

*Recenzja spełnia wymagania formalne*

Przewodniczący Rady Dyscypliny  
Inżynieria Lądowa i Transport

dr hab. inż. Marcin Stańka, prof. PŚ  
Warszawa, 05.07.2022 r.

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Lechowicz  
Katedra Geotechniki  
Instytut Inżynierii Lądowej  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
w Warszawie

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Konrada Walotka  
pt.

### **„Badania i analizy mieszanek drogowych zawierających wybrane odpady antropogeniczne”**

Recenzję opracowałem na zlecenie dr. hab. inż. Marcina Stańka, prof. PŚ, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport (pismo z dn. 05.05.2022 r.), zgodnie z uchwałą Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport z dn. 28.04.2022 r., na podstawie otrzymanego egzemplarza w/w rozprawy doktorskiej. Promotorem rozprawy doktorskiej jest prof. dr hab. inż. Joanna Bzówka, a promotorem pomocniczym dr inż. Adrian Ciołczyk.

#### **1. Uwagi ogólne**

W celu zrównoważenia produkcji dóbr przemysłowych z produkcją odpadów przemysłowych w krajach Unii Europejskiej jest sukcesywnie wdrażany system gospodarczy o obiegu zamkniętym. W systemie zamkniętym minimalizuje się zużycie surowców i wielkość odpadów oraz emisję i straty energii poprzez tworzenie zamkniętej pętli procesów, w których odpady z jednych procesów są wykorzystywane jako surowce dla innych, co znacznie zmniejsza ilość odpadów produkcyjnych. Wśród odpadów wymagających zagospodarowania duże znaczenie mają odpady gumowe, pochodzące z przemysłu motoryzacyjnego, odpady górnicze w postaci łupków przywęglowych nieprzepalonych towarzyszących wydobywaniu węgla kamiennego oraz popioły lotne stanowiące odpad powstały w wyniku produkcji energii elektrycznej z paliw kopalnych. Wykorzystanie tych odpadów zamiast dobrych jakościowo kruszyw naturalnych, których zasoby naturalne ciągle się kurczą, bardzo dobrze wpisuje się w trend budownictwa ekologicznego oraz w system gospodarczy o obiegu zamkniętym.

Należy wyrazić uznanie Doktorantowi, że podjął trudną tematykę oceny zachowania się wieloskładnikowej mieszanki ŁGPC składającej się z łupka przywęglowego nieprzepalonego, miazgi gumowej, popiołu lotnego i cementu przyjmując jako cel rozprawy poznanie i analizę wpływu różnej zawartości miazgi gumowej na właściwości fizyczne i mechaniczne badanej mieszanki. Praca doktorska mgr. inż. Konrada Walotka rozszerza obszar badań nad wykorzystaniem łupka przywęglowego nieprzepalonego, miazgi gumowej, popiołu lotnego w budownictwie drogowym. Uwaga Autora rozprawy doktorskiej skupiła się na doborze odpowiednich metod badawczych oraz na doborze składu mieszanki ŁGPC pod kątem jej wykorzystania w warstwach podbudowy zasadniczej i pomocniczej oraz

Wpłynęło dnia 18.07.2022 r.

ulepszono podłoża. Badania podstawowych właściwości fizycznych i mechanicznych przeprowadzono w Laboratorium Katedry Geotechniki i Dróg na Wydziale Budownictwa Politechniki Śląskiej. Na podkreślenie zasługuje fakt, że część badań właściwości mechanicznych prezentowanych w rozprawie doktorskiej dotyczący cyklicznego obciążenia mieszanki ŁGPC wykonano z wykorzystaniem systemu pomiarowego DIC (Digital Image Correlation) ARAMIS 3D.

## 2. Treść rozprawy doktorskiej

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Konrada Walotka składa się z pięciu rozdziałów, streszczenia w języku polskim i angielskim, spisu literatury oraz dwóch załączników obejmujących szczegółowe procedury przeprowadzonych badań i analizę statystyczną uzyskanych wyników. Spis literatury zawiera 129 pozycji literatury, w tym 61 obcojęzycznych, 17 norm i aktów prawnych oraz 7 adresów stron internetowych. Całkowita objętość pracy wynosi 195 strony. Praca poza tekstem drukowanym zawiera 42. tabele i 122 rysunki. Rozprawa charakteryzuje się przejrzystym i dobrze skonstruowanym układem rozdziałów. Brak jest spisu oznaczeń i symboli.

