

Kraków, dn. 29.12.2023 r.

Prof. dr hab. inż. Jan Deja

Akademia Górniczo Hutnicza im Stanisława Staszycy w Krakowie

Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki

Katedra Technologii Materiałów Budowlanych

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgra inż. Piotra Górkę

pt. „Metoda wytwarzania oraz właściwości fizyczne i użytkowe lekkiego kruszywa kompozytowego” napisanej pod kierunkiem dra hab. inż. Przemysława Postawy, prof. PCz

1. Podstawa formalna opracowania recenzji.

Podstawę opracowania recenzji stanowią:

- Pismo Kierownika Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Informatyki Politechniki Częstochowskiej dra hab. inż. Janusza Szmidla, prof. Politechniki Częstochowskiej.
- Rozprawa doktorska Pana mgra inż. Piotra Górkę pt. „Metoda wytwarzania oraz właściwości fizyczne i użytkowe lekkiego kruszywa kompozytowego”.

2. Opinia ogólna.

Przedłożona mi do recenzji rozprawa doktorska przygotowana przez Pana magistra inżyniera Piotra Górkę pt. „Metoda wytwarzania oraz właściwości fizyczne i użytkowe lekkiego kruszywa kompozytowego” poświęcona jest opracowaniu metody wytwarzania

kruszyw lekkich kompozytowych CLA (Composite Lightweight Aggregate) oraz sprawdzeniu ich właściwości i możliwości aplikacyjnych w technologii betonu. Niniejsza praca bardzo dobrze wpisuje się w ideę gospodarki o obiegu zamkniętym. Autor zadbał o wszelkie aspekty tej idei tj. wyprodukował użyteczny materiał budowlany bazując na surowcach odpadowych, zoptymalizował energetycznie proces produkcji, określił najlepsze możliwości aplikacyjne, a na końcu przedstawił możliwości jego recyklingu. To co jest szczególnie cenne w pracy, to jej kompleksowe podejście, które wymagało od Autora wiedzy i umiejętności z dwóch różnych specjalistycznych dziedzin: projektowania urządzeń cieplnych oraz z technologii betonów i kruszyw. Sposób realizacji pracy zdradza bardzo dużą dojrzałość naukowo-badawczą Autora rozprawy. Do końcowego celu Autor dochodzi etapami, a każdy etap jest zakończony krytycznymi wnioskami, które pozwalają poprawnie zaplanować kolejny etap badań. Zakres przeprowadzonych badań i eksperymentów jest wręcz przytłaczający, a ich jakość bezpośrednio przekłada się na wysoką wartość naukową oraz aplikacyjną niniejszej pracy.

3. Zakres pracy.

Rozprawa doktorska składa się z 10 rozdziałów zawartych na 178 stronach, nie licząc streszczeń, literatury, spisu tabel i rysunków. W tej objętości, przegląd literaturowy zawarty jest w rozdziale nr 2 na 33 stronach, natomiast część doświadczalna wraz z wnioskami zawarta jest w 7 rozdziałach (rozdziały 4-10) zamieszczonych na 141 stronach. W pozostałych 2 rozdziałach zawarto wprowadzenie (rozdział 1) oraz cel i tezy pracy (rozdział 3). Literatura ułożona w porządku alfabetycznym zawiera 245 pozycji, przy czym część z tych źródeł stanowią normy oraz witryny internetowe. Na końcu pracy znajduje się spis zamieszczonych w niej tabel i rysunków. Zarówno konstrukcja niniejszej rozprawy doktorskiej, jak i proporcje poszczególnych rozdziałów są prawidłowe i nie budzą zastrzeżeń.

