

Prof. dr hab. inż. Jacek HULIMKA
Politechnika Śląska
Katedra Inżynierii Budowlanej
ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice

Gliwice, grudzień 2023 r.

WPEŁYNIŁO - WBLIW

10-01-2024

ns2/14/2024

RECENZJA

ROZPRAWY DOKTORSKIEJ PANA MGRA INŻ. JEONGHYUNA KIMA „EFFECT OF REPEATED USE OF RECYCLED AGGREGATE ON SOME PROPERTIES OF CONCRETE”

Podstawa formalna i przedmiot recenzji

Niniejszą recenzję opracowałem na prośbę Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Wrocławskiej, Pana profesora Wojciecha Puły, wyrażoną w piśmie z dnia 20 października 2023 roku.

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska Pana magistra inżyniera Jeonghyuna Kima pt. „Effect of repeated use of recycled aggregate on some properties of concrete”. Praca ta została przygotowana na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej pod kierunkiem Pani dr hab. inż. Anny Grabiec prof. Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu i Pana prof. dra hab. inż. Andrzeja Ubysza jako Promotorów.

Opiniowana dysertacja zawarta jest w jednym tomie, liczącym 97 stron.

Problematyka rozprawy

Jako temat swojej rozprawy Doktorant wybrał problematykę użycia do produkcji betonu kruszyw pochodzących z przekruszenia wcześniej wykonanych betonów – jednak w dość nietypowym aspekcie wielokrotnego recyklingu. Jest to zagadnienie bardzo aktualne wobec ogromnej liczby likwidowanych konstrukcji z betonu przy jednoczesnym wzroście produkcji betonu jako podstawowego materiału budowlanego. Samo zagadnienie recyklingu betonu i wykorzystania przekruszu jako kruszywa w nowych mieszankach jest szeroko badane i publikowane, jednak wielokrotny recykling betonu jest znacznie słabiej rozpoznany. Tym samym temat badawczy podjęty przez Doktoranta należy uznać jako bardzo aktualny i ważny, mający wyraźne odniesienie praktyki projektowania i wykonawstwa betonów z poszanowaniem środowiska naturalnego.

Recenzowana rozprawa doktorska bazuje na artykułach autorstwa lub współautorstwa Doktoranta, zatem nie ma ona charakteru spójnego tekstu, w efekcie czego nie zostały w niej w sposób jasny sformułowane tezy. Niemniej, Doktorant dość jasno określa cele poszczególnych badań, a wśród nich:

- ocenę wpływu wielokrotnego recyklingu betonu na wybrane właściwości nowego betonu,
- analizę związku pomiędzy jakością kruszyw z recyklingu (także wielokrotnego) a właściwościami betonów wykonanych na bazie takich kruszyw,
- ocenę możliwości projektowania betonów z uwzględnieniem zmian właściwości kruszyw pochodzących z kolejnych cykli przekruszania, metodą równoważnej objętości zaprawy (EMV),
- ocenę możliwości wykorzystania drobnych frakcji powstających w procesie kruszenia betonów, jako częściowego zamiennika cementu, w celu zagospodarowania całej masy pierwotnego betonu (zerowa ilość odpadów z procesu kruszenia).

Wymienione wyżej cele należy uznać za ekwiwalentne typowym tezom stawianym w rozprawach doktorskich – w jasny sposób precyzują one zagadnienia, rozwiązanie których Doktorant postawił jako efekt naukowy swoich prac.

