

Warszawa, 16 sierpnia 2022 r.

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Kledyński  
Politechnika Warszawska  
Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki  
i Inżynierii Środowiska  
Zakład Budownictwa Wodnego i Hydrauliki

**Recenzja**  
**rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Karola Wandocha**  
**pt. „Kształtowanie składu współczesnego betonu dla potrzeb budownictwa**  
**z uwzględnieniem wymagań ekologicznych”**

**1. Podstawa formalna recenzji**

Formalną podstawą niniejszej recenzji jest pismo (znak RDILT.512.18.2022) z dnia 6.07.2022 r. Pana dr hab. inż. Marcina Stańka, prof. PŚ, przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport w Politechnice Śląskiej oraz dołączona doń umowa. Załącznikiem do przywołanego pisma był także egzemplarz rozprawy doktorskiej Pana Karola Wandocha.

**2. Informacje ogólne o rozprawie**

Rozprawa doktorska została napisana w języku polskim. Jej treść zajmuje 130 stron, w tym 69 tabel oraz 70 rysunków. Wykaz przywołanych w rozprawie pozycji literatury obejmuje 152 pozycje. Ponadto w dysertacji przedstawiono streszczenie w języku polskim i angielskim.

Rozprawa powstała pod opieką promotorską Pana prof. dr hab. inż. Zbigniewa Giergicznego i promotora pomocniczego Pana dr inż. Artura Goldy.

Przedmiotem pracy są badania technologiczne nad wykorzystaniem tzw. cementów niskoemisyjnych (zdefiniowanych jako zawierające powyżej 35% innych składników głównych niż klinkier portlandzki – str. 9, w. 3 od góry) w produkcji betonów określanych jako: zwykłe (stosowane głównie w budownictwie kubaturowym), masywne, wysokowytrzymałościowe BWW oraz samozagęszczalne SCC, a także w betonie przeznaczonym do produkcji elementów prefabrykowanych oraz betonach mrozoodpornych.

Utylitarnym celem pracy jest przyczynienie się do szerszego wykorzystania tych cementów w produkcji betonów, zwłaszcza o specjalnych właściwościach, i tym samym ograniczenie produkcji klinkieru portlandzkiego, generującej wysokie emisje CO<sub>2</sub>. Tak więc praca wpisuje się we współczesne działania proekologiczne polegające na ograniczaniu emisji gazów cieplarnianych, wykorzystaniu produktów ubocznych i zamykaniu cykli gospodarki obiegu zamkniętego oraz oszczędzaniu zasobów pierwotnych.

Doktorant stawia tezę, że współczesna technologia cementu i betonu jest w stanie podołać przywołanym wcześniej wyzwaniom. Dodatkowe przesłanki podjęcia tematu to stosunkowo wysoki wskaźnik klinkierowy cementów w Polsce (str. 13) oraz niedobory żużla wielkopieczowego i popiołu lotnego krzemionkowego, które można by w części zastąpić łatwo dostępnym wapieniem (str. 116).

Rozprawę podzielono na siedem numerowanych rozdziałów; które uzupełniają streszczenia.

Po wprowadzeniu i rozdziale opisującym cel i zakres pracy Doktorant przedstawił studia literaturowe tematu (rozdział 3). Badania własne są przedmiotem rozdziału 4. Dalej następuje podsumowanie (rozdział 5) i wnioski (rozdział 6). Zestawienie przywołanej literatury i norm umieszczono w rozdziale 7.

### 3. Uwagi szczegółowe do rozprawy

#### Uwagi dotyczące języka rozprawy i redakcji tekstu

W tekście występują błędy językowe i redakcyjne. Do częstszych (i niestety już upowszechnionych) zaliczyć można stosowanie *dla* zamiast *w celu* oraz nagminne nadużywanie przecinków w miejscach przerw logicznych; przykład ze str. 80: „*W aktualnych standardach technologicznych wykonywanie betonów o klasie wytrzymałości na ściskanie powyżej C12/15, bez zastosowania plastyfikatora lub superplastyfikatora, należy do rzadkości.*”

Gdyby wyodrębniona przecinkami (i tu podkreślona) część zdania była wtrąceniem uzasadniającym obecność przecinków, to jej pominięcie nie powinno zmienić logiki zdania. W tym przypadku jednak zdanie bez części ujętej przecinkami ma sens wręcz przeciwny do zamierzonego i brzmi: „*W aktualnych standardach technologicznych wykonywanie betonów o klasie wytrzymałości na ściskanie powyżej C12/15 należy do rzadkości.*”

W tezie (str. 9) można wyczytać, że beton jest działaniem. To niepotrzebny, zwłaszcza w tym miejscu, skrót myślowy.

