

## **Załącznik 2.**

Dr inż. Janusz Konkol  
Politechnika Rzeszowska  
Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury  
Katedra Inżynierii Materiałowej i Technologii Budownictwa  
Al. Powstańców Warszawy 12  
35-959 Rzeszów

# **Autoreferat**

## Autoreferat

### 1. Imię i nazwisko

**Janusz Konkol**

### 2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe

|                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Stopień doktora | <p>Rok uzyskania: <b>2005</b><br/>Politechnika Rzeszowska, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska<br/>Dyscyplina: budownictwo<br/>Tytuł pracy doktorskiej: <b>Zastosowanie analizy struktury do oceny właściwości betonów</b> (rozprawa obroniona z wyróżnieniem nadanym przez Radę Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Rzeszowskiej)<br/>Promotor: prof. dr hab. inż. Grzegorz Prokopski<br/>Recenzenci:<br/>prof. dr hab. inż. Lech Czarnecki<br/>prof. dr hab. inż. Leszek Wojnar<br/>– Indywidualna Nagroda Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego za rozprawę doktorską,<br/>– I miejsce w konkursie na najlepszą pracę doktorską pod patronatem Polskiego Towarzystwa Statystycznego przygotowaną z zastosowaniem narzędzi statystyki i analizy danych zawartych w programach z rodziny STATISTICA</p> |
| Tytuł magistra  | <p>Rok uzyskania: <b>1997</b><br/>Politechnika Rzeszowska, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska<br/>Kierunek: budownictwo<br/>Tytuł pracy magisterskiej: <b>Stateczność zboczy w ujęciu komputerowym</b> (praca obroniona z wyróżnieniem)<br/>Promotor: prof. dr hab. inż. Andrzej Zieliński, mgr inż. Irena Świeboda<br/>– Nagroda Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji za pracę dyplomową</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

### **3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych**

|                  |                                                                                                                                                            |
|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>1996-1997</b> | <b>asystent stażysta</b> , Zakład Inżynierii Materiałowej i Technologii Budownictwa, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Rzeszowska, |
| <b>1997-2005</b> | <b>asystent</b> , Katedra Inżynierii Materiałowej i Technologii Budownictwa, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Rzeszowska,         |
| <b>od 2005</b>   | <b>adiunkt</b> , Zakład Inżynierii Materiałowej i Technologii Budownictwa, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Rzeszowska.           |

Od 1 września 2009 r. do 30 czerwca 2014 r. **asystent ds. sprawozdawczości, monitoringu i promocji** projektu „Zwiększenie liczby absolwentów na kierunku budownictwo, inżynieria środowiska oraz ochrona środowiska”.

### **4. Wskazane osiągnięcia wynikające z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz.882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311)**

#### **a) tytuł osiągnięcia naukowego**

Monografia pt.: „Struktura i właściwości kompozytów cementowych modyfikowanych metakaolinitem”.

#### **b) autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, recenzenci wydawniczy**

Podstawą do ubiegania się przeze mnie o uzyskanie stopnia doktora habilitowanego nauk technicznych w dyscyplinie budownictwo jest monografia (100% udziału własnego):

**Janusz Konkol: Struktura i właściwości kompozytów cementowych modyfikowanych metakaolinitem.**

**Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2016.**

**ISBN 978-83-7934-103-0,**

**Recenzenci wydawniczy: prof. dr hab. inż. Zbigniew Giergiczny**

**prof. dr hab. inż. Józef Jasiczak**

w której zebrałem i rozszerzyłem wyniki badań opublikowanych w następujących artykułach (spis prac w porządku chronologicznym):

1. G. Prokopski, **J. Konkol**: The fractal analysis of the fracture surface of concretes made from different coarse aggregates. *Computers and Concrete*, 2005, 2, (3), 239-248 (wydawca: TECHNO-PRESS, South Korea).  
IF = 0,0 (2005), IF = 0,813 (2016), IF = 0,742 (IF pięcioletni).  
Artykuł ukazał się po 30 marca 2005 roku (po uzyskaniu stopnia doktora).  
Punktacja MNiSW 20 pkt (2016).
2. **J. Konkol**, G. Prokopski: Liczba linii profilowych niezbędna do oceny chropowatości przełomów betonowych. *Inżynieria Materiałowa*, 2006, 4, 835-839 (wydawca: Wydawnictwo Czasopism i Książek Technicznych SIGMA-NOT, Warszawa).  
Punktacja MNiSW 13 pkt (2016).
3. **J. Konkol**, G. Prokopski: The necessary number of profile lines for the analysis of concrete fracture surfaces. *Structural Engineering and Mechanics*, 2007, 25, (5), 565-576 (wydawca: TECHNO-PRESS, South Korea).  
IF = 0,361 (2007), IF = 1,118 (2016), IF = 0,993 (IF pięcioletni).  
Punktacja MNiSW 20 pkt (2016).
4. **J. Konkol**, G. Prokopski: Relationships of fractal dimension with mechanical and structural parameters of basalt concretes. *Brittle Matrix Composites 9*, 2009, 409-418 (wydawca: Woodhead Publishing Ltd., Cambridge and Institute of Fundamental Technological Research, Warszawa).  
Publikacja indeksowana w bazach Web of Science i Scopus.
5. **J. Konkol**, G. Prokopski: Morfologia przełomu oraz odporność na pękanie betonów modyfikowanych dodatkiem popiołu fluidalnego lub metakaolinitu. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, 2011, 58, 3/2011/III, 321-330 (wydawca: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów).  
Punktacja MNiSW 9 pkt\* (2016).
6. **J. Konkol**: Metakaolinit i popiół fluidalny jako alternatywne w stosunku do pyłów krzemionkowych dodatki mineralne do betonu. *Inżynieria i Budownictwo*, 2012, 9, 503-507 (wydawca: Fundacja PZITB Inżynieria i Budownictwo, Warszawa).  
Punktacja MNiSW 7 pkt (2016).
- 7/8. **J. Konkol**: Wpływ wieku betonów modyfikowanych dodatkiem metakaolinitu na ich wytrzymałość na ścislenie i odporność na pękanie. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, 2012, 59, 3/2012/III, 213-222 (wydawca: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów).  
Punktacja MNiSW 9 pkt\* (2016).  
Przedruk na prośbę redakcji w: **J. Konkol**: Wpływ wieku betonów modyfikowanych dodatkiem metakaolinitu na ich wytrzymałość. *Magazyn Autostrady*, 2013, 6, 52-58 (wydawca: Wydawnictwo ELAMED, Katowice).  
Czasopismo punktowane z listy B MNiSW.
9. **J. Konkol**: Wykorzystanie parametrów fraktalnych i stereologicznych do opisu odporności na pękanie betonów modyfikowanych wybranymi dodatkami typu II. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, 2012, 59, 3/2012/III, 223-232 (wydawca: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów).  
Punktacja MNiSW 9 pkt\* (2016).
10. **J. Konkol**: Wykorzystanie geometrii fraktalnej do określenia odporności na pękanie betonu modyfikowanego metakaolinitem. *Budownictwo i Architektura*, 2013, 12, (3), 177-184 (wydawca: Politechnika Lubelska, Lublin).  
Punktacja MNiSW 6 pkt (2016).

11. **J. Konkol**, G. Prokopski: Fraktalny opis powierzchni przełomu betonów cementowych. Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture JCEEA, Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury, 2014, XXXI, 61, 3/II/2014, 273-286 (wydawca: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów).  
Punktacja MNiSW 9 pkt (2016).
12. **J. Konkol**, G. Prokopski: The influence of the age of concretes with FBC fly ash or metakaolinite additives on their strength properties. Road and Bridges – Drogi i Mosty, 2014, 13, (1), 49-67 (wydawca: Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa).  
Punktacja MNiSW 11 pkt (2016).

\* Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury, Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture JCEEA jest kontynuacją Zeszytów Naukowych Politechniki Rzeszowskiej – Budownictwo i Inżynieria Środowiska. Punktację MNiSW w przypadku Zeszytów Naukowych Politechniki Rzeszowskiej – Budownictwo i Inżynieria Środowiska przyjęto jak dla Czasopisma Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture JCEEA.

Wyniki swoich badań przedstawionych w monografii prezentowałem także na konferencjach naukowych – **załącznik 3**. Wykaz opublikowanych prac naukowych, **pkt II L** - Wygłoszenie referatów na międzynarodowych i krajowych konferencjach tematycznych [7-9, 12, 13, 15] – numeracja zgodna z załącznikiem 3.



### **c) omówienie celu naukowego wymienionych prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania**

Przedstawiona do oceny monografia „Struktura i właściwości kompozytów cementowych modyfikowanych metakaolinitem” oparta na pracach [1-12] oraz rozszerzona i uzupełniona wynikami niepublikowanych badań dotyczy wielu oryginalnych aspektów związanych z badaniem i analizą właściwości betonów modyfikowanych metakaolinitem w aspekcie ich struktury.

Głównym składnikiem kompozytów o matrycy cementowej jest oczywiście cement. Poważnym problemem stale rosnącego zapotrzebowania na cement są niekorzystne działania na środowisko związane z procesem jego produkcji. W związku z tym obniżenie zapotrzebowania na cement jest działaniem koniecznym, a jednocześnie proekologicznym, przyjaznym środowisku i wpisującym się w idee zrównoważonego rozwoju w budownictwie. Wytyczany przez badaczy kierunek możliwych rozwiązań sprowadza się m. in. do wykorzystania materiałów, dodatków mogących stanowić częściowy substytut cementu. Najważniejsze wymagania stawiane takim dodatkom odnoszą się do wymagań samego kompozytu, w tym betonu. Są to przede wszystkim odpowiednia wytrzymałość i trwałość

betonu. Jednym z dodatków mogących spełnić te wymagania, a jednocześnie stanowić alternatywę dla szeroko rozpoznanego i powszechnie stosowanego pyłu krzemionkowego jest metakaolinit. Metakaolinit (MK) jako materiał o dużej aktywności pucolanowej wydaje się spełniać wiele wymogów, zarówno w zakresie właściwości i trwałości betonów modyfikowanych tym dodatkiem, jak i ochrony środowiska oraz względów ekonomicznych. Metakaolinit jest materiałem wytwarzanym w kontrolowanym procesie prażenia kaolinitu. Produkcja metakaolinitu w porównaniu z produkcją cementu wiąże się z mniejszą ilością przedostającego się do atmosfery CO<sub>2</sub>, również wytworzenie tony metakaolinitu wymaga zużycia mniejszej ilości energii [\*M44] (\*M – odnośnik do numeracji literatury cytowanej w monografii). Zastosowanie do betonu dodatku prażonego kaolinitu powoduje m. in. zwiększenie jego wytrzymałości, wzmocnienie przyczepności matrycy do ziaren kruszywa i stali zbrojeniowej oraz uszczelnienie mikrostruktury, co wpływa na poprawę odporności na czynniki agresywne oraz na trwałość betonu.

Ośrodki badawcze, które w ostatnich latach prowadzą intensywne badania dotyczące zastosowania minerałów ilastych, głównie kaolinitu jako dodatku do betonu i jego wpływu na właściwości i trwałość betonu, marginalizują, a wręcz pomijają istotne zagadnienie wpływu tego dodatku na odporność na pękanie betonów. Znaczenie badań odporności na pękanie jest niepodważalne, zwłaszcza w materiałach kompozytowych, takich jak beton, w którym występują różnego rodzaju nieciągłości mogące stać się miejscem inicjacji pęknięcia, a składniki struktury charakteryzują się zróżnicowanymi właściwościami, w tym różną podatnością na odkształcenia. Początki badań odporności na pękanie materiałów o matrycy cementowej sięgają 1928 roku [M314]. Mimo że struktura tych materiałów jest heterogeniczna i anizotropowa, podczas ich analizy przyjmuje się założenie, że są to materiały liniowo-sprężyste, homogeniczne, izotropowe i następuje propagacja tylko jednego pęknięcia. Kompozyty o matrycy cementowej nie spełniają żadnego z tych założeń. Mimo to na podstawie prowadzonych badań tych materiałów stwierdzono zgodność wyników doświadczeń z teorią [M296].

Pośrednio zagadnienie odporności na pękanie betonów zawierających w swym składzie metakaolinit poruszyli autorzy pracy [M364]. Badanie odporności na pękanie zawężono jednak do pojedynczych przypadków betonów o stałym stosunku woda/spoiwo i stałym dziesięcioprocentowym udziale metakaolinitu w odniesieniu do masy cementu. Uzyskane wyniki sugerują znaczny spadek odporności na pękanie betonu na skutek modyfikacji po 28 dniach dojrzewania (ponad 25%) i jej wzrost po 90 dniach. Znaczący jest także fakt, że wraz ze zmniejszeniem odporności na pękanie betonu modyfikowanego

metakaolinitem obserwowali oni również zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie tego betonu w stosunku do wytrzymałości na ściskanie betonu kontrolnego, czego nie potwierdzają inne liczne doniesienia literaturowe, w tym praca [M277] dotycząca badań przeprowadzonych z użyciem tego samego metakaolinitu handlowego co w pracy [M364].

Przeprowadzone przeze mnie badania własne [7/8, 12], prowadzone także w ramach dwóch grantów badawczych [M180, M302] (**załącznik 3., pkt II J**) oraz prezentowane na konferencjach (**załącznik 3., pkt II L** [7-9, 12, 13, 15]), nie potwierdzają zmniejszenia odporności na pękanie betonu na skutek wprowadzenia do jego składu dodatku metakaolinitu częściowo zastępującego cement zarówno po 28, 90, jak i 180 dniach dojrzewania betonu. Dodatkowo wykonane przeze mnie i prezentowane w monografii obserwacje SEM mikrostruktury stwardniałego zaczynu cementowego potwierdziły zarówno dobre połączenie ziaren metakaolinitu z produktami hydratacji cementu, jak i pozytywny wpływ modyfikacji betonu dodatkiem metakaolinitu na jakość styku kruszywo/stwardniały zaczyn cementowy (podrozdział 6.6.1 monografii).

