

**Opinia o rozprawie doktorskiej mgr inż. Andrzeja Karłowskiego pt.:
Hierarchiczny system podejmowania decyzji przy betonowaniu w obniżonej
temperaturze. Podejście elastyczne.**

1. Wprowadzenie

Opinia została opracowana zgodnie z uchwałą Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Poznańskiej z dnia 7.11.2023 wyznaczającej mnie na recenzenta w przewodzie doktorskim p. mgr. inż. Andrzeja Karłowskiego, na podstawie umowy nr 0410/2023/179 (recenzja z dnia 25.01.2024), oraz umowy nr 410/2024/165 (ponowna recenzja)..

Przedmiotem opinii jest rozprawa doktorska mgr inż. Andrzeja Karłowskiego pt.: Hierarchiczny system podejmowania decyzji przy betonowaniu w obniżonej temperaturze. Podejście elastyczne”. Jej promotorem jest dr hab. inż. Jerzy Paślawski, prof. PP, uznany specjalista w zakresie inżynierii procesów budowlanych i technologii betonu. Recenzja odnosi się do poprawionej wersji doktoratu, uwzględniającej uwagi i zalecenia zawarte w mojej recenzji z dnia 25.01.2024.

2. Ocena zasadności i istotności podjętej tematyki

Rozprawa doktorska mgr inż. Andrzeja Karłowskiego dotyczy problematyki elastycznego zarządzania procesami budowlanymi, koncentrując się na kwestii technologii i organizacji wykonania betonu w okresie obniżonej temperatury. W obniżonej temperaturze przyrost wytrzymałości betonu jest spowolniony, a w przypadku wystąpienia temperatury ujemnej zamarzanie zawartej w betonie wody może spowodować jego uszkodzenie. W takim przypadku należy zmodyfikować skład betonu oraz przyjąć technologię i organizację procesu betonowania tak, aby uzyskać wytrzymałość bezpieczną betonu w wymaganym czasie i bez ponoszenia

nadmiernych nakładów. Pomimo ogromnych doświadczeń praktycznych i dużej wiedzy teoretycznej wykonywanie betonu w warunkach obniżonej temperatury wciąż jest problematyczne. Wybór odpowiedniej strategii produkcji betonu i jego wykonania (rozwiązań materiałowych, technologii i organizacji procesów betonowania) przy dużej niepewności co do warunków otoczenia pozostaje ważnym problemem decyzyjnym. Dobór nieodpowiedniej technologii może z jednej strony skutkować poniesieniem dużych kosztów wynikających ze złej jakości betonu, a z drugiej poniesieniem dodatkowych kosztów np. w wyniku niepotrzebnie intensywnej pielęgnacji. Rozwiązaniem problemu może być opracowanie systemu wspomagającego decyzje technologiczne w warunkach możliwości wystąpienia obniżenia temperatury. System taki powinien uwzględniać nie tylko ogólne wymagania i zalecenia wynikające z norm i instrukcji, ale przede wszystkim korzystać z szerokiej bazy wiedzy praktycznej o efektach stosowania różnych rozwiązań materiałowych i technologicznych w różnych warunkach wykonania konstrukcji betonowej. Aby wspomaganie decyzji technologicznych było optymalne, system powinien bazować na stałym monitoringu warunków otoczenia w wytwórni betonu i na budowie. Powinien mieć możliwość stałego uzupełniania bazy danych oraz wprowadzenia informacji o innowacjach materiałowych i/lub technologicznych, np. obecnie duże nadzieje wiąże się ze stosowaniem materiałów zmiennofazowych.