Przegląd literaturowy praktycznie w całości skupia się na wykorzystaniu odpadów z tworzyw sztucznych w różnych gałęziach przemysłu w tym przede wszystkim w roli kruszywa w betonach i zaprawach cementowych. Dokładnie omówione są pozycje literaturowe bezpośrednio związane z tematyką niniejszej pracy, czyli zastosowanie kruszyw kompozytowych zawierających odpadowy PET [Poli(tereftalan) etylenu] do produkcji betonów i zapraw cementowych. Przegląd literaturowy kończy się podsumowaniem, w którym Autor porządkuje przytoczone informacje oraz krytycznie wskazuje słabe ogniwa

dotychczas wytworzonych lekkich kruszyw kompozytowych. Dzięki temu część obszarów badawczych pracy skupia się nad poprawą najłabszych ogniw kruszyw kompozytowych CLA. Wszystkie zawarte w przeglądzie literaturowym informacje są użyteczne i potrzebne.

W rozdziale 3 Autor stawia dwie tezy badawcze, na podstawie których wyznacza sobie klarowny cel badawczy. Rozdział 4 opisuje wstępne próby wytworzenia lekkiego kruszywa kompozytowego na bazie PET i popiołów lotnych według autorskich pomysłów. Po wytworzeniu kruszyw CLA Doktorant dwuetapowo sprawdza właściwości uzyskanych kruszyw w zaprawach cementowych. Krytyczne wnioski z tego rozdziału pozwalają skutecznie prowadzić dalsze eksperymenty. Rozdział 5 jest poświęcony z zaprojektowaniu i wykonaniu pilotażowego stanowiska do wytwarzania lekkich kruszyw kompozytowych. Istotnym elementem badawczym tego rozdziału jest dobór optymalnych warunków wytwarzania kruszyw w tym głównie: maksymalną temperaturę obróbki oraz skład surowcowy (stosunek PET do materiału mineralnego). Celem i tematyką rozdziału 6 jest najkorzystniejszy dobór drobnoziarnistego materiału odpadowego spośród 3 trudnych do zagospodarowania odpadów UPS (uboczne produkty spalania): popiół lotny ze spalania ścieków, mieszanka żużlowo-popiołowa i popiół lotny krzemionkowy o dużych stratach prażenia. Rozdział kolejny jest przedłużeniem rozdziału 6 i Autor opisuje w nim badania aplikacyjne uzyskanych kruszyw w zastosowaniu do wylewek samopoziomujących się SLS. Wszystkie uzyskane w poprzednich rozdziałach informacje pozwalają Autorowi w rozdziale 8 zoptymalizować proces wytwarzania lekkiego kruszywa kompozytowego. W rozdziale 9 opisane są kolejne badania aplikacyjne „udoskonalonych” kruszyw CLA - tym razem jako składnika betonu C25/30 o klasie ekspozycji XC4. W tym miejscu przedstawione są również wyniki badań trwałości betonów.

„Wisienką na torcie” tego rozdziału są badania sprawdzające możliwości recyklingu betonów zawierających lekkie kruszywa kompozytowe. Rozdział 10, mimo że jest zatytułowany „wnioski”, to raczej forma podsumowania, w którym znalazło się 5 treściwych wniosków.

4. Ocena merytoryczna.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska prezentuje bardzo wysoki poziom naukowy, a przy tym ma wybitnie duży potencjał aplikacyjny. Autor rozprawy umiejętnie

wykorzystał dostępne informacje literaturowe w zakresie kruszyw lekkich opartych na PET do zaprojektowania nowych kruszyw tego typu, ale o ulepszonych parametrach. Szczególnie cenny, zdradzający dojrzałość naukową Doktoranta, jest etapowy sposób prowadzenia doświadczeń. Każdy etap ma niejako własny plan badawczy, który jest przygotowywany w oparciu o krytyczne wnioskowanie z etapów poprzedzających. W ten sposób Autor skutecznie dąży do założonego celu unikając powielania błędów i mnożenia mało wnoszących eksperymentów. Kolejnym dużym atutem pracy jest sposób budowania doświadczeń. Jest on przemyślany i dąży do jasno określonego celu. Dzięki temu czytelnik wie po co są prowadzone dane badania i dlaczego są stosowane takie, a nie inne metody badawcze. Choć niniejsza rozprawa doktorska jest w swojej części badawczej dosyć obszerna, to jednak nie ma w niej przypadku, treści zbędnych, czy też innych „wypełniaczy”. Następnym aspektem dojrzałości naukowej Doktoranta to krytyczne odniesienie się do postawionych tez i założonego celu badawczego w podsumowaniu.

