

Dr hab. inż. Janusz KONKOL, prof. PRz
Katedra Inżynierii Materiałowej i Technologii Budownictwa
Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury
Politechnika Rzeszowska
Al. Powstańców Warszawy 6
35-959 Rzeszów
e-mail: janusz.konkol@prz.edu.pl

Rzeszów, 21.11.2019 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Kamila Tomczaka

pt.: „Badanie zdolności betonu z dodatkami mineralnymi
do samonaprawiania”

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawą formalną opracowania recenzji jest pismo Dziekana Wydziału Górnictwa i Geoinżynierii Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, prof. dr. hab. inż. Marka Cała, z dnia 24.10.2019 r. (WGiG.b.510-2-18-2/2019), informujące o powołaniu mnie przez Radę Wydziału Górnictwa i Geoinżynierii Akademii Górniczo-Hutniczej w dniu 30.09.2019 r. na recenzenta rozprawy doktorskiej Pana mgra inż. Kamila Tomczaka.

2. Przedmiot recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska pt. „Badanie zdolności betonu z dodatkami mineralnymi do samonaprawiania” opracowana przez mgra inż. Kamila Tomczaka. Promotorem pracy jest dr hab. inż. Jacek Jakubowski, profesor AGH, a funkcję promotora pomocniczego w przewodzie doktorskim pełni Pan dr inż. Łukasz Kotwica.

3. Charakterystyka pracy

Rozprawa doktorska liczy 172 stron; w jej skład wchodzi 107 rysunków oraz 24 tablice. Przytoczono w niej 14 norm i raportów oraz 123 pozycje literaturowe, w tym 2 współautorstwa Doktoranta.

Rozprawa składa się zasadniczo z czterech części:

- 1) **Wstępu**, w którym Autor podał definicję materiału samonaprawialnego oraz wskazał powiązania otaczającego nas świata roślin i zwierząt z rozwojem nauki, w tym kluczowego w rozprawie zagadnienia samonaprawialności kompozytów z matrycą cementowa oraz umiejscowił sformułowaną w temacie problematykę w świetle potrzeb i dotychczasowych osiągnięć w kwestii betonów samonaprawianych wskazując kierunki badań własnych. We wstępie dysertacji Autor zamieścił także główną tezę pracy oraz jej cele, dzieląc je na cele ogólne (3) i szczegółowe (5).
- 2) **Przeglądu literatury (rozdział 2)**, na bazie którego Doktorant przedstawił dotychczasowe wyniki badań dotyczących samonaprawialności kompozytów o matrycy cementowej.

Dokonuje usystematyzowania stosowanego nazewnictwa oraz przedstawia główne czynniki determinujące zdolność materiału do samonaprawiania, jak i metody badawcze wykorzystywane do poznania mechanizmów samonaprawialności i oceny efektywności odzysku właściwości mechanicznych.

3) **Części doświadczalnej (rozdziały 3 do 7)**, obejmującej charakterystykę użytych składników betonu (cementu, aktywowanego mechanicznie popiołu fluidalnego, kruszywa oraz zbrojenia rozporozszonego) (rozdział 3), opis planu badań (rozdział 4) i zastosowanych metod badawczych, w tym metody autorskiej oraz sposobie przygotowania próbek (rozdział 5). W rozdziale 6 przedstawiono wyniki badań, które poddano analizie w rozdziale 7. Łącznie ta część rozprawy obejmuje 117 stron i jest wnikliwym opracowaniem zmierzającym do osiągnięcia postawionych celów i udowodnienia tezy pracy.

4) **Podsumowanie i wnioski końcowe** zawarto w **rozdziale 8**.

Rozprawa zawiera również typowe elementy jak: spis treści, streszczenie w języku polskim, wykaz oznaczeń oraz zestawienie bibliografii, tabel i rysunków.

4. Ocena celowości podjętego tematu oraz trafności sformułowanych tez rozprawy

Materiały samonaprawiające się to materiały inteligentne, czyli materiały, które w wyniku wystąpienia bodźców z otoczenia zmieniają swoje własności. Zmiana ta następuje w sposób kontrolowany. Idea samoleczących, inteligentnych materiałów jest wyzwaniem dla naukowców i jednym ze sposobów usuwania lub minimalizacji defektów struktury powstałych na skutek oddziaływania zewnętrznego, a jednocześnie zapobiegania przed zniszczeniem, wydłużając czas eksploatacji i żywotności materiału.