Treść rozprawy

Jak już wspomniałem, recenzowana rozprawa doktorska bazuje na pięciu artykułach naukowych. Doktorant, w formie zwartej, przedstawił opracowanie złożone ze:

- wstępu, gdzie opisał cel pracy (w skrócie omówiony już w poprzednim punkcie), motywację jej realizacji oraz zakres rozprawy, gdzie w paru zdaniach omówił treść poszczególnych artykułów,
- kolejnych pięciu rozdziałów, z których każdy poświęcony jest omówieniu jednego z artykułów tworzących cykl składający się na zasadniczą treść rozprawy,
- rozdziału końcowego, zawierającego podsumowanie i wnioski oraz dalsze plany badawcze,
- spisu literatury wykorzystanej we wcześniejszym tekście (53 pozycje); uwaga: spis literatury nie jest tożsamy ze znacznie szerszymi wykazami literatury wykorzystanej w poszczególnych artykułach,
- wykazu osiągnięć Doktoranta (dane bibliometryczne, publikacje, referaty konferencyjne, projekty badawcze, staże badawcze, nagrody),
- kopii artykułów wchodzących w zakres pracy doktorskiej,

- oświadczenia o wkładzie Doktoranta w publikacje współautorskie.

Z uwagi na charakter rozprawy, poniżej omówiłem najważniejsze zagadnienia opisane w pięciu składających się na nią artykułach.

[A1] Kim J. Influence of quality of recycled aggregates on the mechanical properties of recycled aggregate concretes: An overview. *Construction and Building Materials*, 2022.

W artykule Autor dokonał szerokiego przeglądu (na podstawie analizy 140 pozycji literatury) badań obcych dotyczących wpływu właściwości kruszyw z recyklingu na właściwości betonów otrzymanych z ich udziałem. W szczególności dotyczyło to obecności w takich kruszywach zaprawy obniżającej ich gęstość i zwiększającej absorpcję wody. W tych aspektach kruszywa podzielono na trzy klasy (wysokiej, średniej i niskiej jakości). Z wykonanych analiz wynika, że zawartość starej zaprawy w przekruszu rośnie wraz z liczbą cykli recyklingu, co skutkuje pogorszeniem jakości kruszyw w poszczególnych cyklach (z oczywistym wpływem parametrów kruszonych betonów na jakość uzyskanych z nich kruszyw). Jednocześnie, da się poprawić jakość takich kruszyw przez odpowiednie zabiegi mechaniczne, termiczne i chemiczne, jednak są to działania wymagające użycia specjalistycznego sprzętu i wysoce energochłonne, co stawia pod znakiem zapytania ich celowość (pomimo faktu, że uzyskanie wtórnego kruszywa o wysokiej jakości pozwala na wykonanie na jego bazie betonu o cechach porównywalnych, a nawet lepszych niż z kruszyw naturalnych). W omawianym artykule Doktorant określił czynniki wpływające na jakość wtórnych kruszyw, zestawiał wyniki wpływu jakości wtórnych kruszyw na cechy betonów wykonanych na ich bazie oraz wnioskował o zasadności wykorzystania kruszyw o średniej i niskiej jakości (bowiem uzyskanie kruszyw o wysokiej jakości wymaga zbyt wysokich nakładów, w tym energetycznych).

[A2] Kim J. Properties of recycled aggregate concrete designed with equivalent mortar volume mix design. *Construction and Building Materials*, 2021.

W artykule Autor omówił metodę projektowania betonów na kruszywie z recyklingu metodą równoważnej objętości zaprawy (EMV), to jest przy założeniu że wtórne kruszywo jest materiałem dwufazowym (oryginalne kruszywo + stara zaprawa) w którym oryginalna zaprawa nie jest traktowana jak kruszywo, tylko sumuje się z nową zaprawą, redukując jej ilość w mieszance. Następnie skupił się na skuteczności metody w odniesieniu do jakości kruszyw z recyklingu, w szczególności w aspekcie efektów stosowania kruszyw o średniej i niskiej jakości. W artykule Doktorant wykazał możliwość zaprojektowania metodą EMV betonów o założonych cechach wytrzymałościowych, przy użyciu kruszyw o średniej i niskiej jakości z recyklingu, co dobrze koresponduje z wnioskami z artykułu [A1]. Artykuł bazował na 108 pozycjach literatury.