W swojej pracy Doktorant opracował i zweryfikował w warunkach praktycznych hierarchiczny system podejmowania decyzji technologicznych przy betonowaniu w obniżonej temperaturze z zastosowaniem elastyczności biernej i czynnej, bazujący na wieloetapowym podejmowaniu decyzji (ColCon). System ten oparty jest o monitoring temperatury we wczesnej fazie dojrzewania mieszanki betonowej i uwzględnia podejmowanie decyzji w trzech zasadniczych etapach: planowanie długoterminowe oparte na współczynnikach sezonowości, eliminacja efektów zakłóceń z wykorzystaniem elastyczności biernej - poprzez zastosowanie odpowiednich modyfikacji materiałowych i technologicznych zapewniających wczesną odporność betonu na działanie obniżonych temperatur w oparciu o prognozy krótkoterminowe oraz elastyczności czynnej - poprzez możliwość sterowania nagrzewem elementu w oparciu o bieżący monitoring pogody i symulację procesu narastania wytrzymałości betonu w przypadku zaistnienia takiej konieczności. Ponadto system ten jest otwarty, ma możliwość uczenia się a więc również wykorzystania nowych i innowacyjnych rozwiązań materiałowych i technologicznych. Uważam, że doktorant w swojej pracy podjął się tematyki aktualnej i ważnej, mającej duże znaczenie praktyczne.

3. Charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do powtórnej oceny rozprawa składa się z 7 rozdziałów, bibliografii i załączników i liczy 174 strony oraz załączników (160 stron) w których przedstawiono 80

przypadków monitoringu warunków betonowania różnych elementów konstrukcyjnych wykorzystanych podczas tworzenia systemu ColCon.

Rozdział 1 – Wstęp liczy 12 stron i składa się z 4 podrozdziałów. Doktorant, bazując na doświadczeniach ze swojej wieloletniej pracy zawodowej, przedstawił w nim istotę problemu betonowania w warunkach obniżonej temperatury, określił główne przyczyny powstawania uszkodzeń betonu i konstrukcji wykonywanych w warunkach obniżonej temperatury, omówił ogólnie genezę, założenia i przebieg badań własnych polegających na monitoringu zmian temperatury betonu w różnych warunkach dojrzewania i sformułował koncepcję trójpoziomego, elastycznego systemu doradczego do wspomagania decyzji technologicznych przy procesach betonowania jako skuteczny sposób zminimalizowania ryzyka wynikającego z wykonywania konstrukcji betonowych w okresie obniżonej temperatury. Wstęp ogólnie dobrze charakteryzuje problematykę pracy, jednak nie omawia jej zakresu – kwestie te przedstawiono dopiero w rozdz. 3.

Rozdział 2 – Przegląd literatury - liczy 48 stron i składa się z 7 podrozdziałów i zakończony jest wnioskami. Po krótkim wstępie (podrozdział 2.1), omówiono w nim kolejno: ogólnie specyfikę betonowania w okresie obniżonej temperatury (podrozdział 2.2), mechanizm (a właściwie mechanizmy) destrukcji mrozowej betonu (podrozdział 2.3), podstawowe zasady betonowania w obniżonej temperaturze (podrozdział 2.4), nowe tendencje w zakresie technologii betonowania (podrozdział 2.5) oraz nowe tendencje w dziedzinie zarządzania procesami budowlanymi (podrozdział 2.6). Rozdział kończą podsumowanie (podrozdział 2.7) i wnioski, w których Doktorant wykazuje potrzebę opracowanie skutecznego narzędzie wspomagania decyzji przy betonowaniu w warunkach ryzyka wystąpienia obniżonej temperatury. Informacje przedstawione w podrozdziałach 2.4 i 2.5 są wprawdzie dość lakoniczne, jednak wystarczające ze względu na uzasadnienie celu rozprawy.

Rozdział 3 – Cel, tezy i przedmiot pracy -liczy 3 strony i składa się aż z 4 podrozdziałów. Przedstawiono w nim cel rozprawy (podrozdział 3.1), tezy rozprawy (podrozdział 3.2) oraz jej przedmiot (podrozdział 3.3) i zakres (podrozdział 3.4). Celem pracy jest opracowanie systemu doradczego usprawniającego podejmowanie decyzji o technologii betonowania w obniżonej temperaturze opartego o tablicę decyzyjną uwzględniającą aktualny stan procesu i otoczenia oraz prognozę ich stanu w określonym czasie. Tak przyjęty cel uważam za zasadny. Dotyczy ważnego i aktualnego problemu, wynika z wniosków z analizy literatury, ma duży potencjał przede wszystkim praktyczny, ale również poznawczy, ze względu na założony zakres badań polowych. Tezy pracy nie budzą wątpliwości, są to jednak stwierdzenia na tyle oczywiste, że przy dobrze określonym celu pracy, uważam ich formułowanie za niepotrzebne. Podrozdziały 3.3 i 3.4 są zbędne. Przedmiot pracy określono w rozdziale 1, natomiast jej zakres powinien być przedstawiony w rozdziale 1.

