

## Spis treści

Streszczenie .....	5
Abstract.....	7
1 Wprowadzenie .....	9
1.1    Cel oraz zakres pracy .....	11
1.2    Teza pracy.....	12
2 Aktualny stan wiedzy.....	13
2.1    Gospodarka o obiegu zamkniętym .....	13
2.2    Odpady górnicze – łupki przywęglowe nieprzepalone .....	16
2.2.1    Charakterystyka i asortyment .....	16
2.2.2    Właściwości fizyko–mechaniczne .....	19
2.2.3    Zastosowania odpadów powęglowych .....	31
2.2.4    Doświadczenia z zastosowań mieszanek związanych spoiwem.....	36
2.3    Popioły lotne .....	39
2.3.1    Charakterystyka i pochodzenia .....	39
2.3.2    Właściwości .....	41
2.3.3    Zastosowania popiołów lotnych .....	44
2.4    Odpady gumowe .....	49
2.4.1    Charakterystyka .....	49
2.4.2    Zastosowania odpadów gumowych .....	54
2.4.3    Wpływ odpadów gumowych na mieszanki związane spoiwem – doświadczenia krajowe .....	60
2.4.4    Wpływ odpadów gumowych na mieszanki związane spoiwem – doświadczenia zagraniczne .....	69
2.5    System pomiarowy DIC ARAMIS 3D .....	76
3 Badania własne .....	82
3.1    Mieszanka kompozytowa .....	82
3.1.1    Wstęp .....	82
3.1.2    Rola poszczególnych składników mieszanki kompozytowej .....	83
3.1.3    Przygotowanie mieszanki kompozytowej.....	86
3.2    Plan Badań .....	89
3.2.1    Wstęp .....	89
3.2.2    Badania zawarte w etapie „1” .....	91

3.2.3	Badania zawarte w etapie „2” .....	92
4	Wyniki badań .....	93
4.1	Etap „1” .....	93
4.1.1	Wyniki badań zastosowanych materiałów .....	93
4.1.2	Wyniki badań mieszanek ŁGPC przygotowanych według tablicy 3.1 .....	101
4.1.3	Podsumowanie wyników badań zawartych w etapie 1 .....	119
4.2	Etap „2” .....	121
4.2.1	Wyniki badań zastosowanych materiałów .....	121
4.2.2	Wyniki badań mieszanek ŁGPC według tablicy 3.2.....	127
4.2.3	Podsumowanie wyników badań nasiąkliwości, podciągania kapilarnego oraz wytrzymałości na ściskanie po 7 i 28 dniach pielęgnacji próbek.....	135
4.2.4	Wyniki badania cyklicznego obciążenia .....	136
4.2.5	Analiza deformacji pionowych .....	141
4.2.6	Podsumowanie pomiarów deformacji w cyklicznych obciążeniach.....	147
4.2.7	Analiza wartości odkształceń pionowych .....	148
4.2.8	Analiza wartości odkształceń poprzecznych.....	154
4.2.9	Podsumowanie pomiarów odkształceń w cyklicznych obciążeniach .....	164
5	Podsumowanie .....	165
5.1	Zestawienie wyników badań .....	165
5.1.1	Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego oraz wilgotność optymalna.....	165
5.1.2	Nasiąkliwość masowa oraz podciąganie kapilarne .....	166
5.1.3	Wytrzymałość na ściskanie po 7 oraz 28 dniach pielęgnacji próbek.....	167
5.1.4	Obciążenie cykliczne .....	170
5.1.5	Możliwe zastosowania mieszanek ŁGPC w budownictwie drogowym .....	171
5.2	Wnioski .....	172
5.3	Dalsze kierunki badań.....	173
	Spis literatury .....	174
	Załącznik 1 Procedury badań .....	184
	Załącznik 2 Analiza statystyczna .....	193

## Streszczenie

Sektor budowlany wykazuje bardzo duże zapotrzebowanie na surowce naturalne, głównie na kruszywa oraz spoiwa mineralne. Źródła tych surowców są ograniczone, co w połączeniu z ich znacznym wykorzystaniem powoduje szybkie zmniejszanie się ich zapasów. Tworzy to potrzebę wykorzystania surowców, pochodzących z innych źródeł ale spełniających podstawowe wymagania. W myśl idei gospodarki o obiegu zamkniętym, najlepsze do tego celu byłyby surowce pochodzące z recyklingu lub odpady powstające w wyniku procesów przemysłowych. Takie podejście do tematyki gospodarki surowcami naturalnymi, recyklingu oraz wykorzystania odpadów może pozwolić na zabezpieczenie rezerw złóż surowców naturalnych oraz poprawienie równowagi ekologicznej świata. Na tej podstawie zaproponowano mieszankę związaną spoiwem mineralnym składającą się z 3 odpadów przemysłowych: łupka przywęglowego nieprzepsalonego, rozdrobnionych odpadów gumowych oraz popiołu lotnego.

Zagospodarowanie odpadów gumowych, pochodzących głównie z przemysłu motoryzacyjnego jest problemem o skali światowej. Szacuje się, że rocznie przybywa około 1 mld zużytych opon samochodowych na świecie. Odpady gumowe nie wykazują agresywnego wpływu na środowisko naturalne, jednak ze względu na swoją łatwopalność, ich składowiska mogą być niebezpieczne. Ze względu na charakterystykę nieodwracalnych procesów chemicznych zachodzących w wulkanizatach, recykling surowcowy odpadów gumowych jest bardzo skomplikowany oraz kosztowny. Stąd najczęściej obieranymi drogami zmniejszania ilości tych odpadów na składowiskach jest recykling energetyczny, produktowy i materiałowy.

Łupki przywęglowe nieprzepsalone to odpady górnicze, towarzyszące wydobyciu węgla kamiennego. Ich zagospodarowanie jest problemem lokalnym występującym głównie w Zagłębiu Górn Śląskim. Szacuje się, iż rokrocznie przybywa około 37 mln ton tego odpadu. Faktem jest, iż aktualne działania towarzyszące próbom odejścia od energetyki węglowej będą powodowały stałe zmniejszanie się rocznego przyrostu tego odpadu, jednak należy ciągle pamiętać o bardzo dużych jego ilościach zalegających na istniejących hałdach.

Popioły lotne są odpadem powstałym w wyniku produkcji energii elektrycznej z paliw kopalnych. W budownictwie już od dłuższego czasu są one wykorzystywane jako substytut spoiw mineralnych lub jako dodatek poprawiający urabialność oraz przebieg reakcji pucolanowych mieszanek betonowych. Mieszanka składająca się z tych 3 odpadów, związana spoiwem jakim jest cement CEM I może być wykorzystana w budownictwie komunikacyjnym, jako materiał konstrukcyjny lub do wzmocnienia podłoża gruntowego. Jej zastosowanie pozwoli na utylizację znacznych ilości odpadów. W pracy przedstawiono analizę badań

laboratoryjnych parametrów fizyko–mechanicznych mieszanek ŁGPC, których nazwa wzięła się od pierwszych liter jej składników.

Przedstawienie wyników badań oraz ich analiza została poprzedzona przeglądem literaturowym, w którym przedstawiono charakterystykę i rozpoznanie właściwości fizyko–mechanicznych każdego ze składników oraz wpływ odpadów gumowych na mieszanki związane spoiwem. Ze względu na lokalny charakter problematyki zagospodarowania odpadów powęglowych, przegląd literatury dotyczący wpływu odpadów gumowych na mieszanki związane spoiwem odnosi się głównie do ich zastosowania w mieszankach betonowych.

Badania właściwości fizyko–mechanicznych wykonano w dwóch etapach. Przeprowadzono badania mieszanek o bardzo zbliżonym zakresie, w których zastosowano niezmienną zawartość popiołów lotnych i cementu oraz dodatki 5%, 10% i 15% rozdrobnionych odpadów gumowych w stosunku do masy łupka przywęglowego nieprzepsalnego. Zakres przeprowadzonych badań obejmował kontrolę nasiąkliwości masowej oraz wysokości podciągania kapilarnego wody, testy wytrzymałościowe po 7 i 28 dniach pielęgnacji próbek oraz badanie w warunkach obciążenia cyklicznego. W etapie 1 do sporządzenia mieszanek wykorzystano łupek przywęglowy nieprzepsalony o uziarnieniu 0/31,5 mm pochodzący z Bielska-Białej (nr 1), zaś w etapie 2 łupek przywęglowy nieprzepsalony odwęglony o uziarnieniu 0/31,5 produkowany w Zakładzie Haldex. Zastosowanie dwóch łupków przywęglowych pochodzących z różnych miejsc umożliwiło sprawdzenie czy zaproponowana mieszanka będzie prezentować zbliżone właściwości niezależnie od cech bazowego budulca. W badaniu obciążenia cyklicznego zawartym w etapie 2 wykorzystano system pomiarowy DIC ARAMIS 3D w celu określenia odkształcalności mieszanek pod wpływem obciążenia. Przedstawione wyniki badań pozwoliły określić wpływ zastosowania odpadów gumowych na ograniczenie wielkości nasiąkliwości masowej oraz wysokości podciągania kapilarnego wody, w mieszance jak również wpływ na zmniejszanie się wartości wytrzymałości na ściskanie oraz powiększenie odkształcalności badanych mieszanek. Wyniki obciążenia cyklicznego wskazały, że dodatki rozdrobnionych odpadów gumowych poprawiają trwałość zmęczeniową mieszanki, poprzez zmniejszenie redukcji wartości modułu sprężystości spowodowanej cyklicznym obciążeniem próbek. Uzyskane wyniki badań dla dwóch różnych łupków przywęglowych nieprzepsalonych potwierdziły skuteczność stosowania w mieszankach ŁGPC.

## **Abstract**

The construction sector shows a very high demand for natural resources, mainly aggregates and mineral binders. The sources of these raw materials are limited, which, combined with their significant use, cause their stocks to decline rapidly. This creates the need to use raw materials from other sources which meet the basic requirements. In line with the idea of a circular economy, recycled raw materials or waste resulting from industrial processes would be the best for this purpose. Such an approach of management of natural resources, recycling and the use of waste may allow for securing reserves of natural resources and improving the ecological balance of the world. On this basis, a mixture bound with a mineral binder was proposed, consisting of three industrial wastes: unburnt coal mining slate, shredded rubber wastes and fly ash.

The management of rubber waste, mainly from the automotive industry, is a problem on a global scale. It is estimated that around 1 billion used car tires are added to the world annually. Rubber wastes do not have an aggressive influence on the natural environment, but due to their flammability, their storage sites can be dangerous. Due to the characteristics of irreversible chemical processes occurring in vulcanizates, the raw material recycling of rubber waste is very complicated and expensive. Hence, the most frequently chosen methods of reducing the amount of this waste in landfills are energy, product and material recycling.

Unburnt coal mining slate is mining waste accompanying the extraction of hard coal. Their management is a local problem occurring mainly in the Upper Silesian Basin. It is estimated that about 37 million tons of this waste are added each year. Current activities accompanying attempts to abandon coal-fired power generation will result in a constant decrease in the annual increase in this waste. However, it is still necessary to remember about very large amounts of it lying on the existing heaps.

Fly ash is a waste generated by the production of electricity from fossil fuels. In construction, they have been used for a long time as a substitute for mineral binders or as an additive to improve the workability and reaction of pozzolanic concrete mixtures. The mixture consisting of these three wastes, bound with the binder CEM I cement, can be used in road engineering construction, as a construction material or to strengthen the ground. Its use will allow the disposal of large amounts of waste. The paper presents an analysis of laboratory tests of physical and mechanical parameters of “Unburnt coal mining – shredded rubber wastes – fly ash – cement” mixtures.

Results and their analyses were preceded by a literature review, which presented the characteristics and recognition of the physical and mechanical properties of each of the components as well as the influence of rubber waste on the mixtures bound with the binder. Due to the local nature of the problem of coal waste management, the review of the literature on the influence of rubber waste on mixtures bound with binder mainly refers to their use in concrete mixtures.

The research on physical and mechanical properties was performed in two stages. Tests of mixtures of a very similar scope were carried out, in which the unchanged content of fly ash and cement, as well as the additives of 5, 10 and 15% of shredded rubber waste, were used in relation to the weight of unburnt coal mining slate. The scope of the tests included the control of mass water absorption and the height of capillary rise of water, strength tests after 7 and 28 days of sample care, and testing under cyclic loading conditions.

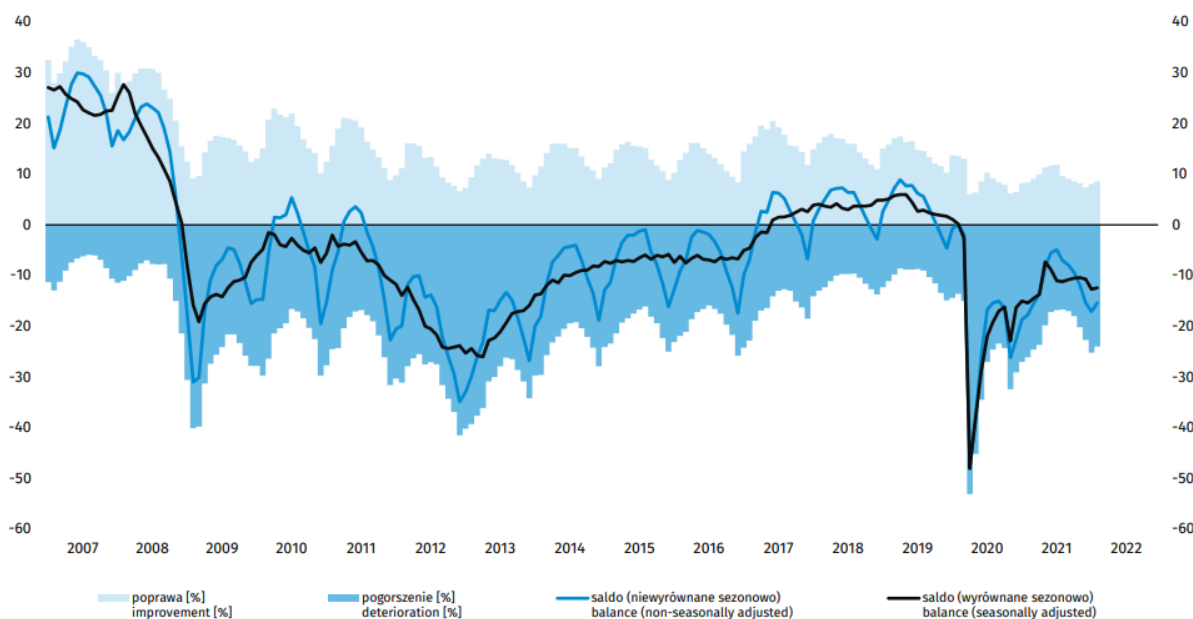
In stage 1, an unburnt coal mining slate with grain size 0/31.5 mm from Bielsko-Biała (no. 1) was used for the preparation of mixtures, and in stage 2 unburnt coal mining slate with decarburization grain size 0/31.5 mm produced at the Haldex Plant (no. 2) was used. The use of two coal mining slates from different places made it possible to check whether the proposed mixture would have similar properties, regardless of the properties of the base material.

In the cyclic loading study included in stage 2, the DIC ARAMIS 3D measurement system was used to determine the deformability of the mixtures under load. The presented results allowed to determine the effect of using rubber waste on the reduction of mass water absorption and the amount of water capillary rise in the mixture, as well as the impact on the reduction of the compressive strength value and increase of the deformability of the tested mixtures. The results of the cyclic loading indicated that the additives of shredded rubber waste improve the fatigue life of the mixture by reducing the reduction in the value of the elastic modulus caused by the cyclic loading of the samples.

The obtained results for two different unburnt coal mining slates confirmed the effectiveness of their use in “Unburnt coal mining slate – shredded rubber wastes – fly ash – cement” mixtures.

# 1 Wprowadzenie

Budownictwo w Polsce, jak i na świecie w krajach rozwiniętych, według danych GUS z lutego 2022 roku, od spadku koniunktury na przełomie 2008/2009 roku odnotowuje ciągły wzrost. Wybuch pandemii w 2020 spowodował znaczący przestój w robotach budowlanych, jednak po opanowaniu sytuacji epidemiologicznej koniunktura w budownictwie wraca do tendencji wzrostowej [GUS, 2022].



Rys. 1.1. Zmiany w koniunkturze w budownictwie na rok 2022 [GUS 2022]

Zwiększenie aktywności w sektorze budowlanym prowadzi w pierwszej kolejności do zabudowywania coraz większej ilości obszarów zielonych oraz zagęszczania się aglomeracji miejskich. W drugiej kolejności prowadzi do stopniowego wyczerpywania się złóż surowców naturalnych wykorzystywanych w budownictwie. Dotyczy to w największym stopniu budownictwa komunikacyjnego, gdzie zapotrzebowanie na kruszywa lub grunty spełniające wymagania warstw konstrukcyjnych dróg oraz nasypów komunikacyjnych jest największe. Niestety ludzki cykl życia jest na tyle krótki, że nie jesteśmy w stanie wyrównać naszego zapotrzebowania na te materiały z ich naturalnym cyklem produkcyjnym, co w efekcie w przyszłości może doprowadzić do wyczerpania się złóż tych surowców.

Odpowiedzią na te problemy jest system gospodarki o obiegu zamkniętym. Jest to regeneracyjny system gospodarczy, w którym 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 maksymalnie zmniejsza ilość odpadów produkcyjnych. System gospodarczy o obiegu zamkniętym od 2015 roku jest sukcesywnie wdrażany w krajach Unii Europejskiej w celu zrównoważenia produkcji dóbr przemysłowych z produkcją odpadów przemysłowych [gov.pl].



Aglomeracja Śląska, a dokładniej Górnośląski Okręg Przemysłowy GOP, jest największym okręgiem przemysłowym w Polsce. Obejmuje on środkowo-wschodnią część województwa śląskiego, jak i część zachodniej Małopolski (Zagłębie Dąbrowskie oraz część Zagłębia Krakowskiego). W GOP najbardziej rozwinięte są następujące sektory przemysłu:

- Górniczego
- Hutniczego
- Transportu
- Energetycznego
- Maszynowego
- Koksowniczego
- Chemicznego

Tak duże zagęszczenie różnych gałęzi przemysłu prowadzi do powstawania szerokiej gamy odpadów przemysłowych, co daje możliwość wdrażania systemu gospodarki zamkniętej.

W rozprawie doktorskiej uwaga została skupiona na wykorzystaniu trzech odpadów przemysłowych o znaczeniu strategicznym dla GOP, tj. łupków przywęglowych nieprzepalonych, popiołów lotnych z energetyki zawodowej oraz odpadów, których utylizacja jest problemem na skalę światową, tj. odpadów gumowych, pochodzących głównie z zużytych opon samochodowych.

Bardzo duży rozwój przemysłu górniczego na terenie województwa śląskiego skutkuje znaczącą produkcją łupków przywęglowych nieprzepalonych. Szacuje się, że roczna produkcja tego odpadu sięga nawet 37 mln. ton [Szlugaj, 2020]. Materiał ten, ze względu na dużą wrażliwość na działanie wody oraz niskie wartości parametrów fizyko-mechanicznych, jest w głównej mierze wykorzystywany do budowy niższych warstw nasypów komunikacyjnych, wałów przeciwpowodziowych oraz rekultywacji terenów zniszczonych przez działalność człowieka. Zastosowania te nie pozwalają jednak na pełne wykorzystanie łupków przywęglowych. Powoduje to konieczność składowania dużych ilości tego materiału, co generuje koszty oraz może prowadzić do powstawania zagrożeń dla środowiska w postaci pyłów pochodzących ze składowiska. Powyższe problemy powodują, iż cena materiału odpadowego sięga często symbolicznej złotówki, w związku z tym największą część kosztu wykorzystania łupków przywęglowych stanowi koszt ich transportu [Skarżyńska, 1996, 1997; IBDiM, 2004].

Popioły pochodzące z elektrowni w Polsce już od dłuższego czasu przestały być uznawane za odpad w znaczeniu technicznym. Stanowią one materiał budowlany, który z powodzeniem jest wykorzystywany w wielu dziedzinach budownictwa. Najczęstszym sposobem wykorzystania popiołów pochodzących z elektrowni jest zastosowanie ich jako dodatku do cementów lub betonów. Mogą one również być wykorzystane jako dodatek stabilizujący grunty, przy wykorzystaniu ich właściwości puculanowych, jako środek doziarniający lub jako dodatek do wyrobów ceramicznych drobnogabarytowych [Wiłun, 1976].



Odpady gumowe, ich składowanie i utylizacja są problemem sięgającym skali światowej. Głównym źródłem tych odpadów są zużyte opony samochodowe. Podstawowymi sposobami ich utylizacji jest ich ponowne wykorzystanie do produkcji elementów gumowych lub opon samochodowych, jednak nie rozwiązuje to w pełni problemu z racji wysokich kosztów klejów żywicznych, które są używane do ponownego scalenia zwulkanizowanej gumy oraz spadku wytrzymałości zmęczeniowej opon, w których zastosowano dodatek gumy odpadowej (średnia trwałość zmęczeniowa spada o 1% na 1% dodatku odpadu) [Sybilski, 2009; Lo Presti, 2013].

W budownictwie odpady gumowe z powodzeniem są wykorzystywane już od 1978 roku (USA) do polepszania właściwości mieszanek bitumicznych. Stosuje się je także jako lekkie wypełnienie nasypów lub do konstrukcji budowli geotechnicznych, gdzie oczekiwany jest mały ciężar oraz stosunkowo duża sztywność (np. ściany oporowe). W Polsce najczęściej stosowaną metodą utylizacji odpadów gumowych jest ich rozdrobnienie, a następnie wykorzystanie ich do produkcji nawierzchni sportowych lub paliw alternatywnych [Sybilski, 2009; Lo Presti, 2013].

## **1.1 Cel oraz zakres pracy**

Na bazie materiałów odpadowych przygotowano mieszankę spoiwową składającą się z miazgi gumowej, popiołu lotnego oraz cementu (spoiwo GPC). Tak skomponowane spoiwo ma zostać dodane do łupka przywęglowego nieprzepalonego (mieszanka ŁGPC) w celu poprawienia jego parametrów fizyko–mechanicznych. Głównymi zadaniami spoiwa GPC mają być:

- Zwiększenie trwałości mieszanek łupka związanych spoiwem, które ze względu na dużą wrażliwość kruszywa na działanie wody, mogą ulegać degradacji w dłuższych okresach czasu
- Obniżenie absorpcji wody w mieszance
- Zabezpieczenie łupka przed rozdrabnianiem w trakcie zagęszczania
- Poprawienie nośności poprzez wytworzenie wiązań hydraulicznych
- Nadanie związanej mieszance pewnej elastyczności, która może pozytywnie wpłynąć na trwałość zmęczeniową nawierzchni

W rozprawie przedstawiono wyniki badań łupka przywęglowego ulepszanego spoiwem GPC (mieszanka ŁGPC), charakterystykę wpływu poszczególnych składników na parametry fizyko–mechaniczne mieszanki oraz ich odniesienie do aktualnie obowiązujących norm dotyczących związanych warstw konstrukcji nawierzchni.

Celem pracy jest:

- Ocena wpływu zróżnicowanych ilości dodatku miazgi gumowej na parametry fizyko–mechaniczne (wytrzymałość na ściskanie, podatność na odkształcenia, nasiąkliwość, podciąganie kapilarne, zachowanie pod wpływem obciążenia cyklicznego) łupka przywęglowego nieprzepalonego związanego spoiwem

- Analiza zastosowania powyższego materiału w budownictwie, w zależności od zastosowanej recepty

Zakres pracy obejmuje:

- Przegląd literatury dotyczącej zastosowań odpadów górniczych oraz gumowych w budownictwie
- Przegląd literatury dotyczącej wpływu zastosowania rozdrobnionych odpadów gumowych na mieszanki związane spoiwem
- Badanie mieszanki ŁGPC: Etap „1”; Etap „2”
- Analizy oraz propozycje zastosowań mieszanek ŁGPC w budownictwie komunikacyjnym

## **1.2 Teza pracy**

Biorąc pod uwagę zakres pracy oraz cel, sformułowano następującą tezę:

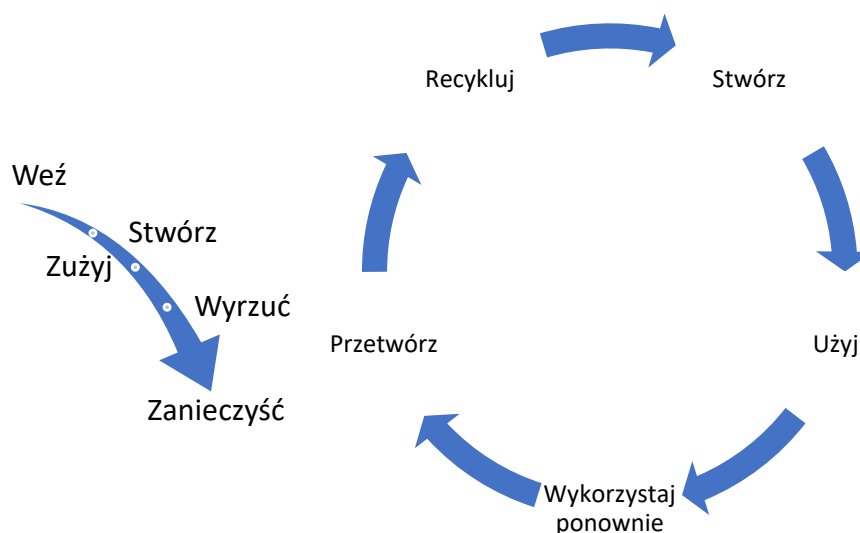
Miało gumowe, stanowiący składnik mieszanki związanej, której bazą jest łupek przywęglowy nieprzepalony pozwala na:

- Uzyskanie porównywalnych wartości parametrów fizyko–mechanicznych niezależnie od pochodzenia i właściwości stosowanego łupka przywęglowego nieprzepalonego
- Zwiększenie odporności mieszanki na działanie wody, poprzez zmniejszenie wysokości podciągania kapilarnego oraz nasiąkliwości
- Zwiększenie zakresu deformacji sprężystych pod przyłożonym obciążeniem

## 2 Aktualny stan wiedzy

### 2.1 Gospodarka o obiegu zamkniętym

Bardzo szybki rozwój gospodarczy oraz technologiczny odnotowany na przełomie XX i XXI wieku doprowadził do znaczącego wzrostu konsumpcjonizmu, nie tylko w sferze życia codziennego, jako spełnianie potrzeb jednostki, ale również w sferze przemysłowej oraz infrastrukturze. Wymóg spełnienia potrzeb jednostki prowadził do coraz większej potrzeby zwiększania wydajności przemysłu, a co za tym idzie, rozwojowi musiała zostać poddana również infrastruktura pozwalająca na zasilenie przemysłu. W Chinach w latach 2011 – 2013 do celów inżynierskich zostało wykorzystane 6.6 Gt cementu, czyli około 2 Gt więcej niż w Stanach Zjednoczonych Ameryki w czasie całego XX wieku (ok. 4.5 Gt) [Bukowski i Fabrycka, 2019]. Trend ten doprowadził do znaczącego wzrostu generowanych odpadów oraz wpłynął na znaczne uszczuplenie złóż surowców naturalnych. Doprowadziło to do potrzeby zmiany panującego na całym świecie systemu gospodarki linearnej, opierającej się na zasadzie „weź – wyprodukuj – zużyj – wyrzuć”, na system gospodarczy o obiegu zamkniętym [gov.pl].



Rys. 2.1. Schemat działania gospodarki linearnej oraz GOZ [Weetman, 2016]

Gospodarka o obiegu zamkniętym GOZ (*ang. Circular economy*) jest to koncepcja gospodarcza, w której materiały oraz surowce powinny zostać w obiegu jak najdłużej, jednocześnie minimalizując produkcję odpadów. Koncepcja ta z założenia uwzględnia wszystkie etapy cyklu życia produktu, od jego zaprojektowania poprzez produkcję, konsumpcję, zebranie odpadów oraz ich recykling. Oznacza to, iż już na etapie projektowania produktu powinien być zaplanowany system utylizacji oraz przetworzenia powstającego odpadu jako surowca wtórnego. Reasumując, oznacza to, iż poprzez proste przesunięcie wylotu gospodarki linearnej w kierunku jej wlotu, pozwala się na uzyskanie zamkniętego (lub bliskiego zamkniętego) obiegu surowców w przemyśle. Skutkuje to znaczącym zmniejszeniem zapotrzebowanie na surowce mineralne, szczególnie te strategiczne, przez co koszt produkcji powinien ulec zmniejszeniu. Jednocześnie pozwala to na zmniejszenie ilości generowanego

odpadu. Działania te mają wydzźwięk nie tylko proekologiczny ale również prorozwojowy, ponieważ potrzeba stałego recyklingu zużytych produktów prowadzi do powstawania coraz to nowszych, tańszych, a przez to wydajniejszych, technologii produkcji oraz recyklingu materiałowego [gov.pl].

O ile sam system GOZ jest stosunkowo nowy, to jego załączki już od dłuższego czasu występowały w sektorze budowlanym. Odznaczało się to potrzebą znajdowania tanich oraz łatwo dostępnych substytutów klasycznych materiałów budowlanych. Potrzeba ta generowana jest poprzez bardzo duże zapotrzebowanie na materiały w budownictwie (sektor budowlany odpowiada za około 25% wydobycia surowców oraz około 30% emisji CO<sub>2</sub> w Unii Europejskiej), szczególnie w przypadku budownictwa komunikacyjnego (bardzo częste zapotrzebowanie na ogromne objętości materiałów ziarnistych lub gruntowych przy robotach ziemnych) oraz wielkogabarytowych obiektach kubaturowych lub inżynieryjnych (wiadukty, mosty, tamy). W związku z powyższym, od lat w budownictwie zauważalny jest trend do poszukiwań materiałów budowlanych lub surowców do ich produkcji pośród odpadów powstałych w innych gałęziach przemysłu. Najczęściej są to materiały ziarniste lub drobnoziarniste powstające jako odpad w przemysłach [Bukowski i Fabrycka, 2019]:

- Hutniczym – żużle – substytut kruszyw naturalnych
- Energetycznym – popioły – dodatki do betonów lub środki stabilizujące grunt
- Górniczym – łupki przywęglowy (skała płonna) – substytut kruszyw naturalnych
- Motoryzacyjnym – odpady gumowe – substytut kruszyw lub gruntów naturalnych, dodatki do asfaltu i mas bitumicznych, produkcja nawierzchni
- Chemicznym (produkcja plastiku lub szkła) – badania nad wykorzystaniem plastików (PET, HDPE) oraz tłuczek szklanych jako dodatków do betonów, asfaltów lub jako dodatki stabilizujące grunt

Niestety charakterystyka całego sektora budowlanego nie pozwala na łatwe i pełne wpisanie się w zamknięty obieg GOZ, ponieważ pojawia się znaczący problem przy projektowaniu „produktu” i wprowadzaniu zagadnień biodegradowalności lub planowanej ograniczonej trwałości w obiektach o dużej odpowiedzialności, takich jak np. obiekty inżynieryjne, tamy czy mosty. Dodatkowo, stosowanie materiałów odpadowych jest trudne w przypadku wykonywania konstrukcji o większej odpowiedzialności, ponieważ wymagania im stawiane są restrykcyjne ze względu na komfort i bezpieczeństwo użytkowania, w związku z tym stosowanie tam materiałów odpadowych, których powtarzalność, jeśli chodzi o uzyskiwane parametry fizyko–mechaniczne, nie jest zbyt wysoka, jest skomplikowane i wymaga stałej kontroli, poprzez np. badania laboratoryjne. Budownictwo komunikacyjne lub w ogólnym ujęciu geotechnika, pozwala jednak na szersze wykorzystywanie tego typu zabiegów. Wynika to z charakterystyki tej części budownictwa, gdzie wymagania stawiane materiałom przeznaczonym do wykonywania np. nasypów są relatywnie niskie [IBDiM, 2004], a najważniejszym kryterium doboru tych materiałów jest ich ilość oraz dostępność. Stąd też wzięła się najczęściej stosowana praktyka, przy projektowaniu ciągów komunikacyjnych, w których niweleta jest tak projektowana, aby pozwolić na osiągnięcie bilansu robót ziemnych,

jak najbardziej zbliżonego do 0 oraz aby odległości przewozu mas ziemnych były jak najmniejsze. Pozwala to na ograniczenie kosztów wykonania budowli ziemnych poprzez zmniejszenie zapotrzebowania budowy na materiały z zewnątrz oraz zmniejsza koszty transportu, które niestety najczęściej przewyższają koszty materiału.

