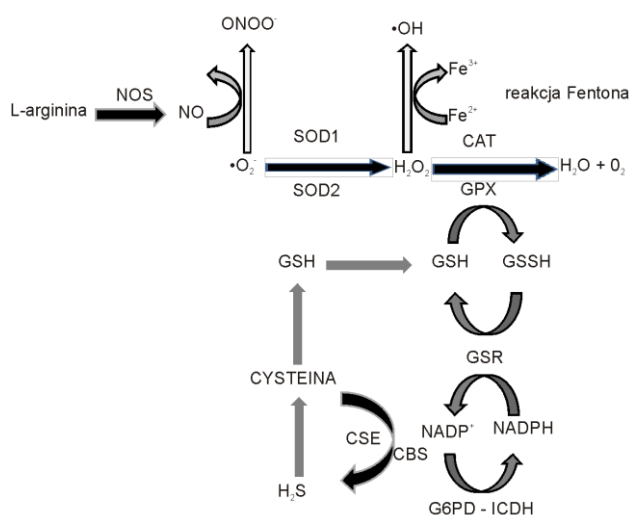
Kategoria czynnika	Rodzaj czynnika
Leki	paracetamol
	dokсорubicyna
	aminotriazole
Jony metali	żelazo
	miedź
	kadm
	nikiel
Zanieczyszczenia	azbest
	polichlorowane difenyle
	parakwat
	dikwat
	dwutlenek azotu
	ozon
Promieniowanie	pył mineralny
	Światło UV
	Promieniowanie rentgenowskie
	Promieniowanie gamma

Jednym z ważniejszych wyzwań ludzkiego organizmu jest uzyskanie równowagi pomiędzy produkcją wolnych rodników, a odpowiednim poziomem bariery antyoksydacyjnej. Stabilność tej równowagi ma ważny wpływ na zdrowie człowieka. Jeśli poziom wolnych rodników jest zbyt wysoki, a antyoksydantów zbyt niski, to rozwijają się warunki stresu oksydacyjnego, co może spowodować poważne i długotrwałe uszkodzenia odgrywające ważną rolę w patofizjologii wielu chorób. W literaturze naukowej są liczne doniesienia potwierdzające bezpośredni związek stresu oksydacyjnego z genezą wielu różnych chorób, takich jak: zmiany neurodegeneracyjne w chorobie Alzheimera, choroba Parkinsona, zaćma, miażdżycy, cukrzyca, chorobowy nowotworowe, chroniczne stany zapalne układu pokarmowego, astma, starzenie się skóry czy innymi chorobami (Butterfield, 2002; Butterfield i Lauderback, 2002; Zarkovic, 2003).

Fizjologiczne stężenie wolnych rodników pozytywnie wpływa na metabolizm komórek poprzez regulację ich ekspresji genów, proliferacji i różnicowania, podczas gdy wysoka koncentracja ROS (reaktywnych form tlenu, ang. *Reactive Oxygen Species*) niszczy komórkowe makromolekuły, co prowadzi do wielu zaburzeń chorobowych i rozwojowych (rys. 1) (Buonocore i in., 2010). Ludzki organizm ma wiele mechanizmów przeciwdziałania uszkodzeniom powodowanym przez stres oksydacyjny, a głównym są czynniki antyoksydacyjne. Antyoksydanty opóźniają lub hamują uszkodzenia oksydacyjne, ponieważ są wystarczające stabilne, aby neutralizować wolne rodniki poprzez przekazywanie im elektronów. Obecnie zostało poznanych i opisanych wiele czynników, które posiadają właściwości antyoksydacyjne, a w ludzkim organizmie można podzielić je na dwie kategorie: enzymatyczne i nieenzymatyczne systemy antyoksydacyjne. Oba te układy chronią struktury komórkowe, ich integralność oraz funkcjonowanie przeciwdziałając uszkodzeniom powodowanym przez ROS poprzez utrzymywanie stężenia wolnych rodników na poziomie fizjologicznym. Grupa enzymatycznych antyoksydantów łączy zawierające miedź i cynk dysmutazy ponadtlenkowe – SOD (ang. *Superoxide Dismutase*) (Cu, Zn-SOD lub SOD1 obecne w cytosolu), zawierającą mangan dysmutazę ponadtlenu (Mn-SOD lub SOD2 obecna w matrix mitochondrium), katalazę (CAT, obecna w poroksyzomach), zawierającą selen peroksydazę glutationową (Se-GPX, obecna w matrix mitochondrium oraz w cytoplazmie) a także reduktazę glutationową (GSR). Ta ostatnia uważana jest za najważniejszy enzym dla cyklu redoksu GSH (glutationu), który zapewnia odpowiednie stężenie zredukowanego glutationu (rys. 2) (Jezek i Hlavatá, 2005; Schafer i Buettner, 2001; Al-Gubory, 2014).



Rys. 1. Kontrola wytwarzania ROS (Lachance i in., 2001; Goodyear-Bruch i Pierce, 2002; Fuchs i in., 2001)



Rys. 2. Działanie enzymatycznych i nieenzymatycznych antyoksydantów odpowiedzialnych za kontrolę ROS (SOD1-miedziowo-cynkowa dysmutaza nadadtlenkowa, SOD2-manganianowa SOD, GSH-zredukowany glutation, GSSG-utleniony glutation, GSR-reduktaza glutationowa, CAT-katalaza, GPX-peroksydaza glutationowa, CBS- β -syntetaza cystationinowa, CSE- γ -liaza cystationinowa, G6PD-dehydrogenaza glukozy-6-fosforanowa, ICDH-dehydrogenaza izocytrynianu) (Jezek i Hlavatá, 2005; Schafer i Buettner, 2001; Al-Gubory, 2014)

Ekspozycja na pestycydy odgrywa istotną rolę we wzroście poziomu stresu oksydacyjnego i może powodować zwiększoną podatność na choroby. Molekularne mechanizmy działania poszczególnych herbicydów i fungicydów w organizmie człowieka nie są do końca poznane, zwłaszcza jeżeli efekt działania pestycydu jest powodowany przez ekspozycję na dawkę środowiskową. Specyficzne oddziaływania biologiczne zależą od chemicznej struktury pestycydu i powinny być badane na poziomie komórkowym. Uzyskane rezultaty mogą służyć jako wskaźnik ekspozycji na konkretny składnik chemiczny (Gupta, 2012). Zmiany w poszczególnych parametrach stresu oksydacyjnego pojawiające się pod wpływem wybranych pestycydów określone są przy zastosowaniu modeli badawczych ludzkich linii komórkowych. Kimura wraz z zespołem odkryli, że herbicyd znany jako MCPA (kwas 4-chloro-2-metylofenoksyoctowy) jest transportowany przez membrany komórek Caco-2, które stanowią zaaprobowany model badawczy dla układu pokarmowego. Linia Caco-2 hodowana na przepuszczalnych membranach wykorzystywana jest do badania mechanizmów transportu międzykomórkowego MCPA poprzez jelito cienkie (Kimura i in., 2012). Bukowska i in. (2008) zbadali wpływ dwóch powszechnie stosowanych fenoksyherbicydów – soli sodowej kwasu 2,4-dichlorofenoksyoctanowego (2,4-D-Na) oraz soli sodowej kwasu 4-chloro-2-metylofenoksyoctanowego (MCPA-Na) na zawartość grup karbonylowych w białkach ludzkich erytrocytów. Linia ta została wybrana jako eksperymentalny model badawczy ze względu na swoją prostotę strukturalną i funkcjonalną, która sprawia, że są odpowiednie do badania toksyczności wybranych

ksenobiotyków. Przeprowadzone eksperymenty wykazały, że prooksydacyjne działanie fenoksyherbicydów jest zależne przede wszystkim od lokalizacji podstawnika w pierścieniu fenolowym (Bukowska i in., 2008). Kim i in. (2013) stwierdzili, że parakwat (chlorek 1,1-dimetylo-4,4'-bipirydyniowy), jeden z najbardziej znanych herbicydów, powoduje stres oksydacyjny w komórkach linii BEAS-2B oskrzeli człowieka. Linia BEAS-2B jest powszechnie stosowanym modelem badawczym w analizie patogenezy chorób układu oddechowego wywołanych stresem oksydacyjnym powodowanym przez pestycydy, ponieważ komórki te zostały wyizolowane ze zdrowych ludzkich oskrzeli. Wykazano, że parakwat (PQ) podlega cyklicznej jednoelektronowej redukcji/utlenieniu poprzez azot amonowy oraz pierścień bipirydynyowy. W wyniku tej reakcji powstają wolne rodniki i PQ oraz zmniejszeniu ulega ilość zredukowanych ekwiwalentów NADPH i GSH. Brak danych literaturowych wyjaśniających, w jaki sposób oddziałują sygnały oksydacyjne parakwatu ze ścieżkami transdukcji, które są podstawą odpowiedzi na nie z płuc. Według He i in. (2012) głównym celem parakwatu są mitochondria. PQ powoduje uszkodzenia struktury mitochondrium, które wraz ze zmianami w cyklu redoks są główną przyczyną wzrostu poziomu stresu oksydacyjnego, co w konsekwencji prowadzi do śmierci komórek nabłonka płuc, nadprodukcji profibrogennych cytokin oraz czynników wzrostu, jak również transformacji miofibroblastów. Wyniki badań przeprowadzonych przez He i in. (2012) wskazują, że cytotoksyczność PQ jest zależna od dawki, co jest związane z indukcją apoptozy, a związek ten wykazano poprzez badanie procesu aktywacji kaspaz 3 i 7. Zaobserwowano również znaczący wzrost w produkcji wolnych rodników po ekspozycji komórek linii BEAS-2B na PQ. Stres oksydacyjny oraz uszkodzenia mitochondriów to główne mechanizmy poprzez które PQ powoduje uszkodzenie i zwłóknienie płuc (He i in., 2012). Inne badania przeprowadzone przez Rodriguez-Rocha i in. (2013) potwierdzają, że PQ oraz cyperkwat, pod względem struktury chemicznej bardzo podobny do parakwatu, powodują zanikanie neuronów dopaminergicznych, co jest ściśle związane ze stresem oksydacyjnym. W badaniach przeprowadzonych na ludzkich komórkach dwóch linii neuroblastoma (SK-N-SH i IMR-32), autorzy wykazali, że PQ powoduje szybki wzrost poziomu rodnika nadadtlenkowego w mitochondrium oraz stres oksydacyjny, który z kolei pociąga za sobą wzrost poziomu stresu oksydacyjnego w cytozolu. W przypadku ekspozycji na PQ wykazano, że nadekspresja MnSOD, ale nie CuZnSOD i Mn-zależnych porfiryn, zmniejsza stres oksydacyjny i obumieranie komórek. Natomiast toksyczność i stres oksydacyjny indukowany przez cyperkwat nie powodowały nadekspresji MnSOD i CuZnSOD. Te odkrycia sugerują, że oprócz formowania rodnika nadadtlenkowego, dodatkowe mechanizmy biorą udział w toksycznym działaniu pestycydów spowodowanym przez inhibicję kompleksu mitochondrialnego I (Rodriguez-Rocha i in., 2013).

Wyniki badań przeprowadzonych przez Regueiro i in. (2015) opisują cytotoksyczność indukowaną przez wybrane fungicydy. Według autorów, wszystkie badane fungicydy powodują zmniejszenie żywotności komórek. Badania te zostały przeprowadzone na liniach pierwotnych neuronów uzyskanych z kory mózgowej płodów myszy. Pestycydy powodowały inhibicję mitochondrialnego kompleksu oddechowego III prowadzącą do zatrzymania naturalnego transportu elektronów, zmniejszenia zasobów ATP oraz depolaryzacji błon mitochondriów, co w efekcie powodowało wzrost stężenia wapnia w cytosolu i śmierć komórek (Regueiro i in., 2015). Badania, przeprowadzone przez Coleman i in. (2012) potwierdzają, że wybrane fungicydy wpływają na wydajność redukcyjną komórek oraz na ekspresję niektórych istotnych enzymów antyoksydacyjnych, takich jak peroksydaza glutationowa czy dysmutaza ponadtlenkowa. Wpływ tych fungicydów był badany na komórkach glejowych i neuronach linii U251 oraz SH-SY5Y (Coleman i in., 2012).

6. Pestycydy, jako zanieczyszczenia chemiczne zaburzające gospodarkę hormonalną człowieka

Ekspozycja na różnorodne zanieczyszczenia środowiskowe wpływa na funkcjonowanie całego organizmu ludzkiego. Pojawiające się pod wpływem pestycydów zaburzenia hormonalne powodują zakłócenia w dynamicznej gospodarce hormonalnej we wszystkich tkankach i organach. Kumulacja efektów jest zależna od dawki, a niezależna od mechanizmu oraz sposobu działania poszczególnych składników mieszanki. Mieszaniny związków złożone z wielu chemicznych składników powodujących zaburzenia układu dokrewnego, naśladują działanie hormonów indukując zaburzenia w ścieżkach przemian estrogenu, androgenu i innych hormonów steroidowych. Toksyczność związków zaburzających gospodarkę hormonalną człowieka wynika głównie z antagonistycznego modelu ich działania polegającego na kompetycyjnym wiązaniu się ligandów z receptorem estrogenowym (Rider i in., 2013; Kortenkamp, 2007; Li i in., 2012).