Najbardziej spektakularne rozwiązania dotyczące materiałów samonaprawiających się dotyczą tworzyw sztucznych. Przykładami biomimetyki w inżynierii, choć dalekich od żywych form, są osiągnięcia naukowców z Uniwersytetu Kalifornia, którzy opracowali technologię tworzywa sztucznego, w przypadku którego pęknięcie pojawiające się na jego powierzchni może być wielokrotnie naprawiane, a po naprawie jest ono niewidoczne. Wymogiem jest podgrzanie materiału do temperatury około 120°C. Podobnym rozwiązaniem mogą pochwalić się naukowcy z niemieckiego Karlsruhe Institute of Technology. Opracowany przez nich polimer po samoregeneracji na skutek uszkodzenia w pełni odzyskuje początkowe właściwości mechaniczne. W tym przypadku również możliwy do zainicjowania wielokrotnie mechanizm samoleczenia wymaga bodźca w postaci chwilowego ogrzania materiału. Rozerwana sieć polimerowa regenerowała się w stosunkowo niskich temperaturach od 50°C do 120°C, w ciągu zaledwie pięciu minut.

Jak na razie takie osiągnięcia w przypadku materiałów kompozytowych o matrycy cementowej są nieosiągalne, co potwierdza celowość prowadzenia badań w tym zakresie oraz wpływa na oryginalność podjętego przez Autora tematu. Podjęte w rozprawie zagadnienie należy uznać za istotne zarówno ze względu naukowego, jak i ekonomiczno-ekologicznego. Wprowadzenie do składu betonu aktywowanych mechanicznie popiołów z kotłów o spalaniu fluidalnym ma bowiem na celu nie tylko poprawę wybranych właściwości betonu ale przede wszystkim wskazuje na możliwość utylizacji tego odpadu przemysłowego.

Podsumowując podjęcie tej tematyki uważam za celowe i potrzebne.

Tytuł rozprawy, jak i jej treść zasadniczo odzwierciedla zamierzenia Doktoranta. W oparciu o przeprowadzoną analizę literatury Autor sformułował tezę pracy: „*Wykorzystanie mineralnych materiałów odpadowych w postaci uszlachetnionych popiołów ze spalania w kotłach fluidalnych do produkcji zapraw i mieszanek betonowych zwiększa zdolność stwardniałego materiału do samonaprawiania w stosunku do jego samonaprawialności autogenicznej*”. Z uwagi na postawiony problem badawczy jest ona oczywistą konsekwencją.

5. Ocena merytoryczna pracy

Recenzowana rozprawa, zwłaszcza część badawcza, wskazuje jednoznacznie na dobrze opanowany przez Doktoranta warsztat badawczy, jak również umiejętność wykorzystania wysublimowanych technik badawczych, analizy danych i wnioskowania.

Część studialną pracy, liczącą 18 storn, można uznać za właściwą. Poza przedstawieniem stanu wiedzy w zakresie mechanizmów samonaprawiania kompozytów o matrycy cementowej oraz czynników determinujących proces samonaprawiania tych kompozytów Doktorant dokonuje własnej oceny, w tym także krytycznej, co w pracach naukowych jest jak najbardziej zasadne. W tej części dysertacji Doktorant dokonuje próby usystematyzowania stosowanego nazewnictwa. W tej kwestii zdaniem Recenzenta wymaga wyjaśnienia stosowanie wymiennie określeń pęknięcie (m. in. str. 19, „... ponowne osadzanie tych produktów w pęknięciach.”) lub rysa (m. in. str. 20, „... zintensyfikowanie procesu wypełniania rys ...”). Jako czytelnik, Recenzent odczuwam wrażenie, że w zależności od cytowanych publikacji Autor stosował dane nazewnictwo.

Niedosyt pozostawia również brak podsumowania tej części pracy, zwłaszcza w kontekście zastosowanego jednego z dodatków – aktywowanego mechanicznie popiołu fluidalnego. Zdaniem Recenzenta istotnym, w odniesieniu do podjętego tematu badawczego, co należało podkreślić i przedyskutować są informacje zawarte między innymi w podrozdziale 2.2.4. *Samonaprawialność wzmacniana przez substancje mineralne*. „Większość dotychczasowych badań ... dotyczyła głównie popiołów lotnych krzemionkowych i żużla wielkopieczowego. Ponieważ istotne ilości tych dodatków reagują z wodą nawet w późniejszym wieku promowane jest samonaprawianie autogeniczne wywołane dalszą hydratacją nieprzereagowanych cząstek”. Czy tak jest również w przypadku użytych popiołów?