W dotychczasowych publikacjach [5-10, 12] i wystąpieniach konferencyjnych (**załącznik 3., pkt II L** [7-9, 12, 13, 15]) prezentujących wyniki badań własnych poruszałem problematykę wpływu dodatku metakaolinitu na dobrze już rozpoznaną wytrzymałość na ściskanie betonu, a zwłaszcza odporność na pękanie betonu z metakaolinitem, opisaną krytycznym współczynnikiem intensywności naprężeń  $K_{Ic}^S$ . W przedkładanej do oceny monografii zagadnienie wpływu dodatku metakaolinitu, użytego jako częściowy substytut cementu, na odporność na pękanie betonu rozszerzyłem o analizę zależności obciążenie – odkształcenie (CMOD) oraz analizę wyników krytycznej długości efektywnej szczeliny  $a_c$  i krytycznego rozwarcia wierzchołka szczeliny CTOD<sub>c</sub>. Badania odporności na pękanie betonów według I modelu pękania (rozciąganie przy zginaniu) przeprowadziłem zgodnie z procedurą RILEM [M78]. Wykonane w tym zakresie analizy potwierdziły korzystny wpływ modyfikacji betonu dodatkiem metakaolinitu w ilości do 15% masy spoiwa, tj. 17,5% masy cementu (był to maksymalny przyjęty udział dodatku metakaolinitu, w badaniach określony jako zmienna – stosunek masy dodatku do masy spoiwa MK/s) na odporność na pękanie tego betonu (analizie poddałem betony o zmiennym stosunku woda/spoiwo od  $w/s = 0,35$  do  $w/s = 0,54$ ). Wykazana poprawa tej właściwości na skutek wprowadzenia do składu betonu dodatku metakaolinitu może się przyczynić m. in. do szerszego stosowania tego dodatku, zarówno w składzie kompozytów betonowych, jak i spoiw wiążących.

Przy programowaniu badań własnych, aby obniżyć koszty badań i nakłady czasowe (z zachowaniem jednak kryteriów realizowalności, informatywności i efektywności

przyjętego planu), wykorzystałem wiedzę merytoryczną i doświadczenie praktyczne w planowaniu eksperymentu, zdobyte w trakcie badań realizowanych w ramach dysertacji doktorskiej, uczestnictwa w programach europejskich i szkoleniach (załącznik 3., pkt III A), a także podczas współpracy z firmą StatSoft Polska (załącznik 3., pkt III E). Posiadana wiedza umożliwiła mi przeprowadzenie tak szeroko zakrojonego programu badań oraz zastosowanie metod i narzędzi statystycznych do analizy uzyskanych wyników i wnioskowania. Przyjęty plan umożliwił mi redukcję liczby punktów badawczych z 25 (plan pełny) do 9. W obu przypadkach przyjęto dwie zmienne niezależne oraz pięć wartości pośrednich każdej ze zmiennych niezależnych.

Na podstawie analizy zależności obciążenie – odkształcenie (CMOD) wykazałem, że wprowadzenie do betonu 8,5% dodatku metakaolinitu zastępującego cement wpływa na wzrost maksymalnych naprężeń rozciągających występujących w otoczeniu szczeliny oraz wzrost sztywności próbek betonowych po 28 dniach dojrzewania w porównaniu z próbkami z betonu niemodyfikowanego. Wzrost ten był tym większy, im niższy był stosunek woda/spoiwo.

Korzystny wpływ metakaolinitu na wartość krytycznego współczynnika intensywności naprężeń  $K_{Ic}^S$  stwierdziłem zarówno w przypadku betonów o najmniejszym przyjętym w badaniach stosunku woda/spoiwo  $w/s = 0,35$ , jak i dla betonów o największym  $w/s = 0,54$ . W przypadku betonów modyfikowanych metakaolinitem o  $w/s = 0,35$  zaobserwowałem w stosunku do betonów bez dodatku prawie 8% wzrost krytycznego współczynnika intensywności naprężeń  $K_{Ic}^S$  po 28 dniach dojrzewania i ponad 4% po 180 dniach dojrzewania. Po 90 dniach dojrzewania próbek nie stwierdziłem zmiany wartości krytycznego współczynnika intensywności naprężeń  $K_{Ic}^S$ . W przypadku betonów o największym stosunku  $w/s = 0,54$  dodatek 8,5% MK wpłynął na wzrost odporności na pękanie o ponad 7% po 28 dniach i ponad 8% po 180 dniach. Po 90 dniach, podobnie jak przy niskim stosunku  $w/s$ , nie stwierdziłem różnicy w wartościach krytycznego współczynnika intensywności naprężeń  $K_{Ic}^S$  między betonem modyfikowanym metakaolinitem a betonem bez dodatku.

Wzrost odporności na pękanie betonu na skutek zastosowania metakaolinitu należy upatrywać jako efekt synergii trzech zasadniczych mechanizmów: działania metakaolinitu jako wypełniacza (ziarna metakaolinitu są blisko dziesięciokrotnie mniejsze od ziaren cementu) – jest to działanie natychmiastowe, działania metakaolinitu jako przyspieszacza hydratacji cementu portlandzkiego (już w pierwszych 24 godzinach) oraz pucolanowej reakcji metakaolinitu z  $\text{Ca(OH)}_2$  będącym produktem hydratacji cementu portlandzkiego



(maksymalny efekt pucolanowy między 7. a 14. dniem) [M372]. Czynniki te powodują uszczelnienie mikrostruktury stwardniałego zaczynu cementowego oraz ograniczenie defektów nie tylko w mikrostrukturze stwardniałego zaczynu cementowego, lecz także na styku kruszywo/matryca cementowa. Badania wykazały wzrost mikrotwardości stwardniałego zaczynu cementowego, szczególnie warstwy przejściowej [M9]. Radykalna zmiana mikrostruktury stwardniałego zaczynu cementowego w strefie kontaktowej kruszywo – matryca cementowa i w jej pobliżu spowodowana zastosowaniem metakaolinitu wynika, oprócz wymienionych mechanizmów, także z ograniczenia w tej strefie dużych kryształów portlandytu i ich aglomeracji.

Otrzymane wyniki pozwoliły mi na osiągnięcie postawionych celów badawczych w aspekcie zarówno poznawczym, jak i utylitarnym. Zastosowanie teorii planowania eksperymentu i przyjęcie kompozycyjnego centralnego planu badań (dwuczynnikowy poliselekcyjno-rotalno-quasi-uniformalny (PS/DS-P:  $\lambda(\lambda^9)$ ) [M182, M289] z pięciowartościowymi wielkościami wejściowymi) umożliwiło mi opisanie uzyskanych zależności krytycznego współczynnika intensywności naprężeń  $K_{Ic}^S$  od zmiennych w planie badań, tj. stosunku woda/spoiwo  $w/s$  oraz stosunku masy dodatku metakaolinitu do masy spoiwa (cement + metakaolinit)  $MK/s - K_{Ic}^S = f(w/s, MK/s)$  zarówno po 28, jak i 180 dniach dojrzewania betonów (podrozdział 6.6.5 monografii). Opracowałem model regresji wielokrotnej umożliwiający przewidywanie odporności na pękanie betonu, opisanej krytycznym współczynnikiem intensywności naprężeń  $K_{Ic}^S$ , od 28. do 180. dnia dojrzewania, przyjmując wiek betonu jako dodatkową zmienną. Podobne analizy przeprowadziłem w przypadku wytrzymałości na ściskanie betonu modyfikowanego metakaolinitem (podrozdziały 7.1 i 7.2 monografii). Opracowane modele mogą być wykorzystane do celów inżynierskich, pozwalają bowiem na przewidywanie wybranych właściwości tych betonów, a tym samym na projektowanie betonów zawierających w swym składzie metakaolinit w aspekcie pożądaných właściwości.

Krytyczny współczynnik intensywności naprężeń  $K_{Ic}^S$  w porównaniu z pozostałymi miarami odporności na pękanie okazał się najbardziej czuły na zmiany w mikrostrukturze betonu wynikające z modyfikacji. Na podstawie analiz sformułowałem wniosek, o dużym znaczeniu praktycznym, którym jest wykazanie, że przy uwzględnieniu rozrzutu wyników związanego z dokładnością zastosowanych metod laboratoryjnych różnice w uzyskiwanych wartościach, zwłaszcza krytycznego współczynnika intensywności naprężeń  $K_{Ic}^S$  w odniesieniu do różnych betonów, są statystycznie istotne. Potwierdza to możliwość

wykorzystywania badań odporności na pękanie oraz wykazuje wystarczającą czułość zastosowanych metod i możliwość wnioskowania na podstawie uzyskanych wyników.

Wzrostowi krytycznego współczynnika intensywności naprężeń  $K_{Ic}^S$  wraz z wiekiem betonu modyfikowanego metakaolinitem towarzyszył wzrost wytrzymałości na ściskanie tego betonu. Dokonane analizy wskazujące na istotną statystycznie liniową zależność między krytycznym współczynnikiem intensywności naprężeń  $K_{Ic}^S$  a wytrzymałością na ściskanie betonów modyfikowanych metakaolinitem wykazały jednak, że zależność między tymi właściwościami zmienia się w trakcie dojrzewania betonu. Stwierdziłem, że wraz z wiekiem betonu współczynnik kierunkowy prostej opisującej zależność  $K_{Ic}^S = f(f_c)$  zmniejszał się. Przyrost wartości krytycznego współczynnika intensywności naprężeń  $K_{Ic}^S$  po 180 dniach dojrzewania betonu był mniejszy niż po 28 dniach. Jednocześnie opracowałem model pozwalający na określenie wartości krytycznego współczynnika intensywności naprężeń  $K_{Ic}^S$  po danym okresie dojrzewania betonu przy znanej wytrzymałości na ściskanie tego betonu.

Celem poznawczym i aplikacyjnym moich badań było nie tylko *stworzenie modeli pozwalających na przewidywanie odporności na pękanie w zależności od wieku betonu*, lecz także *powiązanie odporności na pękanie betonu modyfikowanego metakaolinitem z jego strukturą, opisaną w sposób ilościowy z użyciem metod stereologicznych i fraktograficznych*, co prezentowałem m. in. w pracach [5, 9, 10], na wystąpieniach konferencyjnych i seminariach (**załącznik 3., pkt II L** [7, 8, 12, 13, 15]) oraz zebrałem i rozszerzyłem w monografii. Takie wielowątkowe podejście wymaga zastosowania odpowiednich metod typowych dla inżynierii materiałowej. Fraktalny charakter powierzchni przełomów zaczynów [M375] potwierdzono już kilka lat po zdefiniowaniu przez Mandelbrota pojęć „fraktal” i „wymiar fraktalny”, a w przypadku betonów dopiero w 1995 roku [M325]. W Polsce wykorzystanie badań fraktalnych do tego typu analiz należy do rzadkości, a publikacje w tym zakresie są związane przede wszystkim z nazwiskami profesorów A.M. Brandta, L. Czarneckiego, A. Garbacza i G. Prokopskiego.

Moja wieloletnia współpraca z prof. Grzegorzem Prokopskim przyczyniła się do kontynuacji badań fraktalnych betonów w zagadnieniach analizy morfologii powierzchni przełomu i powiązania jej z odpornością na pękanie betonów. Osiągane wyniki potwierdziły konieczność dalszego rozwoju tych badań oraz celowość naszych starań o stworzenie laboratorium wyposażonego w najnowocześniejszą aparaturę do badań chropowatości powierzchni przełomów betonów jak profilometr laserowy Talysurf CLI 1000 firmy Taylor Hobson do szybkiego bezstykowego pomiaru topografii powierzchni 3D wraz z oprogramowaniem TalyMap. Jednocześnie, wykorzystując nabyte umiejętności

programowania, stworzyłem pakiet profesjonalnych programów komputerowych do analizy morfologii powierzchni przełomów, w skład których wchodziły następujące programy: FRAKTAL\_Digit, FRAKTAL\_Wymiar2D i FRAKTAL\_Stereolog.

Program FRAKTAL\_Digit umożliwia automatyczne określenie kształtu dowolnej krzywej w postaci współrzędnych [M192]. W badaniach własnych program był zastosowany do określenia kształtu linii profilowych uzyskanych metodą replik gipsowych i techniki skanowania (monografia, podrozdział 10.4.1). Otrzymane dane o liniach profilowych importowane do programu FRAKTAL\_Wymiar2D pozwoliły na obliczenie ich wymiaru fraktalnego (metodą pudełkową, cięciwy lub wariogramu). Program FRAKTAL\_Wymiar2D pozwala także na analizę fraktalną dowolnych struktur 2D, w tym również w postaci map bitowych. Program FRAKTAL\_Stereolog, stanowiący profesjonalne narzędzie do analizy stereologicznej, został natomiast zastosowany do wyodrębnienia ze zglądu betonowego obrazu porów (krawędzi przekrojów porów) w celu ich analizy fraktalnej (**załącznik 3., pkt II A** [16] oraz **pkt II E** [35, 45, 53]).

W kwestii powiązania badań fraktalnych z odpornością na pękanie betonu i słuszność podejmowania takich analiz znamienne jest zdanie: „Wykorzystanie pojęcia wymiaru fraktalnego w analizie zachowania się materiałów (mechanika pękania), co przybliży niektóre zagadnienia naukowe do realiów” [M29, s. 19], które znalazło się w materiałach opracowanych przez członków Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN na specjalnym zebraniu komitetu w 2014 roku.

Określenie zależności między strukturą a właściwościami betonu umożliwia kształtowanie struktury betonu modyfikowanego dodatkiem metakaolinitu w celu osiągnięcia pożądanych właściwości i trwałości tego kompozytu przez odpowiedni dobór przyjętych zmiennych determinujących skład betonu. W przypadku badań własnych są to stosunek woda/spoiwo oraz udział dodatku metakaolinitu.

Prowadzone w trakcie prac związanych z doktoratem [M186] badania fraktalne i uzyskane w późniejszym czasie relacje przedstawione w pracach [1, 4] oraz (**załącznik 3., pkt II E** [18-20, 40, 47, 53]) skłoniły mnie do wykorzystania tego narzędzia także do analizy betonów modyfikowanych metakaolinitem. Analizie fraktalnej poddałem uzyskane w wyniku pękania powierzchni przełomów betonów, dokonując wydzielenia z tych powierzchni linii profilowych i obliczenia wymiaru fraktalnego tych linii. W tej części badań wykorzystałem profilometr laserowy (za którego obsługę jestem odpowiedzialny) oraz wiedzę w zakresie koniecznej liczby linii profilowych do oceny chropowatości przełomów betonowych [2, 3], (**załącznik 3., pkt II E** [36]). Wykonane analizy na podstawie wyników kilkuset linii

profilowych wydzielonych z powierzchni przełomów betonów pozwoliły na sformułowanie wniosku, na podstawie którego liczbę linii profilowych wydzielonych z powierzchni przełomu danego betonu można ograniczyć do 12. Wnioskowanie przeprowadziłem na podstawie obliczonej średniej wartości odchylenia standardowego oraz średniej wartości przedziału ufności wartości średniej, zakładając, że badana wielkość ma rozkład normalny o nieznannej wartości średniej i nieznanym odchyleniu standardowym populacji oraz że a priori dopuszczalny błąd oszacowania wartości średniej jest 1,4 razy większy od uzyskanego na podstawie badań przedziału ufności.