Wyżej wymienione podejście nie jest jednak zawsze możliwe do zrealizowania, ze względu na możliwość występowania w strefie wykopów gruntów słabonośnych lub ukształtowanie terenu nie pozwala na odpowiednie zbilansowanie robót. W tej sytuacji wykonawcy stają przed problemem znalezienia, na ogół bardzo dużych ilości materiału, możliwie jak najbliżej miejsca budowy oraz w jak najniższej cenie. Na terenach, na których występuje przemysł górniczy, wybór wykonawców często pada na odpady powęglowe ze względu na ich dostępność oraz atrakcyjną cenę (nierzadko wynoszącą 1zł/tonę). Jednak ze względu na niskie parametry geotechniczne oraz wrażliwość na działanie wody, odpady te mogą być stosowane głównie w niższych warstwach nasypów (poniżej strefy przemarzania gruntów) oraz powinny zostać zabezpieczone przed przenikaniem wody. Dodatkowo, z powodu dużej zmienności parametrów geotechnicznych, w zależności od miejsca występowania (wydobycia) odpadów powęglowych, wymagają one przeprowadzenia szeregu badań laboratoryjnych, przed ich wykorzystaniem, szczególnie tych określających trwałość parametrów w dłuższych okresach czasu [IBDiM, 2004].

Kolejnym materiałem odpadowym, powoli znajdującym swoje miejsce w budownictwie komunikacyjnym, jest odpad gumowy. Pochodzi on w głównej mierze ze zużytych opon samochodowych. Odpady gumowe charakteryzują się wysokimi parametrami fizyko-mechanicznymi, trwałością oraz stosunkowo niską gęstością objętościową. Mogą być stosowane w geotechnice pod postacią całych opon samochodowych (ściany oporowe, lekkie wypełnienie nasypów), częściowo przetworzone (rozcięte do stabilizacji poboczy) lub w formie rozdrobnionej (wióry, granulaty, jako dodatek do gruntu). Jednak ze względu na małą popularność oraz obawę wykonawców o ewentualne wpływy na środowisko tego typu zabudowy w masach ziemnych, materiał ten mimo swoich zalet jest jeszcze rzadko stosowany, w stosunku do ilości dostępnych materiałów odpadowych [Sybilski, 2009; Lo Presti, 2013].

W związku z powyższym oraz brakiem przepisów pomagających wykonawcom lub projektantom zastosowanie tego typu materiałów, ciągle pojawia się bariera nieufności (Rys. 2.2), która nie pozwala w pełni wykorzystać potencjału materiałów odpadowych w budownictwie [Bukowski i Fabrycka, 2019].

Ranking	Bariera
1	Architekci i konstruktorzy nie biorą pod uwagę materiałów i produktów pochodzących z recyklingu podczas projektowania i specyfikacji projektu
2	Brak pozytywnego postrzegania przez klientów
3	Niepewność co do trwałości całego życia materiałów i produktów pochodzących z recyklingu
4	Na wybór i specyfikacje materiałów mają wpływ koszty, a nie korzyści dla środowiska
5	Materiały i produkty pochodzące z recyklingu są droższe niż oczekiwano ze względu na postrzeganą przyjazność dla środowiska
6	Kontrola budynku utrudniająca wykorzystanie materiałów pochodzących z recyklingu
7	Na stronach internetowych dostawców brakuje istotnych informacji o produktach
8	Informacje o produktach z materiałów pochodzących z recyklingu są trudne do znalezienia
9	Trudno znaleźć dostawców materiałów pochodzących z recyklingu
10	W szkołach nie ma odpowiedniej edukacji na temat materiałów i produktów pochodzących z recyklingu
11	Próbki materiałów pochodzących z recyklingu są trudne do uzyskania
12	Profesjonaliści z branży nie mają wystarczającej wiedzy na temat materiałów i produktów pochodzących z recyklingu
13	Materiały pochodzące z recyklingu nie zawsze spełniają potrzeby i wymagania jakościowe
14	Dostawa materiałów pochodzących z recyklingu nie zawsze jest tej samej jakości
15	Podaż na rynku materiałów pochodzących z recyklingu nie zawsze jest pewna
16	Wśród profesjonalistów z branży budowlanej istnieje opinia, że materiały i produkty pochodzące z recyklingu są gorsze
17	Poziom recyklingu w produktach nie zawsze jest jasny i łatwy do znalezienia
18	Przepisy uniemożliwiające użycie produktów i materiałów pochodzących z recyklingu
19	Brak ulg podatkowych dla wykonawców

Rys. 2.2. Wyniki ankiety na temat barier wykorzystania produktów budowlanych z materiałów wtórnych w Wielkiej Brytanii (bariery powiązane z percepcją społeczną) [Oyedele i in., 2014]

W niniejszej pracy przedstawiono mieszankę, która w świetle GOZ może umożliwić ponowne wykorzystanie dużych objętości trzech materiałów odpadowych pochodzących z trzech różnych sektorów przemysłu oraz jednego standardowego materiału budowlanego (cement) do wytworzenia innego materiału budowlanego o przewidywalnych parametrach.

## 2.2 Odpady górnicze – łupki przywęglowe nieprzepalone

### 2.2.1 Charakterystyka i asortyment

Skała płonna (*definicja*) – „skała uważana za nieużyteczną (w odniesieniu do eksploatowanej kopaliny). Jest ona urabiana w trakcie eksploatacji złoża wraz z kopalinią użyteczną np. w celu udostępnienia właściwego złoża, ze względów technologicznych, ze względu na uwarunkowania złoża (niewielką miąższość). W przypadku złóż pokładowych jest to skała otaczająca, przerosty lub nadkład, który w trakcie eksploatacji dostaje się do urobku.

*W przypadku złóż metali, kiedy mineralizacja kruszczowa występuje w obrębie skał goszczących, za skałę płonną uznaje się skałę, w obrębie której koncentracja rozproszonego pierwiastka lub pierwiastków (w przypadku złóż polimetalicznych) spada poniżej arbitralnie wyznaczonej zawartości brzegowej. Urobioną w trakcie eksploatacji złoża i wydobytą skałę płonną składa się zwykle na hałdach” [Góralczyk i inni, 2009].*

Górnośląskie Zagłębie Węglowe w wyniku znacznego rozwoju górnictwa węglowego obfituje w towarzyszące węglowi kamiennemu odpady górnicze. Odpady te powstają podczas wykonywania prac przygotowawczych oraz eksploatacyjnych i przeróbczych. Według IBDiM [2004] na Górnym Śląsku zalega powyżej 1,5 mld ton odpadów powęglowych, a rocznie wydobywa się ich około 37 mln ton [Szlugaj, 2020]. Tak duża ilość materiału wymaga znalezienia sposobu ich utylizacji lub wykorzystania w przemyśle.

Odpady górnicze składają się z różnych rodzajów gruntów skalistych i nieskalistych, w ich skład mogą wchodzić [Sokół i Tabor, 1996; IBDiM, 2004; Machniak i Kozioł, 2014; Kozioł i in., 2015; Kłojzy–Karczmarczyk i in., 2016; Duszyński i in., 2018]:

- Łupki ilaste
- Iłowce
- Łupki węglowe
- Piaskowce
- Żwirowce
- Mułowce
- Syderyt
- Sferosyderyty
- Okruchy węgla kamiennego

Odpady górnicze są klasyfikowane ze względu na sposób ich powstania lub ich przydatność ze względu na właściwości fizyczne. Ze względu na sposób powstania, odpady górnicze można podzielić na dwie następujące grupy [Galos i in., 2009; Liu i Liu 2010; Galos i Szlugaj, 2014; Wowkowicz i in., 2018; Szlugaj, 2020;]:

- Odpady powstające z robót przygotowawczych i eksploatacji pokładów – na ogół duże okruchy skalne o uziarnieniu do 500 mm, najczęściej piaskowiec, w dużej mierze pozostawiane pod ziemią do wypełniania starych pokładów
- Odpady pochodzące z zakładów przeróbczych i wzbogacania węgla – odpady te można podzielić ze względu na sposób przetwórstwa węgla. Można wyróżnić trzy podgrupy:
  - Odpady o uziarnieniu ciągłym – pochodzące z procesu oddzielania węgla w ciężkiej cieczy, materiał o uziarnieniu 20–200 mm, zawartość węgla 5–15%, zawartość siarki poniżej 1%, wilgotność 4–6%
  - Drobnodziarniste odpady – pochodzące z osadzarek wstrząsanych, uziarnienie poniżej 20 mm, wyższa niż w powyższym odpadzie zawartość węgla, siarki oraz wilgotności



- Bardzo drobnoziarniste odpady pochodzące z płuczki flotacyjnej – wysoka zawartość węgla, siarki oraz duża wilgotność

Ze względu na przydatność odpadów w budownictwie drogowym, wyróżniamy następujący podział [IBDiM, 2004, Amrani i in., 2020]:

- Łupki przywęglowe nieprzepalone (surowe) pobrane bezpośrednio z płuczki węglowej
- Łupki przywęglowe nieprzepalone składowane przynajmniej przez rok na hałdzie
- Łupki odwęglone z wtórnej przeróbki łupka nieprzepalonego świeżego lub składowanego co najmniej rok na hałdzie
- Łupki przywęglowe przepalone (czerwone)
- Odpady zawierające skaliste lub nieskaliste grunty z robót przygotowawczych

Zgodnie z IBDiM [2004] łupki przywęglowe nieprzepalone („czarne”) w postaci surowego materiału pobranego z kopalni charakteryzują się gruboziarnistym uziarnieniem oraz dużą podatnością na rozdrabnianie pod wpływem oddziaływania wody lub mrozu. Podatność na rozkruszanie materiału zależy od zawartości i rodzaju występujących w nim odmian skalnych, jak i stopnia zdiagenezowania podstawowego budulca łupków przywęglowych, tj. iłowców. W surowym materiale występuje dodatkowo węgiel (nawet do 30% zawartości). Zastosowanie powyższego materiału w robotach ziemnych jest utrudnione ze względu na niestabilność kruszywa spowodowaną brakiem wypełnienia przestrzeni międzyziarnowych. Przestrzenie te z biegiem czasu są wypełniane w wyniku degradacji uziarnienia kruszywa, doszczelniając istniejącą warstwę, jednak w wyniku tej degradacji dochodzi do konsolidacji materiału, skutkującej powstawaniem znaczących osiadań. Kruszywo to może także ulegać samozapłonowi ze względu na zawarte w nim okruchy węgla. Do samozapłonu dochodzi głównie w niższych warstwach obciążonych dużym ciśnieniem oraz z dostępem do dopływu powietrza. Dodatkowo, w miejscu składowania, materiał na ogół jest w sposób niekontrolowany wymieszany z twardszymi okruchami skalnymi (pochodzącymi z wydobywania) oraz obudową górniczą lub częściami maszyn i urządzeń, przez co może być wykorzystywany selektywnie jako substytut gruntów lub kruszyw kamiennych. W czasie przechowywania materiału na składowisku, w wyniku erozji grubookruchowego materiału dochodzi do jego rozdrobnienia oraz zawilgocenia, co ułatwia jego wykorzystanie w robotach ziemnych. Erozji, szczególnie w dłuższych okresach przechowywania, towarzyszy powstawanie drobnych frakcji pyłowo-iłowych, których nadmierne nagromadzenie może nadać materiałowi cechy wysadzinowe, co znacząco ogranicza jego zastosowanie.

Łupki odwęglone powstają w wyniku przetwórstwa surowych odpadów górniczych, w celu odzyskania występującego w nim węgla. Do tego celu mogą być wykorzystane odpady pochodzące z istniejących hałd lub świeży odpad pochodzący z płuczki węglowej. Proces odwęglania polega na mechanicznym oddzieleniu węgla od skały płonnej w hydrocyklonach z cieczą ciężką. Materiał następnie jest osuszany oraz rozdzielany na poszczególne frakcje. W efekcie powyższego procesu, oprócz odzyskania węgla (około 10%) uzyskuje się kruszywo

o uziarnieniu najczęściej 0–45 mm. Przetwórcy oferują również kruszywa o uziarnieniu nawet do 200 mm. Kruszywo uzyskane w taki sposób charakteryzuje się ciągłym uziarnieniem, mniejszą zawartością węgla, w stosunku do surowego odpadu oraz wykazuje mniejszą skłonność do zmiany uziarnienia pod wpływem oddziaływań mechanicznych lub pod wpływem wody i mrozu. Najkorzystniejsze cechy uzyskują kruszywa powstałe w wyniku przetwórstwa przesezonowanych hałd odpadów górniczych. Wynika to z większej stabilności materiału, który zdążył już w większym stopniu zerodować [Kucharzyk, 2004; IBDiM, 2004; Galos i Szlugaj, 2014].

Łupkoporyt (łupek przywęglowy przepalony „czerwony”) powstaje w wyniku obróbki termicznej (wypalania) odpadów górniczych. Jest to lekkie, sztucznie uzyskane kruszywo, o znacznie większej sztywności oraz twardości poszczególnych ziaren niż surowy lub sezonowany odpad górniczy. W wyniku przepalania poprawia się również odporność kruszywa na degradację uziarnienia pod wpływem wody oraz mrozu, na wysokim poziomie pozostaje jednak nasiąkliwość materiału [Gradkowski i Wyszyński, 2010; Galos i Szlugaj, 2014; Duszyński i in., 2018]. Parametry fizyko–mechaniczne łupka czerwonego zależą w głównej mierze od stopnia przepalenia odpadu górniczego. Całkowicie przepalony odpad ma jednorodny czerwony kolor (zbliżony do gruzu z dobrze wypalanej cegły ceramicznej) oraz charakteryzuje się parametrami fizyko–mechanicznymi znacznie wyższymi niż surowy odpad. Mniejszy stopień przepalenia materiału będzie skutkował obniżeniem wartości parametrów fizyko – mechanicznych, uzyskaniem niejednorodnego pstrego ubarwienia oraz uwydatnieniem się wrażliwości na rozdrabnianie mechaniczne oraz pod wpływem oddziaływania wody i mrozu, jak w przypadku surowego odpadu. Ze względu na wysokie zapotrzebowanie na energię termiczną potrzebną do przepalenia materiału oraz duże ilości pyłów i zanieczyszczeń wytwarzanych przy okazji tego procesu, wykorzystanie tej metody przetwarzania odpadu zostało zaniechane w latach 90–tych ubiegłego wieku [IBDiM, 2004; Galos i Szlugaj, 2014].

Ostatnią już grupą odpadów należących do odpadów górniczych są odpady z prac przygotowawczych. Odpady te powstają w wyniku prowadzenia prac umożliwiających dotarcie do złoża węgla kamiennego. W skład tych odpadów wchodzi skaliste i nieskaliste grunty, w tym głównie piaskowce. Odpady te są składowane wraz z wydobytymi łupkami przywęglowymi oraz innymi odpadami produkcyjnymi, w związku z tym najprostszą metodą ich pozyskania jest pobieranie ich bezpośrednio w trakcie produkcji. Ze względu na dużą różnorodność materiałów wchodzących w skład odpadów przygotowawczych, ich wykorzystanie opiera się na selektywnym doborze materiałów z uwzględnieniem określonych parametrów geotechnicznych. Najczęściej lepsze jakościowo materiały są wykorzystywane do produkcji kruszyw stosowanych w warstwach konstrukcyjnych nawierzchni lub do stabilizacji podłoża gruntowego [IBDiM, 2004].

### 2.2.2 Właściwości fizyko–mechaniczne

Na podstawie informacji zawartych w rozdziale 2.2.1 można wywnioskować, iż pod nazwą odpady powęglowe lub też lupek przywęglowy, kryje się szeroka gama gruntów skalistych lub nieskalistych o zróżnicowanym składzie lub stopniu zerodowania. Właściwości materiałów należących do tej grupy zależą od składu petrograficznego, chemicznego oraz

mineralnego, co w efekcie oznacza, że w zależności od miejsca pobrania materiału uzyskamy zróżnicowane właściwości. W związku z powyższym, zakres zastosowań materiałów z grupy odpadów górniczych jest uzależniony od oceny ich właściwości geotechnicznych.

Tablica 2.1. Skład petrograficzny odpadów powęglowych  
[Skarżyńska, 1997; IBDiM, 2004]

Lp.	Rodzaj Skały	Miejsce Pochodzenia	
		Zagłębie Górnośląskie	Zagłębie Lubelskie
1	Iłowce	40–98	31–65
2	Mułowce	2–40	34–47
3	Łupki węglowe	2–25	–
4	Piaskowce	0–33	16–18
5	Węgiel	3–10	6–8

Tablica 2.1 przedstawia skład petrograficzny surowych odpadów górniczych pochodzących z 25 kopalń, rozgraniczonych pomiędzy Zagłębie Górnośląskie oraz Zagłębie Lubelskie.

W Zagłębiu Lubelskim dominującym rodzajem skały występującym w surowym odpadzie górniczym jest iłowiec (od 31 do 65%), drugimi w kolejności są mułowce z udziałem 34–47%, łupki węglowe nie występują, zaś udział piaskowca oscyluje między 16–18%. Średnia zawartość węgla w odpadach górniczych pochodzących z Zagłębia Lubelskiego wynosi od 6 do 8%.

W przypadku Zagłębia Górnośląskiego, występuje silna przewaga udziału iłowców (40–98%) nad resztą skał. Mułowce oraz łupki węglowe występują od 2% do kolejno 40 i 25%. Udział piaskowca w składzie petrograficznym mieści się w przedziale od 0 do 33%, a średni udział węgla w odpadzie wynosi od 3 do 10%.

Podsumowując, nawet na niedużym obszarze geologicznym zróżnicowanie składu petrograficznego surowego odpadu może być znaczące, a to z kolei będzie miało duży wpływ na określone, dla poszczególnych prób materiałów, właściwości geotechniczne. W efekcie każdorazowe zastosowanie materiału, nawet jeśli pochodzi z jednego źródła, wymaga sprawdzenia jego parametrów fizyko–mechanicznych.

Według IBDiM [2004] skład mineralny surowych odpadów powęglowych zawiera najczęściej od 50 do 70% minerałów ilastych, od 20 do 30% kwarcu oraz od 10 do 20% innych minerałów i substancji węglowych. Substancje węglowe występują głównie jako węgiel nieorganiczny.

Zróżnicowanie w składzie petrograficznym oraz mineralnym rzutuje również na skład chemiczny odpadów górniczych. Z kolei skład chemiczny ma duże znaczenie w przypadku oceny możliwości zanieczyszczenia środowiska poprzez zastosowanie odpadu górniczego lub jego zdolności oddziaływania na inne, wykorzystane wspólnie z nim, materiały budowlane. Do zanieczyszczenia środowiska może dojść poprzez wymycie z odpadu górniczego

występujących w nim rozpuszczalnych soli chlorków i siarczanów. Odpady górnicze mogą także, ze względu na wynikające ze składu chemicznego pH (obojętny, kwaśny lub zasadowy), oddziaływać w sposób erozyjny na zastosowane wraz z nim geosyntetyki, beton lub stal.

Tablica 2.2. Skład chemiczny odpadów górniczych występujących w Polsce  
[Skarżyńska, 1997; IBDiM, 2004]

Składniki	Zawartość [%]
SiO <sub>2</sub>	35–60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17–28
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,5–5,5
K <sub>2</sub> O	0,1–5,5
CaO	0,3–1,8
MGo	0,3–2,1
Na <sub>2</sub> O	0,01–0,7
TiO <sub>2</sub>	0,1–1,7
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,1–0,3
SO <sub>3</sub>	0,04–1,8
Cl <sup>-</sup>	0,02–0,06
pH	4–7,9

Tablica 2.2 przedstawia uśredniony skład chemiczny odpadów górniczych występujących na terenie Polski. W składzie chemicznym odpadów górniczych dominujący udział mają SiO<sub>2</sub> (tlenek krzemu (IV)) oraz Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (tlenek glinu (III)) z udziałem 35–60% oraz 17–28%. Drugą grupą związków chemicznych występujących w odpadach górniczych są Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (tlenek żelaza(III)) oraz K<sub>2</sub>O (tlenek potasu) z udziałami w składzie chemicznym kolejno od 1,5 do 5,5% oraz 0,1 do 5,5%. Reszta tlenków metali występujących w odpadach węglowych charakteryzuje się stosunkowo niewielkim udziałem, w większości do 2%. Najniebezpieczniejsze związki pod kątem ewentualnej możliwości zanieczyszczenia środowiska, tj. SO<sub>3</sub> oraz aniony chloru Cl<sup>-</sup> występują w składzie chemicznym w udziałach kolejno 0,04–1,8% dla tlenku siarki oraz 0,02–0,06% dla anionów chloru. Indeks pH dla odpadów górniczych występujących w Polsce waha się od 4 do 7,9, w efekcie oznaczając, iż odpady te mają odczyn od lekko kwaśnego po prawie zasadowy.

Jak już wcześniej wspomniano, zróżnicowanie składu chemicznego oraz petrograficznego odpadów górniczych rzutuje na najważniejsze, z inżynierskiego punktu widzenia, właściwości fizyko–mechaniczne, sprawiając, iż mogą się one bardzo różnić dla odpadów pochodzących z różnych miejsc poboru.

Powoduje to potrzebę prowadzenia szerokiej gamy badań kontrolnych w przypadku próby zastosowania odpadów górniczych. Według IBDiM [2004] w celu zastosowania

odpadów górniczych jako substytutu gruntu naturalnego, należy sprawdzić następujące cechy fizyko–mechaniczne:

- Uziarnienie
- Wskaźnik różnoziarnistości
- Wskaźnik piaskowy
- Kapilarność bierną
- Maksymalny ciężar objętościowy szkieletu gruntowego
- Wilgotność optymalną
- Współczynnik filtracji
- Kąt tarcia wewnętrznego
- Spójność
- Straty prażenia
- Wskaźnik nośności CBR
- Pęcznienie

W przypadku wykorzystania odpadów górniczych, jako substytutu kruszywa, należy rozpoznać właściwości rozszerzyć o następujące cechy:

- Mrozoodporność
- Ścieralność

Tablica 2.3 przedstawia zestawienie podstawowych parametrów fizyko–mechanicznych surowych odpadów górniczych występujących w Górnos Śląskim Zagłębiu Węglowym. W tabeli przedstawiono graniczne wartości parametrów określonych dla trzech grup odpadów pochodzących:

- Wprost z kopalni
- Ze zwałowisk
- Z zakładów przerobczych

Dodatkowo, dla zwałowisk oraz zakładów przetwórczych dokonano rozgraniczenia na odpady świeże oraz zleżące na składowisku.

Tablica 2.3. Właściwości geotechniczne odpadów powęglowych występujących w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym [Skarżyńska, 1997; IBDiM, 2004]

Oznaczenie	Symbol	Miano	Wprost z kopalni	Ze zwałowisk		Z zakładów przerobczych		
				nowych	zleżałych	świeżych	zleżałych	
Zawartość frakcji	Kamienistej	$f_k$	[%]	25–66	30–38	4–18	5–13	3–7
	Żwirowej	$f_z$	[%]	30–62	43–54	39–61	72–74	66–75
	Piaskowej	$f_p$	[%]	2–10	10–15	9–21	10–14	10–17
	Pyłowej z iłową	$f_\pi$	[%]	2–4	3–8	2–30	5–7	10–12
Nazwa wg PN-86/B-02480	–	–	Ż, KR	Ż, Żg	Ż, Żg, Pog	Ż, Ż/Żg	Żg	
Wskaźnik różnoziarnistości	U	–	4–160	22–170	14–2740	47–54	236–833	
Straty masy przy prażeniu	$I_z$	[%]	17–34	17–29	15–27	17	15	
Wilgotność	w	[%]	4–13	4–10	5–19	5–7	7–8	
Wilgotność optymalna	$w_{opt}$	[%]	7–12	9–16	11–19	8–10	10–11	
Maksymalny ciężar objętościowy szkieletu gruntowego	$\rho_{dmax}$	[kN/m <sup>3</sup> ]	17–19	16–19	12–20	19–20	18–19	
Ciężar objętościowy szkieletu materiału luźnego	$\rho_{do}$	[kN/m <sup>3</sup> ]	12–15	14	12,8–13	14,1–14,6	13,6	
Ciężar właściwy	$\rho_s$	[kN/m <sup>3</sup> ]	20–26	22–23	21–25	–	24–25	
Współczynnik filtracji dla $I_s=0,95$	k	[m/s]	$10^{-4}$ – $10^{-5}$	$10^{-4}$ – $10^{-6}$	$10^{-4}$ – $10^{-8}$	$10^{-4}$ – $10^{-5}$	$10^{-4}$ – $10^{-6}$	
Kąt tarcia wewnętrznego dla $I_s=0,95$	$\varphi$	[°]	38–47	36–42	30–46	38–40	33–37	
Spójność dla $I_s=0,95$	c	[kPa]	4–35	21–33	10–48	29–32	31–50	

Odpady pochodzące wprost z kopalni charakteryzują się największym możliwym udziałem frakcji kamienistej oraz największymi rozrzutami, jeśli chodzi o udziały poszczególnych frakcji. Występuje w nich również najwyższa zawartość węgla w stosunku do reszty grup odpadów oraz wyróżniają się najwyższym współczynnikiem filtracji. Ze względu na możliwą dużą zawartość frakcji kamienistej, odpad ten charakteryzuje się najniższą możliwą spójnością. Właściwości odpadu pochodzącego bezpośrednio z kopalni wynikają z jego niskiego stopnia zerodowania, dlatego też są one najmniej trwałe.

W przypadku świeżych odpadów górniczych pochodzących ze zwałowisk mamy do czynienia z węższymi przedziałami udziału poszczególnych frakcji oraz mniejszymi rozrzutami w wartościach poszczególnych parametrów, co świadczy o wystąpieniu erozji materiału.



Zleżałe odpady pochodzące ze składowisk cechują się znacznie mniejszą zawartością frakcji kamienistej, w stosunku do odpadów świeżych. Frakcja ta w wyniku degradacji uziarnienia rozpadła się zwiększając zawartości frakcji drobniejszych. Największy przyrost odnotowuje się w przypadku frakcji pyłowo–iłowych, jej zawartość zwiększa się z 3–8% do 2–30%. W efekcie tej degradacji zwiększa się wartość wskaźnika różnoziarnistości, zawilgocenia gruntu, wilgotności optymalnej oraz spójności i gęstości objętościowej szkieletu gruntowego. Znaczemu zmniejszeniu ulega współczynnik filtracji.

Odpady pochodzące z zakładów przetwórczych, ze względu na kontrolowany sposób składowania oraz wstępną obróbkę mechaniczną, charakteryzują się najwęższymi przedziałami rozrzutu wartości uzyskanych parametrów oraz najmniejszymi różnicami pomiędzy odpadem świeżym a zleżałym. Pomimo to, w tym przypadku ciągle zauważalny jest efekt degradacji uziarnienia kruszywa w wyniku erozji, powodujący zwiększenie się zawartości frakcji drobnych (głównie pylasto–ilastych) kosztem rozpadających się frakcji kamienistych. Skutkuje to, analogicznie jak w przypadku odpadów pochodzących ze zwałowisk, zwiększeniem się współczynnika różnoziarnistości, zawilgocenia gruntu, wartości wilgotności optymalnej. Zleżałe odpady pochodzące z zakładów przetwórczych charakteryzują się dodatkowo najwyższą możliwą spójnością.

Powyższe wyniki zwracają uwagę na znaczący problem zmienności właściwości fizyko–mechanicznych łupka w czasie, który powoduje, iż określenie stabilnych właściwości materiału w warunkach laboratoryjnych jest trudne i wymaga przewidywania jego zachowania w czasie lub też zastosowania technologii zabudowy, pozwalających na zabezpieczenie go przed wpływem erozji. Aby odpowiednio w sposób laboratoryjny określić parametry fizyko–mechaniczne odpadu, należy w planie badawczym uwzględnić na poletku doświadczalnym zasymulowanie wpływu warunków załadunku, transportu, formowania warstwy oraz jej zagęszczenia. Dodatkowo należałoby przeprowadzić badania sprawdzające wpływ oddziaływania wody, mrozu oraz zagęszczania na wartości uzyskiwanych parametrów [IBDiM, 2004; Sternik, 2011; Baran i in., 2013].

Podsumowując, w przypadku odpadów górniczych mamy do czynienia z materiałem którego proces erozji dopiero rozpoczyna się wraz z jego przetransportowaniem na powierzchnię. W efekcie tej erozji dochodzi do degradacji uziarnienia kruszywa pod wpływem oddziaływania wody i mrozu, powodując zwiększenie się zawartości drobnych frakcji, co skutkuje ciągłą zmianą właściwości współzależnych (wilgotności, wilgotności optymalnej, spójności itd.). Dlatego też najbezpieczniejszymi w zastosowaniu są odpady górnicze najdłużej zalegające na powierzchni, ponieważ charakteryzują się one największą stabilnością właściwości fizyko–mechanicznych.

W pracy IBDiM [2004], dotyczącej wymagań stawianych materiałom odpadowym wykorzystywanym w budownictwie drogowym, przedstawiono wyniki badań dotyczących zmian wybranych właściwości różnych rodzajów łupków przywęglowych. Kontrolili podlegały następujące parametry fizyko–mechaniczne:

- Uziarnienie



- Wskaźnik piaskowy
- Kapilarność bierna
- Granice konsystencji

W pracy IBDiM [2004] przedstawiono wyniki badań zmienności parametrów fizyko–mechanicznych następujących rodzajów łupków przywęglowych:

- Łupka przywęglowego nieprzepalonego uzyskanego z płuczki węglowej z KWK Gottwald
- Łupka przywęglowego odwęglanego produkowanego przez Zakłady Haldex
- Łupka przywęglowego przepalonego z KWK Nowy Wirek

Aby zasymulować czynniki erozyjne oddziałujące na materiał w czasie jego zabudowy oraz późniejszego użytkowania próbki zostały poddane:

- Kilkukrotnemu zagęszczeniu w aparacie Proctora
- Namaczaniu w wodzie
- Cyklem zamrażania i odmrażania

W przypadku kruszywa pochodzącego z KWK Gottwald w stanie naturalnym, zawartość poszczególnych frakcji prezentowała się następująco: kamienista 65,3%; żwirowa 32,6%; piaskowa 1,6%; pyłowo–iłowa 0,5%. W związku z tym materiał ten można określić mianem kruszywa gruboziarnistego, niewykazującego cech gruntu spoistego oraz niewysadzinowego. Pod wpływem namaczania dochodziło do stopniowego zmniejszania się zawartości frakcji kamienistej, tworząc większe zawartości frakcji żwirowej, piaskowej oraz pyłowo–iłowej, jednak w przypadku frakcji żwirowej przyrost jej zawartości nie był stały i po 15 dniach namaczania jej zawartość zaczęła stopniowo się zmniejszać. Jedynie frakcje piaskowa oraz pyłowo–iłowa odnotowały przyrost przez wszystkie dni namaczania. W efekcie badane kruszywo po 50 dniach namaczania, pomimo znaczącego przyrostu zawartości frakcji drobnych, nie uzyskało cech wysadzinowych (wskaźnik piaskowy równy 71 [PN–EN 933–8:2012] oraz kapilarność bierną na poziomie 0,55 m). Uzyskana zawartość frakcji pyłowo–iłowej na poziomie 9,2% nie nadała materiałowi cech gruntu spoistego.