Część badawczą, o klasycznym układzie, rozpoczyna charakterystyka materiałów użytych do badań. Dokonując opisu aktywowanego mechanicznie popiołu fluidalnego Doktorant podkreśla dużą zmienność wielkości ziaren tego popiołu, jak również znaczną powierzchnię właściwą w porównaniu do powierzchni właściwej ziaren cementu czy użytych w badaniach popiołów z kotłów konwencjonalnych. Konkludując wyniki Autor stwierdził: „... większą powierzchnię właściwą wykazał popiół fluidalny co może powodować większą reaktywność tego spoiwa ...”. Potwierdziły to badania aktywności tego dodatku przeprowadzone i zamieszczone w podrozdziale 3.1.4. *Aktywność dodatków mineralnych*. Znaczący wzrost wytrzymałości na ściskanie zaprawy modyfikowanej aktywowanym mechanicznie popiołem fluidalnym obserwowano przede wszystkim w okresie między 7 a 28 dniem dojrzewania. Natomiast w przypadku zastosowania jako substytutu cementu popiołów konwencjonalnych wzrost wytrzymałości na ściskanie zaprawy nastąpił między 28 a 90 dniem dojrzewania. Takie zachowanie świadczy o szybszej reakcji aktywowanych popiołów fluidalnych, co zauważył również Doktorant (str. 40, dyskusja wyników). Rodzi się zatem pytanie czy można spodziewać się na tyle znaczących reakcji nieprzereagowanych cząstek dodatku aktywowanego popiołu fluidalnego w późniejszym czasie w kontekście ewentualnych zjawisk samonaprawiania kompozytu?

Przyjęty do realizacji plan badań przewidywał wykonanie próbek zarówno z zaprawy, jak i betonu. W obu przypadkach jako modyfikator składu przyjęto alternatywnie aktywowane mechanicznie popioły z kotłów fluidalnych lub popioły z kotłów konwencjonalnych z udziałem 0, 5 i 20% w stosunku do początkowej masy cementu. Jako zmienną wprowadzono także zróżnicowanie stosunku wodno-cementowego, wynoszącego odpowiednio 0,3, 0,4 i 0,5 w przypadku zapraw i 0,25 lub 0,4 w przypadku betonów.

W przypadku zapraw obserwacje procesu ewentualnego samonaprawiania przeprowadzono bezpośrednio po wywołaniu defektu oraz po 1, 4, 7, 14, 28, 62, 92, 122 i 152 dniach. Defekty wywołano w sposób mechaniczny (trójpunktowe zginanie) w próbkach po 28 dniach dojrzewania w warunkach wilgotności względnej powietrza powyżej 90% i temperaturze powietrza $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Rozmiary wywołanych defektów, pęknięć oceniono na 600 do 750 μm ich szerokości. Przed wywołaniem spękań wierzchnią warstwę próbki usunięto (górze i dół próbki, zgodnie z kierunkiem

formowania). Do kolejnego badania próbki były przechowywane w wodzie, a przed kolejnym badaniem były wyciągane i suszone.

Cennym uzupełnieniem badań zapraw na obrazach cyfrowych były: analiza zmian prędkości fal ultradźwiękowych, badania wytrzymałościowe (wytrzymałości na ściskanie), a przede wszystkim ponowne próby trójpunktowego zginania próbek z zapraw uzupełnione o badania SEM z analizą EDS.

Defekty w próbkach betonowych sześciennych o boku 100 mm wywoływano na skutek trzykrotnego cyklicznego obciążenia ściskającego (obciążenie do poziomu 80 lub 85% i odciążenie do 50% średniej wytrzymałości na ściskanie betonu odpowiednio o $w/s = 0,4$ lub $0,25$). Sposób przechowywania próbek i ich przygotowania był analogiczny do procedur wykonanych na zaprawach. Badanie przeprowadzono po 28, 62, 92, 122 dniach dojrzewania. Zakres badań betonów obejmował próbki z defektami oraz próbki świadki. Badanie podzielono na: badania wstępne zależności sposobu obciążania próbek od stopnia spadku prędkości fal ultradźwiękowych, badania ultradźwiękowe bezpośrednio przed i po wywołaniu spękań oraz po założonym okresie samonaprawiania oraz badania zmiany prędkości fal ultradźwiękowych i wytrzymałości na ściskanie na próbkach z defektami wprowadzonymi intencjonalnie oraz próbkach świadkach po założonym okresie samonaprawiania.