Celem naukowym moich prac wynikającym z zastosowania w badaniach metod i narzędzi właściwych dla geometrii fraktalnej było wskazanie przydatności stosowania metod i narzędzi geometrii fraktalnej w inżynierii materiałowej, inżynierii betonu do opisu morfologii powstających na skutek zniszczenia powierzchni przełomów betonów oraz wykazanie istnienia zależności między strukturą opisaną wymiarem fraktalnym a właściwościami betonu. Podobnie jak w przypadku współczynnika  $K_{Ic}^S$ , potwierdziłem wystarczającą czułość zastosowanych metod z uwzględnieniem ich dokładności i możliwość wnioskowania na podstawie uzyskanych wyników wymiaru fraktalnego  $D$ , a także stosując trzy metody obliczania wymiaru fraktalnego linii profilowych (metodę cięciwy  $D_C$ , pudełkową  $D_{BC}$  i obwiedni morfologicznych  $D_m$ ) uzyskałem takie same relacje między danym wymiarem fraktalnym  $D$  a przyjętymi w planie eksperymentu zmiennymi niezależnymi ( $w/s$ ,  $MK/s$ ). W miarę zmniejszania się stosunku woda/spoiwo i zwiększania udziału dodatku metakaolinitu wymiar fraktalny zmniejszał się. Redukcja wymiaru fraktalnego wskazuje na uzyskane w procesie pęknięcia powierzchni przełomów o mniejszym skomplikowaniu. Mniejsza chropowatość powierzchni przełomów betonów, a w konsekwencji mniejszy wymiar fraktalny, także wydzielonych z tych powierzchni linii profilowych, dotyczyła betonów o najlepszych właściwościach mechanicznych, m. in. krytycznego współczynnika intensywności naprężeń  $K_{Ic}^S$  i wytrzymałości na ściskanie  $f_c$ . Uzyskanie takiej korelacji nie jest zaskoczeniem, gdyż przy założeniu jednorodności materiału i braku defektów pęknięcie nastąpiłoby wzdłuż płaszczyzny o wymiarze fraktalnym i topologicznym równym 2, mniejszym niż wymiar fraktalny dowolnej powierzchni przełomu powstałej w wyniku pęknięcia niejednorodnego materiału. Powierzchnie przełomów betonów z metakaolinitem o większej chropowatości świadczą o występowaniu w tych betonach większej liczby defektów mikrostrukturalnych i/lub o lokalnych różnicach cech wytrzymałościowych wynikających z większej niejednorodności struktury betonu i mniejszych wartościach sił spójności kruszywo – stwardniały zaczyn cementowy.

Poza wymiarem fraktalnym obliczono także tradycyjnie stosowane do opisu morfologii powierzchni przełomu parametry fraktograficzne: współczynnik rozwinięcia linii profilowej  $R_L$  oraz współczynnik rozwinięcia powierzchni przełomu  $R_S$ . Dla tych wielkości uzyskałem zależności od zmiennych w planie badań, takie jak w przypadku wymiaru fraktalnego. Dodatkowo dla betonów modyfikowanych metakaolinitem sprecyzowałem zależność  $R_S = f(R_L)$ , która przedstawiona na tle propozycji innych autorów wskazuje na zgodność tej propozycji z rozwiązaniem podanym przez Gokhalea i Underwooda [M118] oraz Costera i Chermanta [M53] (podrozdział 10.4.1 monografii).

Z praktycznego punktu widzenia za istotny cel swoich badań uznałem także opracowanie procedury umożliwiającej określenie wymiaru fraktalnego opisującego morfologię powierzchni przełomu betonu modyfikowanego metakaolinitem, bez konieczności przeprowadzania badań niszczących. Prognozowanie wymiaru fraktalnego bez realizowania badań fraktalnych wymagających użycia specjalistycznego sprzętu i oprogramowania zapewne przyczyni się do szerszego stosowania tego rodzaju podejścia do opisu mikrostruktury betonów. Jednocześnie w świetle dotychczasowych dokonań pozwoli na dalszy rozwój prac ukierunkowanych na ustalenie czynników wpływających na proces pęknięcia i odpowiednie kształtowanie mikrostruktury betonu.

Jednym z efektów końcowych przeprowadzonych przeze mnie analiz było powiązanie morfologii powierzchni przełomów betonów modyfikowanych metakaolinitem z ich właściwościami. Opracowałem procedurę pozwalającą nie tylko na określenie wymiaru fraktalnego linii profilowej dla betonu o danym udziale zaczynu i danym udziale metakaolinitu, lecz także umożliwiającą obliczenie wartości krytycznego współczynnika intensywności naprężeń  $K_{Ic}^S$  dla tego betonu po 28 lub 180 dniach dojrzewania (podrozdział 10.9 monografii). Włączenie do analizy także wymiaru fraktalnego spowodowało poprawę predykcji krytycznego współczynnika intensywności naprężeń  $K_{Ic}^S$ . Błąd zaproponowanego przeze mnie podejścia oszacowania wartości współczynnika  $K_{Ic}^S$  na podstawie m. in. wartości wymiaru fraktalnego  $D$  w porównaniu z wartościami badanej  $K_{Ic}^S$  nie przekraczał 6% (bez względu na metodę określania wartości wymiaru fraktalnego  $D$ ), co jest wartością dużo mniejszą niż wartość wynikająca z procentowej różnicy między pojedynczym wynikiem badania a wartością średnią  $K_{Ic}^S$  danego betonu. Opisane w monografii podejście sprawdziło się również w przypadku stosowania do betonu innych dodatków typu II, jak pył krzemionkowy czy aktywowany mechanicznie popiół z kotłów o spalaniu fluidalnym [9, 10].

Ważnym zagadnieniem w moich badaniach i poruszonym w monografii jest wpływ poszczególnych faz w betonie na wartość wymiaru fraktalnego linii profilowej, a tym samym

powierzchni przełomu. Analizę przeprowadziłem, wyróżniając cztery typy pęknięć na analizowanych liniach profilowych: typ M (pęknięcie przechodzące wyłącznie przez matrycę cementową), typ PK (pęknięcie poziornowe od strony ziarna kruszywa grubego z ewentualnymi pozostałościami stwardniałego zaczynu cementowego), typ PM (pęknięcie poziornowe od strony matrycy cementowej) oraz typ WK (pęknięcie na wskroś przez ziarno kruszywa). Na podstawie wyników tej analizy wykazałem możliwość określania wymiaru fraktalnego linii profilowej jako wartości średnioważonej wymiarów fraktalnych, wyznaczonych dla wyróżnionych typów pęknięć z uwzględnieniem ich wag, tj. ich udziału na długości linii profilowej. Linie profilowe otrzymałem za pomocą profilometru laserowego z krokiem dyskretyzacji 1  $\mu\text{m}$ . Największy wymiar fraktalny obliczony metodą pudełkową  $D_{BC}$  i metodą obwiedni morfologicznych  $D_m$  uzyskałem dla linii profilowych przechodzących przez pęknięte na wskroś ziarna kruszywa grubego (typ pęknięcia WK). Najmniejsze wartości wymiaru fraktalnego otrzymano natomiast w przypadku linii profilowych przechodzących przez stwardniały zaczyn cementowy (typ pęknięcia M). Wymiar fraktalny linii profilowej poprowadzonej przez miejsca występowania odcisków poziornowych (typ pęknięcia PM) okazał się porównywalny z wymiarem fraktalnym pękniętej matrycy cementowej. Wymiar fraktalny linii profilowej przechodzącej przez powierzchnię ziarna kruszywa wyrwanego z matrycy cementowej (typ pęknięcia PK) okazał się nieznacznie mniejszy od wymiaru fraktalnego określonego dla powierzchni pękniętego na wskroś ziarna kruszywa. Co istotne, stwierdziłem różnice w wartościach wymiaru fraktalnego linii profilowej wydzielonej na powierzchni wyrwanego z matrycy ziarna kruszywa z ewentualnymi pozostałościami stwardniałego zaczynu cementowego w odniesieniu do wymiaru fraktalnego linii profilowej, znajdującej się w obszarze odcisku poziornowym w stwardniałym zaczynie. Wniosek ten może tłumaczyć m. in. duże rozrzuty w wymiarze fraktalnym dwóch dopełniających się powierzchni przełomu i wydzielonych z nich linii profilowych. Analiza fraktalna musi być zatem dokonywana na odpowiednio dużej liczbie linii profilowych [2, 3].

Jak wykazałem w monografii i w pracach m. in. [1, 4], (**załącznik 3., pkt II A** [14, 15] i **pkt II E** [19, 20, 47]) oraz jak prezentowałem na konferencjach (**załącznik 3., pkt II L** [7, 8, 12]), mniejsza chropowatość powierzchni przełomu, tj. mniejsza chropowatość i mniejszy wymiar fraktalny linii profilowych wydzielonych z tych powierzchni, koresponduje z betonami o większej wytrzymałości na ściskanie i odporności na pękanie. W przypadku tych betonów w porównaniu z betonami o mniejszej wytrzymałości bardziej licznie występują jednak pęknięcia na wskroś ziarna kruszywa grubego. Powodem większych rozrzutów wymiaru fraktalnego linii profilowej (wartości średniej) w przypadku takich powierzchni

przełomów może być zatem większy wymiar fraktalny linii profilowych przechodzących przez pęknięte ziarno kruszywa. Szczegółowa analiza chropowatości linii profilowych typu WK i M polegająca na rozdzieleniu rozważanych profili na składowe falistości i chropowatości wykazała, że cechą charakterystyczną linii profilowych i wyróżnionych z nich profili chropowatości jest większa całkowita wysokość profilu i profilu chropowatości w przypadku przejścia linii profilowej przez matrycę cementową niż poprowadzenia tej linii przez pęknięte ziarno kruszywa. Większa chropowatość linii profilowych typu WK w porównaniu z chropowatością linii profilowych typu M wynika z większej (w przypadku prezentowanych reprezentatywnych linii profilowych prawie dwukrotnie większej) średniej arytmetycznej długości fali na profilu chropowatości wydzielonego z linii profilowych typu WK. Ostatecznie wykazałem istotny (a jednocześnie zakłócający relację mniejsza chropowatość powierzchni przełomu – większa wytrzymałość betonu) wpływ ziaren kruszywa grubego w betonie na wartość wymiaru fraktalnego linii profilowej wydzielonej z powierzchni przełomu tego betonu. Wymiar fraktalny linii profilowych przechodzących przez pęknięte ziarna kruszywa jest od 6 do 13% większy od wymiaru fraktalnego linii profilowych przechodzących przez stwardniały zaczyn cementowy.

Wnioski z dokonanych analizy mają duże znaczenie praktyczne, gdyż uściślają wpływ poszczególnych faz w betonie na wartość wymiaru fraktalnego, jednocześnie wyjaśniając przyczyny znacznych rozrzutów wartości średniej tego wymiaru.

Koniecznym i dotąd niezrealizowanym celem w badaniach morfologii przełomów betonów jest dążenie nie tylko do opisu powstającej powierzchni przełomu i powiązania określonych dla tej powierzchni parametrów fraktograficznych (w tym wymiaru fraktalnego) ze składem i właściwościami betonu, lecz także stworzenie modelu pęknięcia betonu. Temu zagadnieniu poświęciłem obszerną część rozdziału 10. monografii. Zastosowanie do rozwiązania tego zadania podejścia typowego dla geometrii fraktalnej umożliwiło spełnienie ważnego założenia o nieograniczonej liczbie możliwych modelowych linii profilowych, spełniających jednak warunek niezmienności wymiaru fraktalnego. Każde bowiem pęknięcie, nawet w obrębie betonu o takim samym składzie, jest niepowtarzalne, jednak jak wykazałem w badaniach charakteryzuje się zbliżonym wymiarem fraktalnym. Zaproponowany model zweryfikowałem z rzeczywistymi liniami profilowymi, nie tylko na podstawie uzyskanych wartości wymiaru fraktalnego, lecz także oceny wizualnej, stosując własny program do tworzenia fraktalnej linii profilowej z wykorzystaniem założonego generatora (podrozdział 10.11 monografii). Do stworzenia modelowych fraktalnych linii profilowych napisałem program w języku Visual Basic, wykorzystując formalny język wprowadzony przez

A. Lindenmayera, zwany L-systemem, stosowany do opisu wzrostu roślin. Rozwiązaniem był łańcuch symboli, którego wizualizację przeprowadziłem za pomocą idei grafiki żółwia zaproponowanej przez S. Paperta. Porównanie modelowych linii profilowych z rzeczywistymi potwierdziło ich podobieństwo. Zastosowanie prostych transformacji afinicznych pozwoliło na znalezienie na rzeczywistych liniach profilowych fragmentów pasujących do zaproponowanego generatora. Cel naukowy został osiągnięty, a zaproponowany generator może być użyty w badaniach symulacyjnych do modelowania pęknięcia w betonach modyfikowanych metakaolinitem. Zaproponowane podejście może być również wykorzystane w przypadku betonów modyfikowanych innymi dodatkami typu II. Jest to istotny krok w poznaniu i opisie na pozór losowego zjawiska pęknięcia betonów.

Jednym z ważnych aspektów podjętych w monografii jest zagadnienie wpływu dodatku metakaolinitu na porowatość i transport wody w materiałach cementowych modyfikowanych tym dodatkiem. Problem ten był już poruszany przez wielu badaczy. Pierwsze badania w tym zakresie przeprowadzili Khatib i Wild [M169], stwierdzając, że dodatek metakaolinitu powoduje wzrost porowatości zaczynu cementowego. Uzyskane przez nich wyniki nie zostały jednak potwierdzone w innych pracach, m. in. Poona i innych [M293]. Brak zgodności badaczy było przesłanką do podjęcia tego zagadnienia.