Próbki przeznaczone do kondycjonowania w warunkach zamrażania i rozmrażania zostały przygotowane z kruszywa odsianego do frakcji 0/40 mm. Próbka składała się z 24,2% frakcji kamienistej, 70,2% frakcji żwirowej oraz 5,4% i 0,2% frakcji piaskowych oraz pyłowo–iłowych. Początkowo próbki zostały poddane zagęszczaniu w aparacie Proctora. Na tym etapie zawartość frakcji kamienistej spadła w wyniku rozkruszenia ziaren kruszywa o 19,2%, przeistaczając się głównie w frakcję piaskową (przyrost o 18,1%). Wskaźnik piaskowy określony dla kruszywa w tym stanie wynosił 35, co wskazuje, iż materiał ten jest wrażliwy pod względem wysadzinowości. W wyniku cyklicznego zamrażania i rozmrażania uziarnienie próbki zmieniało się w sposób podobny, jak w przypadku jej namaczania, tj. dochodziło do ciągłej degradacji zawartości frakcji grubszych, zwiększając w ten sposób zawartości frakcji drobnych (piaskowej oraz pyłowo–iłowej). Jednak w tym przypadku powstało znacznie więcej

frakcji pyłowo–iłowej (33% po 25 cyklach), co doprowadziło do nadania kruszywu cech gruntu spoistego.

Łupek przywęglowy odwęglony pochodzący z Zakładów Haldex został poddany 5–krotnemu zagęszczaniu w stanie naturalnym, zagęszczaniu przy wykorzystaniu próbki o uziarnieniu 0/25 mm oraz cykлом zamrażania i odmrażania, przeprowadzonym również dla kruszywa w stanie naturalnym.

Próbka poddana 5–krotnemu zagęszczeniu w wyniku badania zredukowała zawartość frakcji kamienistej oraz żwirowej o 5%, tworząc tym samym 3 oraz 7% frakcji piaskowej oraz pyłowo–iłowej. W efekcie zmiany uziarnienia kruszywo z niewysadzinowego (SE = 43) stało się wątpliwe pod względem wysadzinowości (SE=33) [PN–EN 933–8:2012].

W przypadku zagęszczania próbki o uziarnieniu 0/25 mm, zawartość frakcji żwirowej została zmniejszona o 16%, co skutkowało przyrostem zawartości frakcji piaskowej i pyłowo–iłowej o 7 i 9%, co ponownie sprawiło, iż materiał z niewysadzinowego stał się wątpliwy.

W wyniku kondycjonowania próbek w warunkach cyklicznego zamrażania i odmrażania, obserwowana degradacja uziarnienia wyniosła 15 oraz 16% w przypadku frakcji kamienistej i żwirowej, zaś dla frakcji piaskowej oraz pyłowo–iłowej odnotowano przyrost o 17 i 4%. W tym przypadku jednak kruszywo nie wykazuje właściwości wysadzinowych (SE>35) [PN–EN 933–8:2012].

Ostatnim przedstawionym przypadkiem są badania łupka przywęglowego przepalonego pochodzącego z KWK Nowy Wirek. Próbka w stanie naturalnym została poddana 5–krotnemu zagęszczaniu, 25 dniom moczenia w wodzie, 25 cyklem zamrażania i rozmrażania oraz 5–krotnemu zagęszczeniu połączonemu z 25 cyklami zamrażania i rozmrażania.

Po 5–krotnym zagęszczeniu odnotowano spadek zawartości frakcji kamienistej o 15,5%, co skutkowało przyrostem zawartości frakcji żwirowej, piaskowej oraz pyłowo–iłowej odpowiednio o 4; 8,9 i 2,4%; wartość wskaźnika piaskowego wzrosła z 68 do 74. Łupek przywęglowy przepalony wykazał wysoką, w porównaniu do reszty badanych materiałów, odporność na moczenie w wodzie, ponieważ w efekcie tego oddziaływania zmniejszyła się jedynie zawartość frakcji kamienistej o 3,3%, generując taki sam przyrost frakcji żwirowej. Zamrażanie i rozmrażanie próbki doprowadziło do zmniejszenia się zawartości frakcji kamienistej oraz żwirowej o 7,5 i 4,5%, zwiększając tym samym zawartość frakcji piaskowej i pyłowo–iłowej o 8,2 i 3,8%. Największe zmiany w składzie ziarnowym badanej próbki spowodowało 5–krotne zagęszczenie oraz późniejsze poddanie jej cyklem zamrażania i rozmrażania. W tym przypadku zawartość frakcji kamienistej spadła o 20,9%, a zawartość frakcji żwirowej, piaskowej oraz pyłowo–iłowej wzrosły odpowiednio o 8,6; 7,3; 5,0%. Odnotowano również najwyższy spadek wartości wskaźnika piaskowego z 68 do 58.

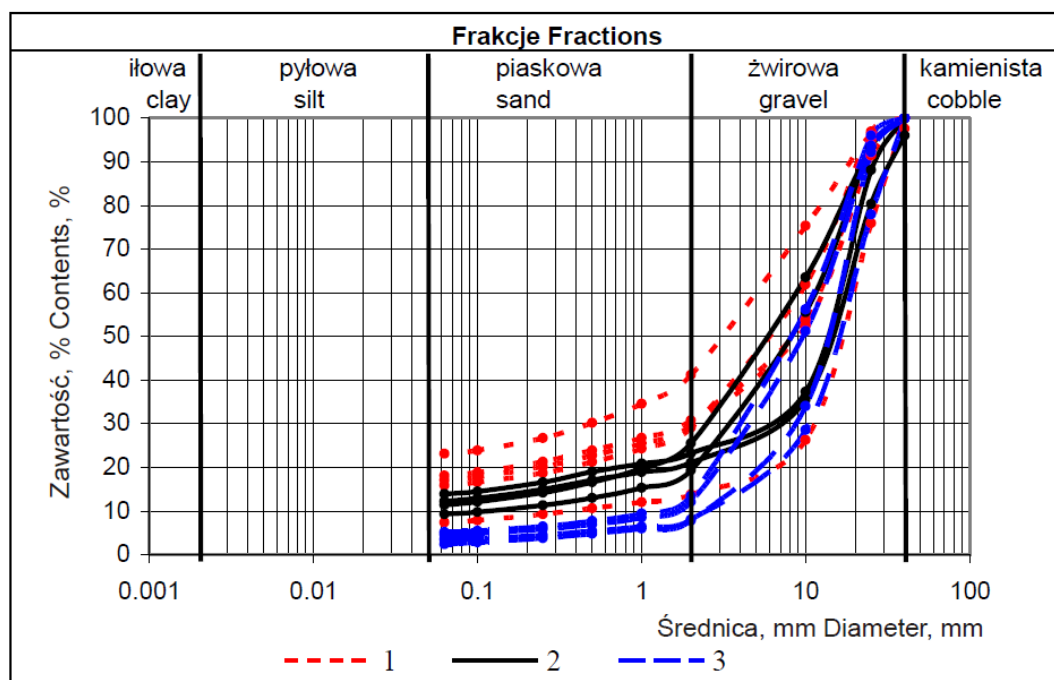
Podsumowując powyższe wyniki badań przedstawione przez IBDiM [2004], można stwierdzić, że dla wszystkich przedstawionych rodzajów łupków przywęglowych degradacji podlegają grubsze frakcje uziarnienia pod wpływem działania wody i mrozu oraz mechanicznego rozdrabniania. Stopień degradacji jest jednak zróżnicowany w zależności od

stopnia przetworzenia materiału. Łupki najmniej przetworzone, tj. łupki świeże pochodzące z płuczki węglowej, najbardziej reagują na namaczanie oraz zamrażanie, jednak w przypadku moczenia nie dochodzi do uzyskania cech wysadzinowych. Odwęglone łupki przywęglowe, reagują na działanie wody i mrozu w dużo bardziej zrównoważony sposób oraz w większości przypadków nie wykazują cech wysadzinowych. Łupki przywęglowe przepalone, w najmniejszym stopniu reagują na działanie wody i mrozu, jednak są ciągle dość wrażliwe na mechaniczne rozdrabnianie.

W pracy Filipowicza i Borysa [2006] autorzy przedstawili wyniki badań dotyczących zmian właściwości fizyko–mechanicznych odpadów powęglowych w czasie, w istniejących obiektach inżynierskich hydrotechnicznych. Do badań autorzy wybrali 4 obiekty wybudowane z odpadów pochodzących z KWK Bogdanka. Obiekty w momencie realizacji badań były eksploatowane od 4 do 22 lat:

- Obiekt 1 – nasyp drogowy po 5 latach eksploatacji, nawierzchnie drogi wykonano z płyt betonowych perforowanych, ułożonych na warstwie piasku średniego o grubości 0,2 m, poniżej występuje warstwa odpadów powęglowych o grubości 0,5 m. Pod warstwą odpadów powęglowych występuje warstwa piasku średniego szarego z gładzikami wapienia
- Obiekt 2 – grobla międzystawowa po 10 latach eksploatacji, pełniąca jednocześnie rolę drogi. Korpus nasypu wykonano z odpadów powęglowych, zagęszczonych spycharką, miąższość warstwy wynosi ok. 2,5 m. Poziom wody gruntowej w momencie wykonywania badań znajdował się ok. 1,0 m poniżej korony. Droga na grobli jest okresowo wykorzystywana przez samochody osobowe
- Obiekt 3 – droga na torfach po 4 latach eksploatacji. Grubość warstwy wbudowanych odpadów powęglowych wynosi ok. 3,0 m. Drogę wykonano zabudowując materiał bez zagęszczania, ze względu na występujące w podłożu torfy z wysokim poziomem zwierciadła wody gruntowej. Materiał usypywano, a następnie oczekiwano na ustabilizowanie osiadań w efekcie naturalnej konsolidacji materiału oraz wypychania zalegających niżej nawodnionych warstw torfu
- Obiekt 4 – ławeczka lewego obwałowania kanału Wieprz–Krzna po 22 latach eksploatacji. Pełni ona rolę drogi dojazdowej do posesji oraz jest wykorzystywana przez ciężki sprzęt transportowy. Miąższość warstwy odpadów powęglowych wynosi 0,9 m

Autorzy w swoich badaniach skupili się głównie na zmianach w uziarnieniu kruszywa, jego wilgotności, wilgotności optymalnej oraz maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego, wskaźniku zagęszczenia, wytrzymałości na ścinanie oraz współczynnika filtracji.



Rys. 2.3. Krzywe uziarnienia odpadów powęglowych pobranych na różnej głębokości na obiekcie nr 3 1–0,3 m; 2–0,5 m; 3–1,0 m [Filipowicz i Borys, 2006]

Na rysunku 2.3 przedstawiono różnice w krzywych uziarnienia próbek odpadów powęglowych, pobranych na obiekcie nr 3 z różnych głębokości zalegania. Próbkę pobraną z głębokości 0,3 m oraz 0,5 m, tj. z głębokości powyżej zwierciadła wody gruntowej charakteryzują się zbliżonymi zawartościami frakcji pyłowo–iłowych. Największą różnicę w zawartości frakcji drobnych można zaobserwować pomiędzy próbkami pobranymi z głębokości 0,3 m a próbkami pobranymi z głębokości 1,0 m, gdzie były one już w pełni nasycone wodą, ponieważ znajdowały się poniżej zwierciadła wody gruntowej (0,6 m). Próbkę odpadów w pełni nasyconych wodą zawierają znacznie mniej frakcji pyłowo–iłowych, niż te zalegające powyżej zwierciadła wody gruntowej.

Tablica 2.4. Uziarnienie odpadów powęglowych pobranych z obiektów 1–4 na głębokości 0,5 m [Filipowicz i Borys, 2006]

Obiekt	Udział frakcji [%]			
	Pyłowa z iłową	Piaskowa	Żwirowa	Kamienista
1	9,0–19,9	4,9–15,4	63,7–82,5	0,0–11,2
2	7,7–20,9	6,3–11,7	66,9–79,6	0,0–12,8
3	8,7–13,9	4,7–14,1	72,5–85,2	0,0–9,7
4	10,7–25,6	8,9–15,6	55,8–71,1	1,5–10,7

W tablicy 2.4 przedstawiono skład granulometryczny odpadów powęglowych pobranych z obiektów 1–4 na stałej głębokości 0,5 m. Na podstawie przedstawionych danych można stwierdzić, że w odpadach powęglowych wbudowanych w nasyp następuje przyrost zawartości drobnych cząstek frakcji pyłasto–iłastej w czasie. Materiał pochodzący z obiektu

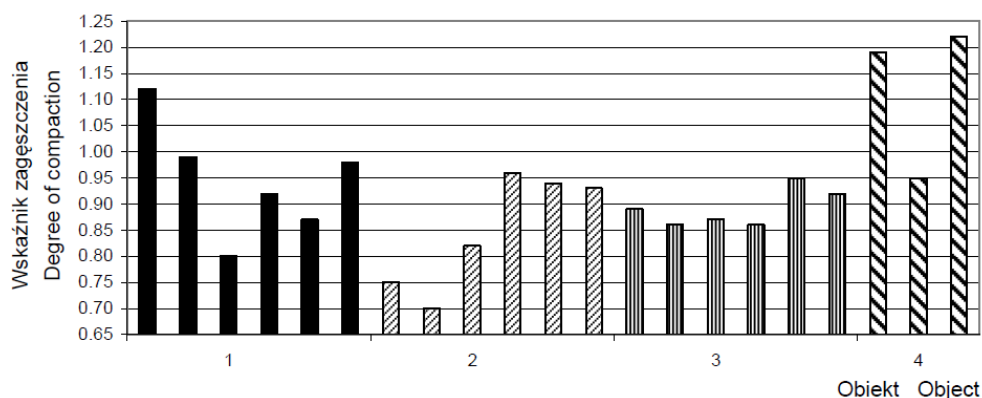
nr 4 (22 lata eksploatacji) zawierał około 10% więcej frakcji pylasto–ilastej niż odpady z obiektu nr 3 (4 lata eksploatacji). W odpadach zaobserwowano również wyraźny spadek zawartości frakcji żwirowej w czasie użytkowania. W przypadku obiektu nr 4 próbka odpadów powęglowych zawierała ok. 18% mniej frakcji żwirowej niż próbka pobrana z obiektu nr 3.

W przypadku tablicy 2.5, przedstawiającej wartości wilgotności optymalnej oraz maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego określone dla próbek pobranych z obiektów 1–4 również nie stwierdzono korelacji pomiędzy wyżej wymienionymi parametrami a czasem eksploatacji zabudowanego materiału.

Tablica 2.5. Zestawienie wartości wilgotności optymalnych i maksymalnych gęstości objętościowych szkieletu gruntowego określonych dla próbek pobranych z obiektów 1–4 zalegających na głębokości 0,5 m [Filipowicz i Borys, 2006]

Obiekt	Wilgotność optymalna [%]	Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego [Mg/m <sup>3</sup> ]
1	14–15	1,852–1,935
2	14–15	1,818–1,824
3	12–13	1,867–1,923
4	15	1,850

W celu sprawdzenia wpływu czasu użytkowania odpadów powęglowych na wskaźnik zagęszczenia, Filipowicz i Borys (2006) w odkrywkach o objętości od 1,5 do 2,0 m<sup>3</sup> wykonali ręczne otwory o objętości od 2500 do 4500 cm<sup>3</sup>, w których za pomocą piasku kalibrowanego wyznaczyli wskaźniki zagęszczenia badanych odpadów. Wyniki przedstawiono na rysunku 2.4.



Rys. 2.4. Wskaźniki zagęszczenia odpadów powęglowych pobranych z obiektów 1–4, z głębokości 0,5 m dla obiektów 1, 2, 4 oraz z głębokości 0,3 m dla obiektu 3 [Filipowicz i Borys, 2006]

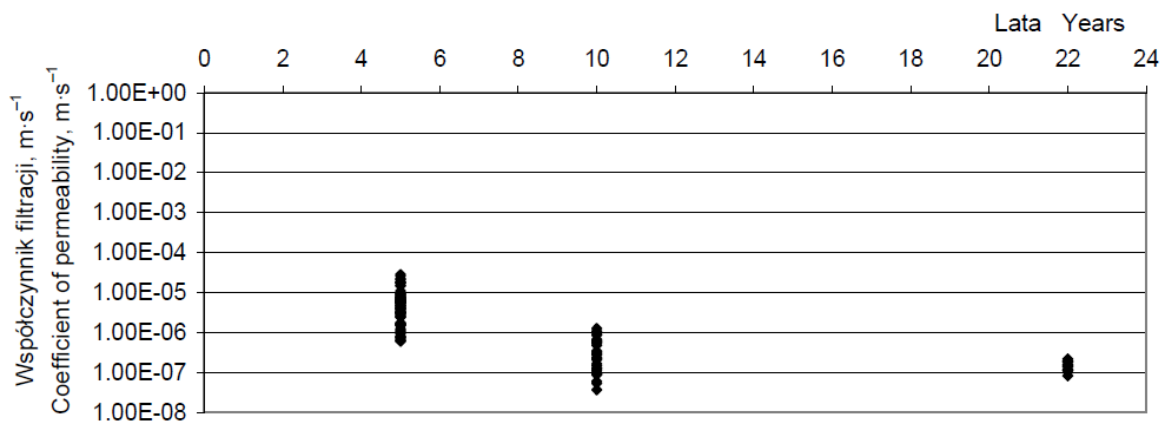
Najwyższe wartości wskaźnika zagęszczenia odnotowano dla próbek materiałów pobranych z obiektu nr 1 (5–letnia eksploatacja) oraz obiektu nr 4 (22–letnia eksploatacja). Spowodowane jest to intensywnym ruchem samochodowym prowadzonym na tych obiektach, który doprowadził do dogęszczenia płycej zabudowanych warstw odpadów. Wskaźniki zagęszczenia przekraczające wartość 1,0, świadczą o podatności odpadów powęglowych na rozpad grubych frakcji na drobniejsze pod wpływem mechanicznego zagęszczania oraz oddziaływania wody. Jednak nie udało się stwierdzić korelacji tego zjawiska w czasie.

Do badania wytrzymałości na ścinanie Filipowicz i Borys (2006) wykorzystali aparat bezpośredniego ścinania. Parametry określono na próbkach o wymiarach 120 x 120 x 60 mm. Próbki przebadano w dwóch przypadkach, tj. przy wilgotności naturalnej oraz gęstości objętościowej szkieletu gruntowego odpowiadających wartościom określonym dla materiału wbudowanego oraz przy wilgotności optymalnej i maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego określonych w aparacie Proctora zgodnie z tablicą 2.5.

Tablica 2.6. Wartości kąta tarcia wewnętrznego oraz spójności określone dla próbek z obiektów 1–4, określone w warunkach wilgotności naturalnej oraz wilgotności optymalnej [Filipowicz i Borys, 2006]

Obiekt	Przekrój	Kąt tarcia wewnętrznego [%]		Spójność [kPa]	
		$I_s = 0,76-1,12$	$I_s = 0,92$	$I_s = 0,76-1,12$	$I_s = 0,92$
1	1	39–48	33–51	14–34	18–41
	2	38–44	44–60	24–34	6–33
2	1	27–40	31–38	12–30	29–39
	2	43–46	38–50	32–31	20–51
3	1	36–39	34–41	33–34	32–62
	2	34–40	38–44	33–42	34–57
4	1	36–48	34–51	27–43	30–36

W tablicy 2.6 przedstawiono wartości kąta tarcia wewnętrznego oraz spójności, oznaczone dla próbek pobranych z obiektów 1–4 w aparacie bezpośredniego ścinania. Zgodnie z przedstawionymi wynikami można stwierdzić, że zagęszczenie próbek przy wilgotności optymalnej oraz naturalnej nie wpływa znacząco na wartości uzyskanych kątów tarcia wewnętrznego, zaś w przypadku spójności uzyskuje się wyższe wartości parametru przy wilgotności optymalnej. Wpływ czasu eksploatacji na zmianę określonych parametrów jest niewielki, jednak zauważalny trend występuje w przypadku próbek o wyższym stopniu zagęszczenia. W ich przypadku zróżnicowanie w uzyskanych parametrach jest najniższe, co prawdopodobnie jest spowodowane większą stabilnością parametrów (większą odpornością na erozję) materiału dobrze zagęszczonego [Filipowicz i Borys, 2006].



Rys. 2.5. Zmiana wartości współczynnika filtracji w czasie, określona dla warstw w których wskaźnik zagęszczenia wynosił od 0,92 do 1,12 [Filipowicz i Borys, 2006]



Na rysunku 2.5 przedstawiono zależność wartości współczynnika filtracji od czasu eksploatacji obiektu, z którego pobrano próbkę. Badanie przeprowadzono dla materiałów, których wskaźnik zagęszczenia w warstwie wynosił od 0,92 do 1,12, w kolumnach filtracyjnych, metodą zmiennego gradientu, w warunkach początkowego spadku hydraulicznego wynoszącego 2,0.

Przedstawione dane dowodzą, iż wartość współczynnika filtracji odpadów powęglowych zmienia się wraz z czasem eksploatacji obiektu wykonanego przy ich wykorzystaniu. Próbki najdłużej zabudowane uzyskały najniższe wartości współczynnika filtracji, zaś próbki najkrócej eksploatowane najwyższe. W związku z tym można stwierdzić, iż wartość współczynnika filtracji maleje wraz z czasem eksploatacji obiektu, co może prowadzić do jego doszczelnienia.

Podsumowując prace Filipowicza i Borysa (2006) można stwierdzić, że czas eksploatacji ma największy wpływ na skład granulometryczny materiału, który wraz z upływem czasu staje się coraz drobniejszy oraz na parametry ściśle z nim związane, takie jak wartość współczynnika filtracji, który wraz z rozdrobnieniem materiału z czasem staje się coraz niższy, doszczelniając konstrukcję.

Reasumując przedstawione w rozdziale 2 wyniki badań i analiz, można dojść do wniosku, iż oprócz ustalenia początkowych wartości parametrów fizyko–mechanicznych odpadów powęglowych, które już w tym momencie mogą być bardzo zróżnicowane, bardzo ważnym aspektem jest również określenie trendów zmian dla parametrów odpadów w czasie oraz pod wpływem oddziaływujących na materiał czynników erozyjnych, takich jak mechaniczne rozdrabnianie w czasie zabudowy oraz działanie wody i mrozu. Jest to spowodowane tym, iż w czasie eksploatacji obiektu wykonanego przy zastosowaniu odpadów powęglowych, parametry fizyko–mechaniczne materiałów mogą ulec pogorszeniu, przez co cały obiekt może stracić właściwości użytkowe, co może zmniejszyć jego bezpieczeństwo oraz ergonomię użytkowania, np. w wyniku powstawania pofałdowań korony obiektu przy uzyskaniu przez odpady powęglowe cech wysadzinowych. Odpowiednie rozpoznanie cech fizyko–mechanicznych odpadów powęglowych, uwzględniające zmienność tych cech w czasie, pozwoli na zastosowanie odpowiednich technologii ochronnych, które będą przeciwdziałać postępowaniu zmian w czasie, np. poprzez zabezpieczenie odpadów przez przenikaniem wód gruntowych i opadowych lub poprzez zabudowanie odpadów poniżej strefy przemarzania.

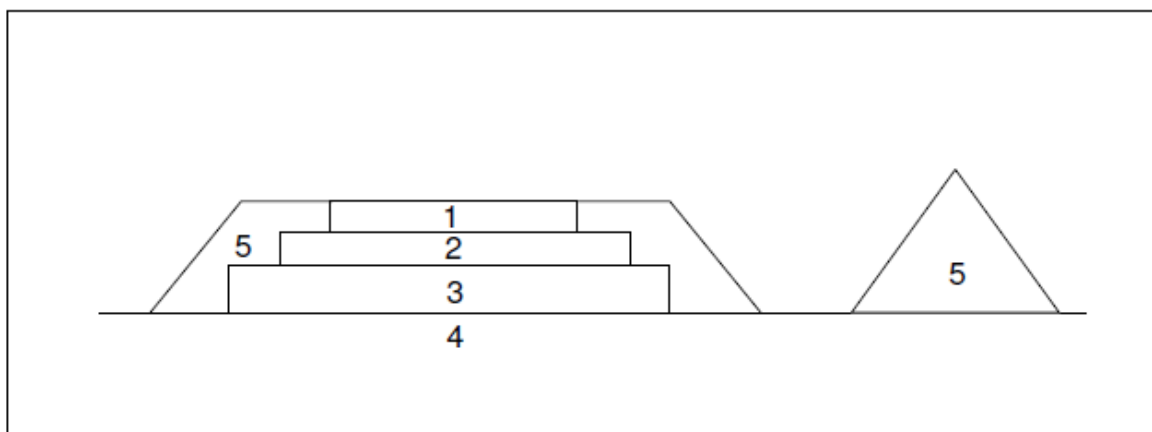
### 2.2.3 Zastosowania odpadów powęglowych

Odpady powęglowe, pomimo swoich zróżnicowanych jakościowo właściwości fizyko–mechanicznych, znajdują swoje zastosowanie głównie w budownictwie. Historycznie najczęściej wybieranym sposobem radzenia sobie z odpadami górnictwem na terenie Zagłębia Górnośląskiego, było ich składowanie na hałdach. Powstawały one na ogół w pobliżu aktywnych kopalni, jako hałdy górnicze pod postacią nieregularnych stożkowatych budowli ziemnych, poprzez zsypywanie zbędnego urobku z wagonów kolejowych. Jedną z najstarszych i największych hałd górniczych w Europie była hałda „Skalny” koło kopalni „Bolesław Śmiały” w Łaziskach Górnych. Hałda Skalny ma około 220 lat, a w czasie, gdy była największa, miała



92,0 m wysokości, pokrywała obszar 30 ha oraz gromadziła w sobie około 17 000 000 Mg odpadów [Pieczyrak, 2010]. Aktualnie ciągle w znacznej części Śląska można obserwować hałdy górnicze, jednak pod koniec XX wieku, została podjęta decyzja o stopniowej rozbiórce hałd górniczych oraz rekultywacji terenów przez nie zajętych. Decyzja ta była spowodowana narastającymi problemami związanymi z utrzymaniem hałd górniczych, tj. zanieczyszczeniem środowiska wynikającym ze znacznego zapylenia obszarów w okolicy hałd górniczych, możliwym zanieczyszczeniem wód gruntowych poprzez wypłukiwanie związków chemicznych zawartych w odpadach górniczych oraz możliwością samozapłonu [Zheng–fu i in. 2009; Gawor, 2013, 2014, 2016]. Do samozapłonu hałdy górniczej dochodzi w efekcie wytworzenia się wysokiego ciśnienia w jej wnętrzu (spowodowanego naporem wyższych warstw hałdy) oraz przy dostępie tlenu do jej wnętrza. W takich warunkach oraz przy obecności pirytu szczątkowe pozostałości węgla z odpadów górniczych ulegają samozapłonowi doprowadzając do podpalenia wnętrza hałdy górniczej. Proces płonienia hałdy górniczej jest stosunkowo trudny do ugaszenia oraz może trwać bardzo długo, nawet od kilku do kilkunastu lat, powodując dodatkowe zagrożenie dla środowiska poprzez emisję dymów oraz pyłów ze spalania [Łączny i in., 2011].

W budownictwie drogowym według IBDiM [2004] odpady powęglowe mogą znaleźć swoje zastosowanie szczególnie w konstrukcji nasypów, jednak pod warunkiem dobrego ich wykorzystania (tablica 2.7). Odpady sklasyfikowane jako „miękkie” (łupek surowy nieprzpalony lub słabo przpalony) mogą być wykorzystywane do konstrukcji nasypów poniżej strefy przemarzania oraz powyżej występowania zwierciadła wody gruntowej, ze względu na swoją podatność na degradację uziarnienia pod wpływem wody i mrozu. Odpady sklasyfikowane jako „twarde”, tj. odpady powęglowe zawierające twarde skały lub dobrze przpalony lupek, mogą być zastosowane do warstw wzmacniających podłoże gruntowe lub dolnych nośnych warstw konstrukcyjnych nawierzchni.



Rys. 2.6. Schemat konstrukcji drogowej. 1 – warstwa ścierna; 2 – warstwa wiążąca; 3 – podbudowa; 4 – podłoże (w tym podłoże ulepszone); 5 – skarpy, nasypy, niwelacja terenu [IBDiM, 2004]

Tablica 2.7. Zastosowanie odpadów powęglowych „miękkich” i „twardych” w poszczególnych warstwach konstrukcji nawierzchni drogowej [IBDiM, 2004]

Rodzaj warstwy drogowej	Możliwe wykorzystanie odpadów pogórnich	
	„twarde”	„miękkie”
Warstwa ścieralna	–	–
Warstwa wiążąca	–	–
Podbudowa	+	–
Podłoże (w tym podłoże ulepszone)	+	–
Skarpy, nasypy, niwelacja terenu	+	+

W ogólnym kontekście wykorzystania odpadów powęglowych, największa ilość tych materiałów jest wykorzystywana w celu makroniwelacji terenu zdegradowanego przez człowieka, na przykład jako wypełnienie obszarów po wycofanych z użytku kopalniach odkrywkowych.



Rys. 2.7. Makroniwelacja terenu starej kopalni odkrywkowej piasku przez Haldex Sosnowiec

[Źródło: <https://ctl.pl/ctl/ctl-haldex/>]

Mogą być wykorzystane wszystkie typy odpadów powęglowych, ze względu na nieistotne w tym przypadku zachodzące w nich zmiany erozyjne. Dla robót polegających na niwelacji terenu wymagania techniczne dotyczące konstruowanych warstw są niewielkie, a procesy erozyjne zachodzące w odpadach powęglowych działają w tym przypadku korzystnie, ponieważ z czasem uzyskuje się „naturalnie” zerodowane podłoże gruntowe o stabilnych parametrach [IBDiM, 2004; Galos i Szlugaj, 2014].

Odpady powęglowe, ze względu na swoją podatność na degradację uziarnienia pod wpływem wody, są często wykorzystywane do budowy budowli hydrotechnicznych (wały przeciwpowodziowe, zapory piętrzące wodę) lub składowisk odpadów. Dla tych budowli (o ile w przypadku wałów po ich powierzchni nie jest prowadzony ciąg komunikacyjny drogowy lub kolejowy), nie stawia się ich górnym częściom wysokich wymagań technicznych dotyczących

nośności warstwy, w związku z tym niskie parametry fizyko–mechaniczne odpadów powęglowych nie stanowią tu problemu. W budowlach tych wykorzystuje się naturalną tendencję odpadów powęglowych do degradacji uziarnienia pod wpływem wody, w wyniku której odpady zabudowane w tego typu konstrukcji doszczelniają, wraz z upływem czasu, skonstruowaną z nich warstwę, poprawiając w ten sposób własności użytkowe danego obiektu [Skarżyńska, 1997].

Materiał ten jest również wykorzystywany do wypełniania podziemnych wyrobisk górniczych. W ten sposób rocznie zużywa się około 3 000 000 Mg odpadów. Jest to jeden z najatrakcyjniejszych ekonomicznie oraz technologicznie sposobów wykorzystania odpadów, ponieważ pozwala kopalni na użycie własnych odpadów przy zerowym koszcie transportu do wypełniania nieaktywnych już wyrobisk. Wykorzystuje się je w technologii suchej pneumatycznej podsadzki lub podsadzki hydraulicznej, w której zastępuje się odpadami górnymi piasek kwarcowy lub odpady elektrowniane [Galos i Szlugaj, 2014].