Na uznanie w części badawczej zasługuje nie tylko szerokie i wnikliwe przeanalizowanie materiału badawczego oraz dobór adekwatnych metod do określenia wpływu zastosowanych modyfikatorów na procesy samonaprawiania. Istotnym w przedmiotowej kwestii zagadnieniem jest uzyskanie defektu mikrostruktury w postaci pęknięcia, które następnie jest obserwowane pod kontem możliwych procesów samonaprawiania. W tym względzie Autor wykazał się nie tylko pracowitością, ale także pokazał wielki potencjał w rozwiązywaniu stawianych przed sobą wyzwań badawczych. Na potrzeby badań własnych, jak zaznacza sam Doktorant na stronie 53 dysertacji, opracowano autorskie podejście do identyfikacji mikropęknięć przygotowując algorytmy zaimplementowane w środowisku ImageJ i VBA, oraz opracowano procedurę postępowania podczas preparatyki próbek i przygotowania obrazów cyfrowych. Zastosowana metoda została opisana w publikacji. Doktorant na tym etapie badań musiał zmierzyć się z ograniczonymi zdolnościami obliczeniowymi komputera. Znaczna rozdzielczość obrazów i ich rozmiary skutkowały potrzebą rezerwowania znacznych obszarów dysku komputera (blisko 2GB) oraz wydłużały czas przygotowania obrazu i jego analizy.

Obserwacje defektów mikrostruktury oraz etapów ewentualnego ich samonaprawiania wymagało od Autora zastosowania odpowiednich narzędzi umożliwiających wykonywanie zdjęć w różnym czasie i nakładanie ich na siebie. Przeniesienie zdjęć do jednego układu współrzędnych, będącego układem współrzędnych pierwszego zdjęcia w stosie, dokonano przy zastosowaniu metody skaloniezmienniczego przekształcenia cech SIFT (*Scale Invariant Feature Transformation*), metody wykorzystywanej m. in. na potrzeby łączenia zdjęć lotniczych. Obrazy występowania defektów w postaci pęknięć tworzone na podstawie analizy odcieni stopnia jasności na długości linii intersekcji. Kolor czarny świadczył o miejscu występowania poszukiwanego obiektu, tj. pęknięcia. Na potrzeby oceny rozwartości pęknięć opracowano dwa algorytmy pozwalające na identyfikację granicy pęknięcia na długości linii intersekcji, linii pomiarowych.

Istotnym elementem tej części analiz, jak sądzi Recenzent nie bez wpływu Promotora pracy Profesora AGH dr hab. inż. Jacka Jakubowskiego, była statystyczna ocena niepewności pomiarów i metody. Niezmiernie istotna zwłaszcza przy wprowadzaniu nowych metod i algorytmów. Tej kwestii poświęcono podrozdział 5.1.2 pracy.

Uzupełnieniem przeprowadzonej analizy obrazu stwardniałych zapraw były badania z użyciem mikroskopii optycznej oraz, co dokonano także w przypadku betonów badania nieniszczące prędkości fal ultradźwiękowych z wykorzystaniem defektoskopu ultradźwiękowego z głowicą nadawczą generującą falę ultradźwiękową o częstotliwości 40 kHz i odbiorczą. Obie o średnicy 40 mm. Dokładność pomiaru czasu przejścia fali wynosiła 2 μ s, a badania przeprowadzono każdorazowo dla trzech próbek. Do opisu zmian prędkości fal na skutek indukcji spękań i ewentualnego samonaprawiania Autor posłużył się miarą średniej względnej zmiany prędkości fal w odniesieniu do prędkości fal ultradźwiękowych w punkcie czasowym $t_0 = 0$ oraz średniej względnej zmiany prędkości fal znormalizowanej względem prędkości fal po wywołaniu spękań.