Zmiany w równowadze hormonalnej pod wpływem wybranych pestycydów badano wykorzystując różne linie komórek ludzkich. Bardzo popularnym i wiarygodnym modelem badawczym umożliwiającym analizowanie zaburzeń hormonalnych pojawiających się na skutek działania pestycydów są linie komórkowe raka piersi, takie jak MCF-7 czy MDA-MB-231. Dane literaturowe wskazują, że fungicydy z grupy karbaminianów, na przykład: benomyl hamują proliferację komórek linii MCF-7 poprzez dwa różne mechanizmy: z jednej strony powodują acetylację mikrotubul, a z drugiej zaburzają ich polimeryzację (Rathinasamy i Panda, 2008). Benomyl działa jako związek zaburzający funkcjonowanie układu hormonalnego poprzez zwiększanie ekspresji i aktywności aromatazy w linii komórkowej ludzkiego nowotworu jajnika KGN (Morinaga i in., 2004). Ta aktywność benomyłu zaburzająca prawidłowe funkcjonowanie układu

dokrewnego powodowana przez benomyl została potwierdzona w badaniach na linii komórkowej MCF-7 przeprowadzonych przez Kawaratani i in. (2015), którzy odkryli, że badany fungicyd uszkadza mikrotubule, powoduje apoptozę oraz zwiększa poziom protein, mRNA i aromatazy, stanowiąc czynnik ryzyka zaburzeń hormonalnych związanych z rakiem piersi. Na linii MCF-7 badano również inne związki działające przeciwgrzybiczo, między innymi z grupy konazoli. Okazało się, że wszystkie badane imidazole oraz triazole wykazały w niższych stężeniach znaczący potencjał zaburzania biosyntezy układu hormonalnego. Ich mechanizm działania polega na inhibicji biosyntezy androgenów, szczególnie testosteronu. Jednakże, w linii komórkowej MCF-7 wykazują aktywność anty-estrogenową spowodowaną inhibicją aromatazy – kluczowego enzymu biosyntezy hormonów steroidowych (Kjærstad i in., 2010). Andersen i in. (2006) wykazali, że inny fungicyd – fenarimol wykazuje podwójny efekt, w niższych stężeniach znacząco hamuje aromatazę, a w wyższych ma właściwości estrogenne. W celu zbadania właściwości estrogennych, antiestrogennych oraz działania hamującego aromatazę wykorzystano linię MCF-7. Ponadto Radice i in. (2006) wykryli przy użyciu linii MCF-7 zaburzenie gospodarki hormonalnej działaniem procymidonu – dikarboksimidowego fungicydu. Dalsze badania wykazały, że aktywacja kinaz MAPK (kinazy aktywowane mitogenami ang. *mitogen-activated protein kinases*) jest odpowiedzialna za stymulację receptorów estrogenu poprzez procymidon (Radice i in., 2006). Wyniki badań przeprowadzonych przez Huovinen i in. (2015) wykazały szkodliwy wpływ ekspozycji na diuron, zwłaszcza na rozwój płodu. Test przeprowadzono na komórkach ludzkiego raka sutka (MCF-7) i komórkach ludzkiego nowotworu łożyska kosmówki (BeWo). Wykazały one, że diuron jest wysoce cytotoksyczny i potencjalnie genotoksyczny, a w mechanizm jego działania zaangażowane są wolne rodniki (Huovinen i in., 2015). Wyniki uzyskane przez Rollerova i in. (2014) potwierdzają niszczące działanie wybranych herbicydów, ponieważ wskazują, że acetochlor może interferować ze ścieżką sygnałową estradiolu i tym samym stymuluje proliferację linii MCF-7 (Rollerova i in., 2014). Podczas gdy w eksperymencie przeprowadzonym przez Rich i in. (2012) wskazano na różne efekty cytotoksyczne wybranych herbicydów zależne od użytej do badań linii komórkowej. W estrogenozależnej linii MCF-7 raka nabłonkowego sutka cytotoksyczność spowodowana atrazyną oraz cynazyną nie została zaobserwowana, jednak estrogeniezależna linia komórkowa MDA-MB-231 raka piersi oraz nie pochodząca od komórek raka linia pierwotna MCF-10A wykazały istotny spadek żywotności komórek (Rich i in., 2012).

7. Podsumowanie

Obecnie, ze względu na potrzebę upraw roślin na dużą skalę, pestycydy są integralną częścią życia, przez co stają

się trudne do wyeliminowania z rolnictwa. Człowiek jest narażony na działanie pestycydów ze względu na wnikanie tych związków do organizmu drogą pokarmową, wziewną i skórą. Niektóre ze stosowanych pestycydów mają udowodnione działanie toksyczne, mutagenne i kancerogenne. Badania wpływu pestycydów na organizm człowieka i zwierząt zwykle prowadzone są z wykorzystaniem modelu zwierzęcego, jednak ze względu na problemy natury etycznej i koszty coraz powszechniejsze są badania *in vitro* bazujące na ludzkich kulturach komórkowych. Przy prawidłowo przeprowadzonych badaniach i odpowiednio dobranych modelach badawczych, kultury komórkowe *in vitro* są dobrym modelem eksperymentalnym, odzwierciedlającym narażenie człowieka na różne ksenobiotyki. Mogą być one również używane do monitorowania ekspozycji na połączone i skumulowane pestycydy. Dzięki dynamicznemu rozwojowi chemii, biologii i biotechnologii oraz medycyny mogą być tworzone jak najmniej toksyczne środki ochrony roślin, a także możliwe jest przewidzenie ich szkodliwego wpływu na funkcjonowanie organizmu człowieka.

Literatura

- Abdollahi M., Ranjbar A., Shadnia S., Nikfar S., Rezaie A. (2004). Pesticides and oxidative stress: a review. *Med. Sci. Monit.*, Vol. 10, 6, 141-147.
- Al-Gubory K.H. (2014). Environmental pollutants and lifestyle factors induce oxidative stress and poor prenatal development. *Reprod. Biomed. Online*, Vol. 29, 1, 17-31.
- Andersen H.R., Bonfeld-Jørgensen E.C., Nielsen F., Jarfeldt K., Jayatissa M.N., Vinggaard A.M. (2006). Estrogenic effects in vitro and in vivo of the fungicide fenarimol. *Toxicol. Lett.*, Vol. 163, 2, 142-152.
- Baandrup M., Ballegaard T. (1989). Three years field experience with an advisory computer system applying factor-adjusted doses. *The BCPC Conference – Weeds*, Vol. 2, 555-560.
- Bukowska B., Rychlik B., Krokosz A., Michałowicz J. (2008). Phenoxyherbicides induce production of free radicals in human erythrocytes: oxidation of dichlorodihydrofluorescein and dihydrorhodamine 123 by 2,4-D-Na and MCPA-Na. *Food Chem Toxicol.*, Vol. 46, 1, 359-367.
- Buonocore G., Perrone S., Tataranno M.L. (2010). Oxygen toxicity: chemistry and biology of reactive oxygen species. *Semin. Fetal Neonatal. Med.*, Vol. 15, 4, 186-190.
- Butterfield D.A. (2002). Amyloid beta-peptide (1-42)-induced oxidative stress and neurotoxicity: implications for neurodegeneration in Alzheimer's disease brain. A review. *Free Radic. Res.*, Vol. 36, 12, 1307-1313.
- Butterfield D.A., Lauderback C.M. (2002). Lipid peroxidation and protein oxidation in Alzheimer's disease brain: potential causes and consequences involving amyloid beta-peptide-associated free radical oxidative stress. *Free Radic. Biol. Med.*, Vol. 32, 11, 1050-1060.
- Coble H.D. (1996). Weed management tools and their impact on the agro-ecosystem. In: *Proc. 2nd International Weed Control Congress*, Copenhagen, Denmark, 1143-1146.
- Cochran C.G. (1991). Cellular injury by oxidants. *Am. J. Med.*, Vol. 92, 235-305.
- Coleman M.D., O'Neil J.D., Woehrling E.K., Ndunge O.B.A., Hill E.J., Menache A., Reiss C.J. (2012). A Preliminary Investigation into the Impact of a Pesticide Combination on Human Neuronal and Glial Cell Lines In Vitro. *PLoS ONE*, Vol. 7, 8, e42768.
- Forbes I.I. (2000). Human airway epithelial cell lines for in vitro drug transport and metabolism studies. *Pharm. Sci. Technol. Today.*, Vol. 3, 1, 18-27.
- Fuchs J., Zollner T.M., Kaufmann R., Podda M. (2001). Redox-modulated pathways in inflammatory skin diseases. *Free Radic. Biol. Med.*, Vol. 30, 4, 337-353.
- Goodyear-Bruch C., Pierce J.D. (2002). Oxidative stress in critically ill patients. *Am. J. Crit. Care.*, Vol. 11, 6, 543-551.
- Gupta P.K. (2012). Toxicity of herbicides. R.C. Gupta (Ed.), *Veterinary Toxicology: Basic and Clinical Principles* (2nd edn), Academic Press/Elsevier, Amsterdam, 631-652.
- Halliwell B. (1994a). Free radicals, antioxidants and human disease: Curiosity, causes and consequences. *Lancet*, Vol. 344, 721-724.
- Halliwell B. (1994b). Free radicals and antioxidants: A personal view. *Naut. Rev.*, Vol. 52, 235-265.
- He X., Wang L., Szklarz G., Bi Y., Ma Q. (2012). Resveratrol inhibits paraquat-induced oxidative stress and fibrogenic response by activating the nuclear factor erythroid 2-related factor 2 pathway. *J. Pharmacol. Exp. Ther.*, Vol. 342, 1, 81-90.
- Huovinen M., Loikkanen, J., Naarala, J., Vähäkangas, K. (2015). Toxicity of diuron in human cancer cells. *Toxicol. In Vitro.*, Vol. 29, 7, 1577-1586.
- Kawaratani Y., Matsuoka T., Hirata Y., Fukata N., Nagaoka Y., Uesato S. (2015). Influence of the carbamate fungicide benomyl on the gene expression and activity of aromatase in the human breast carcinoma cell line MCF-7. *Environ. Toxicol. Pharmacol.*, Vol. 39, 1, 292-299.
- Keikothlaile B.M., Spanoghe P., Steurbaut W. (2010). Effects of food processing on pesticide residues in fruits and vegetables: a meta-analysis approach. *Food Chem. Toxicol.*, Vol. 48, 1-6.
- Kim Y.S., Podder B., Song H.Y. (2013). Cytoprotective effect of alpha-lipoic acid on paraquat-exposed human bronchial epithelial cells via activation of nuclear factor erythroid related factor-2 pathway. *Biol. Pharm. Bull.*, Vol. 36, 5, 802-811.
- Kimura O., Tsukagoshi K., Hayasaka M., Endo T. (2012). Transepithelial transport of 4-chloro-2-methylphenoxyacetic acid (MCPA) across human intestinal Caco-2 cell monolayers. *Basic Clin. Pharmacol. Toxicol.*, Vol. 110, 6, 530-536.
- Kjærstad M.B., Taxvig C., Nellesmann C., Vinggaard A.M., Andersen H.R. (2010). Endocrine disrupting effects in vitro of conazole antifungals used as pesticides and pharmaceuticals. *Reprod. Toxicol.*, Vol. 30, 4, 573-582.
- Kortenkamp A. (2007). Ten years of mixing cocktails: a review of combination effects of endocrine-disrupting chemicals. *Environ. Health Perspect.*, Vol. 115 Suppl 1, 98-105.
- Lachance P.A., Nakat Z., Jeong W.S. (2001). Antioxidants: an integrative approach. *Nutrition.*, Vol. 17, 10, 835-838.
- Li Z., Zhang H., Gibson M., Li J. (2012). An evaluation on combination effects of phenolic endocrine disruptors by estrogen receptor binding assay. *Toxicol. In Vitro.*, Vol. 26, 6, 769-774.
- Morinaga H., Yanase T., Nomura M., Okabe T., Goto K., Harada N., Nawata H. (2004). Abenzimidazole fungicide, benomyl, and its metabolite, carbendazim, induce aromatase activity in a human ovarian granulosa-like tumor cell line (KGN). *Endocrinology*, Vol. 145, 1860-1869.

- Paraviz A., Saiema R. (2014). Emerging Technologies and Management of Crop Stress Tolerance. Volume 1: Biological Techniques, Academic Press, Elsevier, 423-448.
- Radice S., Chiesara E., Frigerio S., Fumagalli R., Parolaro D., Rubino T., Marabini L. (2006). Estrogenic effect of procymidone through activation of MAPK in MCF-7 breast carcinoma cell line. *Life Sci.*, Vol. 78, 23, 2716-223.
- Rastogi S.K., Satyanarayan P.V., Ravishankar D., Tripathi S. (2009). A study on oxidative stress and antioxidant status of agricultural workers exposed to organophosphorus insecticides during spraying. *Indian J. Occup. Environ. Med.*, Vol. 13, 131-134.
- Rathinasamy K., Panda D. (2008). Kinetic stabilization of microtubule dynamic instability by benomyl increases the nuclear transport of p53. *Biochem. Pharmacol.*, Vol. 76, 1669-1680.
- Regueiro J., Olguín N., Simal-Gándara J., Suñol C. (2015). Toxicity evaluation of new agricultural fungicides in primary cultured cortical neurons. *Environ. Res.*, Vol. 140, 37-44.
- Rich J.D., Gabriel S.M., Schultz-Norton J.R. (2012). In vitro effects of herbicides and insecticides on human breast cells. *ISRN Toxicol.*, Vol. 2012, ID 232461, doi: 10.5402/2012/232461.
- Rider C.V., Carlin D.J., Devito M.J., Thompson C.L., Walker N.J. (2013). Mixtures research at NIEHS: an evolving program. *Toxicology.*, Vol. 313, 2-3, 94-102.
- Rodriguez-Rocha H., Garcia-García A., Pickett C., Li S., Jones J., Chen H., Webb B., Choi J., Zhou Y., Zimmerman M.C., Franco R., (2013). Compartmentalized oxidative stress in dopaminergic cell death induced by pesticides and complex I inhibitors: distinct roles of superoxide anion and superoxide dismutases. *Free Radic. Biol. Med.*, Vol. 61, 370-383.
- Rollerova E., Wsolova L., Urbancikova M. (2014). Herbicide acetochlor interferes with proliferation activity of MCF-7 cells enhanced by estradiol. *Endocr. Regul.*, Vol. 48, 4, 195-200.
- Schafer F.Q., Buettner G.R. (2001). Redox environment of the cell as viewed through the redox state of the glutathione disulfide/glutathione couple. *Free Radic. Biol. Med.*, Vol. 30, 11, 1191-1212.
- Shadnia S., Azizi E., Hosseini R., Khoei S., Fouladdel S., Pajoumand A., Jalali N., Abdollahi M. (2005). Evaluation of oxidative stress and genotoxicity in organophosphorus insecticide formulators. *Hum. Exp. Toxicol.*, Vol. 24, 439-445.
- Sułowicz S., Piotrowska-Seget Z. (2016). Oddziaływanie fungicydów na mikroorganizmy w środowisku glebowym. *Post. Mikrobiol.*, Vol. 55, 1, 12-18.
- Wrzosek J., Gworek B., Maciaszek D. (2009). Środki ochrony roślin w aspekcie ochrony środowiska. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*, Vol. 3, 75-88.
- Zarkovic N. (2003). 4-hydroxynonenal as a bioactive marker of pathophysiological processes. *Mol. Aspects Med.*, Vol. 24, 4-5, 281-291.
- Zhang W., Jiang F., Ou J. (2011). Global pesticide consumption and pollution: with China as a focus. *Proc. Internat. Acad. Ecol. Environ. Sci.*, Vol. 1, 2, 125-144.