Pod względem materiałowym odpady powęglowe mogą znaleźć zastosowanie jako surowce w produkcji:

- Kruszyw
- Cementów
- Drobnogabarytowych elementów murowych
- Odzyskiwania węgla
- Niskokalorycznych paliw elektrownianych

W przypadku produkcji kruszyw mamy do czynienia z dwoma ich rodzajami:

- Łupkiem przywęglowym nieprzepalonym odwęglonym
- Łupkiem przywęglowym przepalonym

Łupek przywęglowy nieprzepalony odwęglony powstaje w wyniku procesu odwęglania odpadów powęglowych. Proces ten w głównej mierze ma na celu odzyskanie z odpadów powęglowych jak największej ilości węgla. Jako drugi produkt uzyskuje się odpad powęglowy o znacznie mniejszej zawartości węgla oraz, w związku z tym, wyższymi parametrami fizyko–mechanicznymi (rozdział 2.2.2). Proces produkcyjny składa się z 5 etapów [Galos i Szlugaj, 2014]:

- Przygotowanie surowca (odpad powęglowy o uziarnieniu 0–200 mm)
- Początkowa segregacja według uziarnienia na frakcje <80 mm; >80 mm (z dodatkowym rozdrabnianiem grubych frakcji)
- Drugi etap segregacji według uziarnienia na ekranach wibracyjnych na frakcje <45 mm; > 45 mm (z dodatkowym rozdrabnianiem grubych frakcji)
- Segregacja w hydrocyklonach z wykorzystaniem ciężkiego medium, z płukaniem i osuszaniem, uzyskuje się węgiel o uziarnieniu 0–20 mm oraz 20–45 mm.
- Zagęszczanie i segregacja odpadów z hydrocyklonów, gdzie uzyskuje się 0–3 mm odpad flotacyjny oraz kruszywo o uziarnieniu 3–45 mm

Uzyskane w powyższy sposób kruszywo o uziarnieniu 3–45 mm jest wykorzystywane do rekultywacji terenów zniszczonych przez człowieka, konstrukcji składowisk, wypełniania podziemnych wyrobisk oraz w konstrukcji drogowej. Jednak w tym przypadku kruszywo powinno być ulepszone dodatkiem cementu lub innego spoiwa hydraulicznego, ze względu na swoją niską mrozoodporność [Galos i Szlugaj, 2014].

Łupek przywęglowy przepalony (czerwony) powstaje w wyniku poddania łupka nieprzepracowanego obróbce termicznej w wysokich temperaturach. W wyniku tego procesu węgiel zawarty w kruszywie ulega wypaleniu, a samo kruszywo nabiera nowych właściwości w stosunku do materiału wyjściowego:

- Czerwony kolor
- Znaczaco wyższą sztywność ziaren kruszywa
- Zwiększoną odporność na działanie wody
- Zwiększoną odporność na działanie mrozu
- Wyższy wskaźnik nośności

Łupek przywęglowy przepalony może powstawać w sposób „autonomiczny” poprzez samozapłon hałdy górniczej. Do 1990 roku łupek czerwony był produkowany w Przedsiębiorstwie Produkcji Kruszyw Mineralnych i Lekkich w Siemianowicach Śląskich. Produkcja została jednak wstrzymana ze względów ekonomicznych oraz ekologicznych. Produkcja tego typu kruszywa okazała się nieopłacalna ze względu na wysokie zapotrzebowanie na energię oraz powodowała problemy z bardzo dużą emisją pyłów i gazów.

Łupek przywęglowy przepalony jest wykorzystywany głównie przy budowie konstrukcji dróg wewnętrznych, magazynów fabryk oraz parkingów. W przypadku konstrukcji dróg głównych materiał jest rzadziej wykorzystywany ze względu na wyższą niż w przypadku innych kruszyw wykorzystywanych w drogownictwie, nasiąkliwość [Pieczyrak, 2010; Galos i Szlugaj, 2014].

Odpady powęglowe, szczególnie drobnoziarniste uzyskane w procesie odwęglania, charakteryzują się kalorycznością w granicach 1200 do 4500 kJ/kg, w zależności od swojego składu oraz pochodzenia. Stosunkowo wysoka jak na odpad kaloryczność pozwala na wykorzystanie go do produkcji drobnogabarytowych elementów murowych, 20–30% dodatek odpadów powęglowych w mieszance pozwala na zmniejszenie plastyczności oraz wrażliwości na wysychanie elementów murowych. Dodatkowo, ze względu na swoją kaloryczność, odpady te pozwalają na zmniejszenie zapotrzebowania na energię termiczną w procesie wypalania cegieł [Galos i Szlugaj, 2014; Xu, 2016].

Ze względu na wyżej wymienioną kaloryczność drobnoziarnistych odpadów powęglowych, są one również używane przy produkcji cementów. Rocznie około 150000–200000 Mg odpadów jest wykorzystywanych przy produkcji cementów, jako materiał bogaty w krzem oraz glin, jak również zmniejszający zapotrzebowanie na energię termiczną w procesie wypalania klinkieru [Galos i Szlugaj, 2014].

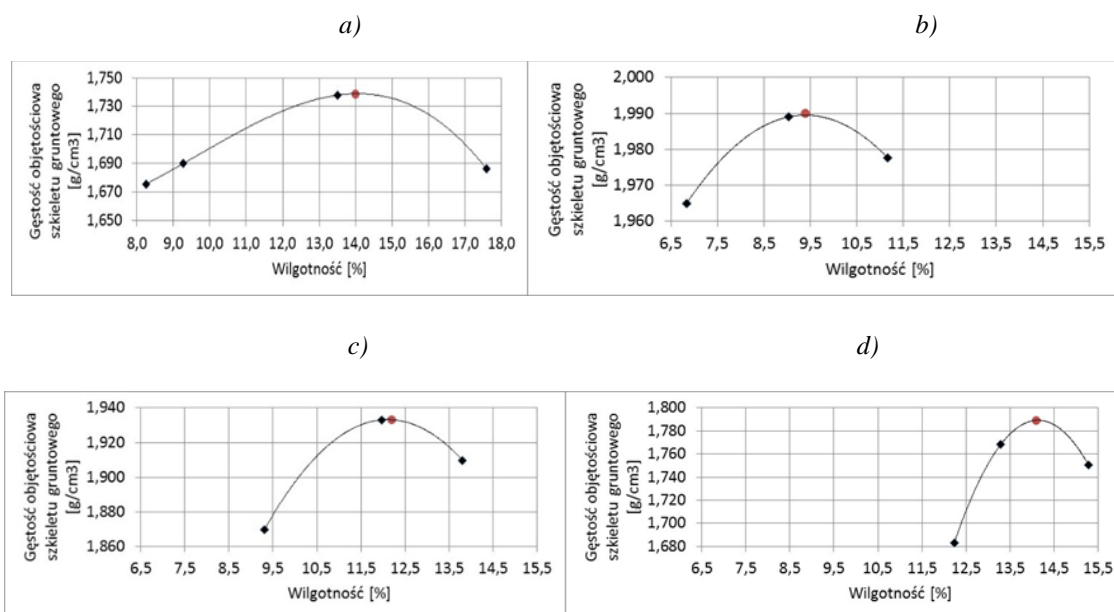
Kolejnym sposobem wykorzystania odpadów powęglowych jest odzyskiwanie z nich węgla oraz produkcja niskokalorycznych paliw dla elektrowni. W zależności od rodzaju odpadu powęglowego może on zawierać od 10 do 15% węgla. W procesie odzyskiwania węgla z odpadów powęglowych uzyskuje się węgiel energetyczny o kaloryczności 22–23 MJ/kg, zawartości popiołu 18–20%, zawartości siarki 0,7–0,8% oraz wilgotności 8–12%. Niskokaloryczne paliwo elektrowniane powstaje z mułu poflotacyjnego z płuczki węglowej. Muł ten jest mieszany oraz granulowany w celu poprawienia jego właściwości, to znaczy zmniejszenia wilgotności oraz poprawienia kaloryczności paliwa. W celu zmniejszenia emisji zanieczyszczeń przy produkcji tego materiału, instalacja służąca do produkcji umieszczana jest na składowiskach mułu poflotacyjnego. Średnia kaloryczność uzyskanych paliw oscyluje od 10 do 12 MJ/kg [Galos i Szlugaj, 2014].

#### 2.2.4 Doświadczenia z zastosowań mieszanek związanych spoiwem

W pracy Ciołczyka i Walotka [2018] zostały przedstawione wyniki badań parametrów wytrzymałościowych łupków przywęglowych nieprzepalonych ulepszonych popiołem fluidalnym. Autorzy w swoich badaniach wykorzystali łupki przywęglowe nieprzepalone o uziarnieniu 0/31,5 mm pochodzące z PG Silesia oraz popioły lotne z kotłów fluidalnych pochodzące z elektrowni Łagisza.

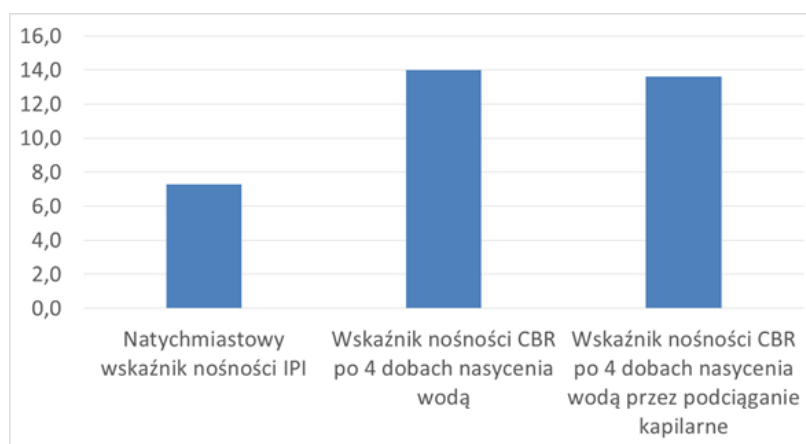
W swoich badaniach autorzy skupili się na wpływie zróżnicowanego dodatku popiołu fluidalnego na wartości natychmiastowego wskaźnika nośności IPI, kalifornijskiego wskaźnika nośności CBR, mrozoodporności oraz wilgotności optymalnej. W tym celu przeprowadzono badania na próbkach składających się z łupka przywęglowego nieprzepalonego oraz z łupka przywęglowego nieprzepalonego z 5, 15 i 25% dodatkiem popiołu fluidalnego.

Badając wpływ wielkości dodatku popiołu fluidalnego na wartość wilgotności optymalnej (Rys. 2.8), autorzy stwierdzili, iż sam dodatek popiołu fluidalnego (5%) wstępnie zmniejsza wilgotność optymalną badanej mieszanki, jednocześnie zwiększając gęstość objętościową suchego szkieletu gruntowego. Jednak wraz ze wzrostem dodatku popiołu fluidalnego (15%, 25%) wartość wilgotności optymalnej zaczyna się zwiększać, zaś gęstość objętościowa suchego szkieletu gruntowego zmniejsza się.



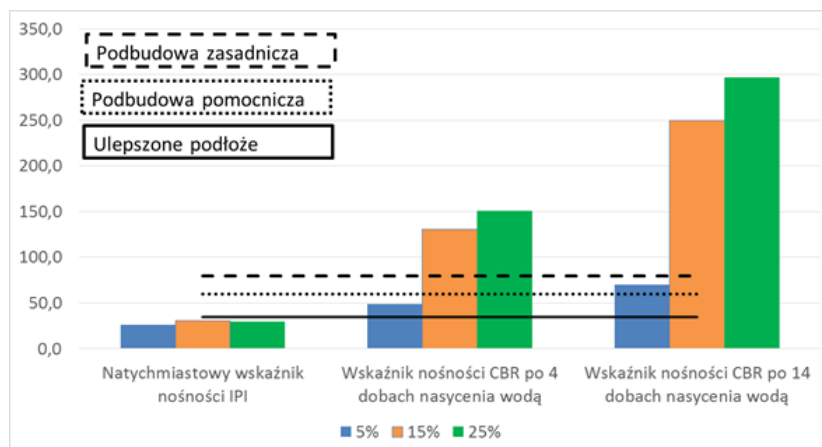
Rys. 2.8. Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego oraz wilgotność optymalna dla a) łupka przywęglowego nieprzpalonego; b) łupka przywęglowego nieprzpalonego z dodatkiem 5% popiołu fluidalnego; c) 15% dodatku popiołu fluidalnego; d) 25% dodatku popiołu fluidalnego [Ciołczyk i Walotek, 2018]

Autorzy przeprowadzili badania IPI oraz CBR na próbkach przygotowanych z łupka przywęglowego nieprzpalonego oraz dla materiału ze zróżnicowanym dodatkiem popiołu fluidalnego. Dodatkowo, przeprowadzili również badanie CBR po 7 cyklach zamrażania i odmrażania próbki (-23°C/+18°C). Wyniki badań przedstawiono na Rys. 2.9 i 2.10.

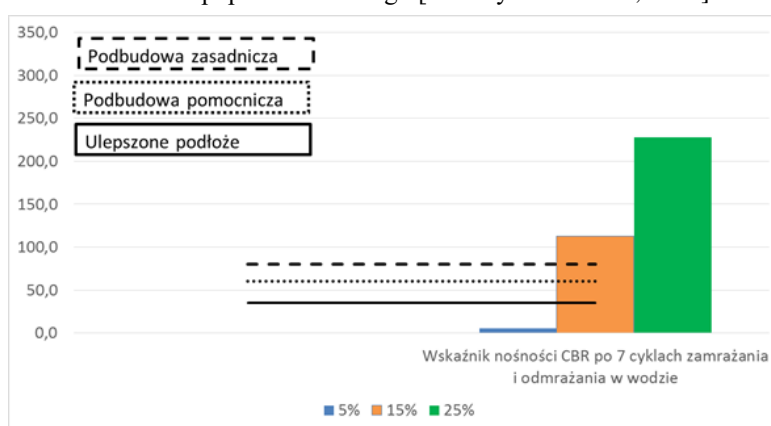


Rys. 2.9. Wskaźniki nośności łupka przywęglowego nieprzpalonego [Ciołczyk i Walotek, 2018]





Rys. 2.10. Wskaźniki nośności mieszanki łupka przywęglowego nieprzepalonego z 5, 15 i 25% dodatkiem popiołu fluidalnego [Ciołczyk i Walotek, 2018]



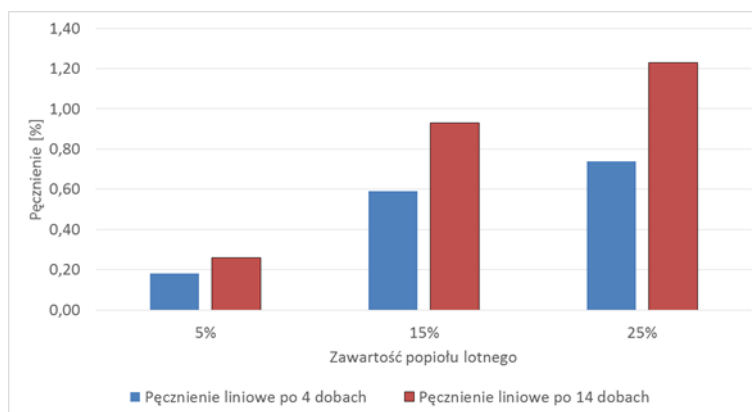
Rys. 2.11. Wskaźnik nośności mieszanki łupka przywęglowego nieprzepalonego z 5, 15 i 25% dodatkiem popiołu fluidalnego po 7 cyklach zamrażania i odmrażania w wodzie [Ciołczyk i Walotek, 2018]

Według Ciołczyka i Walotka [2018] dodatek popiołu fluidalnego powoduje prawie dwukrotne zwiększenie wartości natychmiastowego wskaźnika nośności IPI (Rys. 2.9÷2.10) względem samego łupka przywęglowego nieprzepalonego, jednak samo zróżnicowanie zawartości dodatku nie ma tu ewidentnego wpływu na wartość parametru. Autorzy tłumaczą to ulepszeniem uziarnienia mieszanki poprzez dodanie popiołu fluidalnego, co poprawia klinowanie się i układanie ziaren mieszanki. W przypadku badań CBR (Rys. 2.9÷2.10) przeprowadzonych po 4 i 14 dobach nasycenia wodą, autorzy stwierdzili znaczący wpływ dodatku popiołu fluidalnego na zwiększenie się wartości wskaźnika nośności względem łupka przywęglowego nieprzepalonego (w skrajnym przypadku prawie 20-krotny wzrost) oraz zależność pomiędzy wielkością dodatku a uzyskaną nośnością. Nośność CBR rośnie wraz z zawartością zastosowanego dodatku popiołu fluidalnego. Podobny trend ujawniają badania mrozoodporności (Rys. 2.11). Autorzy wskazują w tym przypadku na wpływ dodatku popiołu fluidalnego na mrozoodporność badanej mieszanki, która rośnie wraz ze zwiększeniem zawartości dodatku.

Ostatnim już badanym parametrem przedstawionym w cytowanej pracy [Ciołczyk i Walotek, 2018] jest pęcznienie liniowe. Na Rys. 2.12 przedstawiono wyniki badań wpływu



zawartości dodatku popiołu fluidalnego na pęcznienie liniowe po 4 i 14 dobach pielęgnacji próbek.



Rys. 2.12. Wpływ zawartości dodatku popiołu fluidalnego na pęcznienie liniowe [Ciołczyk i Walotek, 2018]

Badane próbki wykazują skłonność do pęcznienia w otoczeniu wody. Jednak jak wskazują autorzy, sama wartość pęcznienia liniowego jest ściśle związana z wielkością dodatku popiołu fluidalnego. Pęcznienie liniowe zwiększa się wraz ze zwiększaniem się dodatku popiołu fluidalnego.

Podsumowując badania przeprowadzone przez Ciołczyka i Walotka [2018] można stwierdzić, że parametry wytrzymałościowe łupków przywęglowych nieprzepalonych mogą zostać w znaczącym stopniu poprawione poprzez zastosowanie dodatków wykazujących właściwości puculanowe, takich jak popioły fluidalne. Pozwalają one także na spełnienie warunków mrozoodporności materiału oraz na jego ewentualne osuszenie i poprawę zagęszczalności przy niższych wilgotnościach. Należy jednak uważać i zwracać uwagę na pojawiające się pęcznienie liniowe, które niestety jest charakterystyczną cechą obu zastosowanych materiałów.

## 2.3 Popioły lotne

### 2.3.1 Charakterystyka i pochodzenia

W Polsce ciągle największa część produkowanej energii elektrycznej powstaje w wyniku spalania węgla kamiennego lub brunatnego w elektrowniach ciepłych (tablica 2.8) [PSE.pl]. Spalanie węgla kamiennego i brunatnego w elektrowniach ciepłych odbywa się w bezrusztowych piecach pyłowych lub w technologii spalania fluidalnego. W wyniku spalania węgla w bezrusztowych piecach pyłowych, oprócz energii elektrycznej (powstałej w wyniku przemiany energii cieplnej), powstają produkty uboczne pod postacią popiołów lotnych oraz żużli. Oba odpady należą do grupy elektrownianych odpadów konwencjonalnych. Przy okazji spalania węgla w technologii fluidalnej, jako produkt uboczny, otrzymuje się popioły lotne i denne z kotłów fluidalnych. Popioły z kotłów fluidalnych, jak i odpady uzyskane w wyniku odsiarczania spalin (metodami: suchą, półsuchą i moką), należą do grupy niekonwencjonalnych odpadów elektrownianych [IBDiM, 2004].

Tablica 2.8. Struktura produkcji energii elektrycznej w Polsce stan na grudzień 2020 [PSE.pl]

Rodzaj elektrowni	Udział produkcji energii elektrycznej na rynku polskim [%]
Elektrownie na węglu kamiennym	48,43
Elektrownie na węglu brunatnym	20,83
Elektrownie gazowe	10,31
Elektrownie inne odnawialne	1,06
Elektrownie wiatrowe	11,27
Elektrownie przemysłowe	6,38
Elektrownie zawodowe wodne	1,72

Wszystkie wymienione powyżej materiały należą do grupy odpadów określanych mianem Ubocznych Produktów Spalania (UPS). Ze względu na dużą roczną produkcję tych odpadów oraz ich właściwości, np. pucolanowe, materiały te zostały sklasyfikowane oraz rozdzielone na poszczególne produkty o określonych właściwościach. Wyróżnia się następujące materiały pochodzące z UPS [IBDiM, 2004; Gawlicki i Małolepszy, 2013]:

- Popiół lotny – jest to popiół uzyskiwany ze spalin powstałych w wyniku spalania węgla w bezrusztowych paleniskach pyłowych lub fluidalnych. Popiół ten jest wychwytywany za pomocą elektrofiltrów lub innych urządzeń odpylających. Składa się on w głównej mierze z ziaren nieprzekraczających 0,1 mm, zbudowanych z nadtopionych do fazy szklistej (amorficznej) składników mineralnych. Popiół ten charakteryzuje się szarym zabarwieniem, niską masą oraz dużą suchością
- Żużle – najgrubsze frakcje popiołowe, ze względu na większe uziarnienie nie są wynoszone ze spalinami i na ogół są one odprowadzane z kotłów na mokro
- Produkty odsiarczania spalin – substancje stałe, uzyskane w wyniku przereagowania tlenków siarki z materiałem je absorbującym (sorbentem). Najczęściej stosowanymi sorbentami są związki wapnia, wapień lub wapno, dlatego też w wyniku odsiarczania spalin uzyskuje się produkt składający się w głównej mierze z siarczanu wapniowego (gipsu) oraz nieprzereagowanych cząstek sorbentu
- Popiół zawierający produkty odsiarczania spalin metodą suchą – w tym przypadku odsiarczanie spalin odbywa się już na etapie spalania paliwa. Sorbent (pod postacią kamienia wapiennego lub wapna) jest w tym przypadku podawany bezpośrednio na taśmociąg podający węgiel, do zasobników węgla lub za pomocą dysz do komory spalania. Uzyskane w ten sposób produkty odsiarczania spalin są wychwytywane razem z popiołem lotnym przez urządzenia odpylające. W efekcie tego procesu uzyskuje się popiół lotny zawierający produkty odsiarczania, głównie siarczan wapnia  $\text{CaSO}_4$  (pod postacią anhydrytu) oraz nieprzereagowany sorbent, głównie wapno palone ( $\text{CaO}$ ). Popiół lotny powstały w ten sposób różni się od klasycznego popiołu lotnego wyższą aktywnością

chemiczną, która wyróżnia się jako wiązanie i twardnienie materiału po zarobieniu go z wodą

- Popiół zawierający produkty odsiarczania metodą półsuchą – popiół ten powstaje w sposób podobny do zaprezentowanego powyżej, jednak w tym przypadku do komory spalania oprócz sorbentów podaje się dodatkową fazę ciekłą pod postacią wody lub wodorotlenku wapniowego (wodorotlenek wapniowy podnosi efektywność odsiarczania w porównaniu do wody). Ilość fazy ciekłej jest tak dobierana, aby uzyskać produkt odsiarczania w postaci suchej. W tej metodzie odsiarczania uzyskuje się wyższą skuteczność odsiarczania, na poziomie 70–80% oraz wykorzystuje się mniejsze ilości sorbentu. Popioły uzyskane w tej metodzie charakteryzują się mniejszą aktywnością chemiczną niż w przypadku metody suchej, co objawia się mniejszą twardością produktu po zarobieniu go z wodą
- Popiół pochodzący ze spalania w złożu fluidalnym – w tym przypadku spalanie paliwa odbywa się w warstwie fluidalnej z dodatkiem sorbentu o odpowiednim uziarnieniu. Metoda ta pozwala na spalanie węgla gorszego jakościowo. Popioły uzyskane w tej technologii charakteryzują się większymi wahaniami składu chemicznego oraz brakiem fazy szklistej (amorficznej). Aktywność chemiczna popiołu fluidalnego jest porównywalna z aktywnością popiołów zawierających produkty odsiarczania metodą suchą

### 2.3.2 Właściwości

Spośród przedstawionych powyżej Ubocznych Produktów Spalania, najważniejszym z nich, pod względem tematyki prezentowanej pracy, jest konwencjonalny popiół lotny. Popioły te powstają w wyniku spalania pyłu węglowego w bezrusztowych komorach paleniskowych. Pył węglowy spalany w komorze podawany jest do niej za pomocą palników pyłowych. Częsteczki popiołu powstałego w wyniku spalania pyłu węglowego unoszone są wraz z gazami spalinowymi. Spaliny transportowane są do kanału drugiego ciągu, gdzie po zmianie kierunku przenoszone są do urządzeń odpylających. W trakcie zmiany ich kierunku ze spalin wytrącają się cięższe cząsteczki popiołów. W urządzeniach odpylających i/lub elektrofiltrach zbierane są zaś drobniejsze cząstki popiołu. Częsteczki pyłu węglowego, które wypadły z głównego strumienia spalin opadają na dno komory paleniskowej tworząc żużel. W celu odprowadzenia UPS, są one transportowane rurociągami pod postacią pulpy wodnej. Trafiają na składowiska, gdzie są wytrącane tworząc mieszaniny popiołowo żużłowe [IBDiM, 2004].

Według normy PN-S-96035:1997 rozróżnia się następujące rodzaje popiołów lotnych pod kątem zastosowanych surowców wyjściowych:

- PB – popioły lotne powstałe w wyniku spalania węgla brunatnego
- PK – popioły lotne powstałe w wyniku spalania węgla kamiennego

oraz następujące rodzaje popiołów w zależności od ich zastosowania:

- a – stosowane jako dodatek hydrauliczny do innych materiałów wiążących

- b – stosowane jako środek doziarniający w gruntach sypkich
- c – stosowane jako samodzielne spoiwo hydrauliczne, przy stabilizacji gruntów spoiwystych lub do zmiany wskaźnika odczynu gruntu (pH)

Popioły lotne ze względu na swoje pochodzenie mogą różnić się pod względem składu chemicznego, który będzie miał wpływ na ich końcowe właściwości fizyko – mechaniczne. W tabelicy 2.9 przedstawiono klasyfikację popiołów lotnych pod względem ich składu chemicznego.

Tablica 2.9. Podział popiołów lotnych ze względu na skład chemiczny [IBDiM, 2004]

Występujące związki chemiczne	Klasyfikacja popiołów lotnych		
	wg ONZ i OSŻD i Bastiana	wg Instrukcji ITB	wg PN-S-96035: 1997
	Zawartość składników		
	Grupa I glinowo-krzemianowa	Grupa I glinowo-krzemianowa	PKa i PKb
SiO <sub>2</sub>	-	ponad 40%	powyżej 40%
CaO	poniżej 15%	-	-
SO <sub>3</sub>	-	-	-
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	od 2%	-	poniżej 2% (1,5%)
	Grupa II krzemianowo - glinowe	Grupa II krzemianowo - glinowe	PBa i PBb
SiO <sub>2</sub>	-	-	powyżej 25%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	ponad 25%	poniżej 30%
CaO	poniżej 15%	-	powyżej 3%
SO <sub>3</sub>	-	-	poniżej 2%
SiO <sub>3</sub>	poniżej 3%	-	-
SiO <sub>3</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	poniżej 2%	-	-
	Grupa III siarczanowo-wapniowe	Grupa III siarczanowo-wapniowe	PBc
SiO <sub>2</sub>	-	-	powyżej 25%
CaO	powyżej 15%	ponad 25%	powyżej 15%
wolny CaO	-	-	powyżej 7%
SO <sub>3</sub>	powyżej 3%	-	do 3%
	Grupa IV	-	-
CaO	powyżej 15%	-	-
SO <sub>3</sub>	poniżej 3%	-	-

Następnym kryterium wpływającym na podział popiołów lotnych jest ich uziarnienie. W tabelicy 2.10 przedstawiono podział popiołów lotnych pod względem składu granulometrycznego.

Tabela 2.10. Uziarnienie popiołów lotnych [IBDiM, 2004]

Sito o oczku kwadratowym [mm]	Przechodzi przez sito [%]	
	BPb i PKb	PBa, PBc i PKa
0,5	100	100
0,25	≥95	≥97
0,1	≥80	≥90
0,075	≥75	≥85

Ostatnim już kryterium decydującym o podziale popiołów lotnych jest zawartość wolnego CaO. Wolne CaO wchodzące w skład popiołów będzie decydowało o ich aktywności, tj. zdolności do samodzielnego wiązania w efekcie zachodzących reakcji pucolanowych. W tabelicy 2.11 przedstawiono podział popiołów lotnych ze względu na ich aktywność (zawartość wolnego CaO).

Tabela 2.11. Podział popiołów lotnych ze względu na ich aktywność [IBDiM, 2004]

Aktywność	Zawartość CaO [%]
Nieaktywne lub bardzo mało aktywne	< 3,5
Mało aktywne	3,5 – 7,0
Aktywne	7,0 – 14,0
Bardzo aktywne	> 14,0

Przedstawiona klasyfikacja konwencjonalnych popiołów lotnych pochodząca z normy PN-S-96035:1997 oraz pokrewnych opracowań dotyczy tylko i wyłącznie klasyfikacji popiołów przy ich wykorzystaniu w budownictwie drogowym lub geotechnice.

Zastosowanie popiołów lotnych wychodzi jednak poza samo drogownictwo oraz geotechnikę. Są one wykorzystywane w dużym stopniu przy produkcji betonów. W przypadku technologii betonów, ze względu na odmienną charakterystykę wykorzystania popiołów, stawiane im są inne oraz bardziej sprecyzowane wymagania. Pod względem składu chemicznego w przypadku wykorzystania popiołów lotnych w technologii betonu najistotniejszymi parametrami są straty prażenia (zawartość węglowych części organicznych nieprzepalonych w procesie uzyskiwania popiołu lotnego) oraz zawartość CaO w formie wolnej oraz reaktywnej. Wpływają one na podstawową klasyfikację popiołów lotnych do celów użytkowych. Kolejnym kryterium zastosowania popiołów lotnych do betonów są ich właściwości fizyczne. W przypadku właściwości fizycznych najistotniejszymi parametrami są mialkość oraz wskaźnik aktywności pucolanowej. Mialkość jest wskaźnikiem mówiącym o uziarnieniu popiołu, jednak w przeciwieństwie do wymagań dotyczących wykorzystania

popiołów w drogownictwie lub geotechnice, w tym przypadku, kryterium przydatności stanowi udział cząsteczek mniejszych niż 0,045 mm. Wskaźnik aktywności pucolanowej świadczy o zdolności do samodzielnego wytwarzania wiązań hydraulicznych przez cement [Giergiczny, 2009].

Popioły lotne powstałe w wyniku spalania węgla kamiennego, brunatnego czy też odpadów komunalnych mogą różnić się składem chemicznym, a przez to właściwościami fizycznymi. W szczególności dotyczy to popiołów uzyskiwanych w wyniku spalania odpadów komunalnych, gdzie mogą wystąpić największe rozbieżności składów chemicznych, ze względu na duże zróżnicowanie materiału wkładowego [Nakano i in. 2007; Giergiczny, 2009].

W dalszej kolejności o zastosowaniach popiołów lotnych decydować będzie ich uziarnienie, które będzie miało znaczący wpływ na skuteczność zastosowania popiołów lotnych jako środka poprawiającego urabialność mieszanek betonowych lub doziarniającego w przypadku stabilizacji gruntu w drogownictwie. Ostatnim już parametrem o największym wpływie na zastosowanie popiołów lotnych jest aktywność pucolanowa. Decyduje o rodzaju zastosowania popiołu. Popioły wykazujące niewielką aktywność pucolanową, mogą zostać wykorzystane jako doziarnienie gruntu lub też środek wpływający na konsystencję czy też urabialność mieszanki betonowej. Popioły o dużej aktywności pucolanowej mogą być wykorzystane jako zamiennik cementu, spoiwo alternatywne lub środek wpływający na jakość procesów hydratacji w betonach [Garbacik i Baran, 2008; Giergiczny, 2009; Jackiewicz – Rek, 2010; Śliwiński i in., 2013; Kumar i in., 2014; Łukowski, 2015; Ostrowski, 2015].

### 2.3.3 Zastosowania popiołów lotnych

Popioły lotne krzemionkowe są wykorzystywane przy produkcji cementów budowlanych. Według normy PN-EN 197-1:2012 dopuszcza się produkcję 4 rodzajów cementów, w których popiół lotny występuje jako jeden z głównych składników. W pozostałych przypadkach popiół może być traktowany jako dodatek drugorzędny, którego zawartość nie przekracza 5% [Galos i Uliasz-Bocheńczyk, 2005; Giergiczny i Gawlicki, 2008].

