

Gliwice, dn. 29.04.2019 r.

Dr hab. inż. Mariusz Jaśniok, prof. PŚ
Katedra Konstrukcji Budowlanych
Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska
44-100 Gliwice, ul. Akademicka 5

RECENZJA
rozprawy doktorskiej mgr inż. Huberta Witkowskiego
pt. „Sekwestracja dwutlenku węgla betonów samozagęszczalnych
w procesie karbonatyzacji

wykonanej w Katedrze Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych
na Wydziale Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska
Politechniki Łódzkiej

Promotor: dr hab. inż. Marcin Koniorczyk, prof. PŁ

1 Podstawa formalna recenzji

Recenzję rozprawy doktorskiej mgr inż. Huberta Witkowskiego pt. „Sekwestracja dwutlenku węgla betonów samozagęszczalnych w procesie karbonatyzacji” opracowano na podstawie:

- pisma Pana Dziekana prof. dr hab. inż. Marka Lefika z 12 marca 2019 r.,
- uchwały nr 753 Rady Wydziału Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska Politechniki Łódzkiej z dnia 7 marca 2019 r.

2 Opis rozprawy

2.1 Układ pracy

Recenzowana rozprawa doktorska składa się z siedmiu rozdziałów i liczy 149 stron. Na wstępie pracy zamieszczono wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń oraz zestawienie 37 tablic, 29 rysunków i 9 zdjęć. Za podsumowaniem pracy znajduje się wykaz literatury, liczący 118 pozycji, z których jedynie 10 artykułów opublikowano przed 2000 rokiem. Za wykazem literatury zamieszczono listę 22 norm, głównie polskich wersji Eurokodów. Na ostatnich czterech stronach rozprawy znajduje się streszczenie w języku polskim i angielskim.

2.2 Zawartość rozdziałów rozprawy

W pierwszym rozdziale liczącym 4 strony przedstawiono zarys omawianego problemu, opisano cel i zakres pracy, a także sformułowano 3 tezy rozprawy.

W drugim rozdziale liczącym 64 strony (43% objętości pracy) przedstawiono stan wiedzy w formie studium literaturowego. W pierwszej części rozdziału omówiono właściwości, metody badań i składniki mieszanek betonów samozagęszczalnych. Następnie opisano aspekty środowiskowe w technologii betonu, zwracając uwagę na ocenę cyklu życia konstrukcji oraz definiując pojęcie śladu węglowego i sekwestracji dwutlenku węgla w betonie. W trzeciej, ostatniej części rozdziału omówiono proces karbonatyzacji betonu, wyszczególniając czynniki wpływające na jej przebieg, a także opisując modele teoretyczne procesu oraz metody badań.

W trzecim rozdziale na 38 stronach (26% objętości pracy) opisano badania własne, które rozpoczęto od przedstawienia metodyki i wyników badań składników i właściwości mieszanek betonowych oraz właściwości mechanicznych betonów. Zasadniczą, ostatnią częścią tego rozdziału są badania postępu karbonatyzacji i ilości pochłoniętego dwutlenku węgla określane metodą wskaźnikową, pomiarami spektrometrycznymi i termicznymi.

Kolejne dwa główne rozdziały rozprawy o numerach 4 i 5 dotyczące analizy śladu węglowego oraz analizy maksymalnej ilości pochłoniętego dwutlenku węgla liczą sumarycznie cztery strony. W rozdziałach tych zamieszczono podsumowania i porównania wyników badań własnych oraz wyników pozyskanych z badań literaturowych. Rozdział szósty rozprawy zawiera wnioski końcowe, natomiast rozdział siódmy stanowi podsumowanie całej pracy.

2.3 Ocena układu pracy

Analizując układ pracy wyraźnie odczuwa się niekorzystną silną dominację części dotyczącej studium literaturowego nad badaniami własnymi, których opis zajmuje zaledwie 1/4 objętości całej rozprawy. Jako niezbyt właściwe należy uznać wydzielenie aż dwóch głównych rozdziałów o numerach 4 i 5, dotyczących analiz obliczeniowych, które sumarycznie zajmują tylko cztery strony. Bardziej właściwe byłoby włączenie tych rozdziałów do części związanej z badaniami własnymi (czyli do rozdziału nr 3), jako ich podsumowanie.