THE APPLICATION OF THE HUMAN CELL CULTURE IN THE STUDIES OF PESTICIDES IMPACT ON THE HUMAN ORGANISM

Abstract: In order to provide the food supply for an increasing human population products protecting plants against viral diseases, bacterial, fungal, pests and preparations stimulating their growth and development, known as pesticides, are commonly used. The aim of the paper is to show the way of their actions and the impact they have on the human body at the cellular level. Currently, in vitro cultures of human cell lines are a common model for research in this field. Properly chosen for the experiment cell lines allow for the study of the absorption of various chemicals, including pesticides through the epithelium of the digestive system, respiratory system and skin. They also enable the study of the effects of pesticides on the basic parameters of oxidative stress and the functioning of the endocrine system at the molecular level.

Pracę wykonano w Politechnice Białostockiej w ramach realizacji projektu badawczego finansowanego ze środków S/WBiIŚ/3/2015.

STOSOWANIE SPOIWA RECYKLINGOWEGO JAKO PRZYKŁAD REDUKCJI CO₂

Katarzyna KALINOWSKA-WICHROWSKA*

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

Streszczenie: Artykuł przedstawia dane dotyczące skali produkcji cementu i wpływu tego procesu na emisję dwutlenku węgla na świecie i w Polsce. W dobie polityki zrównoważonego rozwoju oraz dyrektyw unijnych, słusznie narzucających redukcję emisji gazów cieplarnianych (w tym CO₂), zaproponowano rozwiązanie, które w pewnym stopniu może przyczynić się do zmniejszenia zużycia cementu poprzez stosowanie odpowiednio przygotowanego spoiwa recyklingowego jako jego zamiennika. Przedstawiono niektóre wyniki badań własnych dotyczących możliwości zastosowania materiału odpadowego w postaci odpowiednio przetworzonego zaczynu cementowego jako częściowego zamiennika cementu w kompozytach cementowych. Ze względu na dużą ilość zanieczyszczeń w przemysłowym spoiwie wtórnym, które mogłyby zakłócić jednorodność wyników, spoiwo recyklingowe pozyskano w warunkach laboratoryjnych. Mineralny materiał wtórny uzyskano w procesie wieloetapowego rozdrabniania przygotowanych do tego celu próbek laboratoryjnych wykonanych z zaczynów cementowych. Przygotowany materiał przeanalizowano pod kątem zawartości frakcji pylastych oraz aktywności pucołanowej. Uzyskane wyniki badań wykazały, że w przyjętych warunkach obróbki spoiwa recyklingowego, spoiwo to może być z powodzeniem stosowane jako zamiennik cementu w kompozytach cementowych, co pozwala na redukcję potrzebnej ilości cementu, a sięgając do procesu jego produkcji (wypalania klinkieru) do zmniejszenia emisji CO₂.

Słowa kluczowe: kompozyty cementowe, spoiwo recyklingowe, właściwości fizyczno-mechaniczne betonów.

1. Wprowadzenie

Emisję CO₂ w Polsce (bez kategorii 4 – Użytkowanie gruntów, zmiany użytkowania gruntów i leśnictwo) w roku 2014 oszacowano na około 310,31 milionów ton (GUS, 2016). Emisja CO₂ (bez kat.4) stanowiła 81,65% całkowitej emisji gazów cieplarnianych w Polsce w roku 2014. Głównym źródłem emisji CO₂ jest podkategoria Spalanie Paliw. Udział tej podkategorii stanowił 91,8% w całkowitej emisji CO₂ w roku 2014, w tym zawierały się: przemysł energetyczny – 51,5%, przemysł wytwórczy i budownictwo – 9,6%, transport – 14,1% oraz inne sektory – 16,6%. Dla Procesów przemysłowych udział w całkowitej emisji CO₂ w roku 2014 wyniósł 6,6%. W tej kategorii głównym źródłem emisji są Produkty mineralne (szczególnie produkcja cementu). Jak podaje Stowarzyszenie Producentów Cementu (www.polskicement.pl, 2016) produkcja jego jednej tony zwykle generuje emisję 600-700 kg CO₂. Wynika to z faktu, że wymaga ona energii (zarówno z paliw, jak i elektrycznej), a w procesie wytwarzania uwalniany jest CO₂ związany w surowcach. W skali całego świata produkcja cementu odpowiada za około 5% antropogenicznej emisji CO₂.

Większa liczba ludności i wzrost gospodarczy dodatkowo obciąża już i tak ograniczone zasoby naturalne, będzie też wymagać utrzymania działań w celu zneutralizowania wpływu na zmiany klimatu. Jako kluczowy składnik betonu, cement stanowi istotną rolę w gospodarce zasobami, tak więc zagadnienie ponownego wykorzystania starej zaprawy cementowej jest obiektem badań wielu naukowców za sprawą szerokiej tematyki recyklingu betonu i produktów wtórnych w kontekście ich efektywnego zagospodarowania oraz ochrony środowiska (Bołtryk i Kalinowska-Wichrowska, 2016; Kalinowska-Wichrowska, 2016; Duan i Poon, 2014)

Celem badań podjętych w niniejszym artykule jest wykazanie możliwości ponownego wykorzystania spoiwa uzyskanego z recyklingu betonu jako zamiennika cementu w kompozytach cementowych. Redukcja ilości stosowanego cementu, pochodzącego z wytwórni (gdzie najwięcej CO₂ emitowana jest do atmosfery podczas wypalania klinkieru) ogranicza emisję tego gazu.

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: k.kalinowska@pb.edu.pl

Tab. 1. Całkowita emisja głównych zanieczyszczeń powietrza (GUS, 2016)

Wyszczególnienie	2000	2005	2010	2014
	W tysiącach ton			
Dwutlenek węgla	319120	323373	334026	310307
Dwutlenek siarki	1498	1246	970	800
Tlenki azotu	842	851	874	723
Tlenek węgla	2646	2738	3119	2704
Niemetanowe organiczne związki lotne	865	879	949	888
przyroda	290	295	284	282
amoniak	287	274	274	265
Pyły	444	469	462	383

2. Obiekt i metodyka badań własnych

2.1. Charakterystyka surowców

Do badań zastosowano CEM I 42,5R oraz odpowiadający wymogom normy PN-EN 197-1 *Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku*. Zastosowano do badań tylko kruszywo drobne w postaci piasku normowego.

Ze względu na możliwą obecność zanieczyszczeń w spoiwie z recyklingu, pochodzenia „przemysłowego”, które mogłyby zakłócić uzyskane wyniki badań, do zrealizowania eksperymentu przyjęto spoiwo wtórne uzyskane w wyniku przetworzenia wykonanych wcześniej próbek laboratoryjnych z zaczynów cementowych. Zaczyny przygotowano z cementu i wody, o stosunkach w/c: 0,35; 0,45; 0,55 w formach 4×4×16 cm. Po 28 dniowym okresie dojrzewania w warunkach wodnych próbki zaczynów przez kolejny miesiąc próbki oczekiwały na dalsze czynności w warunkach powietrzno-suchych. Następnie zostały przekruszone w kruszarce szczękowej do wymiarów zbliżonych do około 2 cm. W takiej postaci umieszczono je w piecu termicznym, gdzie były poddawane prażeniu w temperaturach określonych w planie eksperymentu. Po tym procesie materiał domielano przez około 20 minut w bębnie micro Devala, w celu uzyskania jak największej powierzchni właściwej. Po domiale cały wsad stanowiła frakcja < 0,125 mm, a zbadana powierzchnia właściwa materiału oscylowała w granicach 3500-3800 cm²/g.

Receptura kompozytów cementowych została przyjęta, jak dla zapraw normowych według PN-EN 196-7:2009 *Metody badania cementu - Część 7: Metody pobierania i przygotowania próbek cementu*, gdzie stosunek w/c = 0,5.

Do zaformowania beleczek 4×4×16 cm zastosowano cement portlandzki CEM I 42,5R, którego 25% (masowo) zastąpiono materiałem recyklingowym. Po upływie 28 dni dojrzewania w warunkach wodnych, próbki poddano badaniom wytrzymałości na zginanie i ściskanie. Wyniki badania przedstawiono w punkcie 4.

2.2. Metodyka badań

Wytrzymałość na ściskanie kompozytów cementowych z materiałem recyklingowym:

- badanie wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono na 6 losowo wybranych z każdej serii beleczkach 4×4×16 cm zgodnie z normą PN-EN 196-1:2006 *Metody badania cementu - Część 1: Oznaczanie wytrzymałości*.
- aktywność pucolanową określono według normy PN-EN 450-1:2009 *Popiół lotny do betonu. Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności*.
- procentową zawartość poszczególnych rozmiarów cząstek w materiale recyklingowym po obróbce termiczno-mechanicznej oznaczono za pomocą analizatora wielkości cząstek Fritsch Analysette 22 NanoTec plus.

3. Eksperyment badawczy

3.1. Plan eksperymentu

W celu ustalenia wpływu obróbki termicznej spoiwa z recyklingu na wybrane właściwości kompozytów cementowych zaplanowano eksperyment badawczy składający się z 9 serii podstawowych oraz 1 serii kontrolnej (numer 10), która nie zawierała spoiwa recyklingowego.

W eksperymentcie uwzględniono dwa czynniki (X_1 , X_2), o trzech poziomach zmienności każdy:

- X_1 – temperatura prażenia spoiwa recyklingowego (550°C, 650°C, 750°C),
- X_2 – stosunek w/c wyjściowych zaczynów cementowych poddawanych recyklingowi (0,35; 0,45; 0,55).

Czas prażenia wynosił 60 minut. Plan eksperymentu zawierający kodowane wartości zmiennych przedstawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Plan eksperymentu badawczego

Numer serii	X_1 - temp.prażenia [°C]	Temp.prażenia	X_2 - w/c materiału rec. w/c materiału w	
1	-1	550	-1	0,35
2	-1	550	0	0,45
3	-1	550	1	0,55
4	0	650	-1	0,35
5	0	650	0	0,45
6	0	650	1	0,55
7	+1	750	-1	0,35
8	+1	750	0	0,45
9	+1	750	1	0,55
10	Seria kontrolna 100% cementu			

3.2. Wykonanie i pielęgnacja próbek

Wykonanie zarobów przeprowadzono przy użyciu automatycznej mieszarki laboratoryjnej. W pierwszej kolejności odważono i wymieszano składniki sypkie przez 5 minut, następnie dodawano wodę i mieszano przez kolejne 10 minut. Tak przygotowany materiał umieszczano w formie stalowej umożliwiającej jednoczesne zaformowanie trzech próbek o wymiarach 4×4×16 cm każda. Następnie umieszczone w formie próbki zagęszczano na stoliku wibracyjnym. Po wyjęciu próbek z formy umieszczano je w basenie z wodą o temperaturze około 20°C do momentu przeprowadzenia stosownych badań.

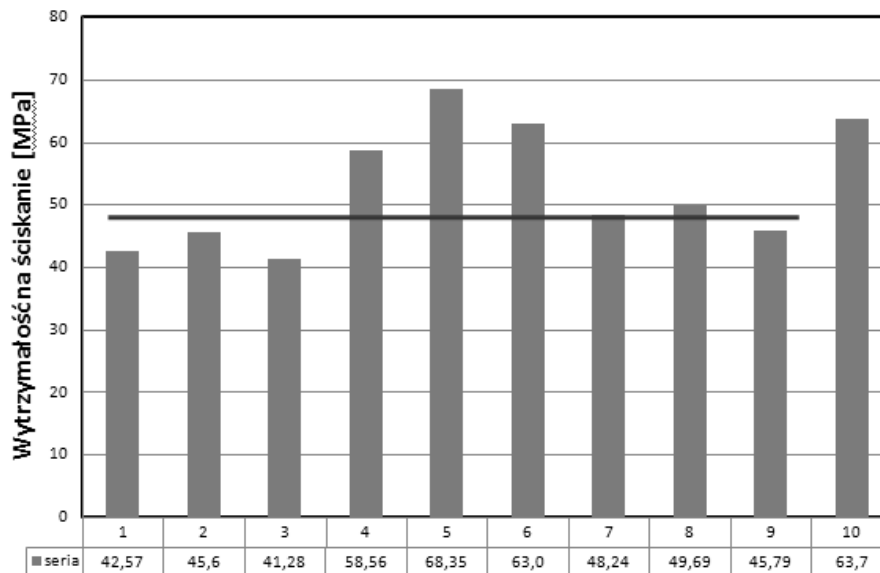
4. Wyniki badań i dyskusja

Najwyższe wyniki wytrzymałości na ściskanie uzyskano dla kompozytów, w skład których wchodził dodatek recyklingowy poddawany obróbce termicznej w 650°C (serie 4, 5, 6). Wielkości uzyskanych wytrzymałości w tych seriach dorównywały wynikom uzyskanym dla serii kontrolnej (10) pozbawionej dodatku recyklingowego, a w przypadku serii 6 odnotowano wzrost wytrzymałości o 7%. Według metody badawczej podanej w normie PN-EN 450-1:2009 badany materiał wykazuje właściwości pucolanowe, kiedy wytrzymałość na ściskanie kompozytu z 25% dodatkiem materiału w charakterze zamiennika cementu wynosi minimum 75% wytrzymałości próby świadka. W badanych kompozytach, wszystkie wyniki wytrzymałości dla serii, gdzie materiał recyklingowy poddawany był prażeniu w temperaturze 650°C i 750°C, wykazywał cechy pucolanowe. Tylko w seriach, gdzie obróbka termiczna materiału recyklingowego wynosiła 550°C (serie 1, 2, 3) właściwości pucolanowe nie zostały uaktywnione.