Jak już wspomniałem wcześniej, wnioskowanie jest krytyczne, logiczne i, w zdecydowanej większości, właściwe. Te, które w opinii recenzenta są dyskusyjne są zawarte w uwagach krytycznych. Przedstawiano do recenzji praca budzi uznanie z uwagi na jej wielopoziomowość, ze względu na łączenie kilku dziedzin naukowych, a przede wszystkim ze względu na wysoką wartość merytoryczną.

5. Uwagi krytyczne.

Mimo ogólnie bardzo pozytywnego odbioru niniejszej rozprawy doktorskiej proszę o komentarz i ustosunkowanie się do następujących uwag i sugestii:

1. **Niepoprawny sposób substytucji kruszyw.** W rozdziale 4 we wstępnych badaniach aplikacyjnych kruszyw lekkich (Etap 1 i 2) oraz w rozdziale 6.4 przeprowadzono częściową substytucję piasku normowego w zaprawach cementowych wprowadzając lekkie kruszywa kompozytowe CLA. Wprowadzone kruszywa CLA mają dużo „grubsze” uziarnienie (2-16 mm) niż piasek normowy (0-2 mm). Podstawienie tego typu nie jest substytucyjne, gdyż uziarnienie kruszyw ma istotny wpływ na parametry zapraw min: wodożądność (reologię) lub parametry wytrzymałościowe. W niniejszym doświadczeniu, w próbce reprezentatywnej, powinno się zastosować kruszywo

naturalne o tym samym uziarnieniu i w tej samej ilości jak w próbkach z kruszywem CLA (tak jak np. w rozdziale 9.1).

2. Wątpliwe wnioski co do wpływu kruszyw CLA na urabialność w zaprawach cementowych. Wymienione wyżej niesubstytucyjne podstawienie piasku normowego kruszywami CLA mogło spowodować wyciągnięcie złych wniosków odnośnie korzystnego wpływu tych kruszyw na poprawę urabialności zapraw. Niewątpliwie prawdą jest, że kulistość nowo wytworzonych kruszyw sprzyja poprawie urabialności, natomiast uzyskany efekt poprawy płynności jest prawdopodobnie spowodowany głównie zmianą uziarnienia zaprawy.

3. Wątpliwe wnioski co do wpływu kruszyw CLA na urabialność w betonach.

W rozdziale 9.2. uzyskano dla niektórych kruszyw CLA lepszą urabialność w betonach niż dla próbki referencyjnej. Tutaj może mieć miejsce inny błąd - zastosowana procedura nasączania wodą (Domagała L.). Kruszywa CLA mają kilkukrotnie wyższą nasiąkliwość niż kruszywa naturalne, stąd też po nawilżeniu wprowadziły do betonów dużo większą ilość wody. Lepsza urabialność betonów, w których wprowadzono kruszywo CLA prawdopodobnie więc wynika z większej ilości wprowadzonej wody. Można było to potwierdzić oznaczając straty suszenia świeżych mieszanek (np.: w wagosuszarce). Warto przy tym podkreślić, że większa ilość faktycznie wprowadzonej wody przełożyła się na duży spadek wytrzymałości betonów z kruszywami CLA.