Uzupełnieniem wiedzy z zakresu porowatości betonów modyfikowanych metakaolinitem i związku tej porowatości z właściwościami charakteryzującymi zdolność tych betonów do transportu wody, a w rezultacie także zdolności do transportu środowiskowych mediów agresywnych są przeprowadzone przeze mnie badania stereologiczne, porozymetrii rtęciowej, piknometrii, sorpcyjności i absorpcji wody oraz obserwacje SEM. Zaletą uzyskanych wyników jest przeprowadzenie wszystkich badań na próbkach wykonanych w obrębie tych samych betonów, które uprzednio poddano badaniom wytrzymałościowym, a których skład determinował przyjęty plan eksperymentu. Badanie przeprowadziłem po 180 dniach dojrzewania betonów.

Wykazałem zróżnicowany wpływ dodatku metakaolinitu na strukturę porów w betonie w rozważanych zakresach wielkości porów w odniesieniu do betonów referencyjnych niezawierających w swym składzie metakaolinitu.

Na podstawie wyników badania sorpcji przeprowadzonego na wyizolowanej z betonu stwardniałej zaprawie cementowej stwierdziłem, że wprowadzenie dodatku metakaolinitu powoduje wzrost objętości porów w zakresie submikroporów o promieniu poniżej 0,8 nm oraz mikroporów o promieniu 0,8-2 nm. Wzrost mikroporów w betonie modyfikowanym metakaolinitem potwierdziły także wyniki badań porozymetrii rtęciowej, uzyskane na



podstawie analizy krzywych różniczkowych rozkładu wielkości porów. Ponieważ pory o promieniach poniżej 2 nm nie biorą udziału w transporcie wody, więc też w transporcie czynników agresywnych, a woda wypełniająca te pory zamarza dopiero w temperaturze poniżej  $-40^{\circ}\text{C}$ , wzrost objętości tych porów nie jest groźny z punktu widzenia trwałości betonu modyfikowanego metakaolinitem.

W przypadku porów o wielkościach odpowiadających mezoporom, tj. porów o promieniach od 2 nm do 50 nm, wyniki badania sorpcji stwardniałych zapraw wyizolowanych z betonów modyfikowanych metakaolinitem wskazały na porównywalną bądź mniejszą objętość porów w tym zakresie wielkości w stwardniałych zaprawach modyfikowanych w porównaniu z odpowiednimi stwardniałymi zaprawami wyizolowanymi z betonów bez dodatku metakaolinitu. Wyjątkiem była stwardniała zaprawa wyizolowana z betonu o największym 17,5% udziale dodatku metakaolinitu w stosunku do masy cementu. W przypadku tej zaprawy stwierdziłem wzrost objętości porów o promieniach od 2 nm do 10 nm wynikający z większej ilości zaadsorbowanej wody, co również potwierdziły badania porozymetrii rtęciowej.

Przebieg izoterm sorpcji opisałem także w postaci zależności funkcyjnych, wykorzystując zaproponowaną przez Hansena formułę [M206], obowiązującą w zakresie wilgotności względnej powietrza od 20% do 98%. Otrzymane modele regresji wykazały jednak dużą zgodność z wynikami doświadczalnymi w całym przedziale zmienności wilgotności względnej powietrza.

Na podstawie analizy wyników badań porozymetrii rtęciowej betonów dla porów o średnicy od  $0,02\ \mu\text{m}$  do  $360\ \mu\text{m}$  stwierdziłem przesunięcie krzywych różniczkowych rozkładu wielkości porów w stronę mniejszych średnic porów. Wpłynęło to na zmniejszenie całkowitej porowatości stwardniałych betonów modyfikowanych metakaolinitem, wyznaczonej nie tylko metodą porozymetrii rtęciowej, lecz także metodą piknometrii helowej oraz obserwacjami SEM. Zmniejszenie średnic porów wynika z wypełnienia mikrostruktury stwardniałego zaczynu cementowego produktami reakcji pucolanowej z udziałem metakaolinitu bądź nieprzereagowanymi jeszcze cząstkami tego dodatku.

Potwierdzeniem zmniejszenia całkowitej zawartości powietrza oraz rozmiarów makroporów o promieniach powyżej  $32\ \mu\text{m}$  są także wyniki badań stereologicznych zrealizowanych na płaskich przekrojach próbek betonowych. Analizy przeprowadzono na podstawie obserwacji specjalnie spreparowanych płaskich powierzchni próbek betonowych, dokonując wyznaczenia: całkowitej zawartości powietrza  $A$ , powierzchni względnej porów  $S_{VP}$ , średniej cięciwy pora  $\bar{l}$ , powierzchni właściwej porów  $\alpha$ , wskaźnika rozmieszczenia

porów  $\bar{L}$ . Podałem wzory umożliwiające obliczenie całkowitej zawartości powietrza  $A$  od przyjętych zmiennych w planie eksperymentu (stosunku woda/spoiwo i stosunku metakaolinit/spoiwo). Do analizy stereologicznej zastosowałem autorski program komputerowy FRAKTAL\_Stereolog. Program ten pozwala na obliczenie ponad 30 parametrów stereologicznych, określonych metodą liniową, punktową, planimetryczną lub kombinacją tych metod. Dostarcza także informacji o polach powierzchni znalezionych na obrazie przekrojów cząstek rozważanej fazy oraz informacji niezbędnej do sporządzenia histogramu rozkładu cięciw. Program umożliwia kompleksowe przygotowanie obrazu do analizy przez przeprowadzenie na obrazie przekształceń punktowych, morfologicznych czy filtrów, takich jak: normalizacja, erozja, dylatacja, zamknięcie, otwarcie, zalewanie otworów, tworzenie negatywu, usuwanie szumów, rekonstrukcja.

Zmiany struktury porowatości betonów na skutek wprowadzenia dodatku metakaolinitu częściowo zastępującego cement wpłynęły również na zmniejszenie zdolności do transportu wody w tych betonach w odniesieniu do betonów bez tego dodatku. Wyniki badania absorpcji powierzchniowej (kapilarnej) wskazały zarówno na mniejszą absorpcję powierzchniową, jak i na mniejszą sorpcyjność betonów zawierających metakaolinit. Zaobserwowano poprawę tych cech betonu w miarę wzrostu udziału metakaolinitu w spoiwie, potwierdzoną także badaniami termowizyjnymi (podrozdział 8.3 monografii).

Odrębnym zagadnieniem, którym zająłem się w swoich badaniach, było wskazanie możliwości użycia metakaolinitu jako składnika spoiwa wraz z cementem portlandzkim i pyłem krzemionkowym. Wykazałem, że powstałe w ten sposób spoiwo, w którym metakaolinit i pył krzemionkowy zastępuje częściowo cement portlandzki, nie powoduje pogorszenia wytrzymałości wczesnej betonu na ściskanie, a znacząco wpływa na wzrost wytrzymałości na ściskanie betonu po 28 dniach dojrzewania. Przy udziale metakaolinitu i pyłu krzemionkowego w spoiwie w ilości 10% masy spoiwa każdy zaobserwowałem wzrost wytrzymałości na ściskanie betonu na spoiwie trójskładnikowym w stosunku do betonu na cemencie portlandzkim o ponad 28% po 28 dniach dojrzewania betonu.

Uzyskane i zaprezentowane w monografii wyniki prac własnych pozwoliły na sformułowanie uwag końcowych zarówno o charakterze użytkowym, jak i naukowym.

1. Dodatek prażonego kaolinitu ma pozytywny wpływ na właściwości, strukturę i trwałość kompozytów cementowych. Betony modyfikowane metakaolinitem z uwagi na ich liczne zalety oraz uzyskiwane właściwości, zarówno w stadium mieszanki betonowej, jak i stwardniałego betonu, mogą stanowić nowoczesny materiał konstrukcyjny, będący alternatywą nie tylko dla betonów niemodyfikowanych, lecz

także dla betonów modyfikowanych innymi dodatkami typu II, w tym betonów z dodatkiem pyłu krzemionkowego.

2. Betony modyfikowane metakaolinitem użytym jako częściowy substytut cementu w ilości do 17,5% masy cementu charakteryzują się większą wytrzymałością na ściskanie i przede wszystkim większą odpornością na pękanie w porównaniu z betonami bez dodatku metakaolinitu. Wzrost odporności na pękanie betonów modyfikowanych metakaolinitem następuje nie tylko na skutek zmniejszenia stosunku woda/spoiwo, lecz także wraz ze zwiększeniem ilości dodatku metakaolinitu. Wzrost odporności na pękanie opisanej krytycznym współczynnikiem intensywności naprężeń  $K_{Ic}^S$  określa liniowa zależność uwzględniająca stosunek woda/spoiwo oraz udział dodatku metakaolinitu. Zamiana 8,5% masy cementu na metakaolinit, zarówno w betonach o  $w/s = 0,35$ , jak i w betonach o  $w/s = 0,54$ , powoduje wzrost krytycznego współczynnika intensywności naprężeń  $K_{Ic}^S$  po 28 dniach dojrzewania tych betonów o około 8%.
3. Modyfikacja betonu dodatkiem metakaolinitu skutkuje przebudową mikrostruktury stwardniałego zaczynu cementowego oraz udoskonaleniem strefy kontaktowej kruszywo – matryca cementowa. Uszczelnienie mikrostruktury stwardniałego zaczynu cementowego w strefie kontaktowej i lepsze przyleganie matrycy cementowej do ziaren kruszywa ogranicza liczbę i rozmiary defektów mikrostrukturalnych, co wpływa przede wszystkim na wzrost odporności na pękanie betonów z dodatkiem metakaolinitu.
4. Wraz z wiekiem betonu modyfikowanego metakaolinitem następuje wzrost wytrzymałości na ściskanie i odporności na pękanie, co pokazuje uzyskana relacja  $K_{Ic}^S(t) - f_c(t)$ . Wzrost odporności na pękanie wyrażonej krytycznym współczynnikiem intensywności naprężeń  $K_{Ic}^S$  jest jednak spowolniony w czasie w stosunku do wzrostu wytrzymałości na ściskanie tego betonu. Wytrzymałość na ściskanie i krytyczny współczynnik intensywności naprężeń  $K_{Ic}^S$  od 28 do 180 dni dojrzewania może być przewidywany na podstawie zaproponowanych modeli regresji wielokrotnej w zależności od wieku betonu, udziału dodatku metakaolinitu do 17,5% masy cementu oraz stosunku woda/spoiwo od 0,35 do 0,54.
5. Zastosowanie spoiwa na bazie cementu portlandzkiego, metakaolinitu i pyłu krzemionkowego powoduje wzrost wytrzymałości na ściskanie betonu po 28 dniach dojrzewania przy jednoczesnej wysokiej wytrzymałości na ściskanie po 2 dniach w porównaniu z betonami wykonanymi z użyciem cementu portlandzkiego. Ze

względem na kryteria maksymalnej wytrzymałości na ściskanie betonu po 2 i 28 dniach dojrzewania optymalnym udziałem metakaolinitu i pyłu krzemionkowego w spoiwie jest odpowiednio udział 11 i 9%.

6. Dodatek metakaolinitu, wprowadzony jako częściowy substytut cementu w betonie w ilości do 17,5% masy cementu, ze względu na uszczelnienie mikrostruktury stwardniałego zaczynu cementowego, wynikającego z działania metakaolinitu jako składnika doziarniającego oraz aktywności pucolanowej tego dodatku, powoduje zmniejszenie całkowitej porowatości betonu. Wprowadzenie dodatku metakaolinitu powoduje jedynie wzrost objętości porów o promieniach 0,8-2 nm, a przy udziale metakaolinitu w betonie wynoszącym 17,5% masy cementu także porów o promieniach 2-10 nm. W przypadku porów o większych promieniach dodatek metakaolinitu do betonu powoduje zmniejszenie rozmiarów tych porów. Stwierdzony przyrost objętości porów o średnicach do 2 nm nie wpływa negatywnie na właściwości związane z transportem czynników agresywnych czy mrozoodporność betonów modyfikowanych metakaolinitem.
7. Wprowadzenie do składu betonu dodatku prażonego kaolinitu zwiększa wilgotność sorpcyjną stwardniałych zapraw wyizolowanych z betonów. Jest to wynik znacznego wzrostu objętości porów o promieniu do 10 nm w tych zaprawach w porównaniu z zaprawami bez dodatku metakaolinitu. Ze względu na redukcję wielkości i liczności pozostałych porów betony modyfikowane metakaolinitem w ilości do 17,5% masy cementu w stosunku do betonów niemodyfikowanych charakteryzują się mniejszą absorpcją powierzchniową (kapilarną) i mniejszą sorpcyjnością. Właściwości te są tym lepsze, im większy jest udział dodatku metakaolinitu w betonie.
8. Istnieje związek między odpornością na pękanie betonów modyfikowanych metakaolinitem a parametrami faktograficznymi, w tym wymiarem fraktalnym linii profilowych wydzielonych z powierzchni przełomów tych betonów. Wraz ze wzrostem odporności na pękanie betonów modyfikowanych metakaolinitem wydzielone z powierzchni przełomów linie profilowe są bardziej płaskie i charakteryzują się mniejszym wymiarem fraktalnym. Wskazuje to na wzrost jednorodności tych betonów w porównaniu z betonem bez dodatku metakaolinitu. Istnieje związek między krytycznym współczynnikiem intensywności naprężeń  $K_{Ic}^S$  a wymiarem fraktalnym  $D$  oraz stosunkiem woda/spoiwo. Większą odporność na pękanie mają betony modyfikowane metakaolinitem o niższym stosunku woda/spoiwo

i mniejszym skomplikowaniu linii profilowej wydzielonej z powstałej na skutek zniszczenia powierzchni przełomu.