Zasadniczą częścią badań efektywności samonaprawiania były badania zmian parametrów mechanicznych przeprowadzone na beleczkach z zapraw ze zbrojeniem rozproszonym o wymiarach 40×40×160 mm oraz kostkach sześciennych z betonu o boku 100 mm. Pęknięcia w próbkach z zaprawy wywołano po 28 dniach dojrzewania w próbie trójpunktowego zginania dopuszczając odkształcenie względne (ugięcie) $\epsilon=1,75\%$. Jak założył Autor, naprężenie dla tego odkształcenia względnego stanowiło parametr opisujący jakość współpracy włókien z matrycą, co Recenzent uznaje za słuszne. Po 180 dniach dojrzewania przeprowadzono ponowne obciążenie próbki w warunkach kontroli przemieszczenia do założonego odkształcenia względnego $\epsilon=10\%$. Moduł odkształcenia przy zginaniu obliczano na podstawie uzyskanych wykresów naprężenie-odkształcenie, dla założonego zakresu poziomu naprężenia od 20% do 80% naprężenia maksymalnego. W próbkach betonowych mikrodefekty wywołano w próbie jednoosiowego ściskania obciążając próbki do 50% średniej, dla uprzednio zbadanych trzech próbek, wytrzymałości na ściskanie. Jako miarę sztywności betonu w trakcie samonaprawiania przyjął Autor średnią względną zmianę modułu odkształcenia podłużnego przy ściskaniu po t dniach samonaprawiania w stosunku do wartości tego modułu określonego w momencie wywołania mikrodefektów w próbce betonowej.

W tej części pracy można zauważyć dążenie Autora do pełnej oceny ewentualnych procesów samonaprawiania. Jest to zamierzenie godne pochwały i pokreślenia, a przyjęte sposoby oceny efektywności ewentualnej samonaprawialności są adekwatne i odpowiednie do osiągnięcia zamierzonego celu dysertacji.

Uzyskane wyniki zamieszczone w rozdziale 6 potwierdzają możliwość zwiększenia samaonaprawialności kompozytów o matrycy cementowej w wyniku zastosowania, jako częściowego substytutu cementu, dodatku aktywowanego mechanicznie popiołu z kotłów fluidalnych. Stwierdzono zróżnicowane zachowanie się procesu samonaprawiania w przypadku badanych zapraw. Zróżnicowany wpływ tych popiołów potwierdziły także badania zamieszczone w podrozdziale 7.3.1. *Aktywności spoiwa w kompozycie*, co potwierdza złożoność podjętej problematyki oraz ambitność Doktoranta do osiągnięcia postawionego celu pracy. Na podstawie analizy obrazów cyfrowych największe zmiany szerokości rozwarcia pęknięć Autor wykazał w pierwszych dniach dojrzewania (do 14 dnia). W niektórych zaprawach zauważono w okresie po 122 dniach samonaprawiania stabilizację tego procesu, przejawiającą się brakiem zmiany względnej szerokości rozwarcia pęknięcia. Największy efekt samonaprawiania po 152 dniach (42,8% zmiany szerokości rozwarcia pęknięcia) Autor uzyskał dla zaprawy o stosunku wodno-cementowym wynoszącym 0,3 i udziale aktywowanego mechanicznie popiołu z kotłów fluidalnych 5% początkowej masy cementu. Podobne zachowanie stwierdzono w przypadku popiołów z kotłów konwencjonalnych.

Cennymi z punktu naukowego i poznawczego są wyniki badań SEM wraz z analizą EDS. Zamieszczone obrazy oraz ich analiza pozwoliła na wykazanie procesu samonaprawiania, a powstające produkty były znacznie inne niż podawane w dotychczasowych publikacjach, co sugeruje współdziałanie w procesie samonaprawiania wprowadzonych do składu aktywowanych mechanicznie popiołów z kotłów fluidalnych. Zastosowanie tego rodzaju popiołu okazało się lepszym rozwiązaniem niż popiołów z kotłów konwencjonalnych.

Istotny element dysertacji stanowią analizy przeprowadzone w rozdziale 7. Dokonując analizy szerokości pęknięć w zależności od przyjętych przedziałów klasowych, stwierdzono że maksymalny odsetek przypadków odzyskania pełnej integralności materiału wystąpił dla pęknięć o rozwartości do 50 μm . Największe rozwartości pęknięć, w przypadku których obserwowano pełne wypełnienie należały do przedziału klasowego 350-400 μm (zaprawa o $w/s = 0,5$ i 20% udziale aktywowanego mechanicznie popiołu z kotłów fluidalnych). Dla większości zapraw maksymalna rozwartość pęknięcia w pełni wypełnionego produktami reakcji należała do przedziału 250-300 μm .