4. Niespójności.

- a) Bezpośrednio pod rysunkiem 38 Autor stwierdza, że **metoda A wytwarzania kruszyw pozwala na większą adsorpcję popiołu w metrycy PET** (chodziło raczej o absorpcję). Tabela 7 wskazuje na dokładnie odwrotną zależność mierzoną jako zawartość PET w kruszywie na podstawie strat prażenia.
- b) We wnioskach rozdziału 7.7 Autor zamieszcza informacje o braku obecności wodorotlenku wapnia w zaprawach cementowych, co jest niezgodne się z informacją zamieszczoną pod koniec strony 135.
- c) **Tabela 21.** Jak należy rozumieć niezerowe wartości przelotu na sicie 0,0 mm? Dlaczego mimo, że według procedury przygotowania kruszywa były separowane na sicie 2 mm to jednak nadal zostało w nich 11% frakcji <2 mm.
- d) **Tabela 26** - niespójność jednostek (ppm czy %?). Popioły zawierające 3,6% baru lub 12% antymonu były by skrajnie toksyczne.

5. Niespójne informacje chemiczne

- a) Interpretacja wyników DSC/TG dla kruszyw wzbudza wątpliwości. Według Autora w zakresie temperatur 375-475 dochodzi do **rozkładu termicznego PET**. Z punktu chemicznego reakcja rozkładu to reakcja, w której z jednego substratu powstają co najmniej dwa produkty. W tym przypadku dochodzi do szeregu reakcji min. depolimeryzacja, utlenianie monomerów (synteza). W literaturze można znaleźć informacje, że w tym zakresie dochodzi do dwóch efektów endotermicznych, które określa się wspólną nazwą: degradacja PET.
- b) Na stronie 40 jest sugestia, że **związki PET reagują z hydroksylo- i alkosylianami zawartymi w cementowym mleczku wapiennym**. Mleczko wapienne nie posiada wymienionych składników.
- c) Proces uzyskiwania kruszywa kompozytowego określono jako „**Synteza termiczna**” – jest to raczej wytwarzanie kruszyw w wyniku obróbki termicznej, natomiast do syntezy chemicznej składników bynajmniej nie dochodzi.

6. Uwagi redakcyjne.

Pod względem formatowania, stylistyki oraz interpunkcji i poziomu graficznego praca stoi na wysokim poziomie. Niektóre zauważone uwagi redakcyjne zestawiono w punktach poniżej:

1. Potoczne sformułowania np.: str. 117: **próbki beleczkowe**, str. 99: Każda cząstka niezależnie od kształtu jest przedstawiana jako **kulka**...
2. Nieprecyzyjne określenia np.: str. 29: **zmniejszenie wytrzymałości z 50 na 90%**, str. 29: **wytrzymałości gwałtownie spadły przekraczając 80%**.
3. Str. 11: błąd jednostki: **1,5 mln Mgm**
4. Str.135: oznaczenie z innego dokumentu: **rys. 10 p.3, rys 10 p.1**

7. Podsumowanie.

Magister inżynier Piotr Górak wykazał się dużą wiedzą z zakresu: technologii kruszyw lekkich, technologii betonu oraz projektowaniu reaktorów cieplnych. Realizując swoją pracę

wykazał się dojrzałością naukową w projektowaniu i prowadzeniu eksperymentu badawczego, a co najważniejsze dojrzałością w krytycznej analizie uzyskanych wyników eksperymentów. Przedstawione w niniejszej recenzji uwagi krytyczne w większości mają charakter polemiczny i nie wpływają na moją bardzo dobrą ocenę rozprawy.

Jest to jedna z lepszych z wielu prac doktorskich, których miałem okazję być recenzentem. Stwierdzam, że praca doktorska w dyscyplinie inżynieria mechaniczna Pana Piotra Górnika pt. „Metoda wytwarzania oraz właściwości fizyczne i użytkowe lekkiego kruszywa kompozytowego” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez Ustawę Prawo szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz.U. 2018 poz 1668 z późn. zm) obowiązującą aktualnie w Polsce.

Stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony. Jednocześnie, biorąc pod uwagę bardzo wysoki poziom recenzowanej rozprawy, wnioskuję o jej wyróżnienie.