Str. 10: klinkier cementowy – czy to poprawne określenie?

Str. 10: zamiar surowcowy – to określenie żargonowe. Podobnie jak *beton palowy* na str. 27.

Str. 37: *wyższej powierzchni, wyższej ilości superplastyfikatora...* Powinno być większej...

Str. 43, w. 2 od dołu: jest *esteru* a powinno być *eteru*(?) W grę może wchodzić jeszcze *estru*...

Str. 44, rys. 24: Rysunek jest nad wyraz umowny i dydaktyczny, ale w tekście się go nie komentuje. Wydaje się niepotrzebny, także z punktu widzenia dalszych analiz.

Tab. 17: w opisie pierwszej kolumny powinno być: Maksymalny wymiar kruszywa  $D_{\max}$  [mm].

Str. 49, tab. 19 i str. 50, tab. 22: Powierzchnia właściwa popiołu i żużla jest dokładnie taka sama. Czy to przypadek, czy pomyłka?

Str. 53: w tekście nad tabelą 28 powinien być wymieniony także CEM I 42,5 R jako drugi cement referencyjny.

Str. 55: Pod tabelą 31 przytoczono błędnie wartość 279,6 zamiast, jak to jest w czwartej kolumnie i ostatnim wierszu tabeli, 276,0.

Str. 56: w nagłówku tabeli 33 brakuje frakcji 16/31,5

Str. 60, rozdział 4.2.5: zamiast *z definicji* powinno być - z założenia.

Str. 68, wiersz 3 od góry: zamiast *znajdują rozwiązania* powinno być - znajdują zastosowanie.

Str. 79, tab. 48: Gęstość betonu XC2 I wydaje się błędna ( $2990 \text{ kg/m}^3$ ).

Str. 79: W podpisach pod rysunkami 42 i 43 zamiast *oznaczonych...* powinno być: w grupie... Betony mają swoje oznaczenia indywidualne, a łączy je oznaczenie grupy.

Str. 86, rys. 50: w podpisie dodać: w grupie XF3

## Uwagi o charakterze merytorycznym

Przedstawione niżej uwagi w części mogą prowadzić do drobnych korekt tekstu lub prezentacji danych, gdyż mogą mieć charakter nie tyle merytoryczny ile uchybień redakcyjnych, czego recenzent nie potrafił jednoznacznie rozstrzygnąć i pozostawia to Doktorantowi. W pozostałych uwagach znajdują się także kwestie, które mógłby Doktorant rozwinąć w odpowiedzi na postawione pytania – wyróżniono je kolejnymi literami alfabetu; mają one także charakter dyskusyjny.

- a) Brak jednoznacznej definicji cementów niskoemisyjnych, zwłaszcza popartej odpowiednią literaturą. Na str. 9 jest zdanie: „*Cementy niskoemisyjne to cementy zawierające w swoim składzie powyżej 35% innych składników głównych niż klinkier portlandzki.*” Czy jest to pogląd powszechny? Poparty jakimiś analizami lub liczbowymi ograniczeniami emisji konkretnego rodzaju?

Str. 11: pierwszy akapit od góry – Sekwestracja CO<sub>2</sub> nie zmieni emisji wynikającej z rozkładu węglanów, o której mowa w zdaniu poprzedzającym.

Str. 11: akapit pierwszy od dołu – ograniczanie emisji CO<sub>2</sub> polegające na zmniejszaniu udziału klinkieru w cementach będzie skuteczne o tyle, o ile doprowadzi do ograniczenia produkcji klinkieru, a ślad węglowy zamiennych składników głównych będzie niższy niż klinkieru. Nota bene cichym założeniem pracy jest zerowa emisyjność CO<sub>2</sub> przypisana żużłowi (S), popiołowi krzemionkowemu (V) i wapieniowi (V, VV). W szerzej zakrojonych analizach, np. LCA, nie jest to prawdziwe.