Całość rozprawy zamyka podsumowanie i wnioski wraz z podaniem kierunku przyszłych badań. Łącznie sformułowano 16 wniosków, co pokazuje obszerność przeprowadzonych badań i dogłębność dokonanych analiz.

Jeszcze raz chciałbym podkreślić wybór przez Doktoranta bardzo ambitnego tematu, i fakt osiągnięcia zamierzonego celu badań, przede wszystkim dzięki rozpoznaniu już wykorzystywanych procedur i opracowaniu własnych. Oprócz wykazania się znajomością programowania Pan mgr inż.

Kamil Tomczak nabył również umiejętność wykorzystania własnego potencjału w badaniach naukowych, wykraczających poza ramy badań normowych.

Celem moich uwag jest pokazanie trudności i wieloaspektowości podjętego zadania oraz doskonalenie warsztatu naukowego Doktoranta. Za autorskie, oryginalne elementy pracy, stanowiące o jej wartości naukowej można uznać: podjęcie aktualnego zagadnienia badawczego, również wpisującego się w nurt proekologicznych i budownictwa zrównoważonego, poszerzenie wiedzy naukowej z zakresu samonaprawiania kompozytów o matrycy cementowej modyfikowanej dodatkami oraz uzupełnienie tej wiedzy o kompozyty modyfikowane aktywowanym mechanicznie popiołem z kotłów o spalaniu fluidalnym, wskazanie możliwości jego utylizacji w kompozycie i poprawę zdolności do samonaprawiania kompozytu o matrycy cementowej, sprecyzowanie celów pracy i sformułowanie tezy, przeprowadzenie badań przy metod przetwarzania i analizy obrazu, opracowanie autorskiej metody w tym zakresie oraz wnioskowanie.

6. Uwagi

Ogólna ocena pracy jest pozytywna. Podczas jej lektury nasuwają się pewne pytania i uwagi krytyczne o charakterze dyskusyjnym wymagające ustosunkowanie się do nich Autora pracy. Uwagi te nie obniżają jednak walorów naukowych, warsztatowych i poznawczych pracy. Część uwag została zawarta w punkcie piątym recenzji „Ocena merytoryczna pracy”. Pozostałe uwagi zamieszczono poniżej.

Uwagi merytoryczne

- 1) Str. 12. W sformułowanej tezie pracy Autor używa określenia uszlachetnienie popiołów ze spalania w kotłach fluidalnych. Na czym polega uszlachetnienie tych popiołów?
- 2) Jak zastosowany aktywowany mechanicznie popiół fluidalny wpływa na proces samonaprawiania w betonie? Czy mechanizm samonaprawiania różni się w przypadku betonu zawierającego w swym składzie nieaktywowany popiół z kotłów o spalaniu fluidalnym? Czy zjawisko tworzącego się ewentualnie wówczas wtórnego ettringitu jest pożądane?
- 3) Czy Autor ma wiedzę w kwestii stymulowania procesu samonaprawiania autogenicznego wprowadzonym do składu dodatku aktywowanego mechanicznie popiołu fluidalnego, o czym wspomina na str. 8 dysertacji?
- 4) Jakie były przesłanki w badaniach własnych Autora wyboru udziału aktywowanego mechanicznie popiołu fluidalnego w stosunku do masy cementu 5 i 20% oraz przyjęcie go jako częściowego substytutu cementu? Jednocześnie należy pamiętać, że dodatek wprowadzano w odniesieniu do początkowej masy cementu. W ostatecznym składzie udział tego dodatku jest w odniesieniu do użytego ostatecznie cementu większy.
- 5) Str. 45²⁻⁴ Stwierdzenie Autora „Dodatek superplastyfikatora został dobrany w taki sposób, aby wszystkie zaprawy cechowały się porównywalną konsystencją w trakcie mieszania oraz nieodstającymi znacząco od siebie zawartościami powietrza w świeżych zaprawach mierzonymi metodą grawimetryczną ...” jest nieprecyzyjne. Jak badano konsystencję w trakcie mieszania zaprawy? W pracy nie zamieszczono wyników pomiaru konsystencji zapraw.
- 6) Str. 45, Tab. 11. Czy zawarty w Tabeli 11, str. 45 skład zapraw, do którego Autor odnosi się w kwestii obliczeń gęstości teoretycznej jest składem na 1 m³ zaprawy? W związku z tym, czy zdanie: „... trzynastu wariantów zapraw o stałej sumarycznej zawartości masowej spoiw ...” jest prawdziwe? Różnica gęstości cementu i dodatków powoduje, że uzyskana zaprawa za każdym razem ma inną objętość, zatem ilość cementu/spoiwa w danej, stałej objętości jest różna.