Zastosowanie popiołu lotnego do produkcji cementu wpływa w znacznym stopniu na przebieg reakcji wiązania cementu oraz jego odporność na działanie siarczanów. Wpływ popiołu lotnego na wiązanie cementu odznacza się wydłużeniem czasu jego wiązania w warunkach niskich temperatur oraz skróceniem czasu jego wiązania w przypadku wystawienia na oddziaływanie wysokich temperatur. Dodatki popiołów lotnych do cementu wpływają również na przyrost wytrzymałości w czasie. Cementy popiołowe charakteryzują się wolniejszym przyrostem wytrzymałości we wczesnych etapach wiązania. Jest to związane ze spowolnieniem szybkości reakcji pucolanowej. Jednak w dłuższych okresach dojrzewania cementy popiołowe uzyskują wytrzymałości równe lub większe niż cementy CEM I o tej samej klasie wytrzymałościowej. Dodatek popiołu lotnego, poza zmniejszeniem prędkości przyrostu wytrzymałości, powoduje również zmniejszenie wydzielanego ciepła hydratacji. Zmniejszenie wydzielanego ciepła hydratacji pozwala na ograniczenie powstającego skurczu. Cecha ta jest szczególnie przydatna przy wykonywaniu elementów betonowych o znacznej powierzchni lub masywów betonowych [Giergiczny, 2003; Giergiczny i Gawlicki 2008].



Według różnych autorów [Kurdowski, 1990; Torii i in., 1998; Bapat, 2001; Chładzyński i Garbacik, 2001; Giergiczny i in., 2002] dodatek popiołu lotnego do cementu wpływa również na jego odporność na korozję chemiczną.

Zastosowanie popiołów lotnych przy produkcji betonów można podzielić na dwa obszary wpływu. Jednym z nich jest zastosowanie popiołów lotnych do zmiany właściwości świeżej mieszanki betonowej. Drugim zaś jest zastosowanie popiołów lotnych w celu zmiany właściwości stwardniałego betonu lub charakterystyki przyrostu jego wytrzymałości na ściskanie. Dodatek popiołu lotnego do betonu powinien wynosić maksymalnie 1/3 masy zastosowanego cementu. W przypadku wyższych zawartości dodatku popiołu mówi się już o betonach wysokopopiołowych [Jackiewicz – Rek, 2010].

Popiół lotny w świeżej mieszance betonowej powoduje zmiany w jej konsystencji, urabialności oraz zapotrzebowaniu na wodę. Ze względu na mniejszą gęstość popiołów lotnych w stosunku do cementu, jego masowe zastąpienie w mieszance betonowej popiołem powoduje zwiększenie się objętości zaczynu cementowego, prowadząc do podwyższenia plastyczności całej mieszanki betonowej. Kulisty kształt drobnych ziaren popiołów lotnych prowadzi do zmniejszenia się tarcia międzycząsteczkowego w świeżej mieszance betonowej oraz pozwala na dokładniejsze wypełnienie przestrzeni pomiędzy ziarnami kruszywa. W efekcie zmniejszenia tarcia międzycząsteczkowego można uzyskać taką samą konsystencję i urabialność mieszanki przy zastosowaniu mniejszych ilości wody zarobowej. Mieszanka betonowa zawierająca popiół lotny jest spoista oraz wykazuje mniejszą tendencję do odsączania wody, jednak ze względu na dodatek popiołu, mieszanka taka może wykazywać trudności w jej napowietrzaniu. Skuteczność stosowania domieszek napowietrzających jest zależna od rodzaju zastosowanego popiołu, a dokładniej od zawartości niespalonego węgla w nim występującego [Galos i Uliasz–Bocheńczak, 2005; Giergiczny i Gawlicki, 2008; Jackiewicz – Rek, 2010].

Dodatek popiołu lotnego do mieszanki betonowej na ogół nie wpływa na czas wiązania, natomiast zastąpienie części cementu popiołem lotnym będzie miało już wpływ na zmianę czasu wiązania mieszanki betonowej, powodując jego opóźnienie. Wielkość opóźnienia czasu wiązania zależna jest od ilości zastąpionego cementu, ilości dodanego popiołu oraz jego właściwości, szczególnie aktywności pucolanowej. Wydłużenie czasu dojrzewania betonu poprzez zastąpienie części cementu popiołem lotnym zmniejsza również ilość oddawanego ciepła hydratacji, przez co betony tego typu charakteryzują się niższym skurczem [Galos, Uliasz–Bocheńczak, 2005; Giergiczny i Gawlicki, 2008; Jackiewicz – Rek, 2010].

Betony, w których zastąpiono znaczną część cementu popiołem lotnym, mogą charakteryzować się ograniczoną mrozoodpornością. Obniżenie mrozoodporności spowodowane jest spowolnieniem zachodzenia reakcji pucolanowej oraz, co za tym idzie, zwolnieniem przyrostów wytrzymałości na ściskanie materiału. Problemy z mrozoodpornością betonów, w których zastosowano popiół lotny, można rozwiązać poprzez wydłużony okres pielęgnacji (60–90 dni) oraz zmiany w mikrostrukturze betonu, poprzez zastosowanie domieszek uplastyczniających zmniejszających wskaźnik w/c oraz domieszek



napowietrzających, ogólnie poprawiających mrozoodporność betonu [Galos i Uliasz–Bocheńczak, 2005; Giergiczyński i Gawlicki, 2008; Jackiewicz – Rek, 2010; Śliwiński in., 2013].

Według IBDiM [2004] popioły lotne mogą być stosowane w drogownictwie na bardzo szeroką skalę. Wyróżnia się następujące obszary budownictwa drogowego, w których można stosować popioły lotne (Rys 2.13):

- Roboty ziemne – popioły lotne oraz mieszaniny popiołowo–żuźłowe mogą być wykorzystywane jako samodzielny materiał budowlany
- Ulepszone podłoże, warstwy wzmacniające – stosuje się w tym przypadku aktywne popioły lotne jako samodzielne spoiwo hydrauliczne, służące do stabilizacji i ulepszenia gruntów lub popioły w połączeniu z materiałami mineralnymi w metodach stabilizacji cementem o niskich wytrzymałościach
- Podbudowy – w tym przypadku popioły oraz mieszaniny popiołowo–żuźłowe stosuje się w mieszankach mineralnych z dodatkiem cementu o wyższych wytrzymałościach

Warstwa ściernalna	Nawierzchnia
Warstwa wiążąca	
Podbudowa zasadnicza Wykorzystanie do 35% w kompozycjach z cementem	
Podbudowa Pomocnicza Wykorzystanie do 100% w kompozycjach z cementem	
Podłoże ulepszone Wykorzystanie do 100% pod warunkiem stabilizacji spoiwem	Podłoże
Nasyp Wykorzystanie do 100%	

Rys. 2.13. Schemat wykorzystania popiołów lotnych i mieszanin popiołowo żuźłowych w warstwach konstrukcji drogowej [IBDiM, 2004]

W przypadku robót ziemnych największe ilości popiołów lotnych lub mieszanin popiołowo żuźłowych są używane do makroniwelacji terenu lub konstrukcji nasypów. W przypadku wykonywania nasypów, mogą one składać się nawet w 100% z popiołów lotnych lub mieszanin popiołowo–żuźłowych, jednak przy zachowaniu pewnych zastrzeżeń [PN–S–02205:1998; IBDiM, 2004]:

- Popioły lotne i mieszaniny popiołowo–żuźłowe mogą zostać zabudowane w dolnych warstwach nasypów poniżej strefy przemarzania, gdy zalegają w miejscach suchych lub są odizolowane od dostępu wody
- Mieszaniny popiołowo–żuźłowe mogą zostać zabudowane w górnej warstwie nasypu powyżej strefy przemarzania jeśli zostaną ulepszone spoiwami

W tabelicy 2.12 przedstawiono wymagania dotyczące parametrów fizyko–mechanicznych mieszanin popiołowo–żuźłowych przeznaczonych do budowy nasypów [IBDiM, 2004].

Tablica 2.12. Właściwości mieszanin popiołowo–żuźlowych przeznaczonych do budowy nasypów [IBDiM, 2004]

Cechy	Wartości	Badania wg normy
Zawartość frakcji piaskowo–żwirowej	$\geq 35\%$	PN-88/B-04481
Zawartość ziaren poniżej 0,075mm	$\leq 75\%$	
Zawartość niespalonego węgla	$\leq 10\%$	
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego po zagęszczeniu wg metody Proctora (metoda I lub II)	$\geq 1 \text{ g/cm}^3$	
Wskaźnik nośności CBR, po 4 dobach nasączenia w wodzie	$\geq 10\%$	PN-S-02205:1998 Załącznik A
Pęcznienie liniowe bez obciążenia	$\leq 2\%$	
Pęcznienie liniowe z obciążeniem 3 kN/m <sup>2</sup>	$\leq 0,5\%$	
Kąt tarcia wewnętrzznego	$\geq 20^\circ$	PN-88/B-04481
Kapilarność bierna	$\leq 2 \text{ m}$	PN-60/B-04493
Zawartość siarczanów	$\leq 3\%$	–

Konstrukcja nasypu wykonanego z mieszanin popiołowo–żuźlowych oraz popiołów lotnych powinna być wykonywana zgodnie z następującymi wymaganiami [IBDiM, 2004]:

- Nasyp można konstruować bezpośrednio na gruncie, jeśli poziom wody gruntowej zalega przynajmniej 1,0 m poniżej spodu konstrukcji nasypu
- W przypadku występowania zwierciadła wody gruntowej płytko pod powierzchnią terenu należy wykonać warstwę odcinającą o grubości minimum 50 cm pod konstrukcją nasypu
- W przypadku terenów zalewowych warstwę odsączającą należy wykonać co najmniej 50 cm powyżej najwyższego stanu wody zalewowej
- Górne warstwy konstrukcji nasypu powinny być wykonane ze spadkiem poprzecznym o wartości około 4%
- Górne warstwy nasypu należy wykonać tak, by zabezpieczyły warstwy zalegające poniżej przed zawilgoceniem, można tego dokonać za pomocą geomembrany lub stabilizacji spoiwami
- Skarpy należy zabezpieczyć tymczasową warstwą antyerozyjną do czasu utworzenia się pokrywy roślinnej

W przypadku wykonywania podbudów z wykorzystaniem popiołów lotnych można wykorzystać dwie technologie [IBDiM, 2004]:

- Podbudowę wykonaną z betonu popiołowego
- Podbudowę z popiołów stabilizowanych cementem

Podbudowy wykonane z betonu popiołowego powinny się konstruować z wykorzystaniem następujących materiałów:

- Kruszywa:
  - Piasek
  - Żwir
  - Kruszywo łamane
  - Żużel wielkopiecowy kawałkowy
  - Łupkoporyt ze zwałów
  - Agloporyt
  - Keramzyt
- Popioły lotne:
  - Z węgla kamiennego odmiany PKb oraz jako dodatek pucolanowy do materiałów wiążących odmiany PKa
  - Aktywne z węgla brunatnego odmiany PBc jako samodzielne spoiwo
  - PBa i PBb jako dodatek pucolanowy do materiałów wiążących
- Inne materiały wiążące: wapno, cement

Zawartości poszczególnych składników w mieszance betonowej powinny wynosić [IBDiM, 2004]:

- Kruszywo 60–80%
- Popioły PKa lub PKb 10–35%
- Aktywne popioły PBc 5–12% lub wapno 4–6% lub cement 5–8%

Podbudowa wykonywana z betonu popiołowego powinna spełniać wymagania dotyczące wytrzymałości na ściskanie oraz mrozoodporności. Wymagania przedstawiono w tabelicy 2.13.

Tablica 2.13. Wymagania stawiane podbudowom wykonanym z betonu popiołowego [IBDiM, 2004]

Rodzaj warstwy	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]			Wytrzymałość po 14 cyklach zamrażania i odmrażania
	R <sub>3<sup>t</sup></sub>	R <sub>14<sup>m</sup></sub>	R <sub>42<sup>m</sup></sub>	R <sub>42<sup>ZO</sup></sub>
Górna warstwa podbudowy dla ruchu ciężkiego i bardzo ciężkiego	5–8	≥2,5	5–8	≥4
Górna warstwa podbudowy dla ruchu lekkiego i średniego oraz dolna warstwa podbudowy dla ruchu ciężkiego i bardzo ciężkiego	3–5	≥1,5	3–5	≥2
Dolna warstwa podbudowy dla ruchu lekkiego i średniego	1,5–3	≥1	1,5–3	≥0,8

Wymagania dotyczące zastosowania popiołów lotnych do wzmacniania warstw konstrukcji nawierzchni wykonanych z kruszywa określone są w WT–5 [2010]. W tabelicy 2.14 przedstawiono zestawienie wymagań dla popiołów lotnych krzemionkowych oraz wapiennych.

Tablica 2.14. Zestawienie wymagań stawianych popiołom lotnym krzemionkowym oraz wapiennym według WT-5 [2010]

Popiół lotny	Uziarnienie		Straty prażenia [%]	Zawartość SO <sub>3</sub> [%]	Zawartość CaO [%]
	Rozmiar sita [μm]	Procent przesianej masy [%]			
Krzemionkowy	90	≥70	≤10	≤4	–
	45	≥40			
Wapienny	315	≥95	–	–	≥5
	90	≥70			

## 2.4 Odpady gumowe

### 2.4.1 Charakterystyka

Coraz większy rozwój rynku motoryzacyjnego na świecie oraz zwiększająca się liczba pojazdów spalinowych na drogach prowadzą do coraz większej produkcji opon samochodowych. Według Lo Presti [2013] oraz Alfayez i in. [2020] około 1,4 mld opon jest co roku sprzedawanych oraz porównywalna ich ilość staje się odpadem w postaci zużytych opon samochodowych. Odpady te nie są traktowane jako materiał niebezpieczny lub stwarzający ryzyko, przy zachowaniu należytych zasad przetworzenia, przechowywania i transportu. Dodatkowo są nietoksyczne, odporne na pleśń, wilgoć oraz wykazują wysoką odporność na oddziaływanie bakterii [Ołdakowska, 2015]. Jednak ze względu na swoją odporność na biodegradację oraz oddziaływanie rozpuszczalników organicznych, materiały te są dużym obciążeniem dla środowiska naturalnego. Dlatego też powstało szereg aktów prawnych normalizujących sposoby radzenia sobie ze zużytymi oponami samochodowymi, między innymi [Ołdakowska, 2015]:

- Dyrektywa 1999/31/EC (Landfill Directive) – dyrektywa Unii Europejskiej wprowadzająca zakaz składowania całych zużytych opon samochodowych od lipca 2003 r., a od lipca 2006 r. również opon rozdrobnionych [za Ołdakowską, 2014, 2015]
- Dyrektywa 200/53/EC (End-of-life Vehicle Directive) – dyrektywa Unii Europejskiej określająca sposób postępowania z pojazdami po zakończeniu ich eksploatacji [za Ołdakowską, 2014, 2015]

Na podstawie powyższych dyrektyw Unii Europejskiej powstały krajowe akty prawne, pozwalające na większą kontrolę odzysku opon samochodowych. Ustawa z dnia 11 maja 2001 zobowiązała polskich producentów do odzysku z rynku większości (około 75%) masy wyprodukowanych opon samochodowych, zaś na przedsiębiorców z branży motoryzacyjnej został narzucony obowiązek ewidencji oraz składowania i przekazania do odzysku zużytych opon samochodowych. Dodatkowo, z 75% wprowadzonych na rynek opon samochodowych, minimum 15% z nich powinno zostać poddane recyklingowi, a pozostałe 60% może być poddane innej formie odzysku [Ołdakowska, 2015].

Opony samochodowe jakie dziś znamy są efektem ponad wieku rozwoju produkcyjnego, w efekcie którego uzyskujemy skomplikowany, zaawansowany technologicznie produkt gwarantujący wysoki komfort i bezpieczeństwo użytkownika. Opona samochodowa, pod kątem materiałowym składa się z trzech głównych składników [Lo Presti, 2013]:

- Mieszanki elastomerowej
- Włókna tekstylnego
- Stali

Włókna tekstylne oraz stal stanowią około 53,5% masy opony samochodowej, kauczuk 25%, krzemionka 13%, sadza 6%. Resztę składu stanowią biel cynkowa oraz aktywatory chemiczne [Skawińska, 2019].

Podstawowym problemem, pojawiającym się przy próbach recyklingu opon samochodowych w przemyśle gumowym, jest brak możliwości przywrócenia zużyтым wyrobom gumowym właściwości świeżej mieszanki gumowej. Świeża mieszanka gumowa (wykonana z kauczuku butylowego IIR) jest lepkiem materiałem plastycznym, co wynika z jej budowy molekularnej. Składa się ona z długich łańcuchów polimerowych, które nie są połączone ze sobą w żaden sposób, mogą się niezależnie przemieszczać, co powoduje, iż materiał ten bardzo łatwo zmienia swój kształt pod wpływem przyłożonych obciążeń. Dodatkowo, świeża mieszanka gumowa charakteryzuje się cechami termoplastycznymi, to znaczy, że jej właściwości zmieniają się w zależności od jej aktualnej temperatury. W tablicy 2.15 przedstawiono cechy świeżej mieszanki gumowej w zależności od temperatury [Lo Presti, 2013].

Tablica 2.15. Cechy świeżej mieszanki gumowej w różnych temperaturach [Lo Presti, 2013]

Temperatura	Cechy
- 10°C	Krucha i nieprzeźroczysta
20°C	Miękka, sprężysta i prześwitująca
50°C	Plastyczna i lepka
120°C – 160°C	Wulkanizacja w obecności siarki
180°C	Rozsegregowanie jak w mastykatorze
200°C	Dekompozycja

Bazując na właściwościach świeżej mieszanki gumowej w zależności od temperatury można stwierdzić, że nabiera ona swoich właściwości użytkowych odpowiadających wyrobom gumowym w procesie wulkanizacji. Wulkanizacja mieszanki gumowej jest złożonym procesem chemicznym i fizycznym, w którym łańcuchy polimerowe kauczuku łączą się ze sobą za pomocą wiązań poprzecznych, wytworzonych z siarki w temperaturze 120–160°C. Wtedy mieszanka gumowa przyjmuje znane nam sprężyste właściwości [Smejda–Krzewicka i in., 2012].

Jak wspomniano wcześniej, aby skutecznie ponownie wykorzystać zużyte wyroby gumowe do produkcji nowych wyrobów, należałoby odwrócić proces wulkanizacji w celu ponownego uzyskania zdolnej do obróbki świeżej mieszanki gumowej. Niestety proces swoistej „de-wulkanizacji” jest trudny do osiągnięcia lub nawet niemożliwy do osiągnięcia przy aktualnej technologii. Dzieje się tak ze względu na złożoność samego procesu wulkanizacji oraz potrzebę selektywnej dekompozycji poprzecznie sieciujących wiązań siarkowych. Do tej pory badaczom udało się jedynie uzyskać materiał częściowo de-wulkanizowany, którego zastosowanie w niedużej ilości pozwala zagospodarować go w nowych wyrobach gumowych przy niewielkiej utracie właściwości użytkowych. Proces ten jest jednak kosztowny i wymaga dużej ilości czasu, dlatego należy szukać innych sposobów recyklingu odpadów gumowych takich jak [Robaczyński, 2009; Smejda–Krzewicka i in., 2012]:

- Recykling energetyczny
- Produktowy
- Surowcowy
- Materiałowy

Recykling energetyczny polega na odzysku ciepła podczas spalania materiału. Odpady gumowe są wykorzystywane jako paliwo podstawowe lub dodatkowe przy produkcji:

- Pary wodnej
- Energii elektrycznej
- Wapnia
- Cementu
- Papieru
- Stali
- Przy spalaniu śmieci

Recykling produktowy jest metodą ponownego wykorzystania odpadu, w której odpad jest ponownie wykorzystany bez lub po niewielkiej obróbce. Dzięki właściwościom sprężystym opony samochodowe świetnie tłumią hałasy, wstrząsy oraz uderzenia co pozwala na ich wykorzystanie jako [Sybilski, 2009; Parasiewicz, 2009; Smejda–Krzewicka i in., 2012]:

- Odbojniki łodzi i statków
- Ochrona wybrzeża w portach
- Bariery dźwiękochłonne
- Bariery ochronne autostrad
- Maty i płytki podłogowe
- Wkładki hamulcowe
- Lekkie wypełnienie nasypów

Recykling surowcowy to metoda, w której z odpadu gumowego odzyskuje się surowce wykorzystane do jego wyprodukowania oraz zazwyczaj odpad wynikający z zastosowanego procesu. Odzyskane surowce mogą posłużyć do produkcji pełnowartościowych tworzyw, zaś odpady mogą posłużyć w innych gałęziach przemysłu (dodatki do paliw i smarów). Metoda ta

pozwała na przetwarzanie odpadów gumowych bez potrzeby ich wcześniejszej segregacji. Złożoność tego procesu sprawia, iż wymaga on skomplikowanej instalacji, wysokich temperatur, ciśnienia, katalizatorów oraz ścisłej kontroli parametrów procesów, przez co jest to rzadko wykorzystywana metoda przetwórstwa odpadów gumowych. Najczęściej stosowanym rodzajem recyklingu surowcowego jest piroliza. Polega ona na ogrzewaniu całych lub rozdrobnionych odpadów gumowych w temperaturze między 400–700°C, w warunkach odizolowania od dostępu tlenu i utleniania odpadów. W efekcie pirolizy odpadów gumowych uzyskuje się surowce w trzech stanach skupienia: stałe, ciekłe oraz gazowe. W skład surowców stałych wchodzi zwęglone pozostałości odpadów [Smejda–Krzewicka i in., 2012].

Kolejnym sposobem ponownego wykorzystania odpadów gumowych jest recykling materiałowy. W metodzie tej przetwarza się odpad w produkt użytkowy, na ogół o innym przeznaczeniu niż materiał pierwotny. Na proces ten składa się zebranie i posortowanie odpadów, następnie przetworzenie w surowiec wtórny, aby wytworzyć finalny wyrób z surowca wtórnego lub z jego dodatkiem.

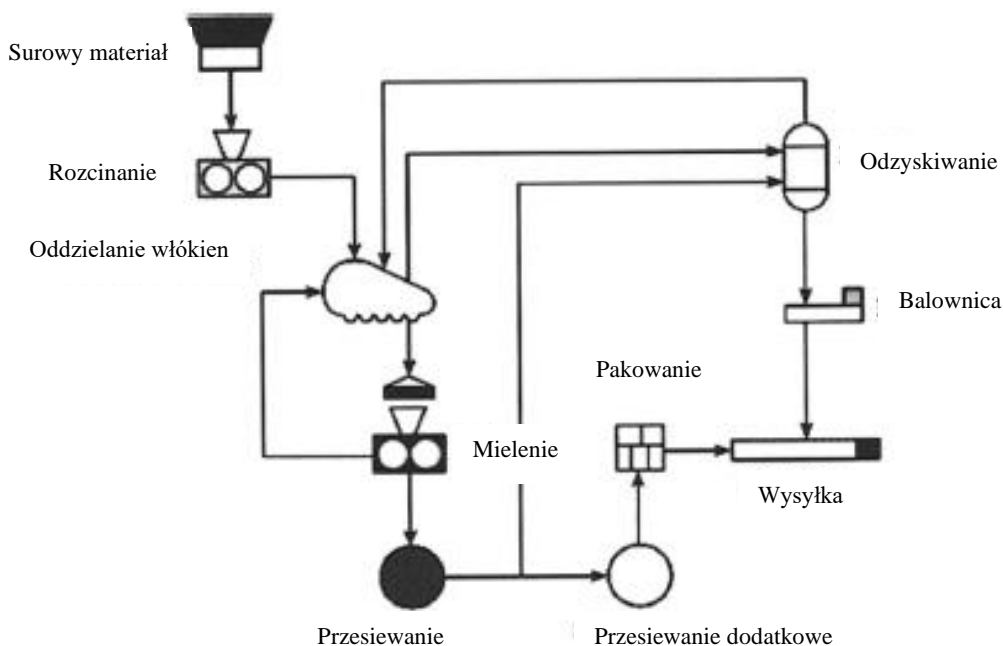
W przypadku odpadów gumowych, w celu wytworzenia surowca wtórnego, są one rozdrabniane. Właściwości rozdrobnionych odpadów gumowych, takie jak wielkość i kształt uzyskanych cząsteczek, ich powierzchnia właściwa są uzależnione głównie od rodzaju mieszanki gumowej w odpadzie oraz zastosowanej metody rozdrabniania. Oprócz granulatu gumowego w procesie rozdrabniania otrzymuje się również odpad stalowy oraz tekstylny. Odpady stalowe mogą zostać ponownie wysłane do huty w celu ich ponownego wykorzystania, zaś włókna mogą posłużyć na przykład do produkcji izolacji termicznej [Smejda – Krzewicka i in., 2012].

Najczęściej spotykanymi metodami rozdrabniania odpadów gumowych są [Smejda–Krzewicka i in., 2012; Lo Presti, 2013;]:

- Rozdrabnianie w podwyższonej temperaturze (mechaniczne)
- Rozdrabnianie metodą Berstorffa
- Rozdrabnianie „na mokro”
- Rozdrabnianie wodą pod wysokim ciśnieniem (hydro jet size reduction)
- Rozdrabnianie metodą kriogeniczną

Rozdrabnianie w podwyższonej temperaturze (mechaniczne) jest najpopularniejszą i najefektywniejszą metodą rozdrabniania odpadów gumowych. Odpady są mielone w specjalnych młynach, granulatorach lub walcarkach. Na proces ten na ogół składa się dwa lub więcej etapów rozdrabniania, w których otrzymuje się rozdrobniony odpad o coraz mniejszej wielkości cząsteczki. Wraz z kolejnymi etapami rozdrabniania z odpadu usuwane są włókna tekstylne oraz kord stalowy. Włókna tekstylne na ogół usuwane są pneumatycznie, zaś w przypadku kordu stalowego wykorzystywane do tego celu są elektromagnesy. Na rysunku 2.14 przedstawiono schemat instalacji do mechanicznego rozdrabniania odpadów gumowych. W metodzie rozdrabniania odpadów gumowych w podwyższonej temperaturze otrzymuje się cząsteczki granulatu o rozwiniętej powierzchni właściwej oraz wielkości najmniejszych ziaren około 420 µm [Smejda–Krzewicka i in., 2012; Lo Presti, 2013].





Rys. 2.14. Schemat instalacji do mechanicznego rozdrabniania odpadów gumowych [Rahman, 2004]

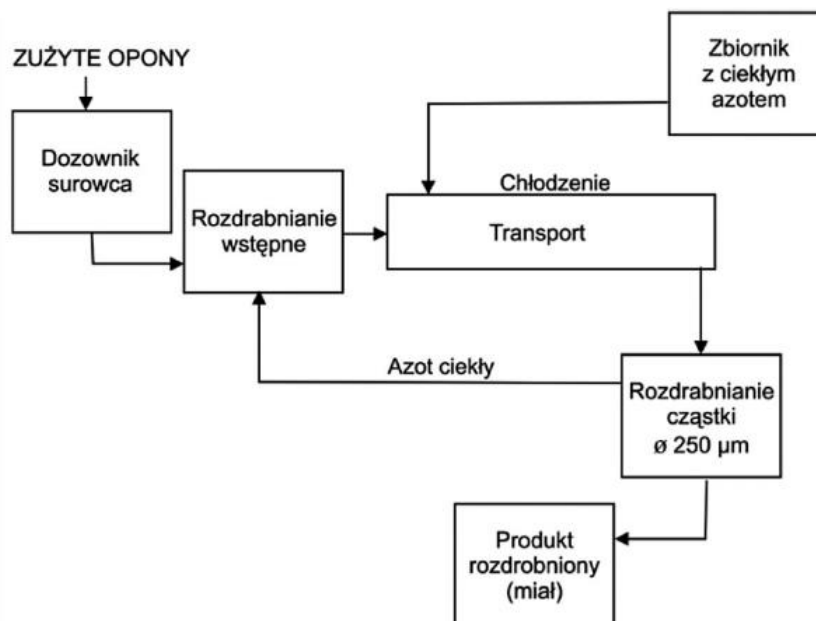
Rozdrabnianie metodą Berstorffa jest modyfikacją metody mechanicznego rozdrabniania, w której rozdrobniony odpad jest dodatkowo rozcierany na walcarka o walcach ryflowanych i wytłaczarce dwuślimakowej. W efekcie uzyskuje się miął gumowy o mniejszych cząstkach i rozwiniętej powierzchni właściwej [Smejda–Krzewicka i in., 2012].

Rozdrabnianie metodą na mokro nie jest kompleksową metodą rozdrabniania odpadów gumowych lecz sposobem redukcji wielkości ziaren granulatu. Wymaga ona wstępnego mechanicznego rozdrobnienia odpadu, który następnie jest wprowadzany do cieczy tworząc wodną zawiesinę. Następnie jest poddawany mieleniu w młynach do mielenia na mokro. W efekcie uzyskuje się drobne ziarna granulatu o wielkości od 250 do 125  $\mu\text{m}$ , o mniej rozwiniętej powierzchni właściwej niż w przypadku pozostałych metod mechanicznego rozdrabniania [Smejda–Krzewicka i in., 2012].

Kolejną metodą rozdrabniania odpadów gumowych jest rozdrabnianie za pomocą wody pod wysokim ciśnieniem (hydro jet size reduction). W metodzie tej odpad gumowy jest poddawany rozdrabnianiu za pomocą szybko obracających się strumieni wody pod wysokim ciśnieniem (55 000 psi – ok. 380 MPa). Strumienie te rozdzierają odpad gumowy, rozdrabniając go oraz oddzielając od granulatu gumowego fragmenty stalowe oraz tekstylne. Metoda ta pozwala na uzyskanie drobnych cząstek granulatu gumowego o rozwiniętej powierzchni właściwej. Uzyskany granulak ze względu na charakterystykę uzyskanych ziaren jest bardzo atrakcyjny w modyfikacjach asfaltów [Lo Presti, 2013].

Rozdrabnianie metodą kriogeniczną (Rys. 2.15) polega na szybkim zamrożeniu wstępnie schłodzonych odpadów gumowych za pomocą ciekłego azotu. Zamrażanie odbywa się w temperaturze od  $-87$  do  $-198^{\circ}\text{C}$ . W tych temperaturach odpad gumowy traci swoją elastyczność i staje się kruchy. Następnie jest on rozbijany za pomocą młota na drobne

cząsteczki. Cząsteczki granulatu uzyskiwane w tej metodzie charakteryzują się najmniej rozwiniętą powierzchnią właściwą spośród wszystkich metod rozdrabniania odpadów gumowych. W związku z tym uzyskany granulak jest najmniej przydatny w modyfikacjach asfaltów oraz jako dodatek do świeżych wulkanizatów, ze względu na gorszą jakość połączenia cząsteczek w nowej matrycy [Lo Presti, 2013].



Rys. 2.15. Schemat przebiegu procesu kriogenicznego rozdrabniania odpadów gumowych [Białasz, 2018]

W efekcie zastosowania przedstawionych metod rozdrabniania odpadów gumowych możemy uzyskać granulak gumowy o różnych przedziałach uziarnienia oraz wielkościach powierzchni właściwej ziaren. Wielkość uziarnienia oraz powierzchni właściwej ziaren będzie rzutować na ewentualne drogi jego wykorzystania. Większa powierzchnia właściwa ziaren granulatu gumowego będzie gwarantowała lepszą współpracę surowca wtórnego z matrycą materiału, w który zostanie wkomponowana. Dlatego granulaty charakteryzujące się tą cechą będą lepiej sprawdzały się przy modyfikacji asfaltów lub jako dodatki wypełniające do mieszanek polimerowych. Ze względu na wielkość granulacji odpadów gumowych wyróżnia się ich następujące rodzaje [Smejda – Krzewicka i in., 2012]:

- Miał gumowy – uziarnienie 0/1mm
- Granulat gumowy – 1/10 mm
- Chipsy – 10/50 mm
- Strzępy – 50/300 mm
- Opony cięte – połówki i kawałki nie mniejsze niż 300 mm

#### 2.4.2 Zastosowania odpadów gumowych

Odpady gumowe są wykorzystywane w budownictwie głównie pod postacią całych lub częściowo przetworzonych (rozciętych) opon samochodowych oraz granulatu o zróżnicowanym uziarnieniu. Wykorzystuje się je najczęściej w geotechnice, technologiach

wytwarzania modyfikowanych mas bitumicznych, przy budowie nawierzchni sportowych, mat pochłaniających wibracje i dźwięk oraz coraz częściej przy modyfikacji właściwości betonów budowlanych. Mimo tak dużej gamy możliwych zastosowań, brak popularyzacji tego typu rozwiązań oraz duży roczny przyrost ilości tych odpadów powodują, iż nie da się ich wykorzystać w pełni.