Tab. 3: W tabeli zestawiono dane o betonach z cementami CEM I oraz – alternatywnie – CEM III lub CEM II. Identyczne klasy wytrzymałości betonu osiągną przy tych samych dozowaniach cementu CEM I i CEM III oraz CEM I i CEM II. Sugeruje to pełną ekwiwalentność porównywanych cementów. Nawet jeśli tak jest w odniesieniu do wytrzymałości, to jednak nie bez dodatkowych zabiegów lub uwarunkowań (domieszki i redukcje w/c lub zmiana terminu badania etc.). Tabela powinna być lepiej objaśniona; samo zestawienie emisji CO<sub>2</sub> jest w tym ujęciu banalne.

- b) Str. 17: Cytat: „W Polsce produkcja betonu powinna być zgodna z normą PN-EN 206 wraz z krajowym uzupełnieniem PN-B 06265”. Jakie są formalno-prawne podstawy takiego stwierdzenia (oczekiwania)?

Str.17: w zdaniu 4 od dołu należy dodać, że otulina powinna być nie tylko odpowiedniej grubości, ale beton w niej powinien mieć także odpowiednie właściwości.

- c) Str. 26-30: Wspomina się tu o oczekiwanych okresach użytkowania obiektów drogowo-mostowych na poziomie 100 i więcej lat. Jednocześnie wskazuje przykłady klasyfikowania betonów w tych obiektach według klas ekspozycji z normy PN-EN 206, która bazuje na 50-cioletnim okresie trwałości. Czy, i ewentualnie, jak te różnice wpłynęły na przyjmowane ograniczenia dot. składu betonów w tych obiektach?
- d) Str. 36, akapit pierwszy od góry – Jest tu komentarz do danych z tabeli 13: „*Rodzaj zastosowanych cementów oraz dodatku typu II w postaci popiołu lotnego krzemionkowego spowodował znaczny przyrost wytrzymałości na ściskanie w okresie pomiędzy 28 a 90 dniem dojrzewania.*” Pytanie: znaczny przyrost względem czego? Między 7 a 28 dniem przyrosty były większe.
- e) Str. 36: pojawia się pojęcie betonu wysokowytrzymałościowego, ale bez bliższego określenia. Na str. 96 przybliży się to pojęcie wskazując, że dotyczy ono klas wytrzymałości powyżej C50/60. Czy to znajduje uzasadnienie w literaturze przedmiotu, np. zagranicznych normach na te betony?

Str. 38: ...w warunkach obniżonych temperatur, a także w warunkach zimowych. Czym te warunki się różnią?

Str. 44, w. 13 od dołu: ...korozji związanej z karbonatyzacją... W wielu pozycjach literatury karbonatyzacji nie uznaje się za korozję betonu (jest groźna dla żelbetu), a jednocześnie próbuje się ją traktować jako pomysł na sekwestrację CO<sub>2</sub>.

Str. 45, w. 1 od góry: Nie sposób zgodzić się ze stwierdzeniem, że na mrozoodporność betonu (traktowanej jako obiektywna właściwość betonu, tj. odporność na przemienne zamrażanie i odmrażanie) wpływa metoda jej badania. Metoda określa sposób testowania mrozoodporności, a ten może być nieadekwatny do rzeczywistych warunków pracy betonu w środowisku o zmiennej temperaturze, gdy spada ona okresowo poniżej zera Celsjusza. Nie utożsamiamy obiektywnej potencji materiału ze sposobem jej badania. Metody powinny być walidowane i dzięki temu właściwie dobierane do celu badań. W tym przypadku metod jest wiele i jeszcze więcej wątpliwości co do zakresów ich stosowania.

- f) Str. 47, w. 1 od dołu: Żużle wykazują podwyższony poziom promieniotwórczości. Względem czego podwyższony?