*Rozdział 1.* stanowi wprowadzenie, w którym Doktorant podkreślił znaczenie zagospodarowania w budownictwie odpadów pochodzących z recyklingu oraz odpadów powstających w wyniku procesów przemysłowych. Zwrócił szczególną uwagę na wykorzystanie w budownictwie odpadów gumowych, pochodzących z przemysłu motoryzacyjnego oraz odpadów górniczych w postaci łupków przywęglowych nieprzepalonych towarzyszących wydobyciu węgla kamiennego i popiołów lotnych stanowiących odpad powstały w wyniku produkcji energii elektrycznej z paliw kopalnych. We wprowadzeniu Doktorant bardzo jasno przedstawił cel, zakres i tezę rozprawy doktorskiej. Jako cel pracy przyjął ocenę wpływu zróżnicowanych ilości dodatku miazgi gumowej (G) stanowiącego składnik mieszaniny spoiwowej GPC zawierającej również popiół lotny (P) i cement (C) na parametry fizyko-mechaniczne mieszanki ŁGPC z dodatkiem łupka przywęglowego nieprzepalonego (Ł). Doktorant przedstawił zakres pracy obejmujący przegląd literatury dotyczącej zastosowań odpadów górniczych i gumowych w budownictwie oraz wpływu zastosowania rozdrobnionych odpadów gumowych na mieszanki związane spoiwem, badania własne mieszanki ŁGPC, analizę uzyskanych wyników i propozycje zastosowań mieszanek ŁGPC w budownictwie komunikacyjnym. Przyjął tezę, że miazga gumowa, stanowiąca składnik mieszanki związanej, której bazą jest łupek przywęglowy nieprzepalony pozwala na uzyskanie porównywalnych wartości parametrów fizyko-mechanicznych niezależnie od pochodzenia i właściwości stosowanego łupka przywęglowego nieprzepalonego, powoduje zwiększenie odporności mieszanki na działanie wody, poprzez zmniejszenie wysokości podciągania kapilarnego i nasiąkliwości oraz zwiększenie zakresu deformacji sprężystych pod wpływem obciążenia komunikacyjnego.

W przeglądzie literatury (*rozdział 2.*) Doktorant przedstawił problematykę gospodarki o obiegu zamkniętym, charakterystykę, właściwości i zastosowanie łupków przywęglowych nieprzepalonych, popiołów lotnych i odpadów gumowych oraz dotychczasowe doświadczenia z wykorzystania systemu pomiarowego DIC ARAMIS 3D pozwalającego na dokładne pomiary odkształceń powierzchni badanych obiektów.

Doktorant zwrócił uwagę, że pod nazwą odpady powęglowe lub też łupek przywęglowy, kryje się szeroka gama gruntów skalistych lub nieskalistych o zróżnicowanym składzie lub stopniu zerodowania. W związku z powyższym, zakres zastosowań materiałów z grupy odpadów górniczych jest uzależniony od oceny ich właściwości geotechnicznych, mrozoodporności i ścieralności, które mogą się istotnie różnić w zależności od pochodzenia. Szczególną uwagę zwrócił na zmienność parametrów fizyko–mechanicznych łupków przywęglowych nieprzepalonych poddawanych kilkukrotnemu zagęszczeniu, działaniu wody oraz cykлом zamrażania i odmrażania. Dla wszystkich analizowanych rodzajów łupków przywęglowych degradacji podlegają grubsze frakcje uziarnienia pod wpływem działania wody i mrozu oraz mechanicznego rozdrabniania. Odpowiednie rozpoznanie cech fizyko–mechanicznych odpadów powęglowych, uwzględniające zmienność tych cech w czasie, pozwoli na zastosowanie w budownictwie drogowym odpowiednich technologii zabezpieczających odpady przed przenikaniem wód gruntowych i opadowych lub wbudowanie odpadów poniżej strefy przemarzania. Zdaniem Doktoranta z przeglądu literatury wynika, że łupek przywęglowy przepalony jest wykorzystywany głównie przy budowie konstrukcji dróg wewnętrznych, magazynów fabryk oraz parkingów. W przypadku konstrukcji dróg głównych łupek przywęglowy jest rzadziej wykorzystywany ze względu na większą nasiąkliwość. Przegląd literatury wskazuje, że parametry wytrzymałościowe łupków przywęglowych nieprzepalonych mogą zostać w znaczącym stopniu poprawione poprzez zastosowanie popiołów, które również poprawiają mrozoodporność. Należy jednak zwracać uwagę na pęcznienie liniowe, które niestety jest charakterystyczną cechą obu materiałów.