[A3] Kim J., Grabiec A. M., Ubysz A., Yang S., Kim N. Influence of mix design on physical, mechanical and durability properties of multi-recycled aggregate concrete. *Materials*, 2023.

W Artykule Autorzy skupili się na problemie wykorzystania w betonie kruszyw grubych pochodzących z wielokrotnego recyklingu betonu. Po krótkim przeglądzie wiedzy, bazującym na 37 publikacjach, przedstawili wyniki własnych badań betonów bazujących na kruszywach grubych z jedno- dwu- i trzykrotnego przekruszenia betonu. Zbadano tu betony projektowane metodą EMV, z 50% i 100% zastąpieniem kruszywa naturalnego kruszywami z recyklingu. Badania obejmowały właściwości kruszyw wtórnych (gęstość, absorpcję wody i zawartość starej zaprawy) oraz wybrane właściwości mieszanek i betonów na kruszywach wtórnych (opad stożka, gęstość, absorpcja wody, wytrzymałość na ściskanie, skurcz, odporność na chlorki). Przy dość oczywistym wzroście ilości zaprawy w kruszywach w kolejnych cyklach kruszenia betonów uzyskano pogorszenie się praktycznie wszystkich badanych cech, przy czym w przypadku zastąpienia 50% kruszywa zmiany wynikające z kolejnych cykli kruszenia są znikome, a przy zastąpieniu 100% kruszywa są już wyraźnie zauważalne. Tym samym, zaprojektowanie betonów o wymaganych cechach z wysokim udziałem kruszyw wtórnych wymaga odpowiedniej kombinacji metody projektowania EMV (metoda równoważnej objętości zaprawy) z optymalnym współczynnikiem wymiany kruszywa. W artykule wykazano fakt pogarszania się jakości kruszyw w kolejnych cyklach kruszenia, wskazano na konieczność projektowania betonów na takich kruszywach metodą EMV z odpowiednio dobranym wskaźnikiem wymiany kruszywa oraz, po raz kolejny, wskazano możliwość i zasadność wykorzystania wtórnego kruszywa o niskiej jakości. Indywidualnym wkładem Doktoranta w opisany artykuł były: koncepcja badań, ich metodologia, analiza stanu wiedzy, wykonanie badań i opracowanie wyników oraz opracowanie tekstu. Doktorant był tu pierwszym autorem i autorem korespondencyjnym.

[A4] Kim J., Grabiec A. M., Ubysz A. An experimental study on structural concrete containing recycled aggregates and powder from construction and demolition waste. *Materials*, 2022.

W artykule, bazującym na 69 pozycjach literatury, Autorzy zajęli się problemem pełnego (bezodpadowego) recyklingu betonu, to jest wykorzystaniu nie tylko wtórnego kruszywa grubego, ale także najdrobniejszych frakcji, mogących częściowo zastąpić pasek i cement. W badaniach własnych Autorzy zbadali wpływ grubego i drobnego kruszywa z recyklingu oraz najdrobniejszych frakcji (proszku poniżej 0,15 mm) na takie właściwości betonu, jak: zawartość powietrza, wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na rozciąganie w próbie rozłupywania oraz moduł sprężystości. Stopień wymiany kruszyw grubych i drobnych wynosił 30, 60 i 100%, a proszku – 10, 20 i 30%. W badaniach udowodniono, że każdorazowo wzrost wskaźnika wymiany któregokolwiek ze składników powodował pogorszenie się

parametrów betonu, jednakże wszystkie zbadane betony spełniały warunki pozwalające na ich zastosowanie w budownictwie, przy wyraźnych zyskach środowiskowych. Wykazano też zasadność skuteczność wykorzystania najdrobniejszych frakcji – proszku poniżej 0,15 mm. Indywidualnym wkładem Doktoranta w opisany artykuł były: koncepcja badań, ich metodologia, analiza stanu wiedzy oraz opracowanie tekstu. Doktorant był tu pierwszym autorem i autorem korespondencyjnym.