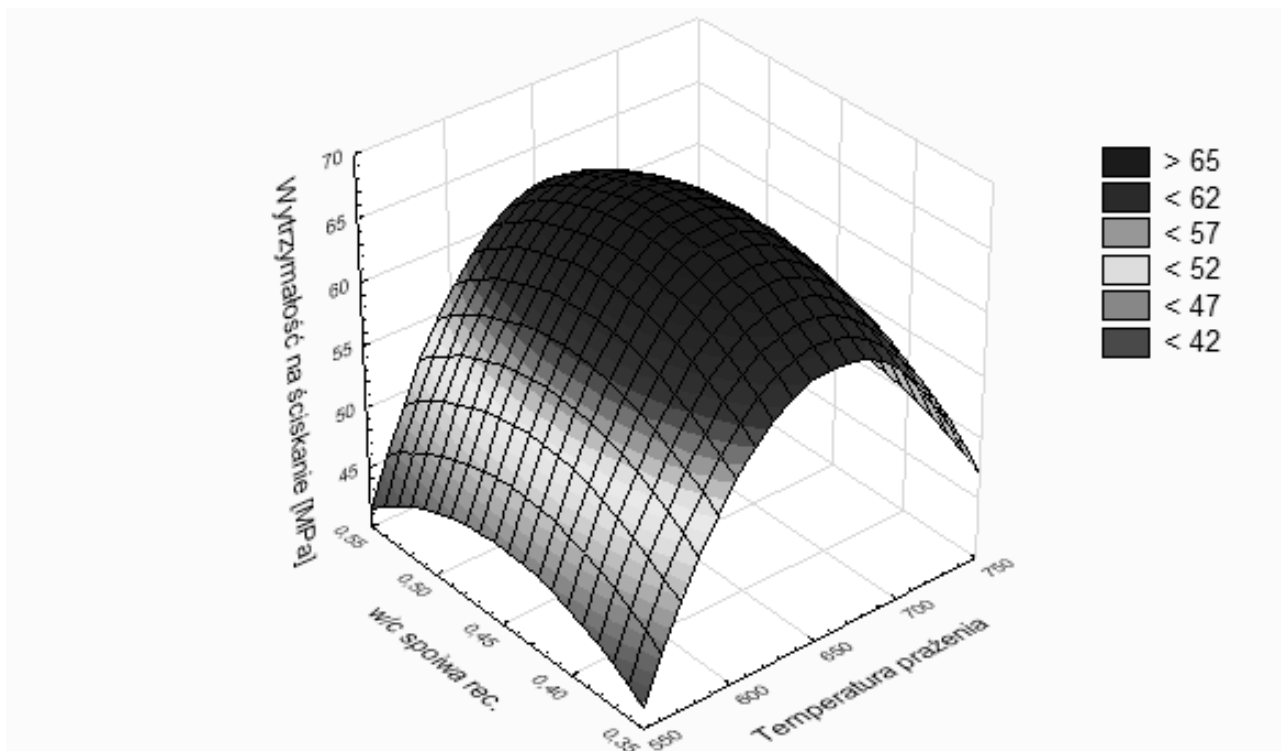
Przypuszcza się, iż w tym zakresie temperatur obecna jest znaczna ilość nierozłożonego portlandytu (Krzywobłocka-Laurów, 1998). Wyniki przedstawiono na rysunku 1.

W prowadzonym badaniu oprócz czynnika temperaturowego rozpatrywano także wpływ stosunku w/c spoiwa recyklingowego na osiąganą wytrzymałość na ściskanie kompozytów cementowych. Jak pokazuje rysunek 2 zmiany stosunku w/c przy towarzyszących im różnych temperaturach wyprażenia nie miały wpływu na wielkość wytrzymałości na ściskanie. Czynniki te można zatem uznać za nieistotny, lecz potwierdzeniem byłoby przeprowadzenie analizy statystycznej, którą pominięto w artykule.

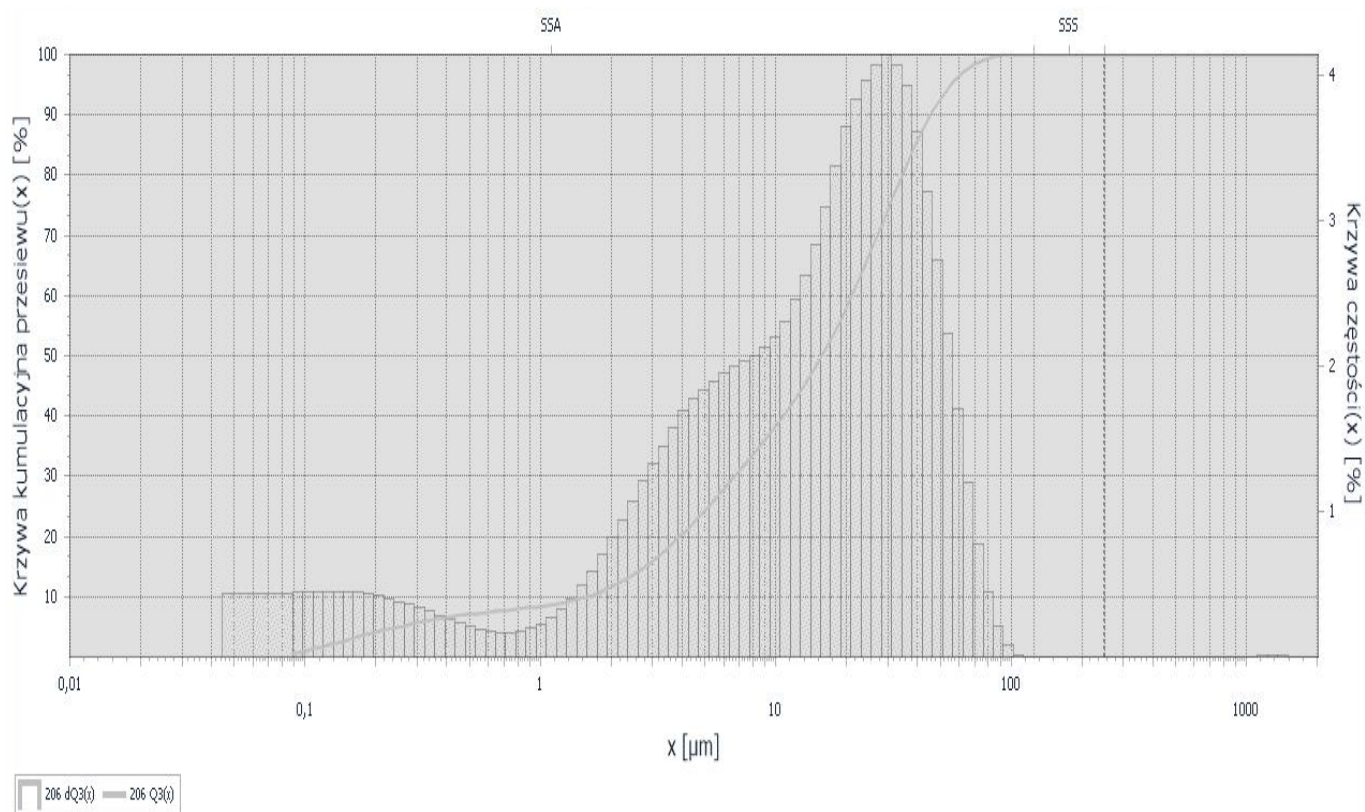
Na brak wpływu zmiennego stosunku w/c materiału recyklingowego na wytrzymałość na ściskanie kluczową rolę odgrywają wysokie temperatury jego obróbki oraz stopień zmielenia. Jak opisywano wcześniej, materiał recyklingowy po procesie prażenia, poddawany był domielaniu w młynku planetarnym do powierzchni właściwej zbliżonej do powierzchni cementu 42,5 R i to te procesy mogły mieć główny wpływ na taki efekt. Nie bez znaczenia jest także przyjęty zakres w/c (0,35-0,55), być może dopiero przy niższych stosunkach w/c niż 0,35 dałoby to bardziej widoczne efekty. Na rysunku 3 i 4 przedstawiono zawartość poszczególnych rozmiarów cząstek dla materiału recyklingowego prażonego w temperaturze 650°C, poddanemu domielaniu oraz cementu 42,5 R. Do tych badań materiał recyklingowy przesiano przez sito 0,063 mm i analizowano jedynie zakresy od 1 do 1000 µm. Z rysunku 3 i 4 wynika, że w cemencie maksymalny wymiar cząstek zawiera się w przedziale do 100 µm, natomiast w starym mielonym zaczynie występują także znaczne ilości cząstek o wymiarach powyżej 100 µm. Zróżnicowanie wymiarów cząstek starego zaczynu (jak udowadniają to wyniki wytrzymałościowe), nie pogarszają właściwości kompozytów.



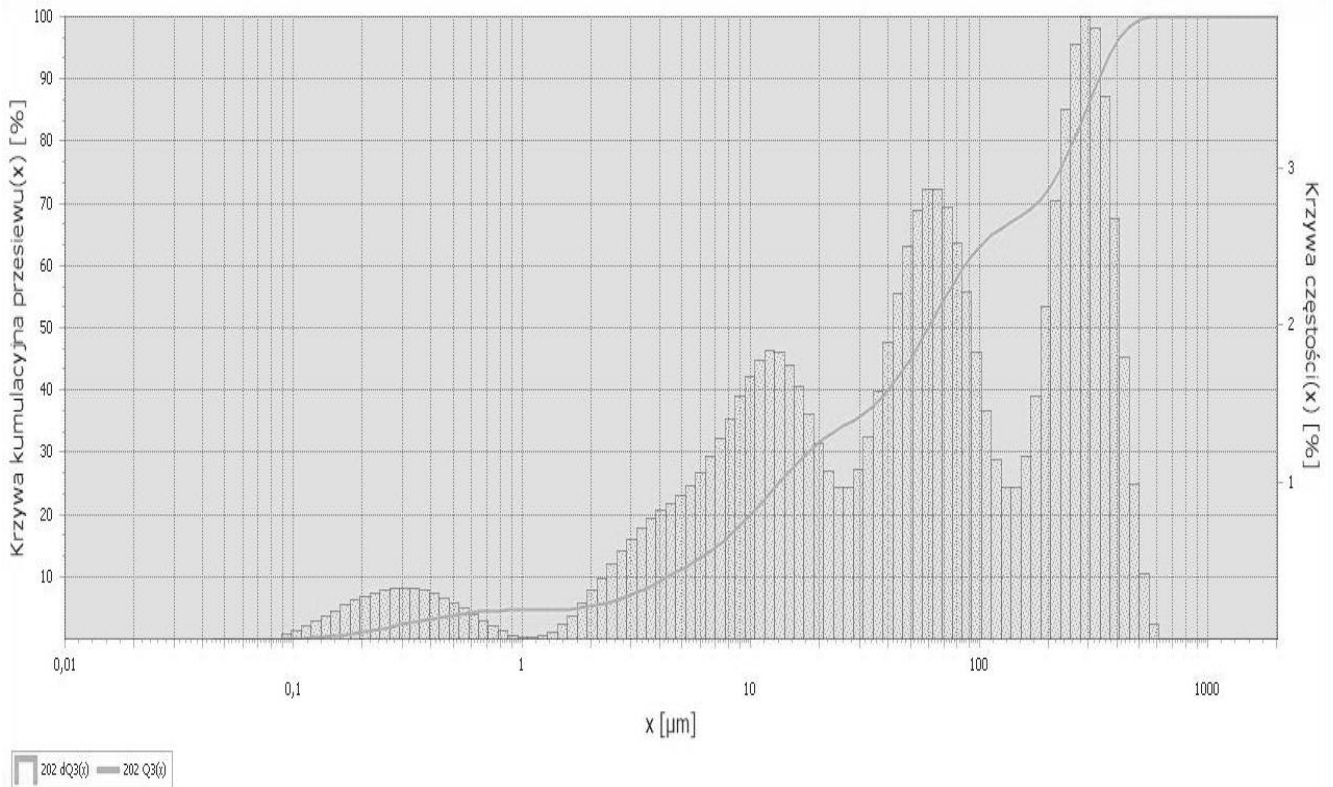
Rys. 1. Wyniki wytrzymałości na ściskanie kompozytów cementowych z dodatkiem spoiwa z recyklingu (linia pozioma przecina serie, w których materiał wykazywał właściwości pucolanowe)



Rys. 2. Wykres obrazujący zależności pomiędzy wpływem temperatury wartości stosunku w/c spoiwa recyklingowego na wielkość wytrzymałości na ściskanie



Rys. 3. Procentowa zawartość poszczególnych rozmiarów cząstek w CEM I 42,5R



Rys. 4. Procentowa zawartość poszczególnych rozmiarów cząstek w spoiwie recyklingowym (650°C)

5. Podsumowanie

Przedstawione wyniki badań potwierdziły, że po odpowiedniej obróbce badany materiał recyklingowy wykazuje właściwości pucolanowe w kompozytach cementowych, wpływając na zachowanie, a w niektórych przypadkach nawet poprawę wielkości wytrzymałości na ściskanie. Optymalne parametry wytrzymałościowe oraz najwyższy poziom wskaźnika aktywności pucolanowej uzyskano dla temperatury prażenia wynoszącej 650 stopni. Podwyższenie temperatury obróbki o 100 °C spowodowało obniżenie parametrów wytrzymałościowych i pucolanowych.

Na przydatność badanego materiału jako aktywnego dodatku istotny wpływ ma także stopień zmielenia zbliżony do powierzchni właściwej cementu, z którego stary zaczyn pochodzi.

W prowadzonych badaniach przyjęty zakres stosunku w/c materiału recyklingowego nie miał wpływu na właściwości wytrzymałościowe kompozytu. Jak dowodzą wyniki badań z powodzeniem można wykorzystywać tak wytworzony materiał recyklingowy jako alternatywę dla cementu, przyczyniając się tym samym do redukcji jego stosowania w przemyśle budowlanym.

Literatura

Bołtryk M., Kalinowska-Wichrowska K. (2016) The cement composites with modified recycled addition. *Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, Vol.7, No. 1, 7-10.

Duan Z.H., Poon C.S. (2014). Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars. *Materials and Design*, Vol. 58, 19-29.