W przeglądzie literatury Doktorant zwrócił uwagę na wykorzystanie popiołów lotnych w budownictwie drogowym, w stabilizacji gruntów oraz jako materiał budowlany w postaci mieszanin popiołowo–żuźlowych z dodatkiem cementu w podbudowie zasadniczej i pomocniczej oraz ulepszonym podłożu.

Wyniki badań przedstawione w literaturze wskazują, że wytrzymałość na ścinanie i dylatacja mieszanki gruntu i odpadów gumowych określane w aparacie trójosiowym są ściśle zależne od zawartości odpadów gumowych. Wyniki badań wpływu zastosowania dodatku rozdrobnionych odpadów gumowych na parametry fizyko–mechaniczne zapraw cementowych oraz betonów budowlanych wskazują, że wraz ze wzrostem dodatku odpadu gumowego powyżej 15% następuje duże obniżenie wytrzymałości na ściskanie. Wyniki badań mrozoodporności betonów z dodatkiem odpadu gumowego wskazują, iż większa zawartości tego dodatku wpływają na zwiększanie się powstających złuszczeń, co świadczy o pogarszaniu się mrozoodporności. Na podstawie literatury przeanalizowano badania nad wpływem zastosowania rozdrobnionych odpadów gumowych na parametry fizyko–mechaniczne mieszanek związanych spoiwem, głównie betonów oraz zapraw cementowych.

Wyniki badań wskazują, że wraz ze wzrostem zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych następuje zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie, zmniejszenie sztywności, zwiększenie odkształcalności, złagodzenie gwałtownej charakterystyki zniszczenia, pozwalając na przenoszenie większych naprężeń przy większych deformacjach, zmniejszenie zdolności do pochłaniania wilgoci z otoczenia oraz zwiększenie mrozoodporności.

Na zakończenie przeglądu literatury Doktorant przedstawił charakterystykę systemu pomiarowego DIC ARAMIS 3D wykorzystanego w badaniach własnych.

*Rozdział 3.* zawiera charakterystykę wykorzystanych składników mieszanki ŁGPC i sposób jej przygotowania oraz program zrealizowanych badań laboratoryjnych. W badanej mieszance ŁGPC bazę stanowi łupek przywęglowy nieprzepalony, a mieszanka spoiwowa składa się z rozdrobnionego odpadu gumowego, pochodzącego z recyklingu zużytych opon samochodowych, popiołu lotnego krzemionkowego oraz cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R. Zdaniem Doktoranta celem stosowania mieszanki ŁGPC jest zniwelowanie negatywnych właściwości łupków przywęglowych nieprzepalonych poprzez zwiększenie trwałości mieszanek łupka związanego spoiwem, obniżenie absorpcji wody w mieszance, zabezpieczenie łupka przed rozdrabnianiem w trakcie zagęszczania, poprawa nośności poprzez wytworzenie wiązań hydraulicznych oraz poprawa trwałości zmęczeniowej nawierzchni.