W geotechnice w zależności od stopnia przetworzenia odpadów gumowych można je wykorzystać do [Sybilski, 2009]:

- Budowy nasypów drogowych
- Wzmacniania podłoża gruntowego
- Poprawy stateczności skarp kanałów i rowów
- Budowy ścian oporowych
- Budowy warstw odsączających i odcinających
- Budowy membran i warstw drenujących
- Budowy przepustów drogowych

Wykorzystanie odpadów gumowych przy budowie nasypów drogowych zakłada wykorzystanie całych lub rozciętych opon samochodowych, jako lekkiego wypełnienia nasypu. W tym celu wewnętrzną część korpusu nasypu wykonuje się z ułożonych na siebie warstwami mat wykonanych z połączonych ze sobą opon samochodowych. Maty te po ułożeniu są zasypywane gruntem, który jest następnie zagęszczany. Stosuje się maty występujące w następujących układach [Sybilski, 2009]:

- Pojedyncza warstwa całych opon samochodowych
- Podwójna warstwa całych opon samochodowych
- Pojedyncza warstwa opon przepoławionych
- Podwójna warstwa opon przepoławionych

Zastosowanie lekkiego wypełnienia nasypu zużytymi oponami samochodowymi pozwala na [Sybilski, 2009]:

- Zmniejszenie ciężaru własnego nasypu
- Poprawę trwałości konstrukcji ze względu na odporność na degradację biologiczną odpadów gumowych
- Zmniejszenie kosztów wykonania
- Poprawę warunków filtracji wody w konstrukcji
- Poprawę mrozoodporności

Kolejnym sposobem zagospodarowania całych lub rozciętych opon samochodowych w geotechnice jest zastosowanie ich do wzmocnienia poboczy dróg. W metodzie tej, analogicznie jak w przypadku lekkiego wypełnienia nasypu drogowego, zastępuje się wypełnienie z gruntu lub kruszyw matami wykonanymi z połączonych opon samochodowych. Maty te dodatkowo są zakotwione w nośnym podłożu, tak aby jeszcze bardziej zwiększyć stabilność konstrukcji. Podobnie, jak w przypadku nasypów, pobocza wzmocnione odpadami

gumowymi charakteryzują się lepszymi parametrami filtracji wody, mniejszym ciężarem własnym oraz większą trwałością niż tradycyjne konstrukcje [Sybilski, 2009].

Całe opony samochodowe mogą także znaleźć zastosowanie przy konstrukcji ścian oporowych. Jest to najprostsza technologia wykorzystania odpadów gumowych. Układa się w niej warstwy opon samochodowych, których wnętrza następnie zasypuje się gruntem, kruszywem lub ich mieszanką, a następnie zagęszcza. Tak przygotowana warstwa jest obsypywana dobrze zagęszczalnym kruszywem mineralnym. Następnie, na przygotowanej w taki sposób warstwie układa się kolejne opony samochodowe. Podobnie, jak w przypadku nasypów drogowych i wzmocnionych poboczy, ściana oporowa wybudowana w tej technologii cechuje się lepszymi parametrami użytkowymi niż tradycyjne konstrukcje [Sybilski, 2009].

Wykorzystanie rozdrobnionych odpadów gumowych w geotechnice, na ogół zakłada zastąpienie ziaren kruszywa lub gruntu granulatem gumowym o odpowiednio dobranym uziarnieniu. Zabiegi te mają na celu wykorzystać lepsze właściwości odpadów gumowych od gruntów lub kruszyw. W tym przypadku chodzi głównie o mniejszy ciężar odpadów gumowych oraz lepsze parametry filtracji wody. Rozdrobnione odpady gumowe mogą być wykorzystane do wzmocnienia niespoistego podłoża gruntowego. Wzmocnienie wykonuje się poprzez ułożenie warstwy składającej się z wiórów gumowych (ziarna o wydłużonym kształcie), o uziarnieniu 10–100 mm lub poprzez ułożenie warstwy składającej się z mieszaniny gruntu z wiórami gumowymi. Podłoże wzmocnione w ten sposób zachowuje się jak nawierzchnia żwirowa, jednak zastosowanie odpadów gumowych wiąże się z powstaniem większych oraz szybciej przyrastających osiadań gruntu. Przyjmuje się, że tradycyjna konstrukcja osiada o około 0,3 cm. W przypadku wymienionych wyżej wzmocnień podłoża wiórami gumowymi osiadania te sięgają około 0,6–1,3 cm [Sybilski, 2009; Kowalska i Jastrzębska, 2017]. Według Glinickiej [2013] można przyjąć, że dodatek rozdrobnionych odpadów gumowych do gruntów niespoistych wpływa na zwiększenie się wytrzymałości na ścinanie takich mieszanin. W efekcie obiekty czy też warstwy wykonane przy wykorzystaniu tej technologii są bardziej oszczędne od tradycyjnie wykonywanych.

Według Bałachowskiego i Gottelanda [2007] wytrzymałość na ścinanie i dylatacja mieszanki gruntu i odpadów gumowych określana w aparacie trójosiowego ściskania są ściśle zależne od zawartości odpadów gumowych. W swojej pracy autorzy stwierdzili, iż zbyt małe dodatki odpadów gumowych powodują obniżenie wartości wytrzymałości na ścinanie w stosunku do gruntu bez dodatków. Aby uzyskać optymalne wartości badanych parametrów, należy zastosować dodatek około 30% odpadów gumowych w stosunku do masy gruntu. Jednak tak duży dodatek miału gumowego negatywnie wpływa na zagęszczalność mieszanki. Według Glinickiej [2007] optymalnym dodatkiem granulatu gumowego pod kątem odpowiedniej zagęszczalności mieszaniny gruntowo–gumowej jest dodatek około 12,5% odpadów gumowych w stosunku do masy gruntu.

W technologiach bitumicznych stosuje się tylko i wyłącznie rozdrobnione odpady gumowe. Pierwsze próby zastosowania rozdrobnionych odpadów gumowych, jako dodatku modyfikującego mieszanki mineralno–asfaltowe, miały miejsce już w 1960 roku. Wtedy to

dwie szwedzkie firmy opracowały pierwszą technologię, w której stosowano dodatek rozdrobnionych odpadów gumowych, jako zastępstwo dla części frakcji piaskowej występującej w mieszance. Modyfikacja ta miała na celu zwiększenie odporności nawierzchni wykonanej z modyfikowanej mieszanki mineralno-asfaltowej na stosowane wówczas w pojazdach ciężarowe opony oraz łańcuchy przeciwnieżne. Taki sposób dozowania rozdrobnionych odpadów gumowych, jako zastępstwo części kruszywa mineralnego, nosi nazwę „metody suchej”. W podobnym okresie czasu, w Stanach Zjednoczonych Ameryki, inżynier materiałowy Charles McDonald wynalazł metodę pozwalającą na uzyskanie materiału łączącego cechy gumy oraz lepiszcza bitumicznego. Odkrył on, że wymieszanie ze sobą lepiszcza asfaltowego oraz rozdrobnionych odpadów gumowych w warunkach wysokiej temperatury oraz odstawienie mieszanki na okres czasu od 45 do 60 minut, pozwala na uzyskanie lepiszcza, nazwanego przez niego gumowym asfaltem. Materiał ten ciągle miał właściwości odpowiednie dla lepiszcza bitumicznego, jednak dodatek odpadów gumowych pozwolił na zwiększenie elastyczności lepiszcza oraz stanowił swoisty wypełniacz, dzięki któremu koszt produkcji mieszanki mineralno-asfaltowej był mniejszy. Aktualnie obie metody „sucha” i „mokra” uległy znacznemu rozwojowi i są jednymi z częściej wykorzystywanych metod ponownego zastosowania odpadów gumowych w sektorze budowlanym. Jak do tej pory nie udało się precyzyjnie scharakteryzować reakcji zachodzących pomiędzy lepiszczem bitumicznym a rozdrobnionymi odpadami gumowymi, jednak przyjmuje się, iż nie jest to reakcja czysto chemiczna [Lo Presti, 2013].

Reakcja zachodząca pomiędzy lepiszczem bitumicznym a gumą jest uzależniona od [Lo Presti, 2013]:

- Parametrów przetwarzania – temperatury, czasu oraz przyłożonych naprężeń ścinających w trakcie mieszania
- Właściwości lepiszcza bitumicznego – głównie zawartości frakcji oleistych
- Właściwości granulatu gumowego – pochodzenia, metody przetwarzania, wielkości cząsteczek oraz ich powierzchni właściwej (większa powierzchnia wpływa na polepszenie interakcji z lepiszczem bitumicznym, ze względu na większą powierzchnię kontaktu)

Jak już wcześniej wspomniano, w technologiach bitumicznych wykorzystanie odpadów gumowych można podzielić na dwie podstawowe metody:

- Metodę suchą
- Metodę moką

Metoda sucha jest najprostszą metodą wykorzystania odpadów gumowych. W metodzie tej rozdrobnione odpady gumowe (o uziarnieniu do 2 mm) lub grubsze (uziarnienie większe od 2 mm) są dodawane do mieszanki mineralno-asfaltowej w czasie jej produkcji. Na ogół stosowany jest dodatek od 1 do 3% odpadów gumowych. Odpady o drobniejszym uziarnieniu pozwalają głównie na modyfikację właściwości samego lepiszcza bitumicznego, w wyniku reakcji częściowego łączenia się tych składników ze sobą. Grubsze frakcje rozdrobnionych odpadów gumowych są natomiast traktowane jak kruszywo gumowe. Krzywa uziarnienia

stosowana w przypadku takiej modyfikacji musi zostać odpowiednio dobrana i jest to na ogół krzywa o uziarnieniu nieciągłym. Dobór lepiszcza asfaltowego do mieszanki mineralno-asfaltowej modyfikowanej metodą na sucho zależy jedynie od jej przeznaczenia. Dodatek odpadu gumowego nie ma na niego wpływu. Do modyfikacji mieszanki mineralno-asfaltowej dochodzi w czasie jej wytwarzania na gorąco. Zachodzi wtedy reakcja pomiędzy lepiszczem asfaltowym oraz granulatem gumowym. Metoda ta nie wymaga stosowania katalizatorów reakcji lepiszcze–guma [Sybilski, 2009; Piłat i in., 2011].

W wyniku modyfikacji mieszanki mineralno-asfaltowej odpadami gumowymi w metodzie na sucho uzyskuje się następujące cechy [Sybilski, 2009]:

- Większą odporność na pękanie
- Zdolność do amortyzacji uderzeń opon
- Zmniejszenie hałaśliwości nawierzchni
- Zdolność do szybkiego usuwania gołoledzi
- Trudniejsze zagęszczanie wynikające ze sprężystego zachowania cząsteczek gumy
- Większą zawartość wolnych przestrzeni w MMA oraz nasiąkliwość

Metoda mokra odnosi się do całej rodziny modyfikacji lepiszcza asfaltowego odpadami gumowymi. Według Lo Presti [2013] wyróżniamy dwa główne rodzaje produkcji lepiszcza asfaltowego modyfikowanego odpadem gumowym w metodzie mokrej:

- Metoda mokra – wysoka lepkość
- Metoda mokra – bez mieszania/terminalowa

Właściwości lepiszcza modyfikowanego gumą w metodzie mokrej zależą w głównej mierze od [Szydło i Koba, 2009]:

- Rodzaju i składu chemicznego gumy
- Uziarnienia oraz ilości dodanego granulatu gumowego
- Rodzaju lepiszcza asfaltowego
- Sposobu łączenia lepiszcza z gumą (rodzaj mieszadła, temperatura oraz czas mieszania, czas dojrzewania)

Najlepsze parametry lepiszcza modyfikowanego odpadem gumowym uzyskuje się przy zastosowaniu granulatu gumowego pochodzącego z opon samochodów osobowych, ze względu na większą zawartość kauczuku naturalnego. Granulat powinien być otrzymywany mechaniczną metodą rozdrabniania w celu uzyskania jak największej powierzchni właściwej ziaren, co pozytywnie wpływa na jakość połączenia pomiędzy lepiszczem a ziarnami granulatu. Preferowane uziarnienie granulatu mieści się w przedziale 0–1 mm [Szydło i Koba, 2009].

Metoda mokra – wysoka lepkość jest rozwinięciem metody modyfikacji na mokro zaproponowanej przez Charlesa McDonalda. Uznaje się, że uzyskane w ten sposób lepiszcze powinno utrzymywać lepkość na poziomie 1500 mPa\*s w temperaturze 177°C w czasie jego mieszania [Lo Presti, 2013]. Proces modyfikacji lepiszcza asfaltowego w tej metodzie polega



na wymieszaniu lepiszcza z gumą w temperaturze 180–225°C przy wysokich obrotach mieszadła (kilka tysięcy obrotów na minutę). Dodatek odpadu gumowego powinien wynosić 10–20% masy lepiszcza asfaltowego. Mieszanie to pozwala na częściowe rozpuszczenie drobnych części gumy w lepiszczu asfaltowym, zaś grubsze frakcje pęczniają i pozostają rozproszone. W efekcie otrzymuje się lepiszcze o układzie dyspersyjnym z niestabilnym układem koloidalnym. W celu zapobieżenia rozsegregowania mieszanki, poddaje się ją procesowi dojrzewania, w którym jest ona przepompowywana do osobnego zbiornika, w którym zachodzi kolejny proces mieszania w wysokiej temperaturze przez okres od 45 minut do 2 godzin. Tak przygotowane lepiszcze może być podawane dalej do wytwórni mas bitumicznych [Sybilski, 2009; Szydło i Koba, 2009; Sybilski i in., 2011; Lo Presti, 2013].

Metoda mokra – bez mieszania/terminalowa jest kolejnym etapem rozwoju metody mokrej opracowanej przez McDonalda. W przypadku tej metody uzyskane lepiszcze asfaltowo–gumowe jest stabilnym materiałem jednorodnym nieulegającym segregacji. Sprawia to, że jego przechowywanie oraz wykorzystanie jest znacznie łatwiejsze [Sybilski, 2009; Szydło i Koba, 2009; Sybilski, 2011; Lo Presti, 2013]. Metodę tą stosuje się jedynie w rafineriach lub specjalnie przygotowanych instalacjach, ze względu na wysokie restrykcje technologiczne. Lepiszcze to produkuje się przy odpowiednim ciśnieniu, temperaturze, czasie i mieszaniu, podobnie jak w przypadku asfaltów modyfikowanych polimerami. Proces produkcji polega na wymieszaniu ze sobą lepiszcza asfaltowego oraz granulatu gumowego (10–20% dodatek w stosunku do masy lepiszcza) w temperaturze pomiędzy 200–300°C, przy prędkości obrotowej mieszadła na poziomie kilku tysięcy obrotów na minutę oraz przy ciśnieniu powyżej 1 atm. Podwyższenie temperatury mieszania oraz przyłożenie dodatkowego ciśnienia, w porównaniu do podstawowej metody McDonalda, skutkuje zmianą charakterystyki współpracy lepiszcza asfaltowego oraz odpadów gumowych. W tym przypadku pęcznienie oraz częściowe rozpuszczenie odpadów gumowych jest zastąpione przez ich depolimeryzację oraz de–wulkanizację. To powoduje, że uzyskana mieszanka jest, w przeciwieństwie do tej uzyskanej według podstawowej metody, jednorodna oraz nie wymaga ciągłego mieszania [Sybilski, 2009; Szydło i Koba, 2009; Sybilski, 2011; Lo Presti, 2013].

Lepiszcza asfaltowo–gumowe uzyskane metodami na mokro mogą być wykorzystane do:

- Mieszanek mineralno–asfaltowych
- Warstwa absorbująca naprężenia SAM (Stress Absorbing Membrane) [Szydło i Koba, 2009]
- Warstwa absorbująca naprężenia SAMI (Stress Absorbing Membrane Interlayer) [Szydło i Koba, 2009]
- Mas zalewowych do wypełniania szczelin dylatacji
- Warstw wodochronnych do zabezpieczania konstrukcji przed filtracją wody



Lepiszczka gumowo–asfaltowe uzyskane metodami mokrymi charakteryzują się lepszymi właściwościami fizyko–mechanicznymi oraz użytkowymi od zwykłego lepiszcza asfaltowego, w tym między innymi [Sybilski, 2009]:

- Większą odpornością na starzenie technologiczne
- Większą odpornością na starzenie eksploatacyjne nawierzchni
- Większą elastycznością lepiszcza oraz mieszanki
- Mniejszą podatnością nawierzchni na koleinowanie
- Większą odpornością na spękania niskotemperaturowe
- Większą kohezją
- Większą trwałością zmęczeniową
- Większą odpornością na czynniki środowiskowe, wodo– i mrozoodpornością
- Mniejszą hałaśliwością
- Głębszym odcieniem czerni oraz dłuższym zachowaniem koloru nawierzchni
- Lepszą integracją z farbami drogowymi

#### 2.4.3 Wpływ odpadów gumowych na mieszanki związane spoiwem – doświadczenia krajowe

Zastosowanie odpadów gumowych w mieszankach związanych spoiwem nie jest praktyką popularną lecz w ostatnich latach badacze przygotowują coraz więcej prób ich użycia. W pracach Skawińskiej [2019] i Ołdakowskiej [2012a, 2012b, 2014, 2015], autorzy przedstawiają wyniki badań wpływu zastosowania dodatku rozdrobnionych odpadów gumowych na parametry fizyko–mechaniczne zapraw cementowych oraz betonów budowlanych.

W pracy Skawińskiej [2019] zaprezentowano wyniki badań wpływu zastosowania rozdrobnionych odpadów gumowych, o zróżnicowanym uziarnieniu, na wytrzymałość na ścislenie oraz mikrostrukturę zapraw cementowych, zbudowanych na różnych rodzajach cementów. W tabelicy 2.16 przedstawiono uogólnione składy recept zapraw cementowych przygotowanych do badań.

Tabela 2.16. Oznaczenie mieszanek oraz ich skład na 1 m<sup>3</sup> mieszanki betonowej [Skawińska, 2019]

Składniki	Mieszanka		
	CEM I 42,5 R	CEM I 42,5 R + 5% GRANULATU GUMOWEGO	CEM I 42,5 R + 15% GRANULATU GUMOWEGO
CEMENT [kg]	450	427,5	382,5
PIASEK [kg]	1350	1350	1350
GRANULAT GUMOWY [kg]	–	22,5	67,5
WODA [kg]	225	225	225

Skawińska [2019] do swoich badań wykorzystwała następujące cementy:

- CEM I 42,4 R
- CEM II/B–V 32,5 R
- CEM III/A 32,5 N
- CEM IV/B(V) 32,5 N

oraz granulaty gumowe o uziarnieniu:

- 0–0,08 mm
- 0,6–2,0 mm
- 1,0–4,0 mm
- 2,5–6,0 mm

Badania wytrzymałościowe były przeprowadzane na beleczkach normowych o wymiarach 4x4x16 cm, po 2, 7 i 28 dniach pielęgnacji.

Według autorki 5% dodatek odpadu gumowego prowadził do obniżenia wytrzymałości na ściskanie zapraw o około 20% w stosunku do próbek świadków (próbek bez dodatku odpadu gumowego). Zastosowanie 15% dodatku miału gumowego prowadzi zaś do obniżenia wytrzymałości badanych próbek o około 50%. Skawińska [2019] wskazuje również, iż uziarnienie zastosowanego odpadu gumowego nie wpływa w znaczącym stopniu na wytrzymałość badanych zapraw. Podobnie przy zastosowaniu różnych cementów autorka nie zaobserwowała, żeby któryś z nich uzyskiwał mniejsze lub większe spadki wytrzymałości przy zastosowaniu dodatku odpadu gumowego.

Autorka dokonała również analizy mikrostruktury zaprawy cementowej na bazie cementu CEM II/B–V 32,5 R z 5% dodatkiem granulatu gumowego o uziarnieniu 1,0–4,0 mm.

Według autorki pracy, w strefie kontaktowej między zaczynem cementowym a granulatem gumowym zauważalna jest zwiększona ilość portlandytu, co może świadczyć o lokalnym zwiększaniu się współczynnika W/C w okolicach ziaren granulatu gumowego. Dodatkowo, Skawińska [2019] wskazuje na brak wpływu odpadu gumowego na budowanie fazy C–S–H, która przyjmuje w tym przypadku budowę o strukturze włóknistej, standardową dla tej obserwowanej w zwykłych betonach konstrukcyjnych.

W pracach Ołdakowskiej [2012a, 2012b, 2014, 2015] przedstawiono wyniki badań dotyczących zastosowania rozdrobnionych odpadów gumowych w betonach wykorzystywanych w budownictwie rolniczym, w podbudowach dróg o niskiej kategorii ruchu oraz w betonach klasycznych.

W przypadku badań betonów wykorzystywanych w budownictwie rolniczym [Ołdakowska, 2012a; 2014; 2015], autorka przeprowadziła następujące badania na betonach wykonanych zgodnie z receptami przedstawionymi w tablicy 2.17:

- Badanie wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania na próbkach sześciennych 10x10x10 cm według PN–EN 12390–3:2002

- Badanie modułu sprężystości betonu na próbkach walcowych  $d = 15 \text{ cm}$ ,  $h = 30 \text{ cm}$
- Badanie mrozoodporności betonu na próbkach sześciennych  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}$  według Grodzickiej [1999]
- Badanie nasiąkliwości według PN-B-06250:1988
- Badanie wilgotności oraz nasiąkliwości sorpcyjnej według Brussier'a i in. [1990] oraz GOST 12730.4-78 [za Ołdakowską, 2012a]
- Badanie mikrostruktury betonu

Tabela 2.17. Skład mieszanek betonowych [Ołdakowska 2012a, 2014]

Seria	Cement	Rozdrobnione odpady gumowe	Kruszywo naturalne	Woda
	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]
1	300	–	1996	150
2	300	39	1927	146
3	300	78	1854	143
4	300	117	1783	140

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach pielęgnacji przedstawiono w tablicy 2.17. Wyniki uzyskane przez Ołdakowską [2012a, 2014] wskazują na to, iż zwiększający się dodatek odpadu gumowego w betonie w coraz większym stopniu zmniejsza jego wytrzymałość na ściskanie. Na podstawie danych z tablicy 2.18 można stwierdzić że:

- 2% dodatek miazgu gumowego zmniejsza wytrzymałość na ściskanie o 20%
- 4% dodatek miazgu gumowego zmniejsza wytrzymałość o 25%
- 6% dodatek miazgu gumowego zmniejsza wytrzymałość o 33%

Tablica 2.18. Wytrzymałość na ściskanie betonów po 28 dniach pielęgnacji [Ołdakowska 2012a]

	Zawartość rozdrobnionych odpadów gumowych			
	0%	2%	4%	6%
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	36,6	29,4	27,6	24,6
Klasa betonu	C25/30	C20/25	C20/25	C16/20

W tablicy 2.19 przedstawiono wyniki badania modułu sprężystości betonu uzyskane przez Ołdakowską [2014].

Tablica 2.19. Moduły sprężystości badanych betonów [Ołdakowska, 2014]

$E_{cm}$	Zawartość rozdrobnionych odpadów gumowych			
	0%	2%	4%	6%
$E_{cm1}$ [GPa]	37,27	35,02	33,17	27,38
$E_{cm2}$ [GPa]	35,80	33,43	28,88	28,86
$E_{cm3}$ [GPa]	36,43	31,14	30,15	32,01
$E_{cm}$ [GPa]	36,50	33,20	30,73	29,41

Na podstawie powyższych wyników można stwierdzić, że dodatek odpadu gumowego wpływa również na sztywność badanych betonów. Zwiększające się dodatki rozdrobnionych odpadów gumowych prowadziły do coraz większych spadków sztywności betonu:

- 2% dodatek odpadu gumowego powoduje obniżenie modułu sprężystości podłużnej o 6%
- 4% dodatek odpadu gumowego powoduje redukcję modułu sprężystości podłużnej o 8%
- 6% dodatek odpadu gumowego powoduje obniżenie modułu sprężystości podłużnej o 11%

Tabela 2.20. Wyniki badania mrozoodporności betonów [Ołdakowska, 2012a]

Rozdrobnione odpady gumowe	Masa złuszczeń po „n” cyklach [kg/m <sup>3</sup> ]				Mrozoodporność według kryteriów Grodzickiej [1999]
	m <sub>14</sub>	m <sub>28</sub>	m <sub>42</sub>	m <sub>56</sub>	
0%	0,059	0,104	0,122	0,193	Dobra
2%	0,044	0,085	0,105	0,132	Dobra
4%	0,056	0,120	0,143	0,222	Dobra
6%	0,115	0,245	0,289	0,376	Dobra

W tablicy 2.20 [Ołdakowska, 2012a] przedstawiono wyniki badań mrozoodporności betonów bez dodatku odpadu gumowego oraz z 2, 4 i 6% dodatkiem. Wyniki zaprezentowano jako masę złuszczeń powstałych na zamrażanej powierzchni badanych betonów po 14, 28, 42 oraz 56 cyklach zamrażania i odmrażania w temperaturach  $-20^{\circ}\text{C}$  oraz  $+20^{\circ}\text{C}$ . Wyniki wskazują, iż coraz wyższe zawartości dodatku odpadu gumowego wpływają na zwiększanie się powstających złuszczeń. Świadczy to o pogarszaniu mrozoodporności przez zastosowanie odpadów gumowych, jednak mimo to wszystkie z badanych próbek mieszczą się w klasie dobrej mrozoodporności betonów (tablica 2.21 klasy mrozoodporności według Grodzickiej [1999]).

Tablica 2.21. Kryteria oceny mrozoodporności wg Grodzickiej [1999]

Mrozoodporność	Wymagania
Bardzo dobra	Średnia złuszczeń po 56 cyklach ( $m_{56}$ ) jest mniejsza niż 0,10 [kg/m <sup>3</sup> ]
Dobra	Średnia złuszczeń po 56 cyklach ( $m_{56}$ ) jest mniejsza niż 0,20 [kg/m <sup>3</sup> ] Lub Średnia złuszczeń po 56 cyklach ( $m_{56}$ ) jest mniejsza niż 0,50 [kg/m <sup>3</sup> ] Przy czym $m_{56}/m_{28}$ jest mniejsza niż 2 lub Średnia złuszczeń po 112 cyklach ( $m_{112}$ ) jest mniejsza niż 0,50 [kg/m <sup>3</sup> ]
Do przyjęcia	Średnia złuszczeń po 56 cyklach ( $m_{56}$ ) jest mniejsza niż 1,00 [kg/m <sup>3</sup> ] Przy czym $m_{56}/m_{28}$ jest mniejsza niż 2 lub Średnia złuszczeń po 112 cyklach ( $m_{112}$ ) jest mniejsza niż 1,00 [kg/m <sup>3</sup> ]
Nie do przyjęcia	Jeżeli nie są spełnione wymagania mrozoodporności możliwej do przyjęcia

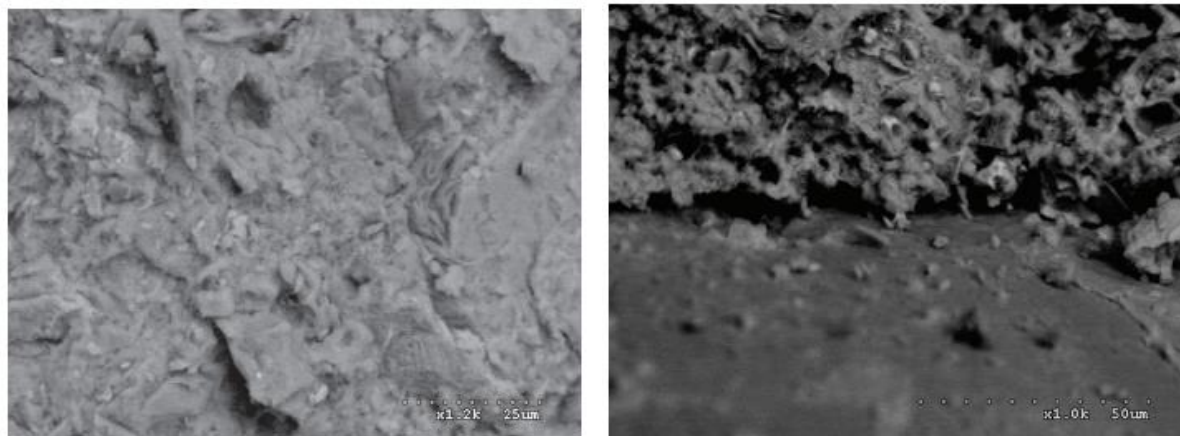
Można w związku z tym stwierdzić, że rozdrobnione odpady gumowe wpływają negatywnie na mrozoodporność badanych betonów, jednak wpływ ten nie powoduje znacznego obniżenia klasy mrozoodporności.

Tablica 2.22. Wyniki badań nasiąkliwości, wilgotności oraz wilgotności sorpcyjnej [Ołdakowska, 2012a]

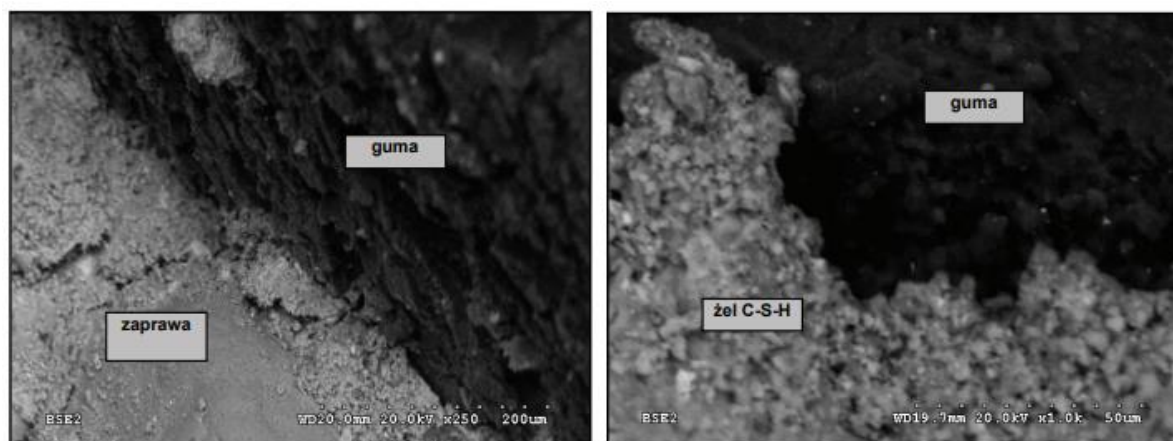
	Zawartość rozdrobnionych odpadów gumowych			
	0%	2%	4%	6%
Nasiąkliwość [%]	5,27	4,55	4,19	3,77
Wilgotność [%]	3,24	3,07	3,03	2,98
Wilgotność sorpcyjna [%]	4,28	3,89	3,81	3,74
Wskaźnik mikroporowatości	0,40	0,41	0,44	0,48

W tablicy 2.22 przedstawiono wyniki badania nasiąkliwości, wilgotności oraz wilgotności sorpcyjnej betonów uzyskane przez Ołdakowską [2012a]. Przedstawione parametry miały posłużyć autorce do określenia wskaźnika mikroporowatości. Wskaźnik mikroporowatości określony zgodnie z GOST 12730.4–78 pozwala na określenie zawartości mezoporów (porów mniejszych od 100 nm) w betonie. Wartości wskaźnika zawierają się w przedziale od 0 do 1; im wyższa wartość wskaźnika mikroporowatości tym zawartość mezoporów w materiale jest wyższa. Zgodnie z Ołdakowską [2012a] dodatki odpadu gumowego wpływają na obniżenie możliwości materiału do pochłaniania wody. Betony bez dodatku odpadów gumowych uzyskały najwyższe wartości nasiąkliwości, wilgotności i wilgotności sorpcyjnej. Wraz ze zwiększaniem się dodatku odpadu gumowego wartości zaprezentowanych parametrów zmniejszały się, uzyskując najniższe wartości przy 6% dodatku odpadu gumowego. Najwyższy 6% dodatek odpadu gumowego pozwolił na obniżenie wartości nasiąkliwości o 8%, wilgotności o 13% oraz wilgotności sorpcyjnej o 28% w porównaniu do betonu bez dodatków odpadu gumowego. Dodatek odpadu gumowego wpłynął również na

wskaźnik mikroporowatości betonu. Coraz wyższe dodatki odpadu powodowały wzrost mikroporowatości. Beton kontrolny (bez dodatku odpadu gumowego) uzyskał wartość wskaźnika równą 0,40; natomiast 6% dodatek uzyskał wskaźnik na poziomie 0,48, co świadczy o 20% wzroście mikroporowatości betonu. W związku z tym można stwierdzić, że dodatki rozdrobnionego odpadu gumowego wpływają na zwiększenie się zawartości mezoporów w betonach.