Główny Urząd Statystyczny (2016). Ochrona Środowiska, Opracowania i informacje statystyczne. *Główny Urząd Statystyczny*, Warszawa, 220-224

Kalinowska-Wichrowska K. (2016). Właściwości kompozytów cementowych z recyklingowym dodatkiem mineralnym. W: *materiały konferencji „Energia, Ekologia, Etyka 2016”*, Wydawnictwo Instytutu Zrównoważonej Energetyki, Kraków 2016, 122-129.

Krzywobłocka-Laurów R. (1998). Badania składu fazowego betonu. Instrukcja 357/98. *Instytut Techniki Budowlanej*, Warszawa.

Stowarzyszenie Producentów Cementu, www.polskicement.pl, dostęp 10.11.2016.

APPLYING RECYCLING CEMENT BINDER AS AN EXAMPLE OF CO₂ REDUCTION

Abstract: The article shows of the scale of present cement production and its influence on carbon dioxide emission in the world and in Poland. In the era of sustainable development policy and EU directives, rightly reducing greenhouse gas emissions (including CO₂), a solution has been proposed that can to some extent contribute to reducing cement consumption by using a properly prepared recycled binder as its replacement. Some own research results were presented on the possibility of using waste concrete material in the form of properly processed cement as partial cement substitute in cement composites. Since large amount of contamination in the industrial secondary binder that could interfere with the homogeneity of the results, it was decided to obtain recycled binder under laboratory conditions. Mineral secondary material

was obtained in a multi-stage shredding process prepared for this purpose laboratory samples made of cement paste. The prepared material was analysed for pozzolanic activity. The obtained results show that under the conditions of treatment the recycler binder, the binder can be used successfully as a substitute for cement in cement composites, thus reducing the amount of cement needed and reaching the production process (burning clinker) – reducing CO₂ emissions.

Pracę wykonano w Politechnice Białostockiej w ramach realizacji pracy statutowej numer S/WBiIŚ/1/16.

THE TECHNICAL INFRASTRUCTURE DETAILS IN THE OLD TOWNS IN SPAIN

Dorota Anna KRAWCZYK^a, Antonio RODERO SERRANO^b,
Katarzyna GŁADYSZEWSKA-FIEDORUK^{a*}

^a Białystok University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Environmental Engineering,
Wiejska 45E, 15-351 Białystok, POLAND

^b University of Cordoba, School of Engineering Sciences of Belmez, Avenida de la Universidad s/n E-14240 Belmez-Cordoba, SPAIN

Abstract: Historic urban cities in most European countries are a very important evidence of the past life style. The cultural heritage of the last generations should be available to as much people as it is possible to give them information about the national history, art and culture. Nowadays people expectation for indoor climate and technical equipment are much higher than several years ago. It makes buildings' owners to modernize them, but in a case of the historical parts of towns it could be difficult from a technical point of view or the result would reduce the architectural quality of the object. The paper shows the selected examples of technical improvements done in Spain.

Key words: architecture, details, cultural heritage; architectural evaluation, technical progress.

1. Introduction

In Europe, historic buildings account for over 25% of all buildings (Moran et al., 2012 and 2014). The changes in society, the discovery of the world of technology and the development of civilization result in much higher expectations of people using buildings than it was a few hundred or even a few years ago. Currently, the standard equipment are cold and hot water systems, drainage, heating, and in countries with warmer climates an air conditioning system as well. One of the most important aims of historical urban modernization is to make changes in the most invisible way and not losing its historical appearances (Niedzielko, 2014). The problem of old buildings conservation was discussed in some papers. İpekoğlu (after Ascione et al., 2011 and 2014) noted the importance of the conservation together with cultural, social and economic aspects, because it is necessary to consider all factors affecting towns (or sections of towns) style. The law problems with conservation of the historic parts of English cities were described by Townshend and Penlebury (2014). They noted the role of experts working on conservation and public engagement to avoid mistakes. Wesółowski (2007) showed that in many towns the problem with gutters is obvious. Some pipes used to remove rain water from roofs are located in well seen places, because they are not adopted to building walls, their colors are different and they are often located too far from facades. In Celadyn's

(2012) opinion architectural details are nowadays more or less integrated with the building. Graham et al. (2000) and Graham (2002) noted that heritage conservation is defined within cultural and economic practice and exists in a real environment. Some authors paid attention to the economic factor (Elsorady, 2012; Teisdall and Heath, 1996) of old towns modernization. The conservation of historical buildings should be done without significantly deteriorating their conditions (Elsorady, 2012). In some papers authors mentioned (Çetina and İpekoğlu, 2013; İpekoğlu et al., 2007; İpekoğlu, 2006) that the climate of each locality was unique and had to be considered before the architectural design, new material use and restoration. Although Todorović (2012) presented optimization of mixed, natural and mechanical ventilation integrated with architectural modeling and HVAC systems operation offering an enormous potential for energy saving integrated renovation. But he also highlighted that it was impossible to reach sustainability without harmonious interdisciplinary interacting, without balance between materiality and spirituality, science and art, technology development and cultural and other human values improvement, without ethics of sustainability. However, historic buildings have a significant cultural value and they were built with technologies and materials that promote fabric breathability. It is necessary to ensure that the modernization from a set of proposed alterations are significantly higher than any actual or perceived reduction in loss of built heritage (Moran et al., 2014).

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: k.gladyszewska@pb.edu.pl

The study showed that important results in terms of reduction of the energy consumption for building cooling can be achieved even when the energy retrofit of heritage buildings is carried out using modern technologies that are able to improve the building envelope performance without altering the architectural and artistic merit of such buildings (Ascione et al., 2014).

This paper shows how the elements of modern infrastructure fit to historical parts of selected towns (Madrid and Cordoba) in Spain.

2. Historical parts of Cordoba and Madrid

Visiting Cordoba Old Town and Madrid Center it is possible to see a lot of technical elements added last years to improve buildings' users comfort. Unfortunately most of them is highly visible and they influence of a total view of the historical buildings. Because of the fact that climate is really warm the air conditional systems and ventilators were mounted quite often.

Walking along the old walls of the town, near the castle of the Christian Monarchs in Cordoba one can see big units used for an air conditioning system (Fig. 1). Figure 2 shows the ventilator on the tower of old Moorish castle built over the former Roman gate. Fortunately, this equipment is shown only to visitors of the museum and the view point on the top of the tower, although even for them the view is contrary to the atmosphere of this place. A facade as a whole is of course the most important part of the object, but it should be noted that all elements like architectural details and technical equipment also determinate the artistic expression of the building.

In Madrid some buildings' owners try to put outside units in places not available to most tourist, and only inhabitants of buildings located opposite them could see solar panels through their windows (Fig. 3-4), while the front facades still look stylish. They were renovated and their character was determined by the architecture details like balconies which gave the object look typical to the times it had been built. Moreover we could observe some television antennas and solar collectors on the roofs, which disturb the expression a little bit, but they are necessary nowadays and it could be difficult to find better place for them. Cities must change because of the technology progress but they also express their times, especially in the centers.



Fig. 1. The conditioning units on the castle's wall (photo K. Gładyszewska-Fiedoruk).



Fig. 2. The ventilator on the tower of old Moorish castle (photo K. Gładyszewska-Fiedoruk).



Fig. 3. The front façade of the hotel (photo D.A. Krawczyk).



Fig. 4. The back façade of the hotel (photo D.A. Krawczyk).

The conductors are also installed outside the buildings, but in some cases they are painted to the color of facade (Fig. 5) what makes them out of eyeshot. Unfortunately in most cases they look really strange on historical facades (Fig. 6).



Fig. 5. The conductors on the façade in Cordoba (photo K. Gładyszewska-Fiedoruk).



Fig. 6. The conductors and other pipes in Madrid (photo D.A. Krawczyk).

It should be noted that all manners of street sink basins and inspection chambers (of gas, water, telephone and electrical systems) located on the Old Town in Cordoba are integrated into the environment very well (Fig.7). The tourists walking the street often do not mention them at all and they could pay attention to the historical buildings, monuments and feel unique atmosphere of the historic space. They seemed to be architectural details, maybe not as unambiguous as in ancient times.



Fig. 7. The manners of street sink basins and inspection chambers (photo A. Rodero Serrano).

The street lamps are mostly the restored version of old ones and fit perfectly with the place where are located (Fig. 8-10).



Fig. 8. The illumination of plaza in Cordoba (photo D.A. Krawczyk).



Fig. 9. The street lamps in Cordoba (photo A. Rodero Serrano).



Fig. 10. The street lamps on the ancient bridge in Cordoba (photo K. Gładyszewska-Fiedoruk).

Only in the case of the Roman Bridge built in the 1-st century BC the illumination was changed during its renovation. Now all the lamps are not as high as before and remind light cubes staying on both sides of the bridge (Fig. 10). In fact they are not well seen during the day and at night they give a nice, stylish light that enables emphasize the beauty of the object.

The form and location of the garbage bins are more inconclusive. There are some very modern units on the streets of Cordoba and Madrit Center. The garbage bins which are installed in buildings walls (Fig. 11) look quite good, but the units staying on the street (Fig. 12) in authors' opinion interfere with the historical atmosphere of place.



Fig. 11. The garbage bins in Cordoba (photo K. Gładyszewska-Fiedoruk).



Fig. 12. The garbage bins in Cordoba (photo K. Gładyszewska-Fiedoruk).

3. Conclusion

During visits in the historical parts of Spain cities we can see a huge attention of designers and contractors for corporation between modern equipment which is necessary for people living or visiting these places. Some of the elements are based on the forms and color of the facade of the building and the interior of the area. The others could be seen only after approaching the building or sidewalk. Unfortunately there are also some places where administrators or owners forgot about the importance of consistency of quality of the building and its surroundings. The introduction of new media technologies need not disturb a historical and individual character of the objects if the places want to stay well worth seeing for new generations.

References

- Ascione F., Bianco N., De Masi R.F., de' Rossi F., Vanoli G.P. (2014). Energy retrofit of an educational building in the ancient center of Benevento. Feasibility study of energy savings and respect of the historical value. *Energy and Buildings*, Vol. 95, 182-193.
- Ascione F., De Rossi F., Vanoli G.P. (2011). Energy retrofit of historical building: theoretical and experimental investigation for modelling of reliable performance scenarios. *Energy and Buildings*, Vol. 43, 1925-1936.

- Çetina F., İpekoğlu B. (2013). Impact of transparency in the design of protective structures for conservation of archaeological remains. *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 14, 21-24.
- Celadyn W. (2012). Architectural detail and the contemporary design imperatives. *Czasopismo Techniczne. Architektura*, R-109, Z.5-A/2012, 66-76. (in Polish)
- Elsorady D.A. (2012). Heritage conservation in Rosetta (Rashid): A tool for community improvement and development. *Cities*, Vol. 29, 379-388.
- Graham B., Ashworth G., Tunbridge G. (2000). A geography of heritage – Power, culture and economy. *Arnold*, London.
- Graham B. (2002). Heritage as knowledge: Capital or culture? *Urban Studies*, Vol. 39 (5-6), 1003-1017.
- İpekoğlu B. (2006). An architectural evaluation method for conservation of traditional dwellings. *Building and Environment*, Vol. 41, 386-394.
- İpekoğlu B., Boke H., Cizer O. (2007). Assessment of material use in relation to climate in historical buildings. *Building and Environment*, Vol. 42, 970-978.
- Moran F., Natarajan S., Nikolopoulou M. (2012). Developing a database of energy use for historic dwellings in Bath, UK. *Energy and Buildings*, Vol. 55, 218-226.
- Moran F., Blight T., Natarajan S., Shea A. (2014). The use of Passive House Planning Package to reduce energy use and CO2 emissions in historic dwellings. *Energy and Buildings*, Vol. 75, 216-227.
- Niedzielko J. (2014). Ład przestrzeni miejskiej w kontekście rozwiązań wentylacyjnych i energii solarnej. Współczesne uwarunkowania gospodarowania przestrzenią – szansa i zagrożenia dla zrównoważonego rozwoju. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*, Warszawa, 105-116.
- Teisdall S., Oc T., Heath T. (1996). Revitalizing historic urban districts.: *Architectural Press*, Oxford.
- Todorović M.S. (2012). BPS, energy efficiency and renewable energy sources for buildings greening and zero energy cities planning: Harmony and ethics of sustainability. *Energy and Buildings*, Vol. 48, 180-189.
- Townshend T, Pendlebury J. (1999). Public participation and the conservation of historic areas: case-studies from the North-east of England. *Journal of Urban Design*, Vol. 4, No. 3, 313-31.
- Wesołowski Ł. (2007). Elements of surface draining system – esthetical architectural detail in use of building technology. *Czasopismo Techniczne. Architektura*, R-104, Z.4-A/2007, 191-198. (in Polish)

Acknowledgements

This scientific project was financed within the framework of science research funds at Białystok University of Technology S/WBIIS/4/2014.

The research was conducted under the cooperation program between Białystok University of Technology and School of Engineering Sciences of Belmez, University of Córdoba for years 2015-2020 (The possibility of the renewable energy sources usage in the context of improving energy efficiency and air quality in buildings and civil constructions). Virtual and Intensive Course Developing Practical Skills of Future Engineers (VIPSKILLS) Erasmus+, Number of the Grant Agreement 2016-1-PL01-KA203-026152.

NOŚNOŚĆ NA ŚCINANIE BELEK WYKONANYCH Z WŁÓKNOBETONU

Joanna STACHNIEWICZ, Marta KOSIOR-KAZBERUK, Julita KRASSOWSKA*

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

Streszczenie: W pracy analizowano wpływ zbrojenia rozproszonego na nośność na ścinanie elementów żelbetonowych. Do badań wybrano trzy rodzaje włókien stalowych o zróżnicowanej geometrii i kształcie. Na podstawie *fib* Model Code 2010 oznaczono wytrzymałość resztkową włóknobetonu na rozciąganie przy zginaniu, którą wykorzystano w obliczeniach teoretycznej nośności na ścinanie. Obliczenia te wykonanych na podstawie dwóch procedur obliczeniowych: *fib* Model Code 2010 i RILEM TC 162-TDF. Stwierdzono, że cechy włókien stalowych, takie jak geometria, a także sposób formowania powierzchni i zakończeń, które decydują o przyczepności włókna do matrycy cementowej, mają wpływ na nośność na ścinanie elementu zginanego. Zastosowane procedury obliczeniowe dają nieznacznie różniące się wyniki oceny nośności na ścinanie badanych elementów żelbetonowych.