3 Ocena merytoryczna pracy

3.1 Ocena ogólna i trafność podjęcia tematu

Temat recenzowanej rozprawy doktorskiej bardzo dobrze wpisuje się we współczesne trendy ekologiczne w produkcji, eksploatacji i utylizacji materiałów budowlanych. Doktorant podjął interesującą próbę oceny tzw. śladu węglowego na etapie produkcji, transportu, wbudowania, eksploatacji i rozbiórki betonowych elementów konstrukcyjnych. Zasadniczo ślad węglowy obejmuje emisję i ewentualnie pochłanianie wszystkich gazów cieplarnianych w całym cyklu życia produktu, przy czym w recenzowanej rozprawie dotyczącej materiału jakim jest beton, Autor słusznie skoncentrował się wyłącznie na dwutlenku węgla, który ma blisko

stuprocentowy udział w śladzie węglowym cementu. Niezwykle cenną myślą przewodnią rozprawy jest wielokrotnie podkreślana przez Autora konieczność kompleksowej analizy śladu węglowego betonu, czyli w pełnym cyklu życia konstrukcji betonowej (z ang. *cradle-to-gate*). Doktorant słusznie zauważa, że najczęstszym scenariuszem przyjmowanym w analizie śladu węglowego jest zgodnie z Eurokodem branie pod uwagę jedynie fazy produkcji materiału. Często w ocenie śladu węglowego analizowany jest również nieco szerszy fragment cyklu życia materiału, obejmujący oprócz procesu produkcji, również proces wbudowania. Wymienione niepełne analizy cyklu życia konstrukcji w przypadku elementów betonowych powodują istotne zafałszowanie obliczonej wartości śladu węglowego, ponieważ każdy element betonowy poczynając od fazy eksploatacji jest permanentnie narażony na oddziaływanie dwutlenku węgla zawartego w powietrzu atmosferycznym. Reakcja wnikażącego w pory betonu CO₂ z wodorotlenkiem wapnia w betonie powoduje proces nieuniknionej, stopniowej karbonatyzacji, której głównym produktem jest węglan wapnia, a produktem ubocznym woda. Ten naturalny proces pochłaniania i absorpcji dwutlenku węgla przez beton, czyli proces sekwestracji CO₂, w sposób zasadniczy poprawia ślad węglowy betonu, ponieważ uwzględniane są tzw. strumienie odwrotne gazu cieplarnianego. Należy jednak podkreślić, że korzystne zjawisko poprawy śladu węglowego betonu w wyniku procesu sekwestracji CO₂ równocześnie wiąże się z neutralizacją (zobojętnieniem) cieczy wypełniającej pory betonu, co w przypadku konstrukcji żelbetowych będzie stanowiło bezpośrednie zagrożenie rozwojem korozji stalowego zbrojenia. Jak można łatwo zauważyć ekologicznie korzystna sekwestracja dwutlenku węgla w betonie powoduje w przypadku zbrojonych konstrukcji betonowych bardzo niekorzystne zjawisko rozwoju korozji elektrochemicznej stalowego zbrojenia. Wspomniany wątek, aczkolwiek nie najistotniejszy z punktu widzenia tematu pracy, nie został jednak przez Autora rozprawy w żadnym miejscu skomentowany. Należy jednak podkreślić, iż poza tym drobnym brakiem, zamieszczone w pracy bardzo obszerne studium literaturowe zostało napisane komunikatywnym językiem technicznym, przeprowadzając czytelnika płynnie od zagadnień i pojęć podstawowych do bardziej zaawansowanych. Jest to zdaniem recenzenta ewidentną zaletą ocenianej pracy.

Natomiast druga, zasadnicza część rozprawy dotycząca badań własnych Autora sprawia wrażenie nieco mniej dopracowanej i mniej czytelnie przedstawionej. Również objętościowo ta część pracy wygląda dużo skromniej od nieco zbyt obszernej części dotyczącej studium literaturowego. Doktorant wykonał badania laboratoryjne i obliczenia śladu węglowego dla trzech różnych betonów samozagęszczalnych, analizując sekwestrację dwutlenku węgla w procesie karbonatyzacji. Omówienie części doświadczalnej rozpoczął, zdaniem recenzenta, od zbyt szczegółowego opisu typowych, normowych badań właściwości składników mieszanek betonowych oraz ich konsystencji i urabialności. Następnie po scharakteryzowaniu właściwości mechanicznych badanych betonów przeszedł do kluczowej części badań dotyczących oceny procesu karbonatyzacji. Ocena ta została przeprowadzona zarówno prostymi metodami wskaźnikowymi (fenoloftaleiną i Rainbow Test) oraz metodami bardzo zaawansowanymi: spektrometryczną i analizami termicznymi (TG i DTA). Niestety w przypadku wymienionych bardzo ciekawych poznawczo i zaawansowanych technicznie badań

spektrometrycznych i termicznych prezentacja wyników na wykresach jest w wielu przypadkach bardzo nieczytelna, a ponadto brakuje bezpośredniego wskazania opisywanych w tekście fragmentów rozkładu punktów pomiarowych, co utrudnia ocenę poprawności wykonanej analizy. Ostatecznie Autor rozprawy wyniki badań porównał m.in. z zapisami normy PN-EN 16757:2017-07, która umożliwia obliczenie maksymalnej teoretycznej ilości dwutlenku węgla pochłoniętego przez całkowicie skarbonatyzowany beton, uzyskując niestety dość rozbieżne wartości. Na pewno cennym i merytorycznie wartościowym wkładem Doktoranta w rozwój metod badawczych dotyczących badań karbonatyzacji betonu jest autorski sposób pobierania materiału do badań spektrometrycznych i analiz termicznych.