9. Wymiar fraktalny linii profilowych bez względu na zastosowaną metodę jego określania jest istotnie zależny od udziału dodatku metakaolinitu w spoiwie i stosunku woda/spoiwo. Zwiększenie ilości dodatku metakaolinitu przekłada się na coraz mniejszą chropowatość linii profilowych wydzielonych z powierzchni przełomów betonów. Relacje wyznaczone z analiz fraktalnych potwierdzają także analizy tradycyjnych parametrów fraktograficznych, np. współczynnika rozwinięcia linii profilowej  $R_L$ . Zależność  $R_S = f(R_L)$  dla betonów modyfikowanych metakaolinitem wskazuje na uzyskanie w wyniku pęknięcia tych betonów bardziej płaskich powierzchni niż w betonach bez dodatku metakaolinitu.
10. Opracowano procedurę pozwalającą na określenie wymiaru fraktalnego linii profilowej wydzielonej z powierzchni przełomu betonu modyfikowanego metakaolinitem bez konieczności prowadzenia analiz fraktalnych na podstawie badań niszczących, wskazując zależność wymiaru fraktalnego linii profilowej od ilości dodatku metakaolinitu oraz objętości zaczynu w betonie. Ważność zaproponowanego modelu rozszerzono także o inne dodatki, takie jak pył krzemionkowy oraz modyfikowany mechanicznie popiół fluidalny.
11. Wymiar fraktalny linii profilowej wydzielonej z powierzchni przełomu betonu modyfikowanego metakaolinitem jest zależny od chropowatości poszczególnych faz w betonie, a w szczególności chropowatości sklasyfikowanych czterech typów pęknięć. Wymiar fraktalny  $D$  linii profilowej może być określany jako wartość średnioważona, uwzględniająca udział poszczególnych typów pęknięć znajdujących się na linii profilowej. Wymiar fraktalny linii profilowych wydzielonych z powierzchni przełomu betonu modyfikowanego metakaolinitem przechodzących przez miejsca występowania ziaren kruszywa grubego jest od 6% do 13% większy od wymiaru fraktalnego linii profilowych przechodzących przez stwardniały zaczyn cementowy.
12. Zastosowanie geometrii fraktalnej umożliwia modelowanie linii profilowej charakteryzującej morfologię powierzchni przełomu betonu modyfikowanego metakaolinitem. Opracowany model fraktalny pęknięcia umożliwia uzyskanie nieskończenie dużej liczby rozwiązań symulacyjnych linii profilowych, które pomimo różnego kształtu charakteryzują się tym samym wymiarem fraktalnym.

Przedkładana monografia poza wypełnieniem istotnych obszarów wiedzy o metakaolinicie jako częściowym substytucie cementu, a w szczególności wskazaniem możliwości aplikacyjnych zastosowania metod i narzędzi typowych dla inżynierii materiałowej oraz przedstawieniem nowych spojrzeń na modelowanie zjawisk pęknięcia betonów, jest także studium literaturowym w zakresie ogólnej wiedzy o kaolinicie i metakaolinicie oraz systematyzującym aktualny stan wiedzy na temat badań kompozytów cementowych modyfikowanych metakaolinitem.



## **5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych**

### **Okres przed uzyskaniem stopnia doktora**

W 1996 roku jako student IV roku Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Rzeszowskiej kierunku *budownictwa* odbyłem staż w Zakładzie Inżynierii Materiałowej i Technologii Budownictwa Politechniki Rzeszowskiej. Staż trwał 9 miesięcy – od 1 października 1996 roku do 30 czerwca 1997 roku.

Ponadto, będąc studentem IV, a potem V roku, zajmowałem czołowe miejsca w kolejnych edycjach Turnieju Wiedzy Informatycznej, obejmującym zagadnienia programowania w języku Turbo Pascal, organizowanym przez Katedrę Mechaniki Konstrukcji Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Rzeszowskiej. Będąc laureatem V Turnieju Wiedzy Informatycznej, miałem możliwość reprezentowania Politechniki Rzeszowskiej 22-23 listopada 1996 roku w Bratysławie na Międzynarodowym Konkursie Programowania „Second Central European Regional Contest of the ACM International Collegiate Programming Contest” w ramach Twenty-First Annual International Collegiate Programming Contest, sponsorowanego przez firmę Microsoft.

Wynikiem moich zainteresowań programowaniem była realizowana w Zakładzie Geotechniki i Hydrotechniki Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Rzeszowskiej pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Andrzeja Zielińskiego praca magisterska pt. *Stateczność zboczy w ujęciu komputerowym*. Za tę pracę otrzymałem Nagrodę Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji. Zasadniczą częścią obronionej w 1997 roku z wyróżnieniem pracy magisterskiej był napisany w języku Turbo Pascal 7.0 program Statgrunt, pracujący wówczas w środowisku DOS, o architekturze interfejsu użytkownika w postaci rozwijalnych okienek. Algorytm obliczeniowy programu Statgrunt oparty na metodzie Felleniusa umożliwił uwzględnienie w obliczeniach stateczności skarpy warstwowości podłoża gruntowego, zjawiska filtracji czy dodatkowego obciążenia naziomu

skarpy, np. symulującego obciążenie koparką lub składowiskiem materiałów. Wyniki moich prac ukazały się w Materiałach Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej pt. „Problemy teorii i praktyki budownictwa”, Lwów, maj 1997 (**załącznik 3., pkt II E** [62]).

Przeprowadzone kolejne analizy dotyczące zagadnienia stateczności skarp i zboczy, jak również osiągnięte na ich podstawie wnioski prezentowałem w licznych czasopismach krajowych (**załącznik 3., pkt II E** [21-25, 27, 29, 32]) oraz w materiałach konferencyjnych z Międzynarodowego Sympozjum Naukowego Studentów i Młodych Pracowników Nauki, Politechnika Zielonogórska, 1998 (**załącznik 3., pkt II E** [63]), a następnie materiałach konferencyjnych z V (2000 r.) i VI (2001 r.) Międzynarodowej Konferencji Naukowej pt. „Aktualne problemy budownictwa i inżynierii środowiska” (**załącznik 3., pkt II E** [66-68]).

Równolegle prowadziłem badania dotyczące betonów i drewna, w tym projektowania betonów (**załącznik 3., pkt II E** [26]) i optymalizacji jego składu (**załącznik 3., pkt II E** [28]), doświadczalnego wyznaczania stałych materiałowych, m. in. modułu sprężystości poprzecznej  $G$  (**załącznik 3., pkt II E** [65, 70, 73]). Uzyskane wyniki zostały opublikowane w materiałach V Międzynarodowej Konferencji Naukowej pt. „Aktualne problemy budownictwa i inżynierii środowiska” (2000 r.), V Konferencji Naukowej pt. „Drewno i materiały drewnopodobne w konstrukcjach inżynierskich” (Szczecin 2002) oraz materiałach XLVIII Konferencji Naukowej Krynica 2002 pt. „Problemy naukowo-badawcze budownictwa” (**załącznik 3., pkt II E** [65, 70, 73]).

Głównym obszarem moich zainteresowań naukowych było zastosowanie metod inżynierii materiałowej do opisu zależności między technologią a właściwościami i strukturą betonów. Oprócz powszechnie wyznaczanych właściwości betonów w obszar swoich badań włączyłem badania odporności na pękanie betonu według I modelu zniszczenia (rozciąganie przy zginaniu). W wyniku badania odporności na pękanie uzyskałem powierzchnie przełomów betonów, będące skutkiem zniszczenia, a jednocześnie obrazem zachowania się elementów struktury betonu podczas procesu pęknięcia, które następnie poddałem dalszej analizie. Do opisu morfologii tych powierzchni przełomu betonów wykorzystałem geometrię fraktalną. Analizę fraktalną przeprowadzałem na wydzielonych z powierzchni przełomu liniach profilowych, obliczając wymiar fraktalny linii profilowej metodą cięciwy  $D_C$  i metodą pudełkową  $D_{BC}$ . Preparatyka próbek do badań fraktograficznych polegała na wykonaniu replik gipsowych przełomów z gipsu białego, a następnie wylaniu na nią gipsu barwionego. Następnie próbkę ciąłem, a linie profilowe wyznaczałem jako krzywą rozgraniczającą gips biały od barwionego.

Głównym przedmiotem moich zainteresowań badawczych były wówczas badania stereologiczne prowadzone na płaskich przekrojach. Analizy stereologiczne dotyczyły porów powietrznych i ziaren kruszywa w betonie i zostały opublikowane w czasopiśmie o zasięgu międzynarodowym i krajowym (**załącznik 3., pkt II A** [15] oraz **pkt II E** [30, 31]) oraz w materiałach konferencyjnych z VII Międzynarodowej Konferencji Naukowej Koszycko-Lwowsko-Rzeszowskiej pt. „Aktualne problemy budownictwa i inżynierii środowiska” (Koszyce 2002) (**załącznik 3., pkt II E** [72]).

Uwagę skupiłem także na przygotowaniu i opracowaniu własnych narzędzi i procedur analizy obrazu. W ramach badań fraktograficznych opracowałem programy komputerowe FRAKTAL\_Digit i FRAKTAL\_Wymiar2D. Zaimplementowane w programie procedury umożliwiają m. in. automatyczne odwzorowania linii profilowych na podstawie zeskanowanego obrazu. Zaproponowana przeze mnie metoda automatycznego odwzorowania linii profilowych została wykorzystana w badaniach własnych do wydzielenia linii profilowej na podstawie zeskanowanego obrazu profilu przełomu wykonanego metodą replik (**załącznik 3., pkt II E** [31]). Program FRAKTAL\_Wymiar2D umożliwił natomiast obliczenie na podstawie uzyskanych informacji o kształcie linii profilowej wymiaru fraktalnego, współczynnika rozwinięcia linii profilowej  $R_L$  i przy zastosowaniu metody cykloid [M378] również współczynnika rozwinięcia powierzchni przełomu  $R_S$ . Wyznaczenie parametrów stereologicznych porów powietrznych i ziaren kruszywa na podstawie analizy obrazu umożliwił natomiast program FRAKTAL\_Stereolog (**załącznik 3., pkt II E** [72]).

Wiedzę dotyczącą analizy stereologicznej próbek betonowych poszerzałem, biorąc udział w 2002 roku w Warszawie w międzynarodowej konferencji i warsztatach International Workshop on Structural Image Analysis in Investigation of Concrete organizowanym przez Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN oraz Centre of Excellence for Advanced Materials and Structures, a następnie uczestnicząc w tym samym roku w dwudniowym szkoleniu z preparatyki i analizy stereologicznej próbek betonu napowietrzanego w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN.

W 2002 roku na Wydziale Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Rzeszowskiej otworzyłem przewód doktorski, który zakończył się na tymże Wydziale obroną w marcu 2005 roku. Rozprawę doktorską *Zastosowanie analizy struktury do oceny właściwości betonów* obroniłem z wyróżnieniem. Promotorem pracy był prof. dr hab. inż. Grzegorz Prokopski. Za rozprawę doktorską otrzymałem Indywidualną Nagrodę Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego oraz I miejsce w konkursie na najlepszą pracę doktorską przygotowaną z zastosowaniem narzędzi statystyki i analizy danych zawartych w programach



z rodziny Statistica. Przeprowadzone w ramach rozprawy doktorskiej badania potwierdziły związek między charakterem pęknięć, składem i mikrostrukturą betonu a właściwościami mechanicznymi betonów badanymi według zasad mechaniki pęknięcia. Przedmiotem analiz były betony zwykle wykonane na kruszywie łamanym (grysie bazaltowy) i otoczkowym (żwirze) o zmiennym stosunku wodno-cementowym i zmiennym punkcie piaskowym stosu okruchowego. Badaniom poddano 9 serii betonów wykonanych z każdego rodzaju kruszywa grubego. Skład poszczególnych serii betonów determinował przyjęty centralny kompozycyjny plan badań. Podjęte badania przyczyniły się do wykazania statystycznie istotnego wpływu rodzaju kruszywa na morfologie powstałych na skutek zniszczenia powierzchni przełomów betonów. Oryginalnym i ważnym ze względów syntezy naukowej aspektem pracy było zastosowanie w badaniach betonów współczesnych narzędzi inżynierii materiałowej (geometrii fraktalnej). W przypadku obu betonów zaproponowałem modele statystyczne umożliwiające określenie wymiaru fraktalnego linii profilowej wydzielonej z powierzchni przełomu betonu na podstawie składu betonu oraz z uwzględnieniem parametrów strukturalnych określonych metodami stereologicznymi, a dotyczących ziaren kruszywa grubego i porowatości.

Ponadto uczestniczyłem w realizacji projektu badawczego nr 8 T07E 023 20 pt. „Zastosowanie metod badawczych inżynierii materiałowej do oceny właściwości betonów w procesie ich dojrzewania” (kierownik projektu: prof. dr hab. inż. Grzegorz Prokopski), wykonując badania mikrostrukturalne SEM betonów, jak również w umowie realizowanej na zlecenie firmy NTB s. c. Głogów Małopolski nt. „Opracowanie technologii pustaków styropianowo-cementowych”.

Rezultaty prowadzonej przeze mnie pracy naukowo-badawczej w okresie przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora ukazały się w materiałach konferencyjnych (12 referatów, **załącznik 3., pkt II E** [62-73]) oraz w czasopiśmie naukowym o zasięgu międzynarodowym (1 artykuł, **załącznik 3., pkt II A** [15]) i krajowym (12 artykułów, **załącznik 3., pkt II E** [21-32]).

### **Okres po uzyskaniu stopnia doktora**

Po uzyskaniu stopnia naukowego doktora nauk technicznych w marcu 2005 roku zostałem zatrudniony na stanowisku adiunkta w Zakładzie Inżynierii Materiałowej i Technologii Budownictwa Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Rzeszowskiej.

Główne nurty moich zainteresowań naukowo-badawczych po uzyskaniu stopnia doktora obejmowały następujące zagadnienia:

- I. Badanie i analiza właściwości betonów modyfikowanych wybranymi dodatkami typu II w aspekcie ich struktury
  - a. badanie właściwości betonów modyfikowanych dodatkami typu II (w tym pyłem krzemionkowym, aktywowanym mechanicznie popiołem fluidalnym lub metakaolinitem), a w szczególności badanie odporność na pękanie tych betonów,
  - b. analiza morfologii powierzchni przełomów betonów metodami fraktografii ilościowej, w tym z uwzględnieniem geometrii fraktalnej,
  - c. analiza powiązań między strukturą a właściwościami badanych betonów z wykorzystaniem metod i narzędzi do analizy statystycznej.
- II. Zastosowanie metod stereologicznych do ilościowego opisu charakterystyki poszczególnych faz w betonie. Opracowanie metody umożliwiającej odtworzenie krzywej uziarnienia kruszywa grubego na podstawie płaskiego obrazu powierzchni betonu.
- III. Wykorzystanie metod stereologicznych w powiązaniu z geometrią fraktalną do opisu porowatości betonu.
- IV. Moje zainteresowania naukowe obejmowały także kontynuację problematyki stateczności skarp i zboczy.