Słowa kluczowe: włóknobeton, włókna stalowe, nośność na ścinanie, wytrzymałość resztkowa na rozciąganie przy zginaniu, procedury obliczeniowe.

1. Wprowadzenie

Popularność włókien jako zbrojenia rozproszonego w betonie w ostatnich latach stale rośnie. Wzrost zainteresowania zarówno technologów betonu, jak i konstruktorów stosowaniem włókien związany jest z rozwojem badań eksperymentalnych, które potwierdzają korzystny wpływ różnego typu włókien na właściwości betonu cementowego (Domański i Czkwianianc, 2006; Głodkowska i Kobaka, 2013; Khaloo i in., 2014). Włókna stosowane jako zbrojenie rozproszone mogą być wykonane z materiałów, takich jak: stal, szkło, tworzywo sztuczne, bazalt, itd. Wprowadzenie tego rodzaju dodatków zmienia właściwości mieszanki betonowej i stwardniałego betonu. Szeroki opis badań cech włóknobetonów można znaleźć, między innymi, w pracach Błaszczyskiego i Przybylskiej-Fałek (2012), Lee i Jacobsena (2011), Topçu i Canbaza (2007), Fischera i Li (2007).

W przypadku betonu konstrukcyjnego obecnie najczęściej stosowanym dodatkiem są włókna stalowe, ponieważ ich obecność powoduje zmianę charakteru zachowania elementu betonowego pod obciążeniem z kruchego na quasi-plastyczne (Michels i in., 2013; Farhat i in., 2007). W porównaniu do betonu zwykłego, beton z włóknami charakteryzuje się większą wytrzymałością na rozciąganie przy zginaniu, często również na ściskanie oraz ścinanie, a także zwiększoną odpornością zmęczeniową i udarność. Poprawa właściwości wytrzymałościowych betonu przy rozciąganiu zależy od właściwego zakotwienia zbrojenia

rozproszonego w matrycy cementowej.

Prace badawcze nad zastosowaniem betonu z dodatkiem włókien stalowych w elementach konstrukcyjnych rozpoczęły się w latach sześćdziesiątych XX wieku (Romualdi i Mandel, 1964). W efekcie badań powstały propozycje procedur i standardów określających metody badań oraz obliczeń konstrukcji wykonanych z włóknobetonów, między innymi, takie jak RILEM TC162-TDF (2003) i *fib* Model Code 2010 (Ajdukiewicz i Walraven, 2014). Projektowanie konstrukcji z włóknobetonu opiera się głównie na wykorzystaniu wytrzymałości resztkowej po zarysowaniu, zapewnionej przez zbrojenie rozproszone (Kamiński i in., 2014). Włókna mogą być stosowane do poprawy zachowania konstrukcji w stanie granicznym nośności lub do poprawy warunków użytkowalności. W stanie granicznym nośności dodatek włókien stalowych może zastąpić częściowo lub całkowicie tradycyjne zbrojenie na rozciąganie lub ścinanie (Chunxiang i Patnaikuni, 1999; Dihn i in., 2010). Jednakże, zagadnienia inżynierii materiałowej związane z zastosowaniem włóknobetonów w elementach konstrukcyjnych są nadal niedostatecznie rozpoznane, co utrudnia rozpowszechnienie metod projektowania uwzględniających obecność zbrojenia rozproszonego w betonie.

Celem pracy była ocena wpływu różnego typu włókien stalowych na nośność elementu żelbetonowego na ścinanie. Wykonano badania doświadczalne w celu określenia wytrzymałości resztkowej na rozciąganie betonów z dodatkiem włókien. Wyznaczone wartości wytrzymałości resztkowej posłużyły do obliczenia

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: j.krassowska@pb.edu.pl

ności na ścinanie belki żelbetowej, według procedur zaproponowanych w *fib Model Code 2010* (Ajdukiewicz i Walraven, 2014) oraz RILEM TC162-TDF (2003).

2. Badania doświadczalne betonów zawierających włókna stalowe

2.1. Materiały i sposób przygotowania próbek

Do wykonania elementów próbnych zastosowano cement portlandzki CEM I 42,5. Zawartość cementu we wszystkich recepturach była stała i wynosiła 416 kg/m³. Wartość wskaźnika w/c była równa 0,40. Jako kruszywo stosowano mieszaninę piasku o uziarnieniu do 2 mm i naturalnego kruszywa grubego o ziarnach do 4 mm. Frakcja ziarnowa nie większa niż 2 mm stanowiła 51%, a frakcja 2-4 mm – 49% stosu okruszowego. Superplastyfikator na bazie polikarboksylatów, stosowany w celu prawidłowego rozprowadzenia włókien w mieszance, dozowano wraz z wodą zarobową w ilości 0,8% masy cementu. Zawartość włókien wynosiła 1% objętościowo (78 kg/m³). Zbrojeniem rozproszonym zastąpiono objętościowo część kruszywa. Porównawczo badano również właściwości mechaniczne betonu bez dodatku włókien. Zastosowane trzy rodzaje włókien stalowych, dostępne na krajowym rynku, opisano w tabeli 1.

Poszczególne serie badanych betonów w tabeli 1 oznaczono jak: WS0 – mieszanka bez dodatku włókien, WS60 – mieszanka z dodatkiem włókien gładkich o odwrotnym haczykowatym zakończeniu i długości 60 mm, WS50 – mieszanka z dodatkiem włókien gładkich o haczykowatym zakończeniu i długości 50 mm, WSA50 – mieszanka z dodatkiem włókien karbowanych o haczykowatych zakończeniach i długości 50 mm. Wszystkie typy włókien miały średnicę $d = 1,0$ mm.

Wykonanie mieszanki polegało na wstępnym wymieszaniu składników suchych z włóknami, a następnie wprowadzeniu wody zarobowej z domieszką

superplastyfikatora. Mieszankę układano w formach w taki sposób, aby zachować równomierne i przestrzenne ukierunkowanie włókien w całej objętości próbki. Następnie, próbki zagęszczano na stole wibracyjnym przez około 10 sekund. Próbki zabezpieczono przed odparowywaniem wody, a po 24 h od wykonania, rozformowano. Elementy próbne były przechowywane w wodzie o temperaturze 18 ± 2 °C do czasu badania.

2.2. Metody badań

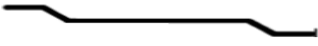
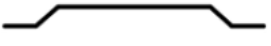

– Badania właściwości mechanicznych betonów z włóknami

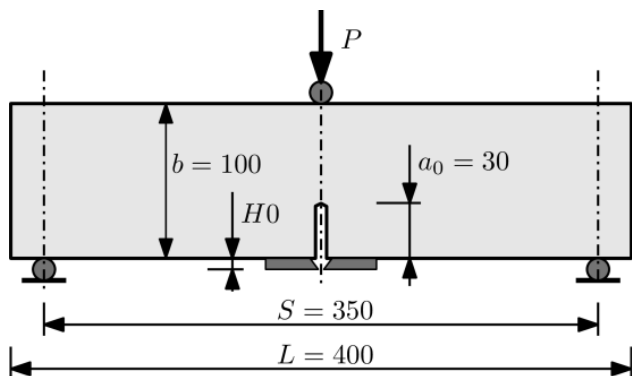
Badanie wytrzymałości betonu na ściskanie wykonano zgodnie z normą PN-EN 12390-3:2011 *Badania betonu - Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań*, wykorzystując próbki sześciennie o boku 100 mm. Każda seria liczyła 6 próbek. Moduł sprężystości podłużnej oznaczono zgodnie z normą PN-EN 12390-13:2014 *Badania betonu - Część 13: Wyznaczanie siecznego modułu sprężystości przy ściskaniu*, stosując próbki walcowe o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm. Każda seria liczyła 3 próbki.

– Badanie wytrzymałości resztkowej na rozciąganie przy zginaniu

Podstawą do wyznaczenia resztkowej wytrzymałości betonu na rozciąganie jest wykres obciążenia P w funkcji rozwarcia wylotu szczeliny pierwotnej CMOD (*Crack Mouth Opening Displacement*), uzyskany w rezultacie obciążania belki ze szczeliną pierwotną, w warunkach trójpunktowego zginania, jak pokazano na rysunku 1. Wykorzystano elementy próbne o wymiarach 100×100×400 mm. Szczelina pierwotna, wykonywana poprzez nacięcie za pomocą piły diamentowej, miała kształt wąskiego karbu typu U o głębokości 30 mm i szerokości 3 mm. Nacięcie wykonywano w dniu poprzedzającym realizację pomiarów.

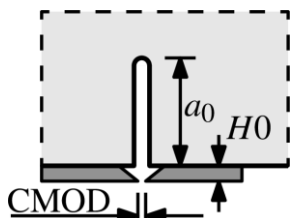
Tab. 1. Zestawienie typów włókien użytych do badań doświadczalnych

Oznaczenie mieszanki betonowej	Rodzaj włókien	Smukłość $A = l / d$	Kształt
WS0	Bez włókien	–	–
WS60	Włókna gładkie o odwrotnym haczykowym zakończeniu	60	
WS50	Włókna gładkie o haczykowym zakończeniu	50	
WSA50	Włókna karbowane o haczykowym zakończeniu	50	



Rys. 1. Wymiary w mm i sposób obciążenia elementu próbnego, według wymagań *fib* Model Code 2010 (Kosior-Kazberuk, 2013)

Konstrukcja stanowiska badawczego zapewniała warunki ustabilizowanego niszczenia próbek. Szerokość rozwarcia wylotu szczeliny pierwotnej mierzono za pomocą ekstensometru blaszkowego mocowanego za pomocą ostrzy stalowych o grubości 5 mm (rys. 2). W trakcie pomiaru rejestrowano w sposób ciągły zmiany siły obciążającej P w funkcji $CMOD$, zgodnie z ogólnymi wymaganiami *fib* Model Code 2010 (Ajdukiewicz i Walraven, 2014).



Rys. 2. Sposób pomiaru szerokości wylotu szczeliny pierwotnej $CMOD$ (Kosior-Kazberuk, 2013)

2.3. Wyniki badania właściwości mechanicznych betonów

W tabeli 2 przedstawiono średnie wartości wytrzymałości na ściskanie i modułu sprężystości podłużnej betonów po 28 dniach dojrzewania.

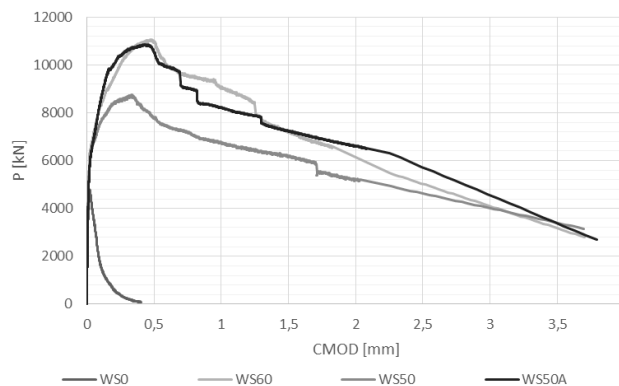
Dodatek włókien stalowych w przypadku wszystkich badanych włókno betonów spowodował wzrost wytrzymałości na ściskanie. Seria WS60 z dodatkiem włókien o długości 60 mm charakteryzowała się największym przyrostem wytrzymałości w stosunku do betonu kontrolnego. Badania modułu sprężystości podłużnej potwierdzają tezę, że włókna nie poprawiają istotnie sprężystości betonu.

Tab. 2. Średnie wartości wytrzymałości na ściskanie f_{ck} statycznego modułu sprężystości E betonów z włóknami w porównaniu do betonu kontrolnego bez włókien

Oznaczenie serii	f_{ck} [MPa]	Δf_{ck} [%]	E [MPa]	ΔE [%]
WS0	64,20	–	42044,30	–
WS60	78,30	22,01	42864,63	1,95
WS50	71,80	11,86	44391,28	5,58
WSA50	70,10	9,22	45226,48	7,57

2.4. Wyniki oznaczenia resztkowej wytrzymałości na rozciąganie włókno betonów

Przykładowe wykresy zależności $P-CMOD$, uzyskane w trakcie badań, przedstawiono na rysunku 3. Wykresy posłużyły do wyznaczenia resztkowej wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu betonów z włóknami zgodnie z wymaganiami *fib* Model Code 2010 (Ajdukiewicz i Walraven, 2014).



Rys. 3. Zależności $P-CMOD$ dla betonów z włóknami i betonu kontrolnego

Największe wartości siły niszczącej P zanotowano w przypadku betonów oznaczonych WS60 i WSA50. Geometria i sposób formowania powierzchni oraz zakończeń włókien miały również wpływ na kształt wykresu w zakresie pokrytycznym. Resztkową wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu $f_{R,j}$ określa się według wzoru:

$$f_{R,j} = \frac{3P_j l}{2bh_{sp}^2} \quad (1)$$

gdzie: P_j jest obciążeniem odpowiadającym $CMOD = CMOD_j$ w N, przy czym: $j = 1$: $CMOD_1 = 0,5$ mm; $j = 2$: $CMOD_2 = 1,5$ mm; $j = 3$: $CMOD_3 = 2,5$ mm; $j = 4$: $CMOD_4 = 3,5$ mm, l jest rozpiętością belki, b jest szerokością belki, a h_{sp} jest odległością między górnym końcem nacięcia, a górną krawędzią belki.

W tabeli 3 zestawiono obliczone wartości wytrzymałości resztkowej na rozciąganie przy zginaniu betonów z dodatkiem włókien.