Rozdział 4 – Teoretyczne podstawy systemu COLCON – liczy 26 stron i składa się z 6 podrozdziałów. Po krótkim wprowadzeniu (podrozdział 4.1), w podrozdziale 4.2 Doktorant przedstawił i przeanalizował elastyczność jako alternatywną ideę dla klasycznego podejścia w zarządzaniu w aspekcie wykonywania robót betonowych w okresie ryzyka wystąpienia obniżonej temperatury. Zasadniczą przesłanką wprowadzenia w takim przypadku podejścia elastycznego jest niepewność, która wynika z trudności przewidywania warunków realizacji i jednocześnie bardzo silnego wpływu tych warunków na przebieg i efekt procesu betonowania. W porównaniu do rozwiązań tradycyjnych bazujących na podejściu deterministycznym, podejście elastyczne daje możliwość realizacji procesów pomimo istotnych zmian w otoczeniu dzięki opcjom elastyczności czynnej (adaptacyjność) oraz biernej (odporność). W dalszej części Doktorant omawia kwestie elastyczności biernej i czynnej oraz odporności i adaptacyjności procesów oraz klasyfikację elastyczności w aspekcie betonowania w obniżonej temperaturze. W proponowanej metodzie ColCon założono wykorzystanie zarówno biernej jak i czynnej elastyczności. Elastyczność bierna będzie wykorzystana na drugim poziomie podejmowania decyzji (głównie polegać będzie na modyfikacji składu mieszanki betonowej w zależności od prognozy pogody przy założeniu zaistnienia scenariusza najbardziej prawdopodobnego). Na trzecim poziomie podejmowania będzie wykorzystana elastyczność czynna (polegać będzie na stosowaniu obróbki termicznej w przypadku zaistnienia scenariusza pesymistycznego, w stopniu zależnym od danych pozyskanych z monitoringu rzeczywistego narastania wytrzymałości betonu i warunków pogodowych). Doktorant przyjął strategię konserwatywną wdrażania elastyczności jako preferowaną w przypadku robót betonowych w warunkach obniżonej temperatury i określił, że miernikiem elastyczności powinny być koszty realizacji przedsięwzięcia oraz czas jego realizacji. Doktorant przeanalizował również na przykładach dotychczasowe doświadczenia ze stosowania monitoringu temperatury betonu i prognozowania właściwości betonu we wczesnym okresie dojrzewania. W podrozdziale 4.3 Doktorant zasygnalizował problematykę termodynamiki tworzenia struktury betonu. Wskazał na związek temperatury i wytrzymałości betonu w początkowej fazie dojrzewania. Cel tego podrozdziału w kontekście stanowiącego cel pracy systemu wspomaganie decyzji jest jasny, jednak przydatność przedstawionych w nim rozważań jest problematyczna. Brakuje w nim jakiegokolwiek zależności temperatura betonu – rozwój wytrzymałości betonu. Doktorant stwierdza w nim, że w tym celu szacowania efektów procesu dojrzewania betonu w elemencie będzie wykorzystywał program HACON. Jakie były przesłanki do wyboru tego oprogramowania? W podrozdziale 4.4 Doktorant omówił kwestie sezonowości robót budowlanych. Związek tego podrozdziału z będącym przedmiotem pracy systemem wspomaganie decyzji jest dla mnie niejasny – uważam, że można go usunąć bez szkody dla pracy. W podrozdziale 4.5 Doktorant, na podstawie szerokiej analizy dostępnego oprogramowania wybrał program do analizowania danych pozyskanych podczas realizacji robót betonowych w warunkach zagrożenia nagłym spadkiem temperatury otoczenia (RapidMiner). Podrozdział 4.6 poświęcony jest przedstawieniu różnych rozwiązań pomiarowych stosowanych przy monitoringu procesów wykonania konstrukcji betonowych. Ten potencjalnie ciekawy rozdział pozostawia spory niedosyt – rozwiązania

przedstawione są ogólnikowo, brak krytycznej dyskusji zastosowanych rozwiązań oraz ew. wpływu tych rozwiązań na system pomiarowy wykorzystywany przez Doktoranta.