## **Ad I**

### **Badanie i analiza właściwości betonów modyfikowanych wybranymi dodatkami typu II w aspekcie ich struktury**

Badania powiązania struktury betonu z jego właściwościami (w tym odporności na pękanie betonu) w przypadku betonów modyfikowanych dodatkami typu II, w tym pyłem krzemionkowym, aktywowanym mechanicznie popiołem fluidalnym lub metakaolinitem, kontynuowałem w ramach własnego projektu badawczego nr N N507 475337 pt. „Wpływ struktury na proces pękania modyfikowanych betonów cementowych”, finansowanego ze środków na naukę w latach 2009-2011(**załącznik 3., pkt II J** [1]). Badania tych betonów w okresie dojrzewania do 180 dni prowadziłem jako główny wykonawca w trakcie realizacji kierowanego przez prof. dr. hab. inż. Grzegorza Prokopskiego projektu badawczego nr N N507 321140 pt. „Wpływ struktury na proces pękania modyfikowanych betonów cementowych w trakcie 90- i 180-dniowego dojrzewania”, finansowanego ze środków

Narodowego Centrum Nauki w latach 2011-2013 (**załącznik 3., pkt II J** [3]). Wyniki prac zostały przedstawione na konferencjach (**załącznik 3., pkt II L** [7, 9, 11, 12, 15]) i opublikowane w czasopiśmie o zasięgu międzynarodowym (**załącznik 3., pkt II A** [14]) i krajowym (**załącznik 3., pkt I B** [5-9, 12] i **pkt II E** [51, 53, 55, 58, 60]) oraz wykorzystane w monografii.

Jednocześnie badania właściwości betonów metodami inżynierii materiałowej prowadziłem w trakcie prac w ramach działalności statutowej Katedry Inżynierii Materiałowej i Technologii Budownictwa Politechniki Rzeszowskiej (**załącznik 3., pkt II J** [6]).

Praktyczne aspekty badań powiązania struktury z właściwościami betonów sprowadzają się do opisu tej zależności w sposób formalny za pomocą zależności funkcyjnych, które mogą być wykorzystane zarówno do projektowania betonów, jak i do ich modelowania.

Dokonałem również opisu i modelowania morfologii powstałych na skutek zniszczenia powierzchni przelomów betonów modyfikowanych aktywowanym mechanicznie popiołem z kotłów o spalaniu fluidalnym (**załącznik 3., pkt I B** [5, 9, 11], **pkt II E** [58] i **pkt II L** [7, 8, 13]). Poddając analizie uzyskane wyniki badań fraktalnych linii profilowej wydzielonej z powierzchni przelomu tych betonów opracowałem podejście umożliwiające określenie wymiaru fraktalnego tych linii z uwzględnieniem w analizie takich składników struktury, jak: ziarno kruszywa grubego oraz stwardniały zaczyn cementowy (**załącznik 3., pkt I B** [11] i **pkt II L** [13]). Na podstawie przeprowadzonych analiz fraktalnych stwierdziłem, że wymiar fraktalny  $D$  linii profilowej może być określany jako wartość średnioważona, uwzględniająca udział różnych typów pęknięć znajdujących się na linii profilowej. Jednocześnie wykazałem, że wymiar fraktalny  $D$  obliczony obiema metodami: metodą pudełkową  $D_{BC}$  i metodą obwiedni morfologicznych  $D_m$ , jest większy w przypadku przechodzenia pęknięcia przez ziarna kruszywa grubego niż przy przejściu pęknięcia przez stwardniały zaczyn cementowy. Przeprowadzone analizy fraktalne wykazały także rozbieżność wymiarów fraktalnych odcisku poziarnowego i powierzchni wyrwanego ziarna kruszywa grubego, co prawdopodobnie ma związek z gorszą przyczepnością zaczynu do kruszywa. Wysunięte na podstawie analizy wyników badań wnioski i stwierdzenia mają duże znaczenie praktyczne, gdyż wyjaśniają m. in. przyczyny większych rozrzutów wyników wymiaru fraktalnego  $D$  linii profilowych wydzielonych z powierzchni przelomu betonów oraz potwierdzają konieczność prowadzenia analizy fraktalnej na odpowiedniej liczbie linii

profilowych, co poruszano także w publikacjach autora (**załącznik 3., pkt I B** [2, 3] oraz **pkt II E** [36]).

Praktycznym aspektem badań było wykorzystanie optymalizacji wielokryterialnej do uzyskania rozwiązań preferowanych z uwagi na pożądane właściwości betonów (**załącznik 3., pkt II B** [58, 60] oraz **pkt II L** [15]), jak również przeprowadzone porównanie wybranych właściwości betonów modyfikowanych wybranymi dodatkami typu II (wytrzymałości na ściskanie  $f_c$  i krytycznego współczynnika intensywności naprężeń  $K_{Ic}^S$ ) w zakresie rozważanej dziedziny eksperymentu (**załącznik 3., pkt I B** [6]).

## **Ad II**

### **Zastosowanie metod stereologicznych do ilościowego opisu charakterystyki poszczególnych faz w betonie**

Przydatność metod stereologicznych wraz z komputerową analizą obrazu do wyznaczenia rozkładu wielkości ziaren kruszywa w betonie wykazał m. in. J. Brzezicki (Zastosowanie komputerowej analizy obrazu do badań struktury betonu. XXXIX Konferencja Naukowa KILiW i KN PZITB, Warszawa-Krynica-Rzeszów, 1993, 21-28).

Własne prace w tym zakresie przyczyniły się do opracowania metody wyznaczenia krzywej uziarnienia kruszywa grubego bazaltowego na podstawie badań stereologicznych płaskich przekrojów w połączeniu z komputerową analizą obrazu. Badania przeprowadzono na próbkach betonowych o zróżnicowanym stosunku wodno-cementowym  $w/c$  oraz zmiennym punkcie piaskowym stosu okruszowego. Zróżnicowanie składu materiału badawczego miało na celu określenie wiarygodnych wytycznych postępowania zmierzającego do ustalenia składu granulometrycznego kruszywa na podstawie analizy płaskiego obrazu powierzchni stwardniałego betonu. Uzyskane informacje o rozkładzie pól powierzchni przekrojów ziaren bazaltu wykorzystano do odtworzenia rozkładu wielkości ziaren tego kruszywa, definiując współczynnik kształtu ziarna bazaltu jako wartość, o którą należy zwiększyć bok kwadratu o polu powierzchni równoważnym polu powierzchni przekroju ziarna bazaltu, aby uzyskać wymiar oczka sita pozwalający zakwalifikować dany przekrój ziarna do odpowiedniej frakcji. Przeprowadzone analizy pozwoliły na znalezienie wartości współczynnika kształtu ziarna bazaltu  $k_{ZB}$  wynoszącej 1,54. Uzyskałem dużą zgodność krzywej uziarnienia wygenerowanej na podstawie komputerowej analizy obrazu z rzeczywistą krzywą uziarnienia otrzymaną na podstawie analizy sitowej, co potwierdziło użyteczność proponowanej metody. Procedurę postępowania przedstawiono na II Konferencji SOLINA 2008 i na seminarium „Zastosowanie nowoczesnych technologii w budownictwie” w ramach

projektu „Wsparcie dla tworzenia i rozwój Świętokrzysko-Podkarpackiego Klastra Budowlanego INNOWATOR” (załącznik 3., pkt II L [4, 10]) oraz czasopismach o zasięgu krajowym (załącznik 3., pkt II E [41, 52]).

### Ad III

#### Wykorzystanie metod stereologicznych w powiązaniu z geometrią fraktalną do opisu porowatości betonu

Metody i narzędzia właściwe dla geometrii fraktalnej wykorzystałem m. in. w analizie porowatości betonów. Przedmiotem prowadzonych przeze mnie prac w tym zakresie były betony o zróżnicowanym stosunku wodno-cementowym. Opracowałem procedurę określania wymiaru fraktalnego porów w betonie na podstawie analizy obrazu powierzchni próbki betonowej i przy wykorzystaniu autorskich programów komputerowych FRAKTAL\_Stereolog oraz FRAKTAL\_Wymiar2D. Zastosowanie nowego sposobu oceny zróżnicowania porowatości betonów za pomocą wymiaru fraktalnego poszerza możliwości zróżnicowania porowatości betonów, a także innych materiałów, z uwzględnieniem zarówno porowatości całkowitej, jak i liczności oraz kształtu porów (badania stereologiczne). Wyniki badań zostały opublikowane w Zeszytach Naukowych Politechniki Rzeszowskiej, Budownictwo i Inżynieria Środowiska (załącznik 3., pkt II E [35]), jako referat I Międzynarodowej Konferencji Energii Słonecznej i Budownictwa Ekologicznego. „Energia odnawialna. Innowacyjne idee i technologie dla budownictwa”. Solina, 17-20 maja 2006, jak również prezentowane były w referatach XI Polskiej Konferencji Naukowo-Technicznej „Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce”, Łódź 2007 (Building Physics in Theory and Practice, t. 2, s. 137-140, załącznik 3., pkt II E [39]) oraz VIII Międzynarodowej Konferencji Stereology and Image Analysis in Materials Science STERMAT 2008 (Inżynieria Materiałowa, 4/2008, s. 231-234, załącznik 3., pkt II E [45]) i czasopiśmie Image Analysis & Sterology (załącznik 3., pkt II A [16]).

Zaproponowałem dwa modele regresji wielokrotnej: I – zależności wymiaru fraktalnego  $D_{BC}$  od liczności względnej przekrojów porów  $N_A$  (względnie powierzchni właściwej porów  $\alpha$ ) i porowatości całkowitej  $A$ , II – zależności wymiaru fraktalnego  $D_{BC}$  od liczności względnej przekrojów porów  $N_A$  i stosunku wodno-cementowego  $w/c$ . Przeprowadzone badania wykazały związek zróżnicowania porowatości betonu opisanego za pomocą trzech parametrów stereologicznych ( $N_A$ ,  $A_A$  i  $\alpha$ ) z wymiarem fraktalnym  $D_{BC}$  określonym metodą pudełkową. Analiza wykazała, że wzrost parametrów stereologicznych ( $N_A$ ,  $A_A$  i  $\alpha$ ) powoduje wzrost wymiaru fraktalnego  $D_{BC}$ . Zastosowanie wymiaru fraktalnego

do opisu zróżnicowania porowatości okazało się sposobem skutecznym, a uzyskane wyniki i korelacje wskazały na pełną przydatność zastosowanej metody do oceny zróżnicowania porowatości stwardniałego betonu.

#### **Ad IV**

##### **Stateczności skarp i zboczy**

Uzyskane w tym zakresie wyniki zostały upowszechnione w kraju i za granicą, m. in. ukazały się w czasopiśmie *Computers and Geotechnics*, znajdujących się w bazie *Journal Citation Reports* (**załącznik 3., pkt II A** [13]).

Badania prowadziłem również w kierunku określenia wpływ dodatku bentonitu na wybrane właściwości betonów (**załącznik 3., pkt II E** [50]), zastosowania metod stereologicznych do oceny mrozoodporności betonów napowietrzanych (**załącznik 3., pkt II E** [49, 54]), w tym określenia wpływu wybranych zabiegów technologicznych na skuteczność napowietrzania betonów oraz oceny właściwości betonów wykonanych z jednoczesnym zastosowaniem dwóch dodatków pylastych: pyłu krzemionkowego i popiołu fluidalnego (**załącznik 3., pkt II E** [56]).

Moja działalność naukowa prowadzona w ramach współpracy z Zakładem Budownictwa Ogólnego Politechniki Rzeszowskiej zaowocowała dwoma zgłoszeniami patentowymi: krajowym (Przegroda budowlana izolacyjno-akumulacyjna i sposób jej wytwarzania, 2015) i międzynarodowym (Insulating and accumulation construction partition and a method for its production, 2015<sup>1</sup>) (**załącznik 3., pkt II C**). Postępowanie patentowe jest w toku. Wniosek uzyskał aprobatę Rady Nadzorującej Centrum Innowacji i Transferu Technologii Politechniki Rzeszowskiej w konkursie Inkubatora Innowacyjności IV Edycji.

Czynnie angażuję się we wspieranie transferu wiedzy między uczelniami a przedsiębiorstwami. W ramach seminarium zorganizowanego przez Staropolską Izbę Przemysłowo-Handlową, lidera projektu „Wsparcie dla tworzenia i rozwoju Świętokrzysko-Podkarpackiego Klastra Budowlanego INNOWATOR” w dniach 1-2 marca 2012 r. w Krasieczynie zostałem zaproszony do wygłoszenia wykładu na temat zastosowania nowoczesnych technologii w budownictwie pt. „Zastosowanie metod inżynierii materiałowej w technologii betonu”<sup>2</sup> (**załącznik 3., pkt II L** [10]). Celem projektu realizowanego w ramach Programu Operacyjnego Rozwój Polski Wschodniej, było wsparcie i rozwój

---

<sup>1</sup> Informacja w bazie Web of Science

<sup>2</sup> [http://www.klaster-innowator.pl/pl/szkolenia\\_i\\_konferencje/metody\\_inzynierii\\_materialowe\\_w\\_tehnologii\\_betonu](http://www.klaster-innowator.pl/pl/szkolenia_i_konferencje/metody_inzynierii_materialowe_w_tehnologii_betonu) (dostęp: 24.04.2018 r.)

przedsiębiorstw branży budowlanej oraz branż pokrewnych przez stworzenie platformy współpracy wzajemnej oraz współpracy z jednostkami naukowo-badawczymi.