Str. 48, w. 1 od dołu: Emisja CO<sub>2</sub> zastosowanych cementów a ślad węglowy badanych betonów. Czym się to różni? Patrz także str. 119, tab. 69, w której pojęcia te utożsamia się

- g) Str. 55, akapit pierwszy od dołu – w odniesieniu do frakcji kruszywa 2/8, 8/16 i 16/31,5 można mówić o udziale podziarna i nadziarna. Pojęcie punktu piaskowego dotyczy mieszanki kruszyw do betonu. Czy szczegółowe dane o zawartości piasku we frakcjach kruszywa grubego zostały w jakiś sposób wykorzystane w projektowaniu mieszanek i analizach wyników badań?

Str. 63 i 66: Przedstawione opisy to dość subiektywny wybór spostrzeżeń wynikających z oglądu pokazanych tabel i wykresów. Nie zawsze są one poparte liczbami i analizą statystyczną tych danych, stąd mają charakter w znacznej mierze jakościowy. Do spostrzeżeń na stronie 63 recenzent ma następujące uwagi:

1. Spostrzeżenie z trzeciego zdania od góry dotyczy nie tylko CEM I 52,5 R, ale także CEM(S)15%.
2. Zdanie czwarte od góry nie dotyczy CEM(LL).
3. W zdaniu trzecim od dołu nie sprecyzowano, o który superplastyfikator chodzi (najlepiej, gdyby nawiązano do jego nazwy podanej w tabeli 40).

W odniesieniu do opisów na str. 66 można zapytać o kierunek spostrzeżeń, tj. jakiej tezy w tych spostrzeżeniach Autor próbuje się doszukać? Jeśli bowiem, dla przykładu, szukać w cementach przygotowanych w warunkach laboratoryjnych ekwiwalentów CEM I 52,5 R, to będą nimi wszystkie z 15% udziałem innych składników głównych (ISG), w grupie z 30% udziałem ISG tylko CEM 30 (S-LL) i CEM 30 S, a w grupie z udziałem 50% ISG tylko CEM 50 S.

Str. 68, ostatnie zdanie na stronie: uwaga o podwyższeniu trwałości jest na tym etapie tylko domniemaniem.

Str. 72, ostatni akapit: jego obecność w tym miejscu jest sztuczna.

Str. 75/76 ostatnie zdanie. Urabialność jest cechą niemierzalną. Jak ją oceniano w pracy? Ponadto „wrzucenie” do jednego worka CEM III/A z CEM I 42,5 R w podsumowaniu „utrzymania właściwości reologicznych w czasie” nie jest uzasadnione, gdyż CEM III/A w kategorii rozpliw był na pierwszym

miejscu (stracił między 5 i 90 minutą najmniej na konsystencji zaprawy), w kategorii granica płynięcia był trzeci pod względem przyrostu tej wielkości (środek rankingu), a w kategorii lepkość plastyczna również trzeci pod względem zmiany wielkości w czasie. Ponadto wykazał po 90 minutach najwyższy rozptył i najniższą granicę płynięcia.

W analizie zabrakło wyliczeń przyrostów, rankingowania cementów w kategoriach i dołączenia relacji między wartościami bezwzględnych mierzonych wielkości reologicznych. To jedynie pokazuje, że kwestie optymalizacyjne są bardziej złożone i nie mogą bazować tylko na spostrzeżeniach jakościowych.

Str. 77, akapit nad tabelą 46: pojawiają się tu dwa pojęcia: beton zwykły i beton towarowy. Nie są one zamienne. Lepiej ich nie używać, ograniczając się w opisie badanej grupy betonów do ich związków z określonym rodzajem budowli i klasami ekspozycji. Dotyczy to także tytułu tabeli 47.

Str. 80 i 81, rys. 44 i 45 oraz analogicznie dalej: wskazane jest podanie co oznaczają tzw. wąsy na wykresach słupkowych, tzn. czy wyznaczają przedział o jakiejś krotności odchylenia standardowego, czy też są inną miarą rozrzutu.

Str. 81, opis badania głębokości penetracji wody pod ciśnieniem: opis nie jest precyzyjny i zawiera błędy stylistyczne.