[A5] Kim J., Jang H. Closed-loop recycling of C&D waste: Mechanical properties of concrete with the repeatedly recycled C&D powder as partial cement replacement. *Journal of Cleaner Production*, 2022.

W artykule (51 pozycji literatury) Autorzy skupili się na wykorzystaniu proszków z wielokrotnego recyklingu jako częściowych zamienników cementu. Do badań uzyskali oni proszki z recyklingu z trzech różnych cykli. Badaniom Autorzy poddali wpływ dodatku proszków (10, 20 i 30% masy cementu) z wielokrotnego recyklingu na właściwości uzyskanych tak betonów: opad stożka, zawartość powietrza, wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na rozłupywanie, moduł sprężystości. W badaniach wykazano, że zarówno wskaźnik wymiany, jak i liczba cykli recyklingu ujemnie wpływają na parametry betonu, przy czym wpływ wskaźnika wymiany jest wyraźniejszy. Tym samym, celem zastosowania proszków z recyklingu nie powinno być uzyskanie wysokich parametrów betonu, a utylizacja tych proszków przy jednoczesnej oszczędności cementu tak, aby uzyskane betony wykazały wymagane właściwości. W tym aspekcie możliwe jest dodanie 10% trzykrotnie przetworzonego materiału z zachowaniem około 95% cech betonu, co daje bardzo wyraźne zyski środowiskowe przy jednoczesnym obniżeniu kosztów. W artykule wykazano możliwość i zasadność techniczną, ekonomiczną i środowiskową zastąpienia znacznej części cementu (do 20%) proszkiem z wielokrotnego recyklingu betonu, tym samym wskazując na możliwość bezodpadowego recyklingu betonu. Indywidualnym wkładem Doktoranta w opisany artykuł były: koncepcja badań, ich metodologia, analiza stanu wiedzy oraz opracowanie tekstu. Doktorant był tu pierwszym autorem i autorem korespondencyjnym.

Merytoryczna ocena rozprawy

Już na początku tej części recenzji stwierdzam, że opiniowaną rozprawę doktorską Pana magistra inżyniera Jeonghyuna Kima oceniam pozytywnie. Za taką oceną przemawiają poniższe argumenty.

- Temat rozprawy jest bardzo dobrze dobrany, ma bowiem nie tylko znaczenie czysto poznawcze, ale także bezpośrednie odniesienie do praktyki projektowania i wykonawstwa betonów z udziałem kruszyw z recyklingu. Jest to, w moim pojęciu, szczególnie cenne, świadczy bowiem o umiejętności sformułowania tematu

badawczego powiązanego z rzeczywistymi problemami w budownictwie, w tym z ochroną środowiska.

- Autor wykazał bardzo dobrą znajomość poruszanej tematyki, wyrażoną w ciekawych przeglądach stanu wiedzy, w szczególności w publikacjach [A1] i [A2].
- Program badań sprawozdanych w kolejnych artykułach został poprawnie dobrany i umiejętnie zrealizowany. Na podkreślenie zasługuje tu logiczne następstwo kolejnych badań, wskazujące na ich przemyślany charakter.
- Wyniki badań i analiz zostały w kolejnych artykułach przedstawione w sposób szczegółowy, co pozwala na ich wykorzystanie przez innych badaczy i wykonanie odrębnych opracowań.
- Autor wykazał się umiejętnością prawidłowego i logicznego wnioskowania na podstawie uzyskanych wyników badań i analiz. Jest to cenna umiejętność, bowiem najlepiej nawet opracowane wyniki bez odpowiedniej interpretacji pozostają jedynie zbiorem liczb i wykresów.