Poszerzenia własnej wiedzy i umiejętności, jak również podniesienia zdolności transferu wiedzy z sektora nauki do potencjalnie zainteresowanych przedsiębiorstw oraz zdobycie praktycznej wiedzy, nawiązywanie i rozwój współpracy nauki i przedsiębiorczości, zdobycie doświadczenia w zakresie komercjalizacji i wdrażania badań naukowych/prac rozwojowych, poznanie specyfiki, potrzeb i oczekiwań przedsiębiorstwa było moim celem podczas uczestnictwa w projekcie realizowanym przez Rzeszowską Agencję Rozwoju Regionalnego S.A. w Rzeszowie pt. „Nauka idzie w praktykę” (**załącznik 3., pkt III A poz. 4**). Projekt był współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki 2007-2013, Priorytet VIII Regionalne kadry gospodarki, Działanie 8.2 „Transfer wiedzy”, Poddziałanie 8.2.1. „Wsparcie dla współpracy sfery nauki i przedsiębiorstw”. W ramach projektu od 12 stycznia 2014 r. do 30 stycznia 2015 r. uczestniczyłem w szkoleniu, a następnie na podstawie zgłoszonego projektu współpracy jednostki naukowej z przedsiębiorstwem zakwalifikowanego przez Rzeszowską Agencję Rozwoju Regionalnego S.A. w Rzeszowie do realizacji uzyskałem możliwość odbycia trzymiesięcznego stażu w Firmie Betler Sp. z o.o. (od 2 marca 2015 r. do 31 maja 2015 r.). Odbycie stażu umożliwiło mi nie tylko zapoznanie się ze specyfiką działalności firmy lecz także wdrożenie swoich pomysłów. Dalsza współpraca z przedsiębiorstwem ukierunkowana jest na modyfikację betonów produkowanych w węźle betoniarskim, jak również modyfikacji składu betonu komórkowego. Dodatkowo w dniach 18-19 lutego 2015 r. w ramach projektu uczestniczyłem w warsztatach wyjazdowych w Kielcach w celu zapoznania się z działalnością Parków Technologicznych Inkubatorów Przedsiębiorczości, a także zaprezentowania dobrych praktyk oraz możliwości nawiązania współpracy nauka-biznes.

W 2006 roku moja praca doktorska pt. „Zastosowanie analizy struktury do oceny właściwości betonów,, przygotowana z zastosowaniem narzędzi statystyki i analizy danych zawartych w programach z rodziny Statistica została wybrana spośród ponad 30 prac doktorskich pochodzących z różnych dziedzin badań naukowych, nadesłanych na konkurs edycji 2005 organizowany przez firmy StatSoft Inc. i StatSoft Polska<sup>3</sup>. Konkurs odbywa się pod patronatem Polskiego Towarzystwa Statystycznego (**załącznik 3., pkt II K poz. 5**). Zajęcie I miejsca w konkursie było początkiem mojej współpracy z firmą. Jako konsultant – specjalista z zakresu planowania eksperymentów w budownictwie, a szczególnie technologii betonu i inżynierii materiałowej, zostałem zapraszany do opracowania i wygłoszenia

---

<sup>3</sup> <https://www.statsoft.pl/rozwiązania/oferta-akademicka/konkurs/rok-2005/> (dostęp: 24.04.2018 r.)

wykładów na organizowanych przez StatSoft Polska seminariach naukowych „Zastosowania statystyki i data mining w badaniach naukowych” (Warszawa 2007 r. i 2015 r., **załącznik 3., pkt II L** [3, 14]) oraz „R&D – badania innowacyjne z wykorzystaniem analizy danych” (Kraków 2008 r., **załącznik 3., pkt II L** [5]). Jestem również autorem czterech rozdziałów w monografiach wydanych przez StatSoft Polska „Planowanie i analiza wyników badań laboratoryjnych betonów o zróżnicowanej strukturze” (**załącznik 3., pkt II E** [40]), „Wprowadzenie do praktycznego planowania eksperymentu” (**załącznik 3., pkt II E** [44]), „Zastosowanie analizy struktury do oceny właściwości betonów” (**załącznik 3., pkt II E** [47]) oraz „Wykorzystanie programu Statistica do rozwiązywania złożonych zagadnień w obszarze inżynierii materiałów budowlanych” (**załącznik 3., pkt II E** [59]).

Oprócz współpracy z firmą StatSoft Polska swoją wiedzę w zakresie umiejętności analizy statystycznej poszerzałem uczestnicząc w szkoleniach, m. in. od września do listopada 2007 r. (w wymiarze 50 godzin) brałem udział w organizowanym przez Wydział Matematyczno-Przyrodniczy Uniwersytetu Rzeszowskiego szkoleniu z zakresu stosowania narzędzi komputerowych w analizie statystycznej w ramach projektu „Umiejętność analizy statystycznej szansą na podniesienie kwalifikacji zawodowych pracowników i szybszy rozwój regionu – kurs statystyki z wykorzystaniem programów komputerowych” (**załącznik 3., pkt III A poz. 2**). Byłem także uczestnikiem szkoleń organizowanych przez firmę StatSoft Polska nt. „Komputerowe wspomaganie planowania i analizy statystycznej doświadczalnych badań innowacyjnych” (czerwiec 2007 r.), „Sieci neuronowe” (grudzień 2010 r.), „DOE – komputerowe wspomaganie planowania i analizy statystycznej badań innowacyjnych” (listopad 2011 r.) (**załącznik 3., pkt III I12**).

Podnosząc swoje kwalifikacje dydaktyczne w maju 2015 r. ukończyłem kurs pt. „Wykorzystanie nowoczesnych technik kształcenia w edukacji akademickiej, zrealizowanym przez Centrum e-Lerningu Politechniki Rzeszowskiej mającym na celu przygotowanie do wdrożenia współczesnych systemów kształcenia na odległość (Uniwersytet otwarty, E-inżynier – wirtualna Politechnika. Platforma edukacyjna) (**załącznik 3., pkt III I12**).

Od czerwca 2012 r. na zaproszenie prof. dr. hab. inż. Grzegorza Prokopskiego uczestniczyłem regularnie w zebraniach Sekcji Inżynierii Materiałów Budowlanych Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej Polskiej Akademii Nauk. Następnie zostałem powołany w skład Sekcji Inżynierii Materiałów Budowlanych Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej Polskiej Akademii Nauk na kadencję obejmującą lata 2015-2018 (**załącznik 3., pkt III H**). Na posiedzeniu Sekcji Inżynierii Materiałów Budowlanych KILiW PAN 30 czerwca 2016 r.



w Warszawie jako nowo przyjęty członek Sekcji miałem możliwość zaprezentowania głównych nurtów swoich zainteresowań badawczych.

Jestem także członkiem Stowarzyszenia IBPSA POLAND oraz członkiem Polskiego Związku Inżynierów i Techników Budownictwa. Na zebraniu Zarządu Komitetu Nauki PZITB 3 kwietnia 2014 r. w Warszawie zostałem przyjęty w poczet członków Komitetu Nauki Polskiego Związku Inżynierów i Techników Budownictwa. Obecnie jestem również członkiem Zarządu Komisji Nauki Oddziału Rzeszowskiego PZITB (**załącznik 3., pkt III H**).

Za działalność naukową uzyskałem czterokrotnie indywidualną nagrodę Rektora Politechniki Rzeszowskiej II stopnia (2002 r., 2011 r.) i III stopnia (2008 r., 2017 r.) (**załącznik 3., pkt II K**).

W latach 2011-2013 po zatwierdzeniu przez Zarząd Województwa Podkarpackiego zostałem powołany jako ekspert w dziedzinie *nauki techniczne*, dyscyplinie *budownictwo* do oceny merytorycznej wniosków o przyznanie stypendium w ramach projektu pn. „Podkarpacki fundusz stypendialny dla doktorantów”, realizowanego przez Urząd Marszałkowski Województwa Podkarpackiego w Rzeszowie, Departament Edukacji, Nauki i Sportu.

W latach 2011-2018 byłem recenzentem 19 artykułów, w tym 5 artykułów do czasopisma “Construction and Building Materials” (Elsevier), po jednym do “Cement and Concrete Research” (Elsevier), “Advances in Engineering Software” (Elsevier), “International Journal of Digital Earth” (Taylor&Francis), “The Open Civil Engineering Journal” (Bentham Science Publishers), “Studia Geotechnica et Mechanica” i 2 do “Zeszytów Naukowych PRz/Scientific Papers of RUT” i “Archiwum Inżynierii Lądowej/Archives of Civil Engineering oraz 2 artykułów w ramach Komisji Nauki Oddziału Rzeszowskiego PZITB w Rzeszowie złożonych na 62. Konferencję Naukową KILiW i KN PZITB „Krynica 2016”.

### **Podsumowanie dorobku naukowego**

Mój dorobek publikacyjny obejmuje 45 artykułów w czasopismach o zasięgu krajowym (w tym 33 po uzyskaniu stopnia doktora) i 10 artykułów w czasopismach o zasięgu międzynarodowym (w tym 9 po uzyskaniu stopnia doktora). Wyniki moich badań zostały również przedstawione w 12 referatach opublikowanych w materiałach konferencyjnych. Jestem autorem lub współautorem sześciu artykułów w czasopismach znajdujących się obecnie w bazie JCR, jednego rozdziału w monografii w języku angielskim i czterech w języku polskim. Sumaryczny impact factor zgodnie z rokiem opublikowania wszystkich

prac naukowych wynosi 4,495. Indeks Hirsha według bazy WoS i Scopus wynosi 3, a według bazy Google Scholar 7. Kierowałem jednym grantem badawczym.

Tabelaryczne zestawienie dorobku przedstawiono w tabelach 1.-3. Wykaz wszystkich opublikowanych prac oraz szczegółowy wykaz osiągnięć naukowo-badawczych, dydaktycznych, organizacyjnych i popularyzacyjnych znajduje się w załączniku 3.

Tabela 1. Zestawienie dorobku publikacyjnego po 30 marca 2005 r. (po uzyskaniu stopnia doktora) wraz z punktacją czasopism

| Lp. | Czasopismo                                                                                                             | Rok wydania artykułu | Pozycja w zał. 3. | Aktualna punktacja MNiSW* |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-------------------|---------------------------|
| 1.  | „Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury. Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture” | 2016                 | II E61            | 9                         |
| 2.  | „Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury. Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture” | 2016                 | II E60            | 9                         |
| 3.  | „Construction and Building Materials”                                                                                  | 2016                 | II A14            | 40                        |
| 4.  | „Zastosowanie statystyki i data mining w badaniach naukowych oraz ...”/rozdział                                        | 2015                 | II E59            |                           |
| 5.  | “Journal of Geography and Geology”                                                                                     | 2014                 | II E20            |                           |
| 6.  | „Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury. Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture” | 2014                 | I B11             | 9                         |
| 7.  | „Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury. Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture” | 2014                 | II E57            | 9                         |
| 8.  | „Roads and Bridges – Drogi i Mosty”                                                                                    | 2014                 | II E58            | 11                        |
| 9.  | „Roads and Bridges – Drogi i Mosty”                                                                                    | 2014                 | I B12             | 11                        |
| 10. | „Budownictwo i Architektura”                                                                                           | 2013                 | I B10             | 6                         |
| 11. | „Magazyn Autostrady”/przedruk                                                                                          | 2013                 | I B8              |                           |
| 12. | „Inżynieria i Budownictwo”                                                                                             | 2013                 | III C7            | 7                         |
| 13. | „Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne”                                                                                  | 2013                 | III C6            | 2                         |
| 14. | „Zeszyty Naukowe PRz”                                                                                                  | 2012                 | I B7              | 9                         |
| 15. | „Zeszyty Naukowe PRz”                                                                                                  | 2012                 | I B9              | 9                         |
| 16. | „Inżynieria i Budownictwo”                                                                                             | 2012                 | I B6              | 7                         |
| 17. | „Zeszyty Naukowe PRz”                                                                                                  | 2012                 | II E56            | 9                         |
| 18. | „Zeszyty Naukowe PRz”                                                                                                  | 2012                 | II E55            | 9                         |
| 19. | „Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne”                                                                                  | 2011                 | III C1            | 2                         |
| 20. | „Przegląd Budowlany”                                                                                                   | 2011                 | II E54            | 5                         |
| 21. | „Izolacje”                                                                                                             | 2011                 | II E53            | 6                         |
| 22. | „Image Analysis & Stereology”                                                                                          | 2011                 | II A16            | 15                        |
| 23. | „Zeszyty Naukowe PRz”                                                                                                  | 2011                 | I B5              | 9                         |
| 24. | „Inżynieria Materiałowa”                                                                                               | 2010                 | II E52            | 13                        |
| 25. | „Przegląd Budowlany”                                                                                                   | 2010                 | II E51            | 5                         |
| 26. | „Computers and Geotechnics”                                                                                            | 2010                 | II A13            | 30                        |
| 27. | „Zeszyty Naukowe PRz”                                                                                                  | 2010                 | II E50            | 9                         |
| 28. | „Zeszyty Naukowe PRz”                                                                                                  | 2010                 | II E49            | 9                         |
| 29. | „Zeszyty Naukowe PRz”                                                                                                  | 2010                 | II E48            | 9                         |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                               |      |                |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|------|----------------|------------|
| 30.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | „Brittle Matrix Composites 9”/rozdział w języku angielskim                    | 2009 | I B4           |            |
| 31.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | „Zastosowanie metod statystycznych w badaniach naukowych III”/rozdział        | 2008 | II E47         |            |
| 32.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | „Zeszyty Naukowe PRz”                                                         | 2008 | II E46         | 9          |
| 33.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | „Inżynieria Materiałowa”                                                      | 2008 | II E45         | 13         |
| 34.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | „R&D – badania innowacyjne z wykorzystaniem analizy danych”/rozdział          | 2008 | II E44         |            |
| 35.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | „Zeszyty Naukowe PRz”                                                         | 2008 | II E43         | 9          |
| 36.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | „Zeszyty Naukowe PRz”                                                         | 2008 | II E42         | 9          |
| 37.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | „Zeszyty Naukowe PRz”                                                         | 2008 | II E41         | 9          |
| 38.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | „Zastosowanie statystyki i data mining w badaniach naukowych”/rozdział        | 2007 | II E40         |            |
| 39.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | „Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce/ Building Physics in Theory and Practice” | 2007 | II E39         |            |
| 40.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | „Inżynieria Morska i Geotechnika”                                             | 2007 | II E38         | 6          |
| 41.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | „Inżynieria Morska i Geotechnika”                                             | 2007 | II E37         | 6          |
| 42.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | „Structural Engineering and Mechanics”                                        | 2007 | I B2           | 20         |
| 43.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | „Budownictwo Ogólne i Konstrukcje Drewniane” - zeszyt naukowy, Łódź           | 2006 | II E36         |            |
| 44.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | „Inżynieria Materiałowa”                                                      | 2006 | I B3           | 13         |
| 45.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | „Zeszyty Naukowe PRz”                                                         | 2006 | II E35         | 9          |
| 46.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | „Zeszyty Naukowe PRz”                                                         | 2006 | II E34         | 9          |
| 47.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | „Przegląd Budowlany”                                                          | 2006 | II E33         | 5          |
| 48.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | „Computers and Concrete”                                                      | 2005 | I B1           | 20         |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                               |      | <b>Łącznie</b> | <b>405</b> |
| * – punktacja według listy MNiSW (lista z 6 grudnia 2016 r.),<br>Punktację MNiSW w przypadku Zeszytów Naukowych Politechniki Rzeszowskiej – Budownictwo i Inżynieria Środowiska przyjęto jak dla Czasopisma Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture JCEEA. |                                                                               |      |                |            |