- h) Str. 84, ostatnie zdanie w pierwszym od góry akapicie (pod rys. 49): *Cementy niskoemisyjne wykazywały mniejszą podatność na wzrost skurczu wraz ze wzrostem stosunku w/c w betonie (rys. 48 i 49). Jak to oceniono? Czy ocenę taką można poprzeć ilościowo?*

Str. 87-89: brakuje opisu badania mrozoodporności, w tym m.in. terminu badania próbek porównawczych. Opis taki (wciąż bez terminu badania próbek – świadków) jest dopiero na str. 98; są w nim natomiast dwa, nie numerowane i dość banalne wzory...

- i) Str. 90, tab. 52: w przedostatnim wierszu tabeli podano wskaźniki w/c. Wartości te odpowiadają punktom 1), 2) i 3) w opisie ponad tabelą, ale ich wyliczenie z wykorzystaniem danych z tabeli (C=390 kg i W=168 oraz 158) daje inne wartości (odpowiednio 0,43 i 0,41). Prośba o wyjaśnienie.

Str. 95, tab. 56: uwaga analogiczna do tej, jaką sformułowano do tabeli 52; dotyczy w/c.

- j) Str. 95 i 101: Czas mierzono „od pierwszego kontaktu wody z cementem”. W innym miejscu „od wymieszania składników” Prośba o wyjaśnienie powodu różnicy.

Rozdział 4.5.3 Beton wysokowytrzymałościowy: Dlaczego nie badano skurczu betonów? Ze względu na znaczne dozowania cementu można oczekiwać sporego skurczu autogenicznego. Analogiczna uwaga dotyczy rozdziału 4.5.4 Beton samozagęszczalny.

Rozdział 4.5.5. Beton masywny: Wobec obniżonego dozowania cementu i dodatku popiołu lotnego krzemionkowego (przesłanki termiczne) wskazane byłoby badanie mrozoodporności. Ma to znaczenie dla decyzji o ewentualnym strefowaniu betonu na wewnętrzny i zewnętrzny w masywie.

- k) Str. 99: Autor słusznie zauważa, że pozytywna ocena mrozoodporności jest zapewne wynikiem wysokiej szczelności badanych betonów. Wiadomo jednak, że w rzeczywistych warunkach pracy betonu, w dłuższym okresie czasu może się on nasycić wodą ponad bezpieczną miarę. Powstaje pytanie o adekwatność testu mrozoodporności. Prośba o komentarz.

Str. 101, tab. 60: uwaga analogiczna do tej, jaką sformułowano do tabeli 52 i 56. Dotyczy w/c i braku w/s.

Str. 105, tab. 63: uwaga analogiczna do tej, jaką sformułowano do tabeli 52 i 56. Dotyczy w/s.

- l) Str. 109, tab. 65: w zestawie cementów brakuje CEM VI (S-V) oraz CEM II/C-M (S-LL) i CEM II/C-M (S-V). Dlaczego? Prośba o wyjaśnienie.

Str. 110, rys. 66: Przy założeniu o braku emisji z nie klinkierowych składników głównych.

Str. 110, rys. 67: Warto podać, że przedstawione wyliczenia bazują na danych ze stron 69 i 70 (rys. 29-32). Czytelniejszy byłby także wymiar pokazanej wielkości charakteryzującej emisję CO<sub>2</sub> - [kg CO<sub>2</sub>/Mg m.c./MPa f<sub>c, cem</sub>]. Podobnie na str. 112-113 emisyjność należało by opisać jako [kg CO<sub>2</sub>/kg m.c./MPa f<sub>c, bet</sub>].

Rozdział 4.6.2 Emisyjność cementów wieloskładnikowych: zagubiono (już w rozdziale 4.5) podział na cementy z prób przemysłowych i te przygotowane w warunkach laboratoryjnych oraz pochodzące z regularnej produkcji. Może warto o tym napisać także w podsumowaniu, jeśli nie we wnioskach. W przeciwnym razie rozróżnienie dotyczyło tylko źródeł pozyskania cementów.

Str. 116, wiersz 3 od góry: Czy można mówić o syntezie klinkieru portlandzkiego?