Tab. 3. Średnia wytrzymałość resztkowa na rozciąganie przy zginaniu próbki z dodatkiem włókien

Parametr	Jednostka	WS 60	WS50	WSA50
<i>CMOD</i> ₁ = 0,5 mm				
<i>P</i> ₁	kN	10,38	7,03	10,31
<i>f</i> _{<i>R</i>,1}	N/mm ²	11,12	7,52	11,04
<i>CMOD</i> ₂ = 1,5 mm				
<i>P</i> ₂	kN	5,87	5,72	7,04
<i>f</i> _{<i>R</i>,2}	N/mm ²	6,29	6,13	7,55
<i>CMOD</i> ₃ = 2,5 mm				
<i>P</i> ₃	kN	4,30	4,55	5,05
<i>f</i> _{<i>R</i>,3}	N/mm ²	4,61	4,85	5,41
<i>CMOD</i> ₄ = 3,5 mm				
<i>P</i> ₄	kN	2,80	3,45	3,45
<i>f</i> _{<i>R</i>,4}	N/mm ²	3,00	3,70	3,70

Analiza wykresów zależności *P-CMOD* (rys. 3), podczas próby zginania elementów betonowych z dodatkiem włókien stalowych, wykazała, że powstanie pierwszej rysy nie prowadzi do nagłego zniszczenia elementu. Zarysowania w elemencie betonowym z włóknami pojawiają się przy większym obciążeniu w porównaniu do betonu bez włókien. Wraz z rozwojem rysy krytycznej naprężenia rozciągające zostają przejęte przez włókna. Kolejno powstające zarysowania w betonie prowadzą do dalszego odkształcania się elementu, ale nie do całkowitego zniszczenia.

Największą wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu wykazały próbki z dodatkiem włókien gładkich o długości 60 mm (WS60) oraz z dodatkiem karbowanych włókien o długości 50 mm (WSA50). Zwiększona wytrzymałość betonu mogła wynikać z dobrej przyczepności (włókna karbowane), smukłości (włókna o długości 60 mm) i kształtu włókien (odwrotne haczykowe zakończenia).

2.3. Klasyfikacja włóknobetonów według *fib Model Code 2010*

W celu sklasyfikowania zgodnie z *fib Model Code 2010* (Ajdukiewicz i Walraven, 2014) wytrzymałości włóknobetonów założono ich liniowo-sprężyste zachowanie po zarysowaniu. Analizie poddano charakterystyczne wartości wytrzymałości resztkowej na zginanie, ponieważ są one istotne dla warunków nośności *f*_{*R*3*k*}, jak i użytkowości *f*_{*R*1*k*}.

Do zastosowań konstrukcyjnych projektant musi sprecyzować klasę wytrzymałości resztkowej, stosunek *f*_{*R*3*k*} / *f*_{*R*1*k*} oraz rodzaj włókien. Klasyfikację próbek na podstawie wyników przeprowadzonych badań przedstawiono w tabeli 4.

Badane betony serii WS60 i WSA50 zaliczono do klasy „11a”, co oznacza, że jego resztkowa wytrzymałość *f*_{*R*1*k*} zawiera się w przedziale od 10 do 11 MPa, a stosunek *f*_{*R*3*k*} / *f*_{*R*1*k*} w przedziale od 0,5 do 0,7. Serię WS50 zaliczono do klasy „8a”, co oznacza, że resztkowa wytrzymałość betonu *f*_{*R*1*k*} zawiera się w przedziale od 7 do 8 MPa, a stosunek *f*_{*R*3*k*} / *f*_{*R*1*k*} w przedziale od 0,5 do 0,7.

Na podstawie kształtu otrzymanych zależności *P-CMOD* (rys. 3) można stwierdzić, że mamy do czynienia ze związkami konstytutywnym dla włóknobetonu po zarysowaniu, odpowiadającym modelowi liniowemu z osłabieniem po zarysowaniu. Model liniowy określany jest: resztkową wytrzymałością w stanie użytkowości *f*_{*F*1*s*} i graniczną resztkową wytrzymałością na rozciąganie przy zginaniu *f*_{*F*1*u*}. Są one definiowane za pomocą wartości resztkowych wytrzymałości na rozciąganie opisanych wzorami:

$$f_{F1u} = 0,45 f_{R1} \quad (2)$$

$$f_{F1u} = f_{F1s} - \frac{w_u}{CMOD_2} (f_{F1s} - 0,5 f_{R2} + 0,2 f_{R1}) \geq 0 \quad (3)$$

gdzie *w_u* jest maksymalną szerokością rysy akceptowaną w projektowaniu konstrukcyjnym i wynosi 1,5 mm.

Wytrzymałości, których wartości podano w tabeli 5 pozwalają na wyznaczenie nośności na zginanie i ścinanie elementów z dodatkiem włókien.

Tab. 4. Klasyfikacja włóknobetonów

Oznaczenie serii	Uśredniona wytrzymałość resztkowa <i>f</i> _{<i>R</i>1<i>k</i>} [MPa]	Oznaczenie wytrzymałości	Stosunek <i>f</i> _{<i>R</i>3<i>k</i>} / <i>f</i> _{<i>R</i>1<i>k</i>}
WS0	–	–	–
WS60	11,12	11	a
WS50	7,53	8	a
WSA50	11,04	11	a

Tab. 5. Graniczna resztkowa wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu i resztkowa wytrzymałość w stanie użytkowości

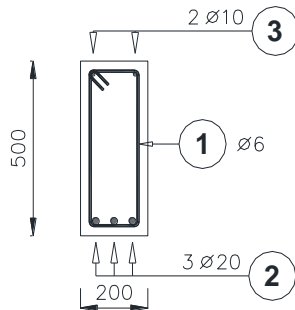
Parametr	Oznaczenie serii		
Resztkowa wytrzymałość według <i>fib Model Code 2010</i>	WS60	WS50	WSA50
Resztkowa wytrzymałość w stanie użytkowości <i>f</i> _{<i>F</i>1<i>s</i>} [MPa]	5,003	3,389	4,969
Graniczna resztkowa wytrzymałość <i>f</i> _{<i>F</i>1<i>u</i>} [MPa]	2,049	1,914	2,286

3. Obliczenie nośności belki z włóknobetonu na ścinanie

3.1. Założenia do obliczeń belek z betonu z dodatkiem włókien stalowych

Aby ocenić wpływ obecności włókien na nośność na ścinanie wykonano obliczenia belki żelbetowej ze zbrojeniem podłużnym i zbrojeniem rozproszonym w postaci włókien. Porównawczo obliczono nośność na ścinanie belki żelbetowej z betonu zwykłego, uwzględniając zbrojenie podłużne. Przyjęto belkę o długości $l_{eff} = 5,70$ m oraz przekroju poprzecznym 200×500 mm. Schemat zbrojenia pokazano na rysunku 4. Przyjęto obliczeniowy moment zginający $M_{sd} = 130,84$ kNm oraz obliczeniową siłę poprzeczną $V_{Ed} = 91,82$ kN, o wartościach ustalonych na podstawie zestawienia obciążeń dla belki stropowej w budynku magazynowym, zakładając obciążenie stałe $g = 12,716$ kNm i obciążenie zmienne $q = 19,50$ kN.

Obliczenia nośności na ścinanie wykonano według dwóch procedur: *fib Model Code 2010* (Ajdukiewicz i Walraven, 2014) i RILEM TC-162TDF (2003). W obliczeniach nie uwzględniano zbrojenia poprzecznego w formie strzemion.



Rys. 4. Rozmieszczenie zbrojenia podłużnego w przekroju poprzecznym belki

3.2. Obliczenia nośności na ścinanie belki żelbetowej bez zbrojenia rozproszonego według Eurokodu 2

Obliczeniowa siła poprzeczna przenoszona przez element z betonu zwykłego (WS0) bez zbrojenia na ścinanie wynosi:

$$V_{Rd,c} = \left[c_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_L \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d = 79,24 \text{ kN} \quad (4)$$

gdzie: d jest wysokością użyteczną przekroju, $d = 8$ cm, b_w jest najmniejszą szerokością strefy ścinania w mm, $b_w = 12$ cm, f_{ck} jest wytrzymałością charakterystyczną betonu na ściskanie w MPa, a k jest współczynnikiem wyznaczanym z zależności (wartość d w mm):

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0$$

ρ_L jest stopniem zbrojenia podłużnego:

$$\rho_L = \frac{A_{sL}}{b_w \cdot d} \leq 0,02$$

A_{sL} jest polem przekroju zbrojenia rozciąganego, $A_{sL} = 1,01$ cm², σ_{cp} jest naprężeniem normalnym w przekroju elementu:

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} \leq 0,2 \cdot f_{cd}$$

N_{Ed} jest siłą podłużną, $N_{Ed} = 0$, A_c jest całkowitym polem przekroju betonu, f_{cd} jest wytrzymałością obliczeniową przekroju na ściskanie w MPa, a $c_{Rd,c}$ współczynnikiem określany ze wzoru:

$$c_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c}$$

3.3. Obliczenia nośności belki fibrobetonowej ze zbrojeniem podłużnym według fib Model Code 2010

Nośność belki (tab. 6) na ścinanie oblicza się według wzoru:

$$V_{Rd,f} = \left\{ \frac{0,18}{\gamma_c} k \left[100 \rho_L \left(1 + 7,5 \frac{f_{Fruk}}{f_{ctk}} \right) f_{ck} \right]^{\frac{1}{3}} + \sigma_{cp} \right\} b_w d \quad (5)$$

gdzie: γ_c jest częściowym współczynnikiem bezpieczeństwa dla betonu bez włókien, według *fib Model Code 2010*, $\gamma_c = 1,4$, k jest czynnikiem uwzględniającym efekt skali, d jest wysokością efektywną przekroju w mm, ρ_L jest stopniem zbrojenia podłużnego, f_{Fruk} jest wartością charakterystyczną resztkowej wytrzymałości F_{RC} na rozciąganie, przy założeniu $w_u = 1,5$ mm; f_{ctk} jest wartością charakterystyczną wytrzymałości na rozciąganie betonu bez włókien w MPa, f_{ck} jest wartością charakterystyczną wytrzymałości betonu na ściskanie w MPa, przy czym $\sigma_{cp} = N_{ed} A_c < 0,2 f_{cd}$ jest średnim naprężeniem działającym na przekrój betonowy A_c przy sile podłużnej N_{ed} wskutek obciążenia, a b_w jest najmniejszą szerokością przekroju w strefie rozciąganej w mm.

Tab. 6. Obliczeniowa nośność na ścinanie elementu ze zbrojeniem podłużnym, bez zbrojenia poprzecznego według *fib Model Code 2010*

V _{Rd,F} [kN]		
WS60	WS50	WSA50
129,88	124,00	128,81

Obliczeniowa nośność na ścinanie, $V_{Rd,F}$, powinna być większa od minimalnej nośności zbrojenia na ścinanie $V_{Rd,Fmin}$. Wyniki obliczeń tej wielkości według wzorów (6) i (7) zamieszczono w tabeli 7.

$$V_{Rd,Fmin} = (v_{min} + 0,15 \sigma_{cp}) b_w d \quad (6)$$

$$v_{\min} = 0,035k^{\frac{3}{2}}f_{ck}^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Tab. 7. Minimalna nośność na ścinanie belki fibrobetonowej

$V_{Rd,Fmin}$ [kN]		
WS60	WS50	WSA50
60,91	58,32	57,63

3.4. Obliczenia nośności belki fibrobetonowej ze zbrojeniem podłużnym według RILEM TC 162-TDF

Zalecenia metody według RILEM TC 162-TDF (2003) są oparte na założeniach obliczeniowych nośności na ścinanie opisanych w normie projektowania konstrukcji betonowych EC2 - PN-EN 1992-1-1:2008. Eurokod 2 - Projektowanie konstrukcji z betonu - Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków. Metoda ta zakłada, że zdolność do przenoszenia siły ścinającej (V_{Rd}) jest sumą trzech składników: nośności elementu betonowego (V_{cd}), wpływu strzemion (V_{wd}) oraz wpływu włókien (V_{fd}) (Kamiński i in., 2014). Decydującą wartością jest $f_{R,4}$, która reprezentuje resztkowe naprężenia rozciągające przy zginaniu, wyznaczone podczas badania trójpunktowego zginania belki ze szczeliną pierwotną.

Nośności na ścinanie betonu V_{Rcd} oblicza się według wzoru (4), biorąc pod uwagę wyznaczone właściwości wytrzymałościowe włókno-betonów. Wyniki obliczeń nośności na ścinanie elementu betonowego według RILEM TC 162-TDF (2003) zamieszczono w tabeli 8.

Tab. 8. Obliczeniowe wartości nośności elementu betonowego na ścinanie V_{cd}

V_{cd} [kN]		
WS60	WS50	WSA50
78,83	76,58	75,97

Obliczenie wartości V_{fd} , uwzględniającej wpływ włókien wykonuje się według wzoru (8):

$$V_{fd} = k_f k_l \tau_{fd} b_w d \quad (8)$$

w którym:

$$k_f = 1 + n \left(\frac{h_f}{b_w} \right) \left(\frac{h_f}{d} \right) \leq 1,5 \quad (9)$$

$$k_l = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \quad (10)$$

$$\tau_{fd} = 0,12 f_{R,4} \quad (11)$$

gdzie: k_f jest współczynnikiem uwzględniającym kształt przekroju, $k_f = 1$, dla przekroju prostokątnego belki, $k_l = k$ jest współczynnikiem uwzględniającym wysokość przekroju, a τ_{fd} jest obliczeniową wytrzymałością

na ścinanie włókno-betonu w MPa.

Obliczeniowe wartości wytrzymałości włókno-betonów na ścinanie podano w tabeli 9, wartości nośności belki z uwagi na obecność włókien w betonie – w tabeli 10, a całkowitą obliczeniową nośność na ścinanie elementu z włókno-betonu ze zbrojeniem podłużnym – w tabeli 11.