Rys. 2.16. Widok zaczynu cementowego w betonie kontrolnym przy powiększeniu 1000x oraz 1200x [Ołdakowska 2012a]



Rys. 2.17. Widok zaczynu cementowego w betonie zawierającym odpady gumowe przy powiększeniu 250x oraz 1000x [Ołdakowska, 2012a]

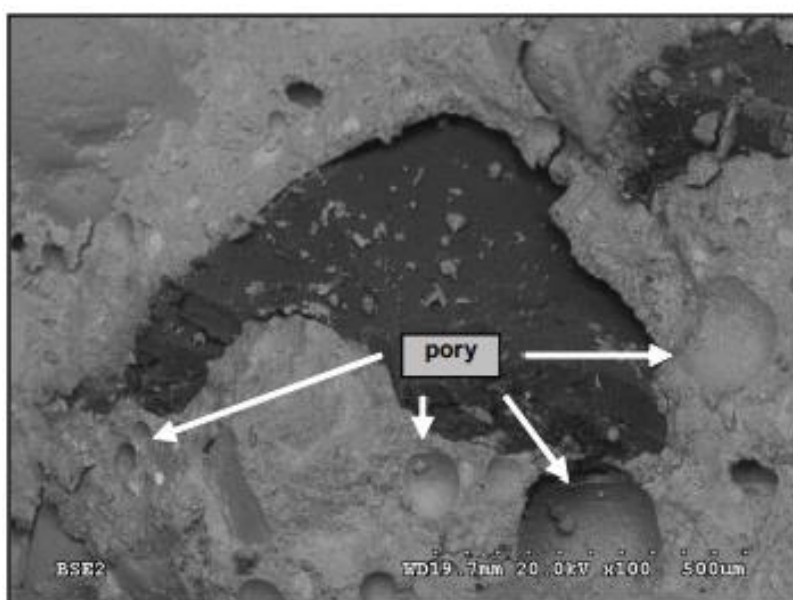
Zaprezentowane przez Ołdakowską [2012a] wyniki badania mikrostruktury betonu świadczą o nieznacznym wpływie odpadu gumowego na powstawanie fazy C–S–H. W obydwu zaprezentowanych przypadkach (Rys. 2.16 oraz 2.17) w głównej mierze występuje typowa zwarta forma fazy C–S–H, o strukturze włóknistej z niewielką ilością pałeczek etringitu. Odpady gumowe mają największy wpływ na mikrostrukturę betonu w strefie kontaktowej zaczyn–guma (Rys. 2.18). W obszarach tych wytwarza się więcej portlandytu niż w przypadku betonów kontrolnych. Jest to spowodowane lokalnie zwiększonym współczynnikiem W/C (odpady gumowe nie absorbują wody).





Rys. 2.18. Strefa kontaktowa guma – zaczyn cementowy [Ołdakowska 2012a]

Dodatkowo, obserwacje mikrostruktury pozwoliły Ołdakowskiej [2012a] potwierdzić wpływ dodatku odpadu gumowego na porowatość betonu. Na rysunku 2.19 przedstawiono obraz porów w strukturze betonów z dodatkiem odpadów gumowych. W przypadku betonu z dodatkiem odpadów gumowych można zaobserwować regularne kuliste pory znajdujące się w zaczynie cementowym. Pory te, zaburzając budowę matrycy cementowej, wpływają na obniżenie jej wytrzymałości, co skutkuje obniżeniem wytrzymałości całego betonu. Jednak porowata budowa może pozytywnie wpłynąć na termoizolacyjność kompozytu.



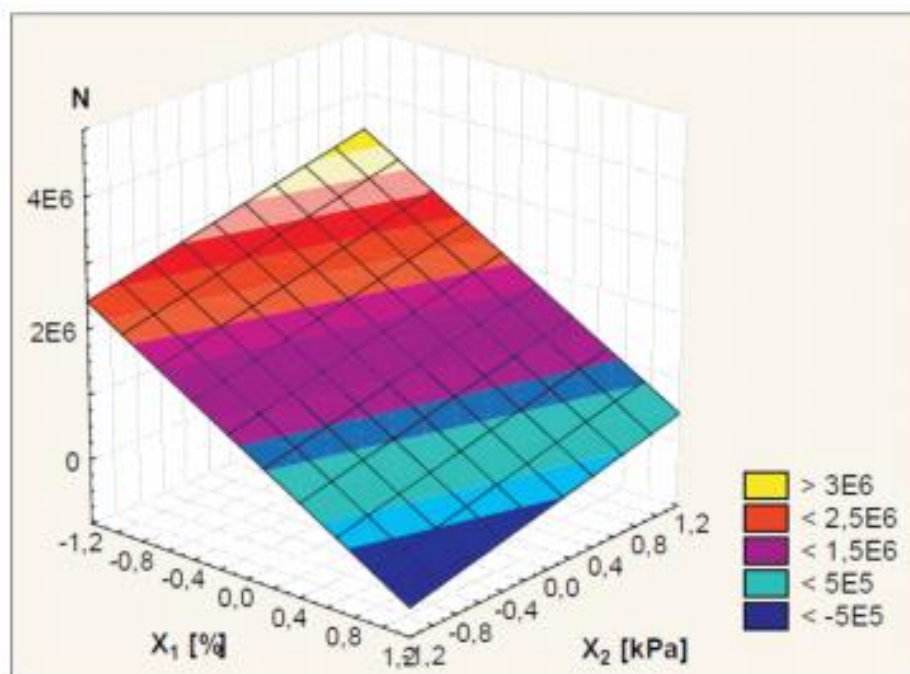
Rys. 2.19. Widok porów w strukturze betonu z rozdrobnionymi odpadami gumowymi, powiększenie 100x [Ołdakowska, 2012a]

W kolejnej pracy Ołdakowska [2012b] prezentuje wyniki dotyczące badania wpływu dodatku odpadów gumowych na trwałość zmęczeniową chudych betonów. W tym celu autorka przygotowała mieszanki betonowe zgodnie z tablicą 2.23.

Tablica 2.23. Składy mieszanek betonowych [Ołdakowska 2012b]

Seria	Cement	Rozdrobnione odpady gumowe	Kruszywo naturalne	Woda
	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]
1	130	–	1970	214
2	130	29	2171	116
3	130	57	2119	114
4	130	85	2067	112

Mieszanki zaprojektowano tak, aby serie 2, 3, 4 zawierały odpady gumowe odpowiadające kolejno 1,3; 2,6 oraz 4% masy zastosowanego kruszywa. Badanie trwałości zmęczeniowej przeprowadzono według EN 12697–24:2003. Wybrano metodę czteropunktowego zginania belki. Do badań przygotowano prostopadłościennne próbki o wymiarach 400x63x50 mm. Próbki po 28 dniach dojrzewania zostały poddane badaniu w maszynie wytrzymałościowej, przy obciążeniu cyklicznym o częstotliwości 10 Hz, przykładanie siły odbywało się przy stałych wartościach amplitudy naprężenia. Badanie prowadzone było do zniszczenia próbek. Wyniki badania przedstawiono na rysunku 2.20.



Rys. 2.20. Zależność trwałości zmęczeniowej od zawartości odpadów gumowych oraz wielkości amplitudy przykładanego naprężenia [Ołdakowska, 2012b]

Według Ołdakowskiej [2012b] występuje związek pomiędzy dodatkiem odpadów gumowych a liczbą cykli koniecznych do powstania spękań zmęczeniowych. Odpady gumowe pozwalają zwiększyć trwałość zmęczeniową badanych chudych betonów. Im wyższy dodatek odpadu gumowego tym większą liczbę cykli obciążenia należy przyłożyć aby zniszczyć materiał. Oznacza to, że odpady gumowe zastosowane nawet w sztywnej matrycy cementowej, powodują poprawę jej odkształcalności oraz zmniejszają jej sztywność.

Podsumowując dane zaprezentowane w pracach Skawińskiej [2019] i Ołdakowskiej [2012a; 2012b; 2014; 2015] można stwierdzić, że w przypadku wyników przedstawionych przez obie autorki uzyskujemy porównywalną tendencję wpływu odpadów gumowych na zachowanie matryc cementowych czy też betonów stosowanych w budownictwie. Zastosowanie odpadów gumowych skutkowało obniżeniem wytrzymałości na ściskanie badanych materiałów. Obniżenie wytrzymałości na ściskanie badanych materiałów było tym wyższe, im więcej odpadu gumowego zastosowano. Jednak spadki wytrzymałości na ściskanie nie były spowodowane wpływem odpadów gumowych na jakość reakcji chemicznych zachodzących w czasie wiązania betonu, ponieważ badania mikrostruktury nie wykazały ich wpływu na budowanie fazy C–S–H. Zauważalny był jedynie niewielki przyrost zawartości kryształów portlandytu, świadczący o lokalnie wyższych stosunkach W/C, niż te projektowane dla mieszanki oraz większe ilości otwartych kulistych porów w strukturze próbek. Można stąd wnioskować, iż obniżenie się wytrzymałości na ściskanie badanych materiałów było spowodowane wprowadzeniem do zaprawy cementowej lub mieszanki betonowej materiału o znacznie niższej sztywności niż pozostałe ich składniki. Spowodowało to uzyskanie kompozytu o niższej wytrzymałości, wyższej odkształcalności, a w efekcie tego, o obniżonej sztywności, w stosunku do kontrolnych badań. Obniżenie sztywności pozwoliło również uzyskać wyższą trwałość zmęczeniową materiału, w którym zastosowano odpad gumowy oraz jak wskazuje Ołdakowska [2012b], zmienić mechanikę zniszczenia materiału. Mianowicie w przypadku klasycznych betonów czy zapraw cementowych mamy do czynienia z gwałtownym wytracaniem wytrzymałości badanego materiału wraz z pojawieniem się jego zarysowań. W przypadku obiektów badawczych, w których zastosowano odpady gumowe, wytracanie wytrzymałości postępowało znacznie łagodniej, pozwalając materiałowi zachowywać wyższe wytrzymałości przy znacznie wyższych odkształceniach próbki. W pracy Ołdakowskiej [2012a] wskazano również na wpływ dodatków odpadów gumowych na mrozoodporność badanych materiałów. Odpad gumowy powoduje pogorszenie mrozoodporności, jednak wpływ ten jest na tyle niewielki, iż nie powoduje zmiany klasy mrozoodporności próbek.

W pracy Ołdakowskiej [2012a] przedstawiono również wpływ zastosowania odpadów gumowych na obniżenie się nasiąkliwości, wilgotności oraz wilgotności sorpcyjnej badanych materiałów. Pozwala to stwierdzić, że dodatki odpadów gumowych, które nie chłoną wody w temperaturze poniżej 100°C, mogą pomóc zmniejszyć zdolność betonów do pochłaniania wody z otoczenia. W związku z tym betony tego typu mogą lepiej pracować w silnie zawilgoconym środowisku. Ołdakowska [2012a] stwierdziła również, że dodatek odpadów

gumowych wpływa na zwiększenie porowatości mikrostruktury badanych obiektów, co może przełożyć się na poprawę ich parametrów termoizolacyjnych.

Na podstawie przedstawionych danych można stwierdzić, że zastosowanie odpadów gumowych w zaprawach cementowych lub betonach wpływa na:

- Obniżenie wytrzymałości na ściskanie
- Zwiększenie odkształcalności
- Zmniejszenie sztywności
- Zwiększenie trwałości zmęczeniowej
- Złagodzenie gwałtownej charakterystyki zniszczenia, pozwalając utrzymywać wysokie naprężenia przy dużych deformacjach
- Zmniejszenie zdolności do pochłaniania wilgotności z otoczenia
- Zwiększenie porowatości

#### 2.4.4 Wpływ odpadów gumowych na mieszanki związane spoiwem – doświadczenia zagraniczne

Wpływ zastosowania rozdrobnionych odpadów gumowych na parametry fizyko-mechaniczne mieszanek związanych spoiwem, a dokładniej betonów oraz zapraw cementowych, został między innymi poruszony w pracach Liu i in. [2016], Bušić i in. [2020] oraz Hadzima–Nyarko i in. [2019]. Autorzy przeprowadzili między innymi badania wpływu rozdrobnionych odpadów gumowych na wytrzymałość na ściskanie oraz moduł sprężystości badanych betonów. W pracy Liu i in. [2016] autorzy dokonali testów na próbkach betonów, w których dokonali zastąpienia od 5 do 20% objętości drobnego kruszywa oraz na próbkach, w których zastąpiono od 1 do 10% całości mieszanki rozdrobnionymi odpadami gumowymi o uziarnieniu 0–4 mm. Bušić i in., [2020] badał betony, w których rozdrobnionymi odpadami gumowymi zastąpiono drobne kruszywo w ilości od 5 do 30% objętości. W tabelicy 2.24 przedstawiono wartości badanych parametrów, jakie w swoich pracach uzyskali autorzy.

Tablica 2.24. Wartości wytrzymałości na ściskanie oraz modułu sprężystości uzyskane przez autorów w pracach [Liu i in., 2016; Bušić i in., 2020]

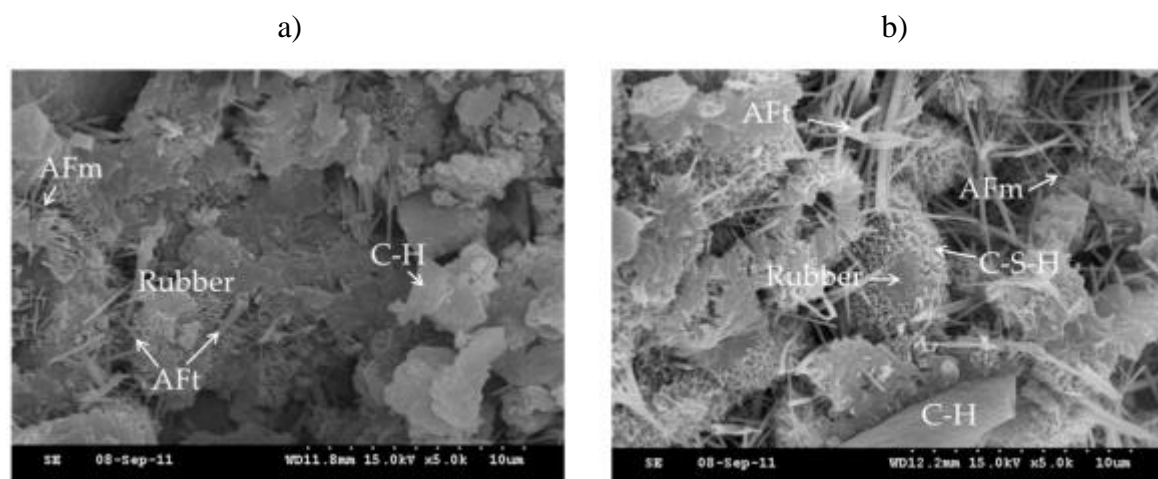
Liu i in. [2016]						Bušić i in. [2020]		
Procent zastąpienia kruszywa [%]	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	Moduł sprężystości [GPa]	Procent zastąpienia mieszanki [%]	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	Moduł sprężystości [GPa]	Procent zastąpienia kruszywa [%]	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	Moduł sprężystości [GPa]
0	34,76	31,75	0	34,76	31,75	0	43,72	38,58
5	34,52	29,6	1	31,60	29,22	5	39,04	34,89
10	34,19	27,88	3	29,99	21,88	10	30,88	32,92
15	33,82	26,71	5	25,38	17,74	15	28,04	28,3
20	33,41	24,73	10	19,33	13,42	20	22,76	22,3
–	–	–	–	–	–	25	13,28	16,5
–	–	–	–	–	–	30	12,71	14,99

W przypadku obu zaprezentowanych prac autorzy jednomyślnie stwierdzili wpływ zwiększającej się zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych na zmniejszanie się wytrzymałości na ściskanie. Wpływ ten jest liniowy, powoduje bardzo zbliżone spadki wytrzymałości na każde 5% zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych. Dodatkowo Liu i in. [2016] stwierdzili, iż zastosowanie rozdrobnionych odpadów gumowych jako procentowe zastąpienie całej mieszanki betonowej powoduje większy spadek wytrzymałości niż zastąpienie objętości drobnego kruszywa. Wy tłumaczyli to zmniejszeniem się zawartości cementu w mieszance betonowej, spowodowane takim sposobem dozowania dodatku.

Pomiar wartości modułu sprężystości wykazał analogiczną zależność, jak w przypadku pomiaru wytrzymałości na ściskanie. To znaczy, iż wraz ze wzrostem zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych uzyskana wartość modułu sprężystości malała. Wpływ zaobserwowany przez autorów [Liu i in., 2016; Buśić i in., 2020] miał charakter liniowy oraz w przypadku zastąpienia dodatkiem procentu mieszanki betonowej uzyskane spadki były znacznie większe niż w przypadku zastąpienia objętości drobnego kruszywa.

Autorzy Chen i Lee [2019] oraz Petrella i Notarnicola [2021] przeprowadzili również badania nad wpływem zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych na właściwości fizyko–mechaniczne zapraw cementowych. W pracy Chen i Lee [2019] autorzy przeprowadzili badania wpływu 5% dodatku rozdrobnionych odpadów gumowych „świeżych” oraz 5% dodatku odpadów kondycjonowanych w temperaturze 200–250°C w otoczeniu tlenu oraz azotu. Badania przedstawione w pracy obejmowały badanie wytrzymałości po 7, 14, 28 oraz 56 dniach pielęgnacji próbek oraz obrazowanie mikrostruktury stwardniałej zaprawy pod kątem formowania się fazy C–S–H.

Na rysunku 2.21 przedstawiono uzyskane przez autorów obrazy mikrostruktury stwardniałej zaprawy (w powiększeniu 5000x), zawierającej dodatek „świeżych” odpadów gumowych (a) oraz odpadów kondycjonowanych (b).

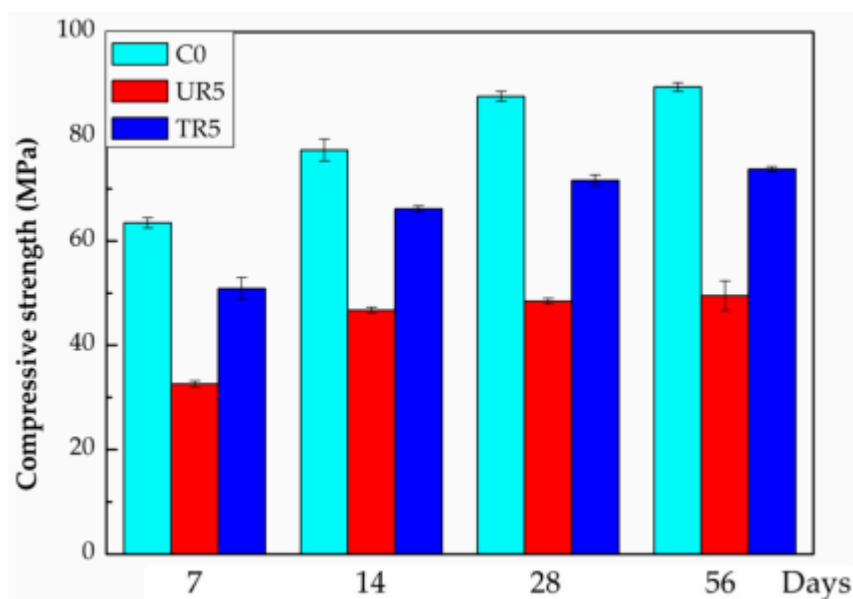


Rys. 2.21. Obrazy mikrostruktury stwardniałej zaprawy cementowej a) z dodatkiem „świeżych” odpadów gumowych; b) z dodatkiem kondycjonowanych odpadów gumowych [Chen i Lee, 2019]



Według Chen i Lee [2019] zastosowanie odpadów gumowych powoduje zmniejszenie się zawartości fazy C–S–H w mikrostrukturze stwardniałej zaprawy w porównaniu do zapraw niezawierających w sobie tych dodatków. Jednak w przypadku odpadów kondycjonowanych zawartość fazy C–S–H jest wyższa niż w przypadku odpadów świeżych. Spowodowane jest to wpływem utleniania odpadów gumowych na ich hydrofilowość, która w efekcie powoduje lepszą współpracę pomiędzy zaprawą cementową a cząsteczkami gumy, które skutkuje poprawą warunków formowania się fazy C–S–H.

Na rysunku 2.22 przedstawiono wyniki badania wytrzymałości na ściskanie jakie autorzy uzyskali w swojej pracy [Chen i Lee, 2019].



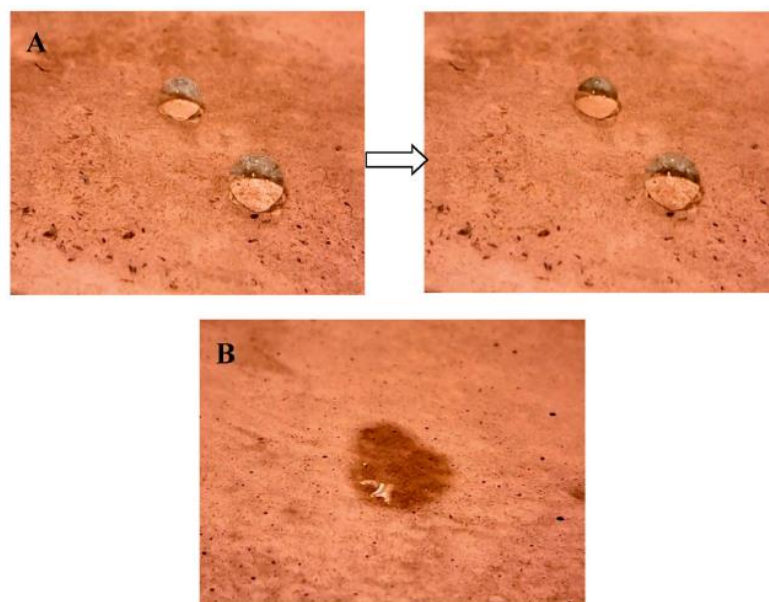
Rys. 2.22. Wartości wytrzymałości na ściskanie próbek w różnych okresach pielęgnacji [Chen i Lee, 2019]

Jak można zauważyć zastosowanie rozdrobnionych odpadów gumowych powoduje obniżenie się wytrzymałości na ściskanie w każdym z przedstawionych okresów pielęgnacji. Jednak w przypadku kondycjonowanych odpadów gumowych spadek ten jest znacznie mniejszy niż w przypadku zastosowania odpadów „świeżych”. Wskazuje to na poprawę właściwości mechanicznych takich zapraw, spowodowane zwiększeniem się hydrofilowości kondycjonowanego odpadu gumowego pozwalającego na powstawanie większych ilości faz C–S–H w strukturze związanej zaprawy.

W swojej pracy Petrella i Notarnicola [2021] skupiają się głównie na badaniu wpływu odpadów gumowych o różnym uziarnieniu (drobne 0–2mm oraz grube 2–4mm) w różnych stosunkach objętościowych na budowę mikrostruktury stwardniałej zaprawy cementowej oraz jej wytrzymałość na ściskanie. Dochodzą oni do analogicznych wniosków, jak w przypadku pracy Chen i Lee, [2019], że dodatki odpadów powodują zmniejszenie się zawartości fazy C–S–H w mikrostrukturze materiału oraz że wraz ze wzrostem zawartości dodatków wytrzymałość na ściskanie zapraw maleje. W swojej pracy autorzy przedstawili jednak jeszcze dodatkową analizę testu kropli umieszczonej na powierzchni próbek kontrolnych (b) (nie



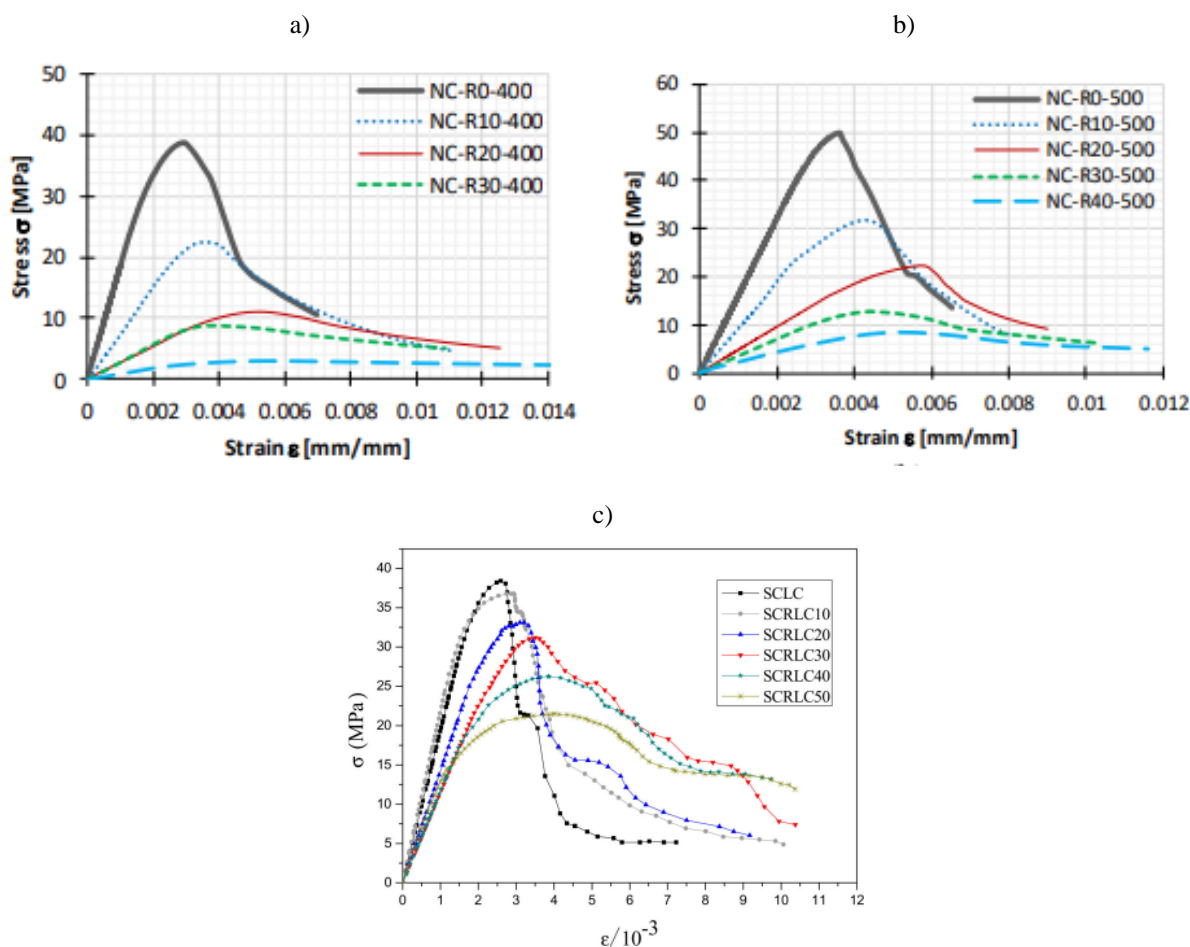
zawierających dodatków odpadów gumowych) oraz próbek zawierających w sobie dodatki drobnych odpadów gumowych (a). Wyniki badania przedstawiono na rysunku 2.23.



Rys. 2.23. Wynik testu kropli: a) kropla umieszczona na próbce zawierającej dodatki drobnych odpadów gumowych, w momencie nałożenia na próbkę (grafika z lewej) oraz po 150 sekundach (grafika z prawej); b) kropla umieszczona na próbce kontrolnej (po 1 sekundzie) [Petrella i Notarnicola, 2021]

Jak można zauważyć na rysunku 2.23 zastosowanie rozdrobnionych odpadów gumowych pozwala na zwiększenie hydrofobowości materiału, co skutkuje zwiększeniem się kąta zwilżenia na jego powierzchni. W efekcie tych zjawisk materiał, w którym zastosowano dodatki odpadów będzie wykazywał większą odporność na przejmowanie wilgoci z otoczenia.

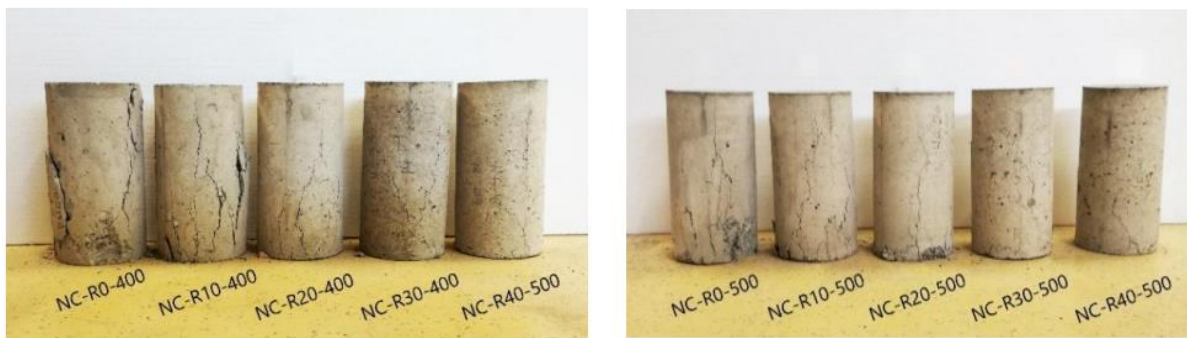
W literaturze zagranicznej znalazły się również badania dotyczące wpływu zastosowania dodatków rozdrobnionych odpadów gumowych do betonów na zależność naprężenie–odkształcenie przy ściskaniu. Badania te przedstawiono w pracy Strukar'a i in. [2018] oraz serii prac Lv'a i in. [2019a, 2019b, 2020], w których autorzy prowadzili badania nad lekkim betonem samozagęszczalnym. W pracy Strukar'a i in. [2018] autorzy badali betony o zawartości cementu wynoszącej 400 oraz 500 kg na m<sup>3</sup> mieszanki betonowej i zawartościach rozdrobnionych odpadów gumowych (o uziarnieniu 0–4mm) od 0 do 40% zastępujących drobne kruszywo o tym samym uziarnieniu przy kroku dozowania dodatku 10%. W pracy Lv'a i in. [2019a, 2019b, 2020] autorzy prowadzą badania na betonach o stałej zawartości cementu równej 425 kg/m<sup>3</sup> oraz zawierających w sobie od 0 do 50% dodatku rozdrobnionych odpadów gumowych (o uziarnieniu 0–4 mm) zastępującego drobne kruszywo o tym samym uziarnieniu, przy kroku dozowania dodatku 10%. W wyżej wymienionych pracach autorzy zastępowali drobne kruszywo dodatkami rozdrobnionych odpadów gumowych w stosunku objętościowym. Na rysunku 2.24 przedstawiono uzyskane przez autorów zależności naprężenie–odkształcenie dla badanych próbek.