Str. 120, wniosek 6: Wniosek dotyczy znanych technik komponowania betonów (nie dotyczy to jedynie cementów niskoemisyjnych), ale zasada się na dostępności domieszek kompatybilnych z badaną grupą cementów.

Str. 121, wniosek 10: Wniosek niedookreślony. O czego zrozumienie w nim chodzi? Jak miałyby się ono wyrażać?

#### 4. Ocena rozprawy

Przedmiot rozprawy jest aktualny pod względem badawczym i ma silne uzasadnienie praktyczne. Podjęcie kwestii wpływu produkcji cementów i betonów na środowisko naturalne jest odpowiedzią na wyzwania współczesności, co ma także swój wymiar społeczny i może stanowić element tzw. społecznej odpowiedzialności biznesu. Tytuł rozprawy odwołuje się ogólnie do wymagań ekologicznych i to może obiecywać dużo, ale w treści rozprawy skoncentrowano się na kwestii emisji CO<sub>2</sub> wynikającej z produkcji cementów i betonów, co może budzić pewne rozczarowanie czytelnika. Wszak oddziaływań środowiskowych branży cementowej i przemysłu betonów na środowisko jest dużo więcej. Ponadto Doktorant przyjął uproszczone założenie o zero-emisyjności nie klinkierowych składników głównych cementu i ograniczył się do wyliczenia redukcji emisji CO<sub>2</sub> wynikającej jedynie z obniżenia udziału klinkieru portlandzkiego w tzw. cementach niskoemisyjnych. Uzyskane wyniki dają więc cząstkowy pogląd na spodziewany efekt ekologiczny, jakkolwiek stanowią konkretną i użyteczną bazę dla analiz emisji w większych skalach (zakresach). Z punktu widzenia potencjalnego wykorzystania wyników badań przedstawionych w dysertacji w szerszych analizach środowiskowych ciekawym wskaźnikiem emisyjności jest ilość kg CO<sub>2</sub> przypadająca na 1 Mg masy cementu i 1 MPa wytrzymałości na ściskanie zapraw normowych (str. 110) oraz wskaźnik dla betonów, tj. jest ilość kg CO<sub>2</sub> przypadająca na 1 kg masy cementu w betonie i 1 MPa wytrzymałości na ściskanie tegoż betonu o konkretnym składzie (str. 112-115). Niedosyt budzi brak kontynuacji tych analiz i ich rozwinięcia na inne właściwości betonów, zwłaszcza, że Doktorant projektował i badał betony specjalne o zróżnicowanych zakresach właściwości i wymaganiach, często dużo ważniejszych niż wytrzymałość na ściskanie.

Doktorant wykazał się biegłością w stosowaniu skomplikowanych technik badawczych spoiw cementowych i betonów, dobrą intuicją badawczą i odpowiednim zorganizowaniem bogatego zakresu prac doświadczalnych. Uzyskane wyniki zostały poprawnie przedstawione i przeanalizowane w założonym zakresie.

Recenzent wyraża nadzieję, że interpretacyjny potencjał bogatego zbioru wyników zostanie jeszcze lepiej wykorzystany w przyszłych publikacjach Doktoranta. Dotyczy to zwłaszcza problematyki wielokryterialnego wyboru optymalnych rozwiązań z szerokiej palety możliwych, pokazanych w dysertacji.

## **5. Wniosek końcowy**

Biorąc pod uwagę treść dysertacji i ważąc sformułowane do niej uwagi krytyczne i dyskusyjne uważam, że rozprawa Pana mgr inż. Karola Wandocha pt. „Kształtowanie składu współczesnego betonu dla potrzeb budownictwa z uwzględnieniem wymagań ekologicznych” spełnia warunki określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2003 r., nr 65, poz. 595, z późn. zm.) stawiane rozprawom doktorskim, w szczególności ma cechy oryginalności naukowej i dużą wartość praktyczną. Potwierdza także wysokie kompetencje Doktoranta w zakresie technologii betonów.

**Na tej podstawie wnoszę do Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Śląskiej o przyjęcie rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Karola Wandocha pt. „Kształtowanie składu współczesnego betonu dla potrzeb budownictwa z uwzględnieniem wymagań ekologicznych” i dopuszczenie jej do publicznej obrony.**