Wśród szczegółowych osiągnięć poznawczych pracy wymienić należy:

- wykonanie bardzo szczegółowego przeglądu wiedzy, z szeregiem cennych analiz porównawczych pozwalających na sformułowanie programu badań doświadczalnych,
- wykazanie możliwości uzyskania poprawnych jakościowo i wytrzymałościowo betonów przy użyciu pochodzących z recyklingu kruszyw o średniej i niskiej jakości,
- wykazanie możliwości wiarygodnego projektowania betonów z kruszywami z recyklingu (w tym o średniej i niskiej jakości) przy użyciu metody równoważnej objętości zaprawy (EMV),
- wykazanie możliwości uzyskania betonów o założonych właściwościach z udziałem kruszywa z wielokrotnego recyklingu, pod warunkiem projektowania ich metodą EMV przy odpowiednim poziomie wymiany kruszyw poszczególnych frakcji,
- wykazanie możliwości uzyskania betonów konstrukcyjnych przy wykorzystaniu materiałów z pełnego recyklingu betonów, w tym często traktowanych jako odpad proszków o niskiej granulacji,
- wykazanie możliwości częściowego zastąpienia cementu proszkami z wielokrotnego recyklingu betonu, z wykazaniem efektywności ekonomicznej i środowiskowej takiego postępowania, przy niewielkich (do 5%) stratach parametrów betonu.

Obowiązkiem recenzenta jest także sformułowanie pytań i uwag krytycznych, w tym o charakterze dyskusyjnym. W danym przypadku jest to trudne, bowiem wszystkie artykuły zostały opublikowane w cenionych czasopismach technicznych gwarantujących bardzo

wysoki poziom recenzowania. Niemniej, chciałbym poznać zdanie Doktoranta odnośnie do postawionych niżej zagadnień.

- Jak wiek pierwotnego betonu będzie wpływał na jego przydatność do recyklingu? W szczególności dotyczy to konstrukcji o niewielkich grubościach, gdzie znaczna część betonu znajdzie się w zasięgu karbonatyzacji.
- Jak Doktorant ocenia zależność pomiędzy klasą betonu poddanego recyklingowi a możliwością do uzyskania klasy betonu na kruszywie z tego recyklingu?
- Biorąc pod uwagę różne warunki użytkowania konstrukcji z betonu, część z nich mogła być narażona w swojej historii na różnego rodzaju szkodliwe oddziaływania chemiczne. Chciałbym poznać zdanie Doktoranta na temat koniecznych tu do wykonania badań chemicznych "starego" betonu i ewentualnych wartości granicznych poszczególnych substancji (chlorków, siarczanów, innych) dyskwalifikujących beton jako źródło pozyskania kruszyw wtórnych.

Podsumowanie i wniosek końcowy

Podsumowując niniejszą recenzję stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana magistra inżyniera Jeonghyuna Kima pt. „Effect of repeated use of recycled aggregate on some properties of concrete” stanowi cenny wkład w rozwój wiedzy w zakresie recyklingu betonów, uzupełniając ją o szereg zagadnień, zwłaszcza związanych w wielokrotnym recyklingiem oraz z wykorzystaniem najdrobniejszych frakcji, zwykle traktowanych jako odpad.

Po analizie treści poszczególnych artykułów (traktowanych jako spójny cykl) oraz udziału Doktoranta w opracowaniach współautorskich uważam recenzowaną pracę za oryginalną i cenną, spełniającą wymagania stawiane w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (właściwej dla postępowań wszczętych po 30 kwietnia 2019 r.).

Ponadto, co istotne, recenzowana praca udowadnia spełnienie przez Doktoranta wymagań stawianych na ósmym poziomie uczenia się (wg Europejskich Ram Kwalifikacji) w zakresie wiedzy, umiejętności i kompetencji.

Tym samym wnoszę o dopuszczenie Pana magistra inżyniera Jeonghyuna Kima do publicznej obrony przedmiotowej rozprawy doktorskiej.


.....
prof. dr hab. inż. Jacek Hulimka