Tab. 9. Obliczeniowa wytrzymałość na ścinanie włókno-betonu

τ_{fd} [MPa]		
WS60	WS50	WSA50
0,360	0,444	0,444

Tab. 10. Obliczeniowe nośności na ścinanie belki określone z uwagi na obecność włókien

V_{fd} [kN]		
WS60	WS50	WSA50
38,47	47,40	47,40

Obliczenie zdolności do przenoszenia siły ścinającej V_{Rd} (w rozważanym przypadku nie uwzględniono zbrojenia poprzecznego) określa wzór (12):

$$V_{Rd} = V_{cd} + V_{fd} \quad (12)$$

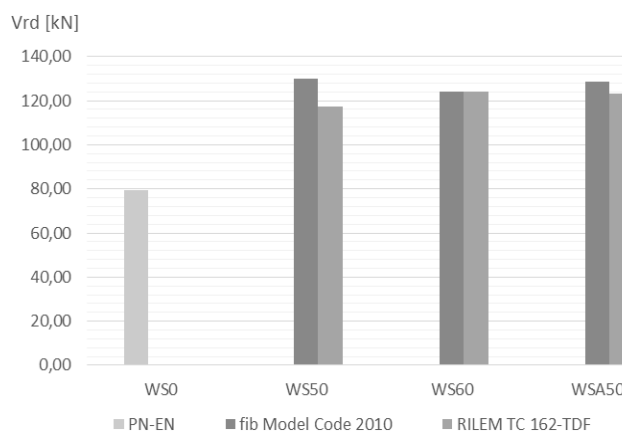
gdzie: V_{cd} jest nośnością elementu betonowego w kN, a V_{fd} jest nośnością z uwagi na obecność włókien w kN.

Tab. 11. Całkowita nośność na ścinanie belki włókno-betonowej bez zbrojenia poprzecznego

V_{Rd} [kN]		
WS60	WS50	WSA50
117,30	123,98	123,37

3.5. Porównanie wyników obliczeń nośności według obu procedur projektowych

Obliczeniowe wartości nośności na ścinanie belki z włókno-betonu przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Porównywanie wyników obliczania nośności na ścinanie belki włókno-betonowej według fib Model Code 2010 oraz RILEM TC 162-TDF

Przeprowadzone obliczenia nośności elementu żelbetowego ze zbrojeniem rozproszonym wskazują na niewielkie różnice w szacowaniu nośności na ścinanie otrzymane przy zastosowaniu omawianych procedur.

Procedura *fib Model Code 2010* jest obecnie najnowszą metodą projektowania elementów z włóknobetonu i daje największe wartości nośności obliczeniowej. Obliczenia według tej metody oparte są na wartości resztkowej wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu $f_{R,4}$. W odróżnieniu od *fib Model Code 2010*, metoda RILEM TC 162-TDF nie uwzględnia współczynników bezpieczeństwa, a decydującą wartością przy obliczaniu nośności jest resztkowa wytrzymałość $f_{R,4}$.

Na nośność na ścinanie belek wykonanych z włóknobetonu wpływają również parametry stosowanych włókien, takie jak: długość, smukłość oraz przyczepność włókien do matrycy cementowej. Z wykresu porównawczego (rys. 5) wynika, że według obu metod największą nośność na ścinanie ma belka wykonana z betonu z dodatkiem karbowanych włókien stalowych o długości 50 mm, średnicy 1,0 mm i haczykowatych zakończeniach (WSA50). Niewiele niższą nośnością na ścinanie wykazały się belki z betonu z dodatkiem gładkich włókien o długości 60 mm, średnicy 1,0 mm i haczykowatym zakończeniu (WS60). Najmniejsze wartości nośności uzyskano dla belek z dodatkiem gładkich włókien stalowych o długości 50 mm (WS50).

4. Wnioski

W pracy analizowano wpływ trzech rodzajów włókien stalowych na nośność na ścinanie elementów żelbetowych. Porównano dwie metody szacowania nośności belek włókno betonowych: *fib Model Code 2010* i RILEM TC 162-TDF, różniące się założeniami obliczeniowymi. Wskazano czynniki wpływające na nośność na ścinanie belek wzmocnionych włóknami.

Analiza wyników badań pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków:

- Dodatek włókien stalowych jako zbrojenia rozproszonego w elementach betonowych może prowadzić do redukcji zbrojenia poprzecznego. Dzięki temu, zmniejszony koszt i czas pracy związany z wykonaniem zbrojenia elementów strzemionami, można przeznaczyć na zwiększenie kosztów innych materiałów (włókien, składników betonu) w kierunku uzyskania pożądanych właściwości kompozytu.
- Badania przeprowadzono stosując jednakową zawartość włókien stalowych (1% objętościowo). Stwierdzono, że nośność betonowego elementu z dodatkiem włókien zależy od parametrów włókien, między innymi geometrii, kształtu i wykończenia ich powierzchni. W rozważanym przypadku najkorzystniejszy wpływ na nośność elementu betonowego miały karbowane włókna stalowe o długości 50 mm (WSA50). Natomiast najmniejszą nośność wykazał element z dodatkiem włókien gładkich (WS50). Istotny wpływ na wyniki miała także długość włókien. Na podstawie wyników badań

eksperymentalnych stwierdzono największą wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu betonów z dodatkiem najdłuższych włókien.

- Na podstawie analizy obliczeń przykładowego elementu żelbetowego z dodatkiem włókien stalowych zauważono różnice w wynikach obliczeń według analizowanych metod. Wykazano, iż wartości obliczone według RILEM TC 162-TDF mogą się różnić od *fib Model Code 2010*, ponieważ metoda ta nie uwzględnia współczynników bezpieczeństwa, a decydującą wartością we wzorze jest resztkowa wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu elementu z fibrobetonu $f_{R,4}$. Natomiast *fib Model Code 2010* zakłada inne wartości częściowego współczynnika bezpieczeństwa γ_c , a obliczenia oparte są na tej samej wartości resztkowej wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu $f_{R,4}$. Metoda *fib Model Code 2010* daje nieco większe wartości nośności na ścinanie belek z fibrobetonu niż procedura według RILEM TC 162-TDF.

Literatura

- Ajdukiewicz A., Walraven J. (2014). *Fib Model Code 2010*. Pre – norma Konstrukcji Betonowych, Tom 1 i 2. *SPC*, Kraków.
- Błaszczński T.Z., Przybylska-Fałek M. (2012). Fibrobeton jako materiał konstrukcyjny. *Izolacje*, Vol. 17, 44-50.
- Chuxiang Q., Patnaikuni I. (1999). Properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete beams in bending. *Cement&Concrete Composites*, Vol. 21, 73-81.
- Dinh H.H., Parra-Montesinos G.J., Wight J.K. (2010). Shear behavior of steel fiber-reinforced concrete beams without stirrup reinforcement. *ACI Structural Journal*, Vol. 107, 597-606.
- Domański T., Czkwianianc A. (2006). Wpływ zbrojenia rozproszonego na parametry mechaniczne betonu. *Przegląd Budowlany*, No. 6, 32-36.
- Farhat F.A., Nicolaides D., Kanellopoulos A., Karihaloo B.L. (2007). High performance fibre-reinforced cementitious composite (CARDIFRC) – Performance and application to retrofitting. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 74, 151-167.
- Fischer G., Li V.C. (2007). Effect of fiber reinforcement on the response of structural members. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 74, 258-272.
- Głodkowska W., Kobaka J. (2013). Modelling of properties and distribution of steel fibres within a fine aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 44, 645-653.
- Kamiński M., Bywalski C., Kaźmierowski M. (2014). Nośność na ścinanie belek wykonanych z fibrobetonu. *Materiały Budowlane*, No. 6, 76-77.
- Khaloo A., Raisi E.M., Hosseini P., Tahsiri H. (2014). Mechanical performance of self-compacting concrete reinforced with steel fibres. *Construction and Building Materials*, Vol. 51, 179-186.
- Kosior-Kazberuk M. (2013). *Ocena degradacji betonu konstrukcyjnego poddanego procesom niszczenia mrozowego*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok.
- Lee S.F., Jacobsen S. (2011). Study of interfacial microstructure, fracture energy, compressive energy and debonding load of steel fiber-reinforced mortar. *Materials and Structures*, Vol. 44, 1451-1465.

- Michels J., Christen R., Waldmann D. (2013). Experimental and numerical investigation on postcracking behavior of steel fiber reinforced concrete. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 98, 326-349.
- RILEM TC 162-TDF (2003). Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. *Materials and Structures*, Vol. 36, 560-567.
- Romualdi J., Mandel J. (1964). Tensile strength of concrete affected by uniformly distributed and closely spaced short lengths of wire reinforcement. *ACI Journal*, Proc. 61, 657-672.
- Topçu I.B., Canbaza M. (2007). Effect of different fibers on the mechanical properties of concrete containing fly ash. *Construction and Building Materials*, Vol. 44, 1486-1491.

SHEAR CAPACITY OF FIBRE REINFORCED CONCRETE BEAMS

Abstract: The influence of dispersed reinforcement on the shear capacity of reinforced concrete elements was analysed. Three types of steel fibres with different geometries and shapes were selected for the test. The residual flexural strength of concrete with fibres was determined based on the procedure of *fib* Model Code 2010. The residual strength was used in the calculation of the theoretical shear capacity according to two calculation procedures: *fib* Model Code 2010 and RILEM TC 162-TDF. It was found that the property characteristics of steel fibres, such as geometry, as well as the method of surface forming and endings that determine the adhesion of the fibres to the cement matrix, have an influence on the shear capacity of bending element. Applied computational procedures give slightly different results of the shear capacity evaluation calculated using both methods.

Abstracts Vol. 8 No. 1

Anna BERNATOWICZ

The high-tech, computer-based analysis of the fracture mechanics parameters

The use of the parameters of fracture mechanics presents a new way of designing in civil engineering. Traditional laboratory research provides lots of important information connected to cracks and tension – concentration in loaded elements. On the other hand, tests are very time - consuming. Initial calculations by means of computer programmes allow to decrease amount of laboratory tests only to extreme minimum. The paper contains the overview of the most common computer programmes used for the analysis of parameters of fracture mechanics . Moreover, the own model of Brazilian test in computer programme called Robot Structural Analysis was created. The model verification was made in Abaqus CAE. Concrete discs with straight or inclined crack in the middle, which simulates simple – or mixed – tension conditions in concrete element, were used as the subject of the study.

Błażej GAZE, Michał KAMIŃSKI, Agnieszka BIERNACIK, Arkadiusz DYJAKON

Analysis of economic and environmental solutions of heating systems of single-family building in the perspective of legislative changes

In Poland on 1 January 2017 a new legal regulation relating to the technical conditions for new buildings has begun to be obligatory. The paper aim is to analyze buildings designed according to old and new regulations. The study examined examples of three variants of solution of the heating system, domestic hot water and a source of electricity for a typical single-family home. The economic and environmental effects of presented solutions were compared. A simple payback period was determined for each solutions. The advantages and disadvantages of each solution were discussed.

Robert GRYGO, Marta KOSIOR–KAZBERUK

Reinforcing concrete structures with non-metallic composite frp bars

The paper presents the sorts, properties and designing methods for structures with FRP bars. The methods to determine the guaranteed tensile strength and guaranteed modulus of elasticity according to the guidelines for non-metallic reinforcement ACI 440.1R and CSA-S807 were presented, based on the analysis of strength parameters test results of GFRP bars and BFRP bars. As an example, the procedure of calculating the flexural capacity of structure reinforced with FRP bars according to ACI 440.1R was discussed. The results of the mechanical properties tests of GFRP bars and BFRP bars were used for calculation.

Agata JABŁOŃSKA-TRYPUC, Elżbieta WOŁEJKO, Urszula WYDRO, Andrzej BUTAREWICZ

The application of the human cell culture in the studies of pesticides impact on the human organism

In order to provide the food supply for an increasing human population products protecting plants against viral diseases, bacterial, fungal, pests and preparations stimulating their growth and development, known as pesticides, are commonly used. The aim of the paper is to show the way of their actions and the impact they have on the human body at the cellular level. Currently, in vitro cultures of human cell lines are a common model for research in this field. Properly chosen for the experiment cell lines allow for the study of the absorption of various chemicals, including pesticides through the epithelium of the digestive system, respiratory system and skin. They also enable the study of the effects of pesticides on the basic parameters of oxidative stress and the functioning of the endocrine system at the molecular level.

Katarzyna KALINOWSKA-WICHROWSKA

Applying recycling cement binder as an example of CO₂ reduction

The article shows of the scale of present cement production and its influence on carbon dioxide emission in the world and in Poland. In the era of sustainable development policy and EU directives, rightly reducing greenhouse gas emissions (including CO₂), a solution has been proposed that can to some extent contribute to reducing cement consumption by using a properly prepared recycled binder as its replacement. Some own research results were presented on the possibility of using waste concrete material in the form of properly processed cement as partial cement substitute in cement composites. Since large amount of contamination in the industrial secondary binder that could interfere with the homogeneity of the results, it was decided to obtain recycled binder under laboratory conditions. Mineral secondary material was obtained in a multi-stage shredding process prepared for this purpose laboratory samples made of cement paste. The prepared material was analysed for pozzolanic activity. The obtained results show that under the conditions of treatment the recycler binder, the binder can be used successfully as a substitute for cement in cement composites, thus reducing the amount of cement needed and reaching the production process (burning clinker) – reducing CO₂ emissions.

Dorota Anna KRAWCZYK, Antonio RODERO SERRANO, Katarzyna GŁADYSZEWSKA-FIEDORUK

The technical infrastructure details in the old towns in Spain

Historic urban cities in most European countries are a very important evidence of the past life style. The cultural heritage of the last generations should be available to as much people as it is possible to give them information about the national history, art and culture. Nowadays people expectation for indoor climate and technical equipment are much higher than several years ago. It makes buildings' owners to modernize them, but in a case of the historical parts of towns it could be difficult from a technical point of view or the result would reduce the architectural quality of the object. The paper shows the selected examples of technical improvements done in Spain.

Joanna STACHNIEWICZ, Marta KOSIOR-KAZBERUK, Julita KRASSOWSKA

Shear capacity of fibre reinforced concrete beams

The influence of dispersed reinforcement on the shear capacity of reinforced concrete elements was analysed. Three types of steel fibres with different geometries and shapes were selected for the test. The residual flexural strength of concrete with fibres was determined based on the procedure of *fib* Model Code 2010. The residual strength was used in the calculation of the theoretical shear capacity according to two calculation procedures: *fib* Model Code 2010 and RILEM TC 162-TDF. It was found that the property characteristics of steel fibres, such as geometry, as well as the method of surface forming and endings that determine the adhesion of the fibres to the cement matrix, have an influence on the shear capacity of bending element. Applied computational procedures give slightly different results of the shear capacity evaluation calculated using both methods.