W badaniach wykorzystano dwa rodzaje łupków przywęglowych nieprzepalonych, pochodzących z różnych obszarów województwa śląskiego. Oba kruszywa w stanie naturalnym miały ciągłe uziarnienie o rozmiarze największego ziarna powyżej 63,0 mm. Do badań wykonywanych w dużym cylindrze Proctora wykorzystano kruszywo odsiane do uziarnienia 0/31,5 mm, zaś do przygotowywania próbek walcowych o wymiarach 80 x 80 mm zastosowano kruszywo odsiane do uziarnienia 0/16 mm. Odpady gumowe pochodzą z mechanicznego rozdrabniania opon samochodów osobowych, zostały rozdrobnione do uziarnienia 0/2 mm. Popiół lotny krzemionkowy został zastosowany ze względu na jego wpływ na poprawę wytrzymałości wiązań hydraulicznych matrycy cementowej. Rolą cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R jest zbudowanie wiązań hydraulicznych pozwalających na utrzymanie kształtu stwardniałego kompozytu oraz uzyskanie zadowalających parametrów wytrzymałościowych. Doktorant opracował procedurę przygotowania mieszanki ŁGPC pozwalającą na uzyskanie odpowiedniej jednorodności mieszanki i jej składu, szczegółowo opisaną w pracy.

W celu określenia wpływu różnej ilości dodatku rozdrobnionych odpadów gumowych na właściwości mieszanki ŁGPC zostały wykonane podstawowe badania pozwalające na charakterystykę bazowych parametrów wykorzystywanych składników, badania opisujące interakcję uzyskanej mieszanki z wodą oraz badania wytrzymałościowe i odkształceniowe. W ramach badań podstawowych parametrów poszczególnych składników mieszanki wykonano badanie składu granulometrycznego oraz badanie wskaźnika piaskowego, wilgotności optymalnej i wskaźnika CBR łupka przywęglowego. Dodatkowo w przypadku

łupka przywęglowego nieprzepalonego nr 2 oraz łupka z dodatkiem 10% odpadów gumowych przeprowadzono badanie wpływu 5-krotnego zagęszczania na uziarnienie. W ramach badań przeprowadzonych dla mieszanek ŁGPC wykonano badania wilgotności optymalnej oraz badania opisujących interakcję mieszanki ŁGPC z wodą w postaci nasiąkliwości masowej oraz wysokości podciągania kapilarnego. W ramach badań wytrzymałościowych mieszanek ŁGPC zostały wykonane badania wytrzymałości na ściskanie po 7 i po 28 dniach dojrzewania oraz badania przy cyklicznym obciążeniu po 28 dniach dojrzewania. Z badań wytrzymałościowych wyznaczono wartość wytrzymałości na ściskanie, maksymalne deformacje, moduł sztywności oraz moduł sprężystości Younga oraz zakres odkształceń sprężystych i plastycznych mieszanki. W badaniach wytrzymałościowych w etapie 2. został wykorzystany system DIC ARAMIS 3D do pomiaru odkształceń powierzchni badanych mieszanek.

W ramach etapu 1. zostały przeprowadzone badania mieszanek ŁGPC, z użyciem łupka przywęglowego nieprzepalonego nr 1. W ramach etapu 2. zostały wykonane badania na bazie łupka przywęglowego nieprzepalonego nr 2, w celu określenia powtarzalności uzyskanych wyników przy zastosowaniu zróżnicowanego kruszywa podstawowego. Badania w etapie 2. został poszerzony o badania z wykorzystaniem systemu DIC ARAMIS 3D w celu szczegółowej charakterystyki zwiększonej odkształcalności oraz sprężysto–plastycznego charakteru zachowania się mieszanek. Skład mieszanek ŁGPC przygotowanych do badań w obu etapach obejmował zawartość odpadów gumowych wynoszącą 0%, 5%, 10% i 15% przy stałej zawartości popiołu lotnego i cementu wynoszącej 5% i 5%.

*Rozdział 4.* zawiera wyniki badań zastosowanych materiałów oraz mieszanek ŁGPC wykonanych w ramach etapu 1. i 2. oraz ich analizę, szczególnie pod kątem nasiąkliwości, podciągania kapilarnego oraz wytrzymałości na ściskanie po 7 i 28 dniach pielęgnacji oraz deformacji i odkształceń przy obciążeniach cyklicznych.