Rozdział 5 – System doradczy COLCON - liczy 40 stron i składa się z 4 podrozdziałów i podsumowania. W podrozdziale 5.1 przedstawiono zwięźle ideę systemu ColCon, w podrozdziałach 5.2 - 5.4 przedstawiono opis i zasady funkcjonowania odpowiednio I, II i III poziomu systemu oraz scharakteryzowano decyzje menadżerskie na każdym z poziomów. Wyróżniono trzy poziomy (etapy) podejmowania decyzji: (1) planowanie procesu betonowania i przygotowanie harmonogramu ogólnego przy uwzględnieniu danych klimatycznych, (2) bezpośrednio przed betonowaniem (24 h) w oparciu o dane z monitoringu o aktualnym i przewidywanym stanie otoczenia wprowadzenie ewentualnych modyfikacji składu betonu (przewidziano modyfikację domieszkami lub użycie materiałów zmiennofazowych), (3) w oparciu o bieżące dane z monitoringu ewentualne zastosowanie modyfikacji procesu poprzez wprowadzenie i/lub sterowanie procesem termicznej pielęgnacji betonu. Dla każdego z poziomów omówiono w wystarczającym zakresie podstawy do wypracowania reguł decyzyjnych, zwracając szczególną uwagę na kwestie uczenia systemu na przykładach oraz optymalizację tego procesu ze względu na jego wiarygodność i prostotę stosowania. System doradczy bazuje na 80 przypadkach pozyskanych w wyniku badań własnych Doktoranta wykonywanych w laboratorium i na budowach (umieszczonych w załączniku), co jest godne podkreślenia jako znaczące osiągnięcie pracy bardzo istotnie wpływające na skuteczność systemu decyzyjnego.

Rozdział 6 – Praktyczne zastosowanie systemu COLCON – liczy 20 stron, przedstawiono w nim aparaturę pomiarową wchodzącą w skład systemu oraz omówiono przykłady skutecznego wykorzystania praktycznego systemu.

Rozdział 7 - Wnioski – liczy 4 strony i zawiera podsumowanie całości rozprawy w postaci wniosków ogólnych i szczegółowych oraz kierunku dalszych badań. Wnioski są sformułowane właściwie, wynikają z wykonanych badań i analiz i oddają rezultaty pracy.

Bibliografia - cytowana w rozprawie literatura obejmuje ok. 150 pozycji, w większości opublikowanych w języku angielskim i po 2000 roku. Jest ona w wystarczająca ze względu na postawiony cel i zakres pracy.

Rozprawa zawiera obszerne załączniki w których przedstawiono wyniki badań własnych monitoringu temperaturowego wykorzystane do uczenia systemu wspomaganego decyzji. Jest to cenna baza danych, o dużym potencjale aplikacyjnym wykraczającym poza zakres pracy.

Rozprawa, choć wyraźnie poprawiona nadal jest napisana w sposób dość trudny do odbioru i niezbyt starannie zredagowana, zawiera dużo błędów edycyjnych (np. w zestawieniu literatury nie zastosowano jednolitego stylu opisu publikacji, a szereg pozycji literaturowych jest błędnie sformatowana/opisana).

4. Ocena rozprawy i najważniejsze uwagi krytyczne

Przedmiotem oceny jest zmieniona i istotnie poprawiona wersja doktoratu, w której Doktorant uwzględnił większość moich uwag. Obecnie pracę pod względem merytorycznym oceniam pozytywnie, jako posiadającą poziom naukowy odpowiedni dla doktoratu. Na podstawie analizy stanu wiedzy i techniki oraz własnego doświadczenia wykonawczego Doktorant prawidłowo zdefiniował problem badawczy i sformułował cel pracy oraz badań własnych, a przeprowadzone szerokie i liczne badania terenowe oraz analizy pozwalają na osiągnięcie założonego celu, czyli stworzenie skutecznego systemu doradczego. Badania wykonane przez Doktoranta uzupełniają wiedzę w zakresie technologii wykonywania robót betonowych w okresie obniżonej temperatury, a stanowiący jej efekt system wspomagania decyzji ma duży potencjał aplikacyjny wykraczający poza zakres robót betonowych.