- 7) Str. 48, Tab. 14. Analogicznie do uwagi powyżej - czy podany w Tabeli 14 skład mieszanek betonowych jest przeliczony na 1 m³? Dodatkowego wyjaśnienia wymagają ilości użytego w recepturach modyfikowanych popiołów fluidalnych. Jak określono wartości zamieszczone w kolumnie 3, dla receptur M1, M2 i M4, jaki udział stanowi w tych recepturach dodatek?
- 8) Wprowadzenie obrazu powierzchni próbek do komputera – zamiana na obraz cyfrowy dokonywana była przy użyciu skanera o rozdzielczości 6400 dpi. Jako wielkości stałe przyjęto niezmienną rozdzielczość skanowania oraz utrzymanie stałej odległości rejestratora obrazu od skanowanej powierzchni. Czy Autor próbował dokonywać analizy wpływu na wyjściowy obraz cyfrowy oświetlenia w pomieszczeniu (sztuczne czy naturalne)? Czy próbki podczas skanowania były nakrywane?
- 9) Str. 150 Wyjaśnienia i sprecyzowania wymaga zdanie: „*Pierwszą grupę stanowiły próbki zapraw, w których defekty w postaci rys o rozwarości z zakresu 600-750 μm wprowadzono w próbie zginania trójpunktowego*”. Jak w świetle tego zapisu przeprowadzono analizy zaprezentowane w podrozdziale 7.1?

Pozostałe uwagi, w tym stylistyczne

- 10) Interpretację wyników badań i czytelność pracy nieco utrudnia przyjęty sposób oznaczenia próbek. Na przykład oznaczenie receptury zaprawy Z11F wydaje się odnosić do zaprawy modyfikowanej Flubetem, a nie popiołem z kotłów konwencjonalnych.
- 11) Str. 33⁸⁻⁹ Recenzent uważa, że zaproponowane w pracy uproszczenie „*w postaci produktu FLUBET® (zwany dalej popiołem z kotłów fluidalnych)*” za zbyt daleko idące. Informacja o mechanicznej aktywacji tego popiołu jest niezbędna.
- 12) Str. 40₄₋₂ Stwierdzenie „*Taki stan rzeczy wskazuje na istotnie większą reaktywność popiołów fluidalnych w początkowym okresie dojrzewania w stosunku do popiołów z kotłów fluidalnych*” jest niejasne. Powodem jest uproszczenie przyjętego nazewnictwa (patrz uwaga 11).

Błędy przypadkowe

- 13) Str. 161₂₀: zamiast „D. Jozwiak-Niedzwiedzka” powinno być „D. Józwiak-Niedźwiedzka”.
- 14) Str. 76³: zamiast „modułu odkształcenia przy zginaniu” powinno być „modułu odkształcenia przy ścisnaniu”

7. Wniosek końcowy

Recenzowana praca jest niewątpliwie oryginalnym dziełem naukowym o istotnym znaczeniu poznawczym i użytkowym oraz aktualnej tematyce, w którym Doktorant wykazał się zarówno wiedzą teoretyczną niezbędną do osiągnięcia wyznaczonego celu naukowego i udowodnienia postawionej tezy, jak również wykazał się umiejętnością wnioskowania i samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Zawarte w ocenie uwagi nie umniejszają wartości pracy. Wysoko oceniam zarówno przyjętą metodykę badań, w tym wprowadzenie własnych procedur opartych na komputerowym przetwarzaniu i analizie obrazu, jak również umiejętności programowania.

Stwierdzam, że recenzowana praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie Pana mgr inż. Kamila Tomczaka do jej publicznej obrony.