Badania uziarnienia łupka przywęglowego nieprzepalonego nr 1 pochodzącego z Bielska Białej wykonane metodą sitową „na sucho” oraz „na mokro” wskazują na zwiększenie zawartości frakcji mniejszej niż 0,063 mm oraz zmniejszenie zawartości frakcji grubszych przy metodzie „na mokro”, które wynikają z degradacji uziarnienia kruszywa spowodowanego działaniem wody. Badania wskaźnika piaskowego łupka przywęglowego nieprzepalonego nr 1 wskazują, iż jest on materiałem wysadzinowym, natomiast badania zagęszczalności metodą Proctora wykazały wilgotność optymalną wynoszącą 11,4% oraz maksymalną gęstość objętościową szkieletu gruntowego równą 1,775 t/m<sup>3</sup>. Kalifornijski wskaźnik nośności wynosi 10,2%, zatem spełnia wymagania nośności gruntu G1. Wyniki pomiaru pęcznienia łupka przywęglowego nieprzepalonego nr 1 wykazały niewielkie pęcznienie po 10 dobach nasączenia wynoszące 0,18%. Badania uziarnienia rozdrobnionych odpadów gumowych wskazują, że największą frakcją jest frakcja 0,5/1 mm, której zawartość wynosi 46,7%. Badania uziarnienia popiołu lotnego wskazują, że zawiera on ponad 63% frakcji drobnych.

Badania mieszanek ŁGPC zawierających łupek przywęglowy nieprzepalony nr 1 bez dodatku odpadów gumowych wykazały maksymalną wartość gęstości objętościowej szkieletu gruntowego równą  $1,904 \text{ t/m}^3$  przy wilgotności optymalnej równej  $10,2\%$ . Zwiększenie zawartości dodatku odpadów gumowych wpływa na zmniejszenie się wartości maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego oraz wilgotności optymalnej, przy czym przy dodatku wynoszącym  $10\%$  maksymalna wartość gęstości objętościowa szkieletu gruntowego wynosi  $1,71 \text{ t/m}^3$  przy wilgotności optymalnej równej  $9,1\%$ . Badania nasiąkliwości masowej mieszanek ŁGPC oraz badania podciągu kapilarnego wykazały najmniejszą nasiąkliwość mieszanki oraz najmniejszy podciąg kapilary przy dodatku odpadów gumowych wynoszącym  $10\%$ .

Badania wytrzymałościowe mieszanek ŁGPC zawierających łupek przywęglowy nieprzepalony nr 1 w etapie 1. przy obciążeniach cyklicznych przeprowadzono za pomocą maszyny wytrzymałościowej. Badane mieszanki ŁGPC bez dodatku odpadów gumowych uzyskały wytrzymałość na ściskanie po 7 dniach pielęgnacji równą  $1,95 \text{ MPa}$  i  $2,74 \text{ MPa}$  po 28 dniach pielęgnacji. Przy dodatku odpadów gumowych wynoszącym  $10\%$  nastąpiło zmniejszenie wartości wytrzymałości na ściskanie do  $1,55 \text{ MPa}$  po 7 dniach pielęgnacji i do  $2,35 \text{ MPa}$  po 28 dniach pielęgnacji. Badane mieszanki ŁGPC bez dodatku odpadów gumowych uzyskały maksymalne odkształcenie przy zniszczeniu równe  $2,9\%$  po 7 dniach pielęgnacji oraz  $2,54\%$  po 28 dniach pielęgnacji. Przy dodatku odpadów gumowych wynoszącym  $10\%$  nastąpiło zwiększenie maksymalnego odkształcenia przy zniszczeniu do  $3,07\%$  po 7 dniach pielęgnacji i  $3,52\%$  po 28 dniach pielęgnacji.

Badania mieszanek ŁGPC przy obciążeniach cyklicznych obejmujących 20 cykli obciążenia wykazały, że wraz ze wzrostem zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych uzyskano najmniejsze wartości naprężeń ściskających oraz mniejsze wartości modułu Younga.