Jako ważne osiągnięcia rozprawy uważam:

- Zaproponowanie i opracowanie trójstopniowego systemu wspomagającego decyzje podczas planowania i wykonania procesu betonowania w obniżonej temperaturze. Jako główne innowacyjne cechy tego systemu można wskazać: (1) elastyczne podejście do projektowania procesu betonowania pozwalające na opracowanie wariantów materiałowych i technologicznych zgodnych z ideą elastyczności czynnej, (2) wielostopniowe projektowanie technologii i organizacji robót pozostawiające możliwość zmian i korekt w miarę pozyskiwania dokładniejszej i pewniejszej informacji o warunkach otoczenia oraz (3) wprowadzenie do systemu decyzyjnego innowacji materiałowej (w postaci dodatku PCM). Ważną cechą systemu jest możliwość jego modyfikacji poprzez rozszerzenie bazy danych o kolejne przypadki realizacji. Dzięki temu zwiększa się nie tylko skuteczność systemu, ale również możliwa jest aktualizacja systemu przez wprowadzanie nowych rozwiązań materiałowych i technologicznych.
- Opracowanie na podstawie badań własnych szerokiej, systematycznej bazy danych z realizacji konstrukcji betonowych w warunkach obniżonej temperatury, co przyczynia się do skuteczności systemu wspomagania decyzji.

W trakcie obrony będę prosił Doktoranta o ustosunkowanie się do następujących zagadnień:

- Jakie są zalety i wady wynikające ze stosowania materiałów zmiennofazowych jako składnika betonu? Czy ich praktyczne wykorzystanie w celu ochrony betonu przed uszkodzeniem przy betonowaniu w obniżonej temperaturze jest realne?

- Proszę o wyjaśnienie na przykładach, czy i na ile można przewidzieć moment uzyskania przez beton wytrzymałości bezpiecznej na podstawie pomiaru zmian jego temperatury?
- Czy modyfikację składu betonu w etapie II podejmowania decyzji na pewno należy traktować jako modyfikację o charakterze elastyczności biernej? Przecież w zależności od temperatury otoczenia można stosować betony o różnym składzie i z różnymi domieszkami. Czy jedynym sposobem reagowania w etapie 2 jest modyfikacja składu betonu? Wydaje się, że tutaj również można uwzględnić kwestie technologii i organizacji betonowania.
- Czy w etapie III podejmowania decyzji zakłada się stałą dostępność urządzeń do obróbki cieplnej?
- Według jakich kryteriów system wskazuje wariant optymalny w danych warunkach (koszt robót, termin uzyskania wytrzymałości bezpiecznej, inne)? Jak w świetle tych kryteriów Doktorant ocenia skutki modyfikacji składu betonu poprzez stosowanie materiałów zmiennofazowych?

5. Wniosek końcowy

Rozprawa mgr. inż. Andrzeja Karłowskiego pt.: „Hierarchiczny system podejmowania decyzji przy betonowaniu w obniżonej temperaturze. Podejście elastyczne.” dotyczy oryginalnego problemu, ważnego z naukowego i praktycznego punktu widzenia w obszarze dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport.

Doktorant mgr inż. Andrzej Karłowski wystarczająco rozpoznał potrzebny mu obszar wiedzy, właściwie sformułował cele pracy oraz zrealizował je w zakładanym stopniu, wykazując przy tym umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Biorąc pod uwagę wyszczególnione w pkt. 4 niniejszej recenzji osiągnięcia rozprawy oraz krytyczne i dyskusyjne uwagi merytoryczne, stwierdzam, że spełnia ona wymagania stawiane pracom doktorskim przez Ustawę z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. 2017, poz. 1789 z późn. zm.) oraz Ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2023, poz. 7542 z późn. zm.) i stawiam wniosek o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.