Tabela 2. Sumaryczny impact factor, liczba cytowań i indeks Hirsha publikacji naukowych (stan na dzień 24 kwietnia 2018 r.)

|                                                                                                           |                                 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| Sumaryczny IF dla artykułów w bazie Journal Citation Reports zgodnie z rokiem opublikowania (pięcioletni) | <b>4,495</b><br><b>(10,213)</b> |
| Sumaryczna liczba cytowań opublikowanych artykułów według bazy Web of Science                             | <b>15</b>                       |
| Sumaryczna liczba cytowań opublikowanych artykułów według bazy Scopus                                     | <b>16</b>                       |
| Sumaryczna liczba cytowań opublikowanych artykułów według bazy Google Scholar                             | <b>134</b>                      |
| Indeks Hirsha według bazy Web of Science (All Databases)                                                  | <b>3</b>                        |
| Indeks Hirsha według bazy Scopus                                                                          | <b>3</b>                        |
| Indeks Hirsha według bazy Google Scholar                                                                  | <b>7</b>                        |

Tabela 3. Zestawienie osiągnięć naukowych (stan na dzień 24 kwietnia 2018 r.)

| Rodzaj pracy                                                                                                                             | Liczba prac w ujęciu sumarycznym | Liczba prac po uzyskaniu stopnia doktora | Liczba prac przed uzyskaniem stopnia doktora |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------|
| publikacje w czasopismach ujętych w części A wykazu czasopism MNiSW posiadających impact factor*                                         | 6 (1)                            | 5 (1)                                    | 1                                            |
| artykuły ujęte w części B wykazu czasopism MNiSW                                                                                         | 43 (21)                          | 31 (12)                                  | 12 (9)                                       |
| monografia                                                                                                                               | 1 (1)                            | 1 (1)                                    |                                              |
| rozdziały w monografiach w języku angielskim                                                                                             | 1                                | 1                                        |                                              |
| rozdziały w monografiach w języku polskim                                                                                                | 4 (4)                            | 4 (4)                                    |                                              |
| publikacje w czasopismach zagranicznych innych niż znajdujące się w bazie Journal Citation Reports                                       | 4 (1)                            | 4 (1)                                    |                                              |
| artykuły o zasięgu krajowym                                                                                                              | 2                                | 2                                        |                                              |
| <b>Publikacje ogółem</b>                                                                                                                 | <b>61</b>                        | <b>48</b>                                | <b>13</b>                                    |
| <b>Referaty</b>                                                                                                                          | <b>38</b>                        | <b>26**</b>                              | <b>12</b>                                    |
| referaty na międzynarodowych konferencjach                                                                                               | 12 (8)                           | 3 (1)                                    | 9 (7)                                        |
| referaty na krajowych konferencjach                                                                                                      | 26 (9)                           | 23 (9)                                   | 3                                            |
| <b>Udział w konferencjach naukowych</b>                                                                                                  | <b>13</b>                        | <b>12</b>                                | <b>1</b>                                     |
| <b>Udział w projektach badawczych</b>                                                                                                    | <b>13</b>                        | <b>12</b>                                | <b>1</b>                                     |
| kierownik                                                                                                                                | 1                                | 1                                        |                                              |
| opiekun naukowy                                                                                                                          | 1                                | 1                                        |                                              |
| główny wykonawca                                                                                                                         | 1                                | 1                                        |                                              |
| wykonawca                                                                                                                                | 10                               | 9                                        | 1                                            |
| <b>Zgłoszenia patentowe</b>                                                                                                              | <b>2</b>                         | <b>2</b>                                 |                                              |
| międzynarodowe                                                                                                                           | 1                                | 1                                        |                                              |
| krajowe                                                                                                                                  | 1                                | 1                                        |                                              |
| <b>Nagrody</b>                                                                                                                           | <b>7</b>                         | <b>5</b>                                 | <b>2</b>                                     |
| Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji                                                                                              | 1                                |                                          | 1                                            |
| Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego                                                                                                    | 1                                | 1                                        |                                              |
| Nagroda Rektora Politechniki Rzeszowskiej                                                                                                | 4                                | 3                                        | 1                                            |
| inne                                                                                                                                     | 1                                | 1                                        |                                              |
| <b>Prace usługowe</b>                                                                                                                    | <b>3</b>                         | <b>2</b>                                 | <b>1</b>                                     |
| <b>Udział w Komitecie Organizacyjnym Konferencji</b>                                                                                     | <b>2</b>                         | <b>2</b>                                 |                                              |
| * w zestawieniu ujęto artykuły w czasopismach, które obecnie znajdują się w części A wykazu czasopism MNiSW (lista z 6 grudnia 2016 r.), |                                  |                                          |                                              |
| *) w zestawieniu ujęto 12 referatów, które zostały opublikowane w czasopismach,                                                          |                                  |                                          |                                              |
| () – w nawiasie podana liczba prac jednoautorskich.                                                                                      |                                  |                                          |                                              |

*Janusz Korndol*

## **Działalność dydaktyczna i organizacyjna**

W ramach pracy dydaktycznej prowadzę zajęcia zarówno na studiach stacjonarnych, jak i niestacjonarnych I i II stopnia (**załącznik 3., pkt III I**). Jestem również współprowadzącym (wraz z prof. dr. hab. inż. Grzegorzem Prokopskim) zajęcia z przedmiotu „Zastosowanie metod badawczych inżynierii materiałowej do oceny materiałów z matrycą cementową” na studiach doktoranckich na Wydziale Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury Politechniki Rzeszowskiej, kierunek *budownictwo* (**załącznik 3., pkt III K**). Jestem współautorem programu zajęć, jak również prowadziłem zajęcia w języku angielskim z przedmiotu „Materials engineering”. Jestem zaliczany do minimum kadrowego studiów pierwszego i drugiego stopnia na kierunku *budownictwo* prowadzonych na Wydziale Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury Politechniki Rzeszowskiej. Jako koordynator przedmiotu opracowałem karty modułu z przedmiotów: technologia betonu (studia stacjonarne I stopnia), materiały do napraw i modernizacji konstrukcji (studia stacjonarne i niestacjonarne II stopnia), metody komputerowe w inżynierii materiałowej (studia stacjonarne i niestacjonarne II stopnia) oraz kompozyty budowlane (studia niestacjonarne II stopnia).

Jestem promotorem licznych prac dyplomowych inżynierskich (53) i magisterskich (66) realizowanych na studiach stacjonarnych i niestacjonarnych, w tym także wyróżnionych przez Komisję Egzaminacyjną oraz Komisję Nauki PZITB Oddział w Rzeszowie. W VI Konkursie Prac Dyplomowych Kierunku „Budownictwo” Politechniki Rzeszowskiej w 2012 r. wyróżniona została praca magisterska na kierunku *budownictwo* Pani Kamili Pleban pt. „Wpływ zabiegów technologicznych na skuteczność napowietrzania betonów”. Wymiernym wynikiem mojego zaangażowania się w pracę ze studentami są liczne publikacje i prezentowane na konferencjach referaty współautorstwa dyplomantów/absolwentów Politechniki Rzeszowskiej (**załącznik 3., pkt III J**).

Ważnym w mojej działalności akademickiej było uczestnictwo od 1 września 2009 r. do 30 września 2014 r. w projekcie „Zwiększenie liczby absolwentów na kierunkach budownictwo, inżynieria środowiska oraz ochrona środowiska” współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego (kierunki zamawiane) (**załącznik 3., pkt III A poz. 1**). Działanie to zostało zrealizowane w ramach Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki, Priorytet: IV Szkolnictwo wyższe i nauka. Działanie: 4.1. Wzmocnienie i rozwój potencjału dydaktycznego uczelni oraz zwiększenie liczby absolwentów kierunków o kluczowym znaczeniu dla gospodarki opartej na wiedzy. Poddziałanie: 4.1.2. Zwiększenie liczby absolwentów kierunków o kluczowym znaczeniu dla

gospodarki opartej na wiedzy. Instytucją pośredniczącą było Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Celem głównym projektu było stymulowanie wzrostu liczby absolwentów kierunków o kluczowym znaczeniu dla gospodarki opartej na wiedzy ze względu na ich priorytetowe znaczenie dla rynku pracy i konkurencyjności gospodarki. Cel główny został zrealizowany przez wzrost liczby osób podejmujących kształcenie na kierunkach zamawianych oraz stworzenie programów stypendialnych, wdrożenie programów wyrównawczych, podniesienie atrakcyjności kształcenia m. in. przez dodatkowe wykłady prowadzone przez specjalistów z przemysłu, wybitnych profesorów z uczelni krajowych i zagranicznych, zajęcia z języka angielskiego w terminologii specjalistycznej dla danego kierunku, wyjazdy studyjne do zakładów pracy, staże dyplomowe oraz kursy specjalistyczne. Celowość prowadzenia takich działań potwierdziło duże zainteresowanie studentów taką formą „uatrakcyjnienia” studiowania.

W projekcie pełniłem funkcję asystenta ds. sprawozdawczości, monitoringu i promocji projektu. Byłem odpowiedzialny za prawidłową realizację projektu, tj.: prowadzenie działań promocyjnych oraz monitoringu i ewaluacji projektu, przygotowanie sprawozdań oraz wniosków z postępu rzeczowego realizacji projektu, organizację wyjazdów, wykładów i staży dla studentów, archiwizację dokumentacji projektu, w tym dokumentów do wniosków o płatność, przygotowanie wniosków o płatność, opracowanie harmonogramu płatności oraz udział w sprawozdawczości, monitoringu oraz kontrolach projektu.

W ramach przedmiotu „technologia betonu”, którego jestem koordynatorem, przyczyniam się do podniesienia atrakcyjności kształcenia przez organizację cyklicznych wyjazdów studyjnych dla studentów II roku studiów stacjonarnych I stopnia kierunku *budownictwo* do zakładów firmy SOLBET Kolbuszowa S.A. (Zakładu Betonów w Kolbuszowej oraz Zakładu Betonów Komórkowych w Głogowie Młp.), produkujących betonowe i żelbetowe elementy prefabrykowane oraz beton komórkowy. Wyjazdy są cennym dla studentów uzupełnieniem programu dydaktycznego (**załącznik 3., pkt III I**). Wyjazdy studyjne dla studentów kierunku *budownictwo* organizowałem także w ramach kierunków zamawianych oraz projektu „Kształcenie innowacyjnych kadr GOW w Politechnice Rzeszowskiej”.

Podczas zajęć z przedmiotu „metody komputerowe w inżynierii materiałowej” oprócz konwencjonalnych metod audiowizualnych korzystam również z własnych programów komputerowych do analizy obrazu (stereologia) oraz analizy fraktograficznej (**załącznik 3., pkt III I**).

Jestem opiekunem Laboratorium Technologii Betonu oraz Laboratorium Mikroskopii Skaningowej Katedry Inżynierii Materiałowej i Technologii Budownictwa. Od 2000 roku jestem odpowiedzialny za wykonywanie opracowań na zamówienie z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego, zarówno na potrzeby instytucji zewnętrznych (ICN Polfa Rzeszów S.A.) (**załącznik 3., pkt III M**), jak i jednostek organizacyjnych Politechniki Rzeszowskiej, m. in. z Wydziału Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury oraz Wydziału Chemicznego. Wykonane opracowania i analizy mikrostruktur wykorzystane były w pracach dyplomowych, pracach doktorskich oraz innych pracach naukowych, w tym grantach i projektach kluczowych (**załącznik 3., pkt II J**). Obsługuję również profilometr laserowy stosowany m. in. w badaniach własnych, w tym badaniach realizowanych we współpracy z Zakładem Oczyszczania i Ochrony Wód oraz Katedrą Zaopatrzenia w Wodę i Odprowadzenia Ścieków dotyczących badań morfologii biofilmów. Zarówno mikroskop skaningowy, jak i profilometr laserowy są wykorzystywane również w procesie dydaktycznym dla studentów. W ramach promocyjnych Wydziału przygotowałem pokaz/zwiedzania Laboratorium Mikroskopii Skaningowej skierowany do uczniów szkół średnich w ramach m. in. Dni Otwartych czy Spotkań z Nauką.

Dwukrotnie byłem powoływany do pełnienia funkcji opiekuna roku na kierunku *budownictwo*. Na bieżąco uczestniczę w wydziałowych komisjach ds. obron prac magisterskich i inżynierskich oraz komisjach egzaminu dyplomowego.

Z ważniejszych, wypełnianych przeze mnie obowiązków w sferze organizacyjnej jest uczestnictwo w powołanej wówczas na Wydziale Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Rzeszowskiej Komisji do Przygotowania Raportu Samooceny za lata 2003-2008 w związku z akredytacją kierunku *budownictwo*.

W latach 2010-2012 pełniłem dwukrotnie funkcję sekretarza organizacyjnego 57. i 58. Konferencji Naukowej Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej Polskiej Akademii Nauk oraz Komitetu Nauki Polskiego Związku Inżynierów i Techników Budownictwa „Rzeszów-Krynica 2011” i „Rzeszów-Krynica 2012” (**załącznik 3., pkt III C**). Konferencja odbywa się co roku w Krynicy-Zdroju i jest to największe w kraju forum naukowców, projektantów, praktyków, wykonawców zajmujących się budownictwem. W latach 2011 i 2012 konferencję organizowała Politechnika Rzeszowska.

Na moją działalność organizacyjną składa się również administrowanie strony internetowej Katedry Inżynierii Materiałowej i Technologii Budownictwa. Jestem odpowiedzialny również za obsługę programu do ewidencji dorobku naukowego pracowników Katedry.