Badania uziarnienia łupka przywęglowego nieprzepalonego nr 2, pochodzącego z zakładu CTL Haldex, wykonane metodą sitową „na sucho” oraz „na mokro” wskazują, że w metodzie „na sucho” uzyskano mniejszą zawartość frakcji drobnych mniejszych od  $0,063 \text{ mm}$  oraz większą zawartość frakcji grubych powyżej  $63 \text{ mm}$ , w stosunku do krzywej otrzymanej metodą „na mokro”. Badania uziarnienia łupka z dodatkiem  $10\%$  odpadów gumowych przeprowadzone przed i po 5-krotnym zagęszczaniu wskazują na znacznie mniejszy przyrost zawartości frakcji drobnych poniżej  $0,063 \text{ mm}$ , niż w przypadku samego łupka, co świadczy o pozytywnym wpływie dodatku odpadów gumowych na zabezpieczenie ziaren kruszywa przed ich rozdrabnianiem w trakcie jego zagęszczania. Badania wskaźnika piaskowego łupka wskazują, że jego wysadzinowość określa się jako wątpliwą.

Badania mieszanki ŁGPC zawierających łupek przywęglowy nieprzepalony nr 2 bez dodatku odpadów gumowych wykazały maksymalną wartość gęstości objętościowej szkieletu gruntowego równą  $1,912 \text{ t/m}^3$  przy wilgotności optymalnej równej  $11,0\%$ . Zwiększenie zawartości dodatku odpadów gumowych wpływa na zmniejszenie się wartości maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego oraz wilgotności optymalnej, przy czym przy

dotatku wynoszącym 10% maksymalna wartość gęstości objętościowa szkieletu gruntowego wynosi  $1,807 \text{ t/m}^3$  przy wilgotności optymalnej równej 10,5%. Podobnie jak w przypadku łupka przywęglowego nieprzepalonego nr 1 badania nasiąkliwości masowej mieszanek ŁGPC oraz badania podciągu kapilarnego wykazały najmniejszą nasiąkliwość mieszanki oraz najmniejszy podciąg kapilary przy dodatku odpadów gumowych wynoszącym 10%.

Badane mieszanki ŁGPC bez dodatku odpadów gumowych uzyskały wytrzymałość na ściskanie po 7 dniach pielęgnacji wynosząca 1,72 MPa i 3,3 MPa po 28 dniach pielęgnacji. Przy dodatku odpadów gumowych wynoszącym 10% nastąpiło zmniejszenie wartości wytrzymałości na ściskanie do 1,52 MPa po 7 dniach pielęgnacji i 2,26 MPa po 28 dniach pielęgnacji. Badane mieszanki ŁGPC bez dodatku odpadów gumowych uzyskały maksymalne odkształcenie przy zniszczeniu równą 2,86% dla badania po 7 dniach pielęgnacji oraz 1,98% po 28 dniach pielęgnacji. Przy dodatku odpadów gumowych wynoszącym 10% nastąpiło zwiększenie maksymalnego odkształcenia przy zniszczeniu do 3,10% po 7 dniach pielęgnacji i do 2,59% po 28 dniach pielęgnacji.

Badania mieszanek ŁGPC zawierających łupek przywęglowy nieprzepalony nr 2 w etapie 2. przy obciążeniach cyklicznych przeprowadzono za pomocą maszyny wytrzymałościowej połączonej z systemem pomiarowym DIC ARAMIS 3D, wykorzystującym cyfrową korelację obrazu, w celu określania deformacji zachodzących na powierzchni badanych próbek. Analizę wyników badań przeprowadzono pod kątem oceny deformacji pionowych i odkształceń pionowych w zakresie sprężystym i plastycznym oraz odkształceń poziomych przy różnych zawartościach dodatku odpadów gumowych. Wyniki badań wskazują na zwiększanie się wartości pionowych odkształceń plastycznych wraz z wzrostem liczby cykli obciążenia oraz ograniczenie pionowych odkształceń plastycznych wraz ze wzrostem zawartości odpadów gumowych. Przy obciążeniach cyklicznych wartości pionowych odkształceń sprężystych ulegają zwiększeniu wraz ze wzrostem zawartości odpadów gumowych, co wskazuje na skuteczność działania tego dodatku. Wyniki badań wykazały, że wraz ze wzrostem zawartości odpadów gumowych uzyskano mniejsze wartości modułu sprężystości Younga. Zwiększenie zawartości odpadów gumowych powoduje wyrównywanie się wartości odkształceń poprzecznych mierzonych w środku wysokości próbki oraz w jej dolnej i górnej części.