3.2 Uwagi dyskusyjne, pytania

W ramach metod badawczych służących ocenie zasięgu karbonatyzacji betonu Doktorant zastosował proste metody wskaźnikowe, a także metody bardzo zaawansowane: spektrometryczną i termiczną. W literaturze wymienia się również inną dokładną metodę oceny stopnia karbonatyzacji betonu na podstawie pomiarów pH roztworów modelowych cieczy porowej betonu. Doktorant w swojej rozprawie sygnalizuje, że zna taką metodę, jednak w badaniach laboratoryjnych nie wykorzystał jej możliwości do pozyskania bardzo cennych dodatkowych informacji. Proszę o wyjaśnienie, jakie były przyczyny pominięcia tej metody w badaniach? Proszę również o komentarz dotyczący potencjalnych korzyści, jakie wniosłaby ta metoda do analizy porównawczej śladu węglowego badanych betonów.

W ramach studium literaturowego Doktorant bardzo obszernie opisał różne aspekty procesu karbonatyzacji betonu, natomiast pominął istotny wątek związany ze zjawiskiem zubożniania wysokoalkalicznej cieczy porowej betonu przez rozpuszczający się w niej kwaśny gaz, co w konsekwencji stwarza bezpośrednie zagrożenie korozyjne dla stalowego zbrojenia. Proszę o komentarz dotyczący zjawiska stopniowej karbonatyzacji betonu, który stanowi zagrożenie korozyjne dla stalowych wkładek zbrojeniowych.

Generalnie w rozprawie doktorskiej koncentrowano się na badaniu całkowitej karbonatyzacji betonu. W rzeczywistości front postępującej karbonatyzacji jest bardziej rozmyty oraz istotnie różni się w betonie suchym i zawilgoconym. Czy stosowanymi przez Doktoranta metodami można byłoby ocenić szerokość takiego zmiennego frontu?

Opracowana autorska metodyka badań jest ciekawa i na pewno poprawia wiarygodność wyników uzyskiwanych metodami termicznymi i metodą spektrometryczną. Bardzo podobne problemy z wiarygodnością wyników badań skarbonatyzowanego betonu występują w przypadku oceny poziomu zubożnienia cieczy wypełniającej pory betonu przez dyfundujący dwutlenek węgla. Czy Doktorant widzi możliwość wykorzystania opracowanej nowej metodyki poboru materiału do badań w kontekście oceny zagrożenia korozją stalowego zbrojenia przez skarbonatyzowany beton?

3.3 Uwagi edytorskie

W ocenianej pracy niestety nie zadbano o dobrą jakość i ujednoczenie wszystkich rysunków, a w szczególności wykresów. Dotyczy to przede wszystkim prezentacji wyników badań własnych, gdzie mało czytelne są 3 wykresy na rys. 16÷18, a bardzo nieczytelne z miniaturowymi opisami jest 6 bardzo ważnych wykresów na rys. 22÷27. Opisany mankament nie tylko wpływa na niezbyt korzystny wizualnie odbiór tej części pracy, ale również bardzo utrudnia ocenę merytoryczną uzyskanych wyników badań.

W trakcie lektury pracy natrafiono także na literówki oraz drobne błędy stylistyczne, np.:

- str. 26, 13 wiersz od dołu, brak spacji między wyrazami – „metodasitowejsegregacji”,
- str. 28, 10 wiersz od dołu, napisano: „(...) poszczególnych klasy”, powinno być: „(...) poszczególnych klas”,
- str. 31, 14 wiersz od dołu, napisano: „zgodnie z Rysunek 6”, powinno być :„zgodnie z rysunkiem 6”,
- str. 48, wiersze 8, 9, 10, 11 od dołu – brak konsekwentnej odmiany końcówek wyrazów,
- str. 50, wiersz 3 od dołu, brak spacji między wyrazami „newconstruction”, itd.

4 Podsumowanie i wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Huberta Witkowskiego pt. „Sekwestracja dwutlenku węgla betonów samozagęszczalnych w procesie karbonatyzacji” stanowi moim zdaniem wartościowe osiągnięcie naukowo-badawcze w zakresie inżynierii materiałowej, badań materiałów budowlanych, a także w kontekście szeroko rozumianej ekologii. Doskonale wpisuje się w obecne trendy poszukiwań efektywnych sposobów oceny redukcji dwutlenku węgla w atmosferze. Autor opracował oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, a także wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Niniejszym stwierdzam, że w przypadku ocenianej rozprawy wymagania Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z 14 marca 2003 r. (art. 13.1) zostały spełnione i wnoszę do Rady Wydziału Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska Politechniki Łódzkiej o dopuszczenie pana mgr inż. Huberta Witkowskiego do publicznej obrony pracy doktorskiej.