W *rozdziale 5.* w ramach podsumowania podano zestawienie wyników badań, wnioski końcowe oraz kierunki dalszych badań. W ramach zestawienia wyników badań obejmujących właściwości fizyczne i mechaniczne badanych mieszanek ŁGPC, Doktorat podał zalecenia dotyczące możliwości zastosowania mieszanek ŁGPC w budownictwie drogowym.

### **3. Ocena pracy**

Rozprawa ma charakter doświadczalno-analityczny. Mgr inż. Konrad Walotek podjął się zbadania i oceny właściwości fizycznych i mechanicznych wieloskładnikowej mieszanki ŁGPC składającej się z łupka przywęglowego nieprzepalonego, miazgi gumowej, popiołu lotnego i cementu. Dla zrealizowania założonego celu rozprawy Doktorant wykonał obszerne i bardzo dobrze udokumentowane badania laboratoryjne. Bogaty materiał doświadczalny

umożliwił Autorowi dokonanie oceny wybranych właściwości mieszanki ŁGPC, w aspekcie wpływu zawartości odpadów gumowych na zmianę parametrów fizycznych i mechanicznych, na podstawie interpretacji nowoczesnych badań laboratoryjnych.

Za najważniejsze elementy oryginalne, stanowiące własny dorobek naukowy Doktoranta należy uznać:

- określenie wpływu dodatku rozdrobnionych odpadów gumowych na zmianę parametrów fizycznych (wilgotności optymalnej, maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego, nasiąkliwości masowej, podciągu kapilarnego) mieszanki ŁGPC w przypadku dwóch różnych łupków przywęglowych nieprzepalonych,
- określenie wpływu dodatku rozdrobnionych odpadów gumowych na zmianę parametrów mechanicznych (wytrzymałości na ściskanie po 7 i 28 dniach pielęgnacji, modułu Younga) mieszanki ŁGPC w przypadku dwóch różnych łupków przywęglowych nieprzepalonych,
- zastosowanie maszyny wytrzymałościowej połączonej z systemem pomiarowym DIC ARAMIS 3D w badaniach mieszanki ŁGPC zawierającej łupek przywęglowy nieprzepalony nr 2 przy obciążeniach cyklicznych,
- określenie wpływu dodatku rozdrobnionych odpadów gumowych na zmianę parametrów mechanicznych (odkształcenia pionowego w zakresie sprężystym i plastycznym, odkształcenia poziomego, modułu Younga) mieszanki ŁGPC przy obciążeniach cyklicznych w przypadku łupka przywęglowego nieprzepalonego nr 2,
- wykazanie, że 10% dodatek rozdrobnionych odpadów gumowych istotnie ogranicza nasiąkliwość i wysokość podciągu kapilarnego przy możliwie największych wartościach wytrzymałości na ściskanie i trwałości zmęczeniowej mieszanki ŁGPC.

Należy podkreślić, że założony przez Doktoranta naukowy cel pracy został osiągnięty, a przyjęte tezy udowodnione. Przedstawione w pracy wnioski końcowe są w pełni udokumentowane i stanowią własny i oryginalny wkład Doktoranta w poznanie i ocenę właściwości fizycznych i mechanicznych wieloskładnikowej mieszanki ŁGPC zawierającej łupek przywęglowy nieprzepalony, miał gumowy, popiół lotny i cement.

#### **4. Uwagi krytyczne i dyskusyjne**

Analiza rozprawy doktorskiej nasunęła mi następujące uwagi krytyczne i dyskusyjne, które powinny być wyjaśnione lub skomentowane podczas publicznej obrony pracy:

- Opis badań przy obciążeniach cyklicznych wymaga dodatkowych informacji dotyczących m.in. charakteru obciążeń cyklicznych, częstotliwości, poziomu zmobilizowania wytrzymałości na ściskanie, amplitudy naprężenia i odkształcenia.
- W badaniach przy obciążeniach cyklicznych przyjęto 20 cykli. Jaki jest wpływ liczby cykli obciążenia na zachowanie się podobnych materiałów?



- Badania mieszanek ŁGPC przy obciążeniach cyklicznych przeprowadzono maszyną wytrzymałościową oraz maszyną wytrzymałościową połączoną z systemem pomiarowym ARAMIS 3D, wykorzystującym cyfrową korelację obrazu. Czy dokonano porównania wyników badań z obu metod?
- W analizie statystycznej wyników badań na rysunkach podano jedynie współczynnik determinacji  $R^2$ . Czy wyznaczono inne statystyczne miary błędu?
- Wartości modułów Younga przedstawione na Rys. 4.58 i w Tabeli 4.9 oraz na Rys. 4.65 i w Tabeli 4.11 wymagają dodatkowego komentarza.
- W pracy stwierdzono, że badania zagęszczalności przeprowadzono według drugiej metody Proctora. Co to dokładnie oznacza?
- Rysunek 4.8 wymaga dodatkowego wyjaśnienia.
- Wpływ jakich innych czynników warunkujących zachowanie się mieszanki ŁGPC należałoby zbadać przed praktycznym jej wykorzystaniem?

Pragnę podkreślić, że powyższe uwagi krytyczne nie pomniejszają przedstawionych w recenzji własnych i oryginalnych osiągnięć Doktoranta.

Drobne poprawki w tekście, tabelkach i na rysunkach zostały zaznaczone w recenzowanym egzemplarzu, zestawione w zamieszczonej tabeli oraz przekazane Doktorantowi, umożliwiając dokonanie niezbędnych korekt przed przekazaniem części pracy do druku.

## 5. Podsumowanie i wniosek końcowy

Mgr inż. Konrad Walotek przedłożył do oceny rozprawę doktorską opracowaną na podstawie nowoczesnych, dobrze zaprogramowanych i obszernych badań laboratoryjnych służących ocenie wybranych właściwości fizycznych i mechanicznych mieszanki ŁGPC składającej się z łupka przywęglowego nieprzepakowanego, miazgi gumowej, popiołu lotnego i cementu. Recenzowana praca wniosła oryginalne elementy poznawcze w dyscyplinie „inżynieria lądowa i transport” wskazane w ocenie rozprawy, zatem spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim, określone w odpowiednich przepisach. Zawarte w pracy sformułowania i rozwiązanie problemu badawczego potwierdzają, że Doktorant sprostał wymaganiom stawianym kandydatom do stopnia naukowego doktora. Wnioskuje, zatem o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Konrada Walotka pt. „Badania i analizy mieszanek drogowych zawierających wybrane odpady antropogeniczne” do publicznej obrony.

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Lechowicz

## Uwagi redakcyjne

do rozprawy doktorskiej mgr inż. Konrada Walotka  
pt.

### „Badania i analizy mieszanek drogowych zawierających wybrane odpady antropogeniczne”

Strona	Jest	Powinno być
w całej pracy	redukcja	zmniejszenie
w całej pracy	niska, wysoka, niższe, wyższe, najniższa, najwyższa itd.	mała, duża, mniejsze, większe, najmniejsza, największa itd
w całej pracy	współczynnik korelacji $R^2$	współczynnik determinacji $R^2$
w całej pracy	szybkość	prędkość
w całej pracy	spadek	zmniejszenie
w całej pracy	tamy	zapory
w całej pracy	na mechanikę zniszczenia	na mechanizm zniszczenia
w całej pracy	ubytek	zmniejszenie
w całej pracy	[g/cm <sup>3</sup> ]	Układ SI [t/m <sup>3</sup> ] lub [Mg/m <sup>3</sup> ]
str. 6	głównie	głównie
str. 7	to strengthen the ground	to improve the ground
str. 7	The paper presents	The thesis presents
str. 31	uwzględniające, postępowaniu	uwzględniające, postępowaniu
Tabela 2.9	SiO <sub>2</sub> , SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	SiO <sub>2</sub> , SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....
str. 89	szczególna	szczególną
Tabela 4.7 i 4.8 Rys. 4.30 i 4.31	Przed 5-krotnym zagęszczaniem	Przed zagęszczaniem
Rys. 4.34	[g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]
Rys. 4.56	Zawartość	Zawartość
Rys. 4.60	obciążenia	obciążenia
str. 164	Najmniejszy procentową redukcję wartości	Najmniejsze procentowe zmniejszenie wartości

*Juhorn -*