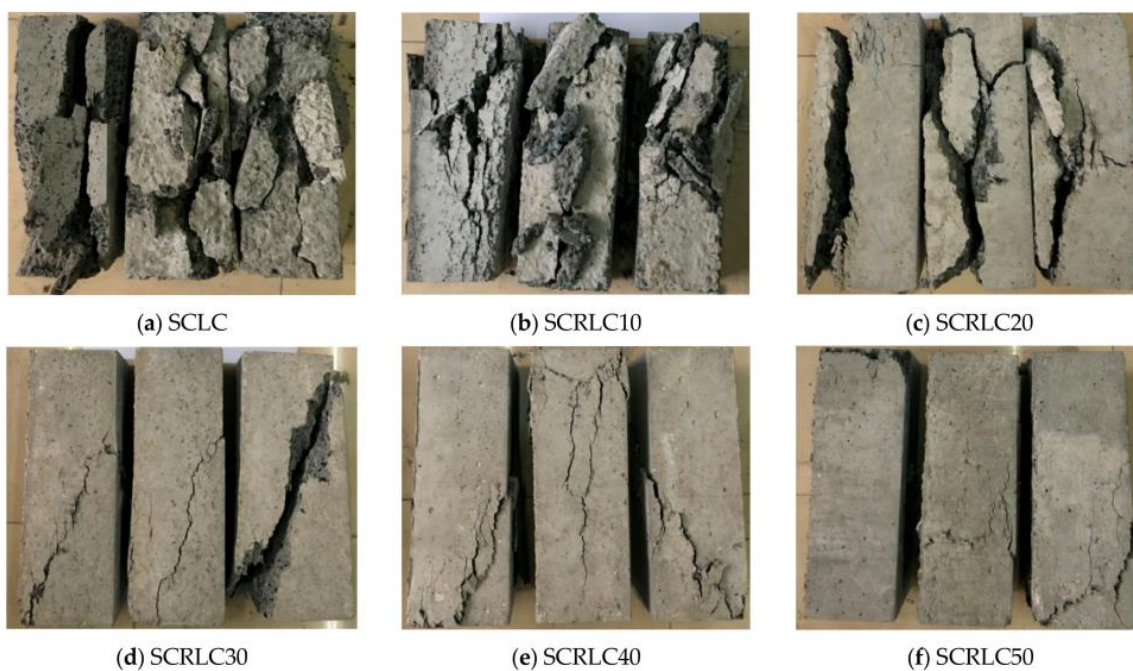
Rys. 2.24. Wykresy zależności naprężenie–odkształcenie uzyskane przez autorów analizowanych prac:  
 a) dla próbek o zawartości cementu  $400 \text{ kg/m}^3$ ; b) dla próbek o zawartości cementu  $500 \text{ kg/m}^3$  [Strukar, 2018];  
 c) dla próbek o zawartości cementu równej  $425 \text{ kg/m}^3$  [Lv i in., 2019b]

Jak wynika z rysunku 2.24 w przypadku prac obu autorów, niezależnie od zawartości cementu obserwujemy podobną zależność. Zastosowanie dodatku rozdrobnionych odpadów gumowych powoduje spadek naprężeń oraz zwiększa wartości uzyskanych odkształceń. Wpływ ten jest tym większy, im większą zastosowano zawartość dodatku rozdrobnionych odpadów gumowych. Poza wpływem na same wartości naprężeń i odkształceń, zawartość rozdrobnionych odpadów gumowych wykazała również wpływ na sposób zniszczenia badanych próbek. Wraz ze wzrostem zawartości dodatku próbki wykazywały coraz łagodniejszy spadek wartości odkształceń po osiągnięciu ich maksymalnej wartości, co w efekcie skutkowało pojawieniem się zwiększającej się (wraz ze wzrostem udziału dodatku) strefy płynięcia materiału w obszarze naprężeń krytycznych. Autorzy zauważyli to zjawisko również na podstawie obserwacji próbek po wykonaniu badania wytrzymałościowego. Próbki o większej zawartości dodatków rozdrobnionych odpadów gumowych wykazywały na swojej powierzchni większą ilość zarysowań o sieciowym rozłożeniu, jednak o mniejszej szerokości zarysowania niż w przypadku próbek kontrolnych. Dodatkowo zachowywały one zwartą strukturę po wykonaniu badania oraz nie prezentowały tak dużej ilości wykruszeń dużych fragmentów próbki, jak w przypadku próbek kontrolnych. Obserwacje zarejestrowane przez autorów przedstawiono na rysunku 2.25.

a)



b)



Rys. 2.25. Zdjęcia próbek po badaniu wytrzymałościowym: a) pochodzące z pracy Strukar i in. [2018];  
b) pochodzące z pracy Lv i in. [2019b]

Fang i in. [2021] oraz Mhaya i in. [2021] badali wpływ dodatków rozdrobnionych odpadów gumowych na trwałość betonu w środowisku agresywnym. W pracy Fang'a i in. [2021] autorzy skupili się na wpływie dodatków rozdrobnionych odpadów gumowych oraz Nano-SiO<sub>2</sub> na zawartość i strukturę porów w betonie kondycjonowanym w warunkach zamrażania i rozmrażania. Badania były przeprowadzone na betonie o składzie (kg/m<sup>3</sup>):

- Cement 461 kg
- Popiół lotny 51 kg
- Piasek 586 kg
- Kruszywo 1087 kg
- Woda 215 kg
- Plastyfikator 0,4 kg

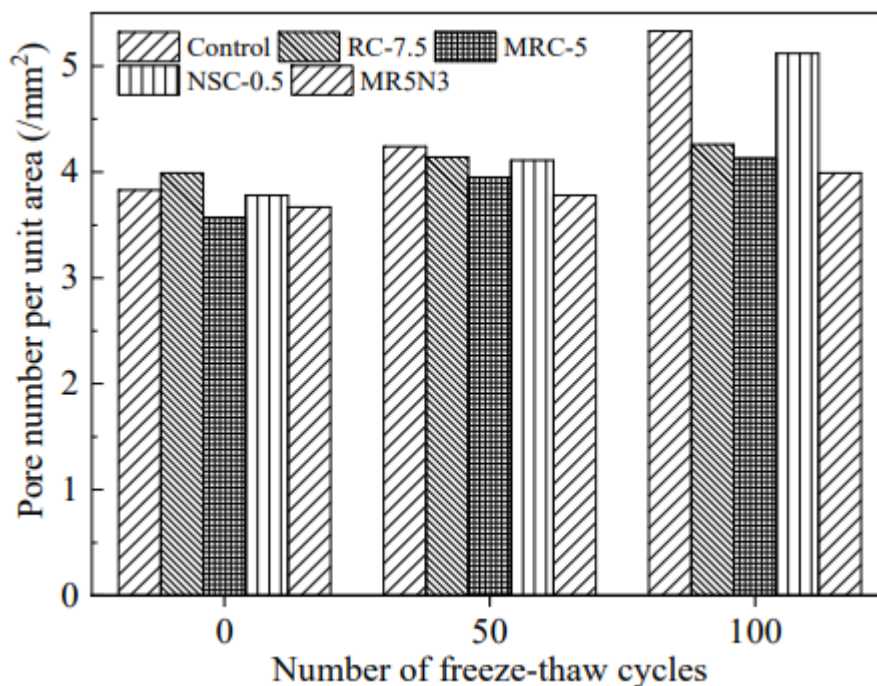
W tabelicy 2.25 przedstawiono udziały zastosowanych przez autorów dodatków do betonu.

Tabelica 2.25. Zawartości zastosowanych dodatków w badanych przez Fang'a i in. [2021] mieszankach

Mieszanka	Nano-SiO <sub>2</sub> [% w stosunku do zawartości cementu]	Odpady gumowe [% w stosunku do zawartości cementu]	Silanizowane* odpady gumowe [% w stosunku do zawartości cementu]
NSC-0,5	0,5%	–	–
RC-5	–	5%	–
RC-7,5	–	7,5%	–
MRC-5	–	–	5%
MRCN0,5	0,5%	–	5%
MR5N3	3%	–	5%

\*Silanizowane – powierzchniowo pokryte cząsteczkami alkoksylinaów organofunkcyjnych, tworzy łącznie kowalencyjne -Si-O-Si-

Na próbkach betonowych przygotowanych zgodnie z powyższymi wytycznymi zostało przeprowadzone kondycjonowanie w czasie 100 cykli zamrażania i odmrażania próbek. Tak przechowywane próbki zostały poddane analizie pod kątem zawartości porów w ich strukturze, po odpowiedniej liczbie cykli kondycjonowania. Wyniki badania zarejestrowane przez autorów przedstawiono na rysunku 2.26.



Rys. 2.26. Zawartość porów w strukturze betonu [Fang i in., 2021]

Autorzy dokonali kontroli zawartości porów przed rozpoczęciem cyklu kondycjonowania próbek, po 50 oraz po 100 cyklach. Najwyższe przyrosty zawartości porów



pod wpływem kondycjonowania próbek stwierdzono w przypadku próbek kontrolnych oraz próbek zawierających w swoim składzie jedynie dodatek nano-SiO<sub>2</sub>. Próbki, w których zastosowano dodatki odpadów gumowych w każdym z przypadków wykazały się podwyższoną mrozoodpornością, która uwidacznia się poprzez najmniejsze przyrosty zawartości porów.

Na podstawie przedstawionych danych można stwierdzić, iż zastosowanie odpadów gumowych w zaprawach cementowych lub betonach wpływa na:

- Obniżenie wytrzymałości na ściskanie
- Zwiększenie odkształcalności
- Zmniejszenie sztywności
- Złagodzenie gwałtownej charakterystyki zniszczenia, pozwalając utrzymywać wysokie naprężenia przy dużych deformacjach
- Zmniejszenie zdolności do pochłaniania wilgoci z otoczenia
- Zwiększenie mrozoodporności

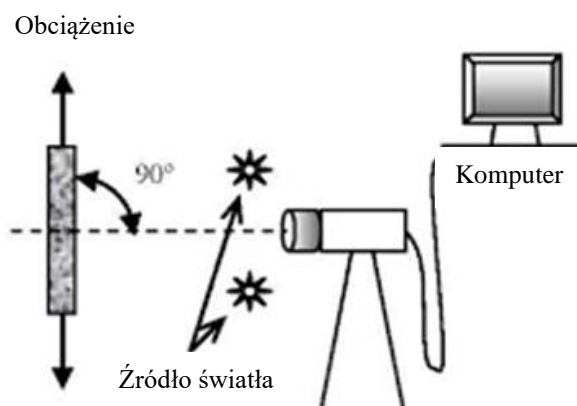
## 2.5 System pomiarowy DIC ARAMIS 3D

Systemy DIC (Digital Image Correlation) pozwalają na bardzo dokładne pomiary odkształceń powierzchni badanych obiektów. W niniejszej pracy został wykorzystany system pomiarowy DIC ARAMIS 3D firmy GOM.

Systemy pomiarowe ARAMIS występują w dwóch wersjach [GOM.com/pl]:

- ARAMIS 2D
- ARAMIS 3D

System ARAMIS 2D jest planimetrycznym systemem DIC (Rys. 2.27). System ten składa się z pojedynczej kamery cyfrowej, źródła światła oraz jednostki obliczeniowej (komputer przenośny) wraz z dołączonym oprogramowaniem, służącym do analizy otrzymanego obrazu wideo.



Rys. 2.27. Schemat działania ARAMIS 2D  
[what-when-how.org]

Ze względu na swoją dwuwymiarową charakterystykę pracy, za pomocą systemu ARAMIS 2D można odczytać deformacje zachodzące na powierzchni próbki, jednak aby to osiągnąć należy zastosować szablon, na podstawie którego zadamy oprogramowaniu rząd mierzonych wartości. Można tego dokonać, np. poprzez przyłożenie szablonu pomiarowego w ogniskowej badanego elementu i zadanie oprogramowaniu wartości odległości mierzonych na ekranie. Brak pomiaru głębi w systemie 2D powoduje znaczące problemy przy badaniach elementów o zakrzywionej powierzchni. W przypadku badania takich elementów każde odsunięcie głębi pomiaru od ogniskowej skutkuje znacznymi rozrzutami w uzyskanych wynikach. Ze względu na powyższe cechy systemy pomiarowe 2D są przydatne w przypadku badania obiektów płaskich o niedużym stopniu skomplikowania [GOM.com/pl; Sutton i in., 2008, 2009; Hoult i in., 2013; Blaber i in., 2015].



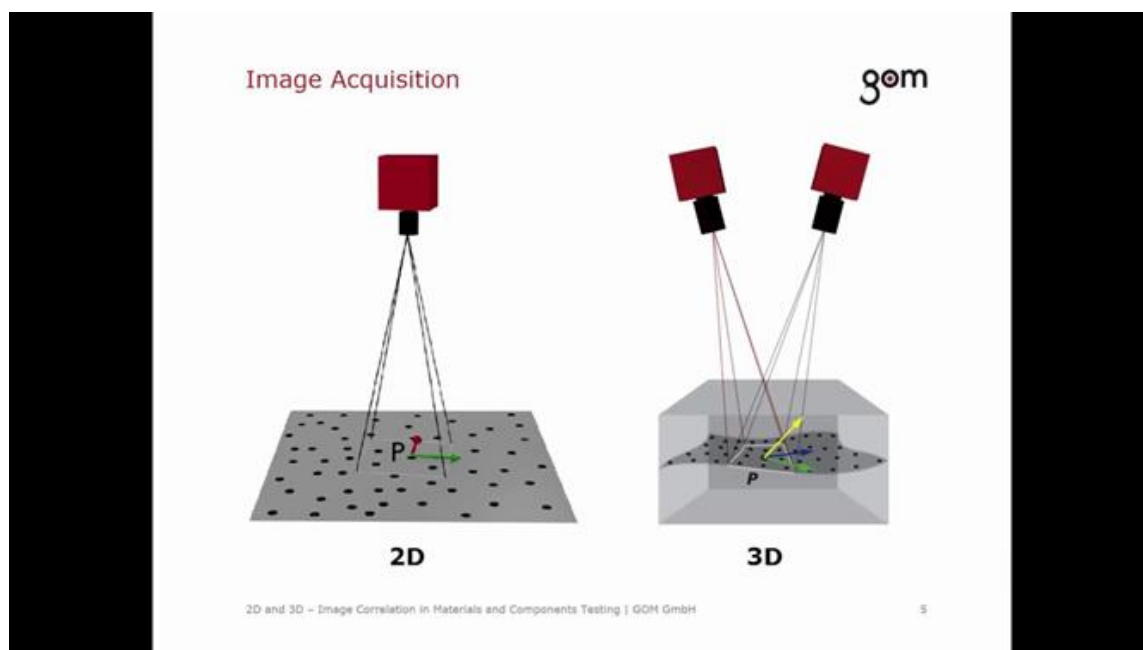
Rys. 2.28. System pomiarowy ARAMIS 3D [fot. własna]

System ARAMIS 3D (Rys. 2.28) jest zbudowany z dwóch kamer cyfrowych o wysokiej rozdzielczości, belki (HUB), źródła światła niebieskiego oraz jednostki obliczeniowej (komputer przenośny). Belki (HUB) pozwalają na komunikację pomiędzy kamerami i jednostką obliczeniową oraz zapewniają uzyskanie odpowiedniej ogniskowej kamer. Źródło światła niebieskiego doświetla badany obiekt, poprawiając dokładność pomiarów. Jednostka obliczeniowa wyposażona w odpowiednie oprogramowanie umożliwia przeprowadzanie analizy i obliczeń na podstawie danych pomiarowych (z prasy wytrzymałościowej) oraz zarejestrowanego materiału video [GOM.com/pl].

Ze względu na zestawienie ze sobą dwóch kamer skierowanych na wspólną ogniskową, system pomiarowy zapisuje widziany obraz jako obraz trójwymiarowy. To zaś pozwala, po

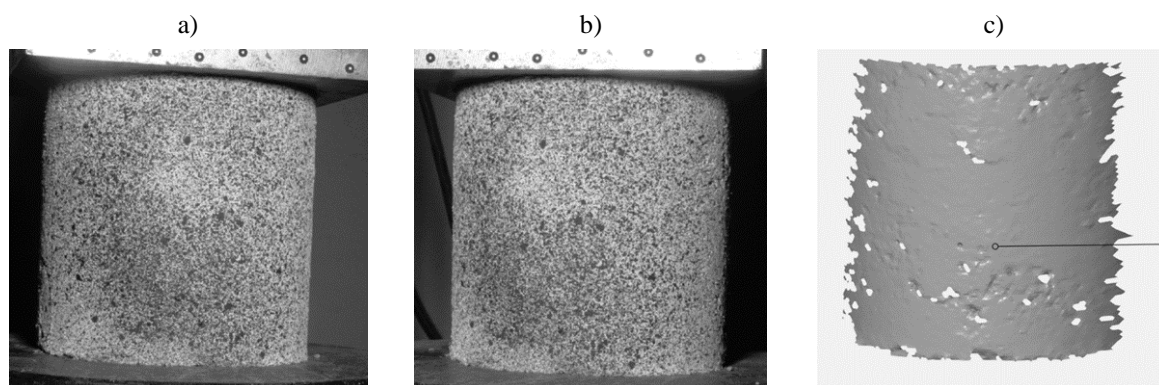


kalibracji urządzenia, na wykonywanie automatycznych pomiarów, w których system ARAMIS jest w stanie samodzielnie odczytywać rzeczywiste wielkości badanych obiektów. Obszar pomiarowy, który jest obejmowany przez kamery jest zależny od rozstawu oraz kąta skierowania kamer zastosowanej belki pomiarowej (HUB'a). Wraz ze wzrostem gabarytów badanego obiektu konieczne jest w związku z tym zastosowanie coraz to większych belek pomiarowych.



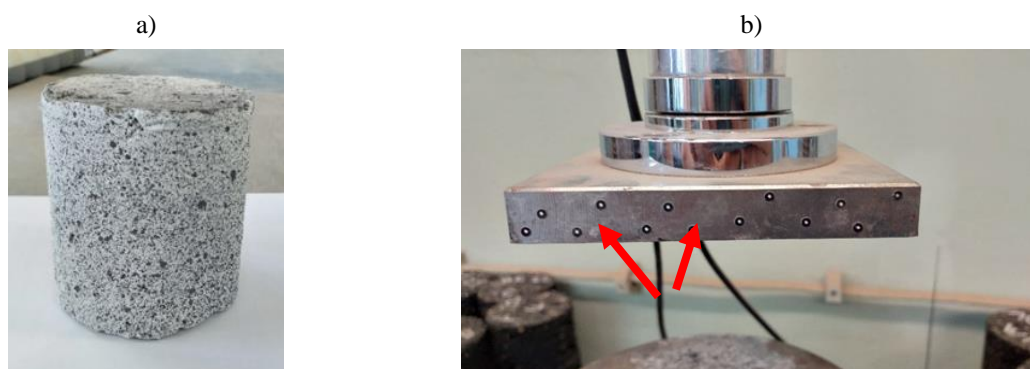
Rys. 2.29. Schemat pozyskiwania obrazu przez ARAMIS 2D oraz ARAMIS 3D [GOM.com/pl]

System pomiarowy ARAMIS 3D (Rys. 2.28) wykonuje serię zdjęć poklatkowych badanego obiektu. Na bazie zdjęć wykonanych za pomocą kamer o wspólnej ogniskowej, przy wykorzystaniu oprogramowania namierza się oraz identyfikuje punkty na podstawie skali szarości. Punkty identyfikowane są na każdym z kolejnych zdjęć oraz nadawane im są położenia z dokładnością do subpikseli. Następnie na podstawie triangulacji, obliczane jest położenie poszczególnych punktów w trójwymiarowej przestrzeni, dzięki nałożeniu na siebie obrazu z obu kamer. W ten sposób można zbudować trójwymiarowy model powierzchni badanego obiektu (Rys. 2.30), na podstawie którego za pomocą oprogramowania możemy określić, wywołane obciążeniem, przemieszczenia punktów w trójwymiarowym układzie współrzędnych oraz ich prędkości i przyspieszenia. Dodatkowo za pomocą oprogramowania można kontrolować odkształcenia powierzchni badanego obiektu tworząc mapę odkształceń głównych lub pomniejszych [GOM.com/pl; Schreier i Sutton, 2002; Sutton i in., 2008, 2009; McCormick i Lord, 2010; Tang i in., 2012; Bossuyt, 2013; Pan, 2018].



Rys. 2.30. Wyniki pomiarów za pomocą systemu ARAMIS 3D a) obraz z kamery lewej; b) obraz z kamery prawej; c) model 3D zbudowany na podstawie obrazów z kamer [fot. własne]

System pomiarowy ARAMIS 3D określa położenie punktów na powierzchni próbki na podstawie odczytu skali szarości powierzchni. Aby było to możliwe, powierzchnia próbki musi być przygotowana w odpowiedni sposób. Na rysunku 2.31a przedstawiono próbkę przygotowaną do badania. Powierzchnia próbki powinna wstępnie zostać pokryta białą matową farbą, w celu uzyskania kontrastującego oraz antyrefleksyjnego tła. Następnie na tak przygotowaną powierzchnię próbki należy naprowadzić gradient w postaci czarnych plamek. Plamki powinny być rozmieszczone równomiernie na powierzchni próbki. Powierzchnia czarnych plamek powinna zakrywać powierzchnię porównywalną z powierzchnią białego wymalowania. Wielkość oraz gęstość plamek jest uzależniona od wielkości obszaru pomiarowego. W przypadku pomiarów deformacji małych obiektów przygotowany gradient powinien składać się z bardzo drobnych i gęsto rozmieszczonych plamek. Powierzchnia dużych obiektów powinna być pokryta plamkami większymi, o większym rozrzedzeniu. W przypadku pomiarów odkształceń lub przesunięcia elementów stałych, takich jak np. przystawki pras lub tłoki, powinno się je oznaczyć za pomocą specjalnych punktów pomiarowych, takich jak te pokazane na rysunku 2.31b. Podobnie, jak w przypadku plamistego gradientu, na powierzchni próbek wielkość zastosowanych punktów pomiarowych będzie uzależniona od wielkości badanego obiektu [GOM.com/pl].



Rys. 2.31. Przygotowania do pomiarów za pomocą systemu ARAMIS 3D a) powierzchnia próbki przygotowana do badania; b) punkty pomiarowe na przystawce do ściskania próbek walcowych [fot. własne]



Rys. 2.32. Stanowisko systemu pomiarowego ARAMIS 3D przygotowane do badań [fot. własna]

Na rysunku 2.32 przedstawiono stanowisko systemu pomiarowego ARAMIS 3D, przygotowane do badań. Stanowisko składało się z:

- Jednostki obliczeniowej (komputer przenośny) z zainstalowanym oprogramowaniem GOM Correlate Professional 2020
- Statywu
- Maszyny wytrzymałościowej Humboldt HM-3000, o maksymalnym obciążeniu równym 50 kN, maksymalnej prędkości przesuwu tłoka 70 mm/min. Maszyna wytrzymałościowa została połączona z jednostką obliczeniową w celu odczytywania oraz zapisywania sił oraz deformacji oddziaływujących na próbkę
- HUB'a 150 mm z dwiema kamerami cyfrowymi, o ogniskowej 350 mm oraz obszarze badawczym 150x120x90 mm
- Źródła światła niebieskiego doświetlającego badany obiekt

System pomiarowy ARAMIS 3D był wykorzystany przy badaniu obciążenia cyklicznego zawartym w etapie „2”. System zastosowano w celu obserwacji i opisu wpływu zmiennej zawartości dodatku rozdrobnionych odpadów gumowych na sztywność oraz odkształcalność badanych mieszanek.

Historia zastosowań systemów pomiarowych wykorzystujących cyfrową korelację obrazu DIC sięga lat 80-tych XX wieku. Początkowo, ze względu na brak odpowiedniej technologii, systemy te opierały się na analizie 2D, która pozwalała głównie na dokonywanie pomiarów na płaskich obiektach. Pomimo początkowych ograniczeń w wykorzystaniu technologii DIC, wysoka dokładność pomiarów oraz wygoda w ich stosowaniu, wynikająca z możliwości dowolnego dostosowywania pomiaru na zarejestrowanym nagraniu badania sprawiły, iż znalazły one na stałe swoje miejsce jako narzędzie pomiarowe w badaniach laboratoryjnych [Peters i Ranson, 1982; Sutton i in., 1983; He i in., 1984; Peters i in., 1984].

Wraz z rozwojem poziomu technologii komputerowych (wzrost możliwości obliczeniowych komputerów) oraz wideo (zwiększanie się rozdzielczości oraz dokładności nagrywanych obrazów), zwiększały się również możliwości systemów pomiarowych wykorzystujących DIC. Pozwoliło to w końcu na zastosowanie systemów działających w technologii 3D. Po skalibrowaniu urządzenia potrafiło ono w sposób automatyczny określić rzeczywistą wielkość badanego obiektu oraz dokonać pomiaru w trójwymiarowym układzie współrzędnych przy zachowaniu dokładności pomiaru w głębi badanego obszaru. W efekcie w XXI wieku technologie DIC zaczęły być bardzo szeroko stosowane w wielu dziedzinach inżynierii materiałowych [Pan, 2018]. DIC wykorzystuje się między innymi w następujących sektorach inżynierii materiałowej:

- W inżynierii biomedycznej:
  - W biomechanice [Mguil–Touchal i in., 1997; Verhulp i in., 2004; Palanca i in., 2016;]
  - W badaniach tkanek organicznych [Zhang i Arola, 2004]
- W mechanice eksperymentalnej [Chu i in., 1985; Lu i Cary, 2000; Yoneyama i Murasawa, 2009; Stoilov i in., 2012]
- W budownictwie [Roux i Hild, 2006; Ramos i in., 2015; Zarinpour i Chao, 2017; Turoń i in., 2018]
- W pomiarach wysokich deformacji [Bing i in, 2006; Pan i in., 2008, 2009; Hild i Roux, 2012; Pan, 2018]
- W badaniach metali oraz testach zmęczeniowych [Vanlanduit i in., 2009; Cerbu i in., 2018; Kosiń, 2020]
- W badaniach materiałów kompozytowych [Canal i in., 2012]
- W badaniach wykorzystujących mikroskopię elektronową [Reu, 2012]
- W badaniach turbin wiatrowych [Poozesh i in., 2017]



## 3 Badania własne

### 3.1 Mieszanka kompozytowa

#### 3.1.1 Wstęp

W niniejszym rozdziale pracy przedstawiono wyniki badań dotyczące wpływu zastosowania rozdrobnionych odpadów gumowych, jako dodatku do łupka przywęglowego nieprzepalonego, na parametry fizyko–mechaniczne mieszanki. Robocza nazwa mieszanki ŁGPC pochodzi od pierwszych liter zastosowanych składników:

- Ł – łupek przywęglowy nieprzepalony
- G – rozdrobnione odpady gumowe, pochodzące z recyklingu zużytych opon samochodowych
- P – popiół lotny krzemionkowy
- C – cement portlandzki CEM I 42,5 R

W mieszance ŁGPC można wyróżnić 2 grupy funkcyjne:

- Bazę w postaci łupka przywęglowego nieprzepalonego
- Mieszankę spoiwową składającą się z rozdrobnionych odpadów gumowych, popiołu lotnego oraz cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R

Przedstawioną mieszankę zastosowano w celu poprawy parametrów fizyko–mechanicznych łupków przywęglowych nieprzepalonych, a w szczególności zwiększenia odporności łupka na działanie wody. Jak opisano w rozdziale 2.2, łupki przywęglowe nieprzepalone są problematyczne w zastosowaniu w budownictwie ze względu na wrażliwość na działanie wody oraz dużą, w porównaniu do innych materiałów ziarnistych, zmienność parametrów fizyko–mechanicznych w czasie składowania.

Łupki przywęglowe nieprzepalone są kruszywami o małej nośności w stosunku do innych kruszyw, spowodowanej niewielką wytrzymałością na ściskanie pojedynczych ziaren. Wrażliwość kruszywa na działanie wody objawia się poprzez rozpad większych ziaren kruszywa na mniejsze. W efekcie rozpadu ziaren kruszywa na drobniejszy materiał ten może dodatkowo zmniejszyć swoją nośność w wyniku zdegradowania szkieletu nośnego. Postępująca degradacja uziarnienia, spowodowana działaniem wody może również doprowadzić do zwiększenia się zawartości frakcji pylasto–ilastych w kruszywie, a to z kolei może doprowadzić do pojawienia się cech wysadzinowych w materiale, który w trakcie zabudowywania takich cech nie wykazywał.

Zmienność w czasie parametrów fizyko–mechanicznych łupków przywęglowych spowodowana jest procesami erozyjnymi zachodzącymi po wydobyciu kruszywa na powierzchnię. Procesy erozyjne są dodatkowo przyspieszane przez działanie wody na materiał w miejscu jego zalegania, np. hałdzie. W związku z tym, przy pobieraniu łupków przywęglowych nieprzepalonych z hałd w celach budowlanych, należałoby prowadzić dość szczegółową kontrolę parametrów fizyko–mechanicznych materiału. Jego właściwości mogą być uzależnione od miejsca pobrania oraz głębokości jego zalegania w hałdzie.

W celu zniwelowania powyższych negatywnych właściwości łupków przywęglowych nieprzepalonych, które utrudniają jego zastosowanie, zaproponowano mieszankę ŁGPC, która ma za zadanie odizolować ziarna kruszywa od nadmiernego wpływu wody oraz powstrzymać procesy erozyjne w nim zachodzące. W efekcie mogłoby to pozwolić na częstsze oraz bezpieczniejsze wykorzystanie łupków przywęglowych nieprzepalonych w budownictwie. Dodatkowo, mieszanka ŁGPC ze względu na zastosowanie 3 materiałów odpadowych (łupek przywęglowy nieprzepalony, rozdrobnione odpady gumowe oraz popiół) bardzo dobrze wpisuje się w trend budownictwa ekologicznego oraz w gospodarkę o obiegu zamkniętym, pozwalając wykorzystać odpady zamiast dobrych jakościowo kruszyw naturalnych, których zasoby naturalne ciągle się kurczą.

Celem stosowania mieszanek ŁGPC w budownictwie drogowym jest przede wszystkim:

- Zwiększenie trwałości mieszanek łupka związanego spoiwem, które ze względu na dużą wrażliwość kruszywa na działanie wody, mogą ulegać degradacji w dłuższych okresach czasu. Zastosowanie w mieszankach rozdrobnionych odpadów gumowych ma doprowadzić do utworzenia w matrycy cementowo–popiołowo–gumowej warstwy izolacyjnej, utrudniającej penetrację wody w głąb materiału
- Obniżenie absorpcji wody w mieszance. Dodatek rozdrobnionych odpadów gumowych (materiał nienasiąkliwy wodą w temperaturze poniżej 100°C) ma za zadanie obniżyć ogólną nasiąkliwość kompozytu oraz poprzez zmiany w mikrostrukturze porów doprowadzić do zmniejszenia się sił podciągania kapilarnego, a w efekcie zmniejszenia wysokości podciągania kapilarnego wody
- Zabezpieczenie łupka przed rozdrabnianiem w trakcie zagęszczania – dodatek podatnych na deformacje sprężyste odpadów gumowych ma za zadanie stworzyć komponent amortyzujący uderzenia towarzyszące zagęszczaniu kruszywa, w efekcie niwelując efekt rozdrabniania ziaren kruszywa w trakcie jego zagęszczenia
- Poprawienie nośności poprzez wytworzenie wiązań hydraulicznych. Zastosowanie dodatku cementu ma na celu uzyskanie mieszanki o stabilnych parametrach wytrzymałościowych
- Nadanie związanej mieszance pewnej podatności, która może pozytywnie wpłynąć na trwałość zmęczeniową nawierzchni. Dodatek rozdrobnionych odpadów gumowych, równomiernie rozłożonych w matrycy cementowo–popiołowo–gumowej, pozwala na zmniejszenie sztywności materiału. Obniżenie sztywności może zwiększyć wielkość deformacji, przy której następuje zniszczenie materiału, zmniejszając tym samym wpływ mechaniki kruchej pęknięcia na pracę materiału

### 3.1.2 Rola poszczególnych składników mieszanki kompozytowej

Mieszanka ŁGPC składa się z 4 składników: łupka przywęglowego nieprzepalonego, rozdrobnionych odpadów gumowych, popiołu lotnego krzemionkowego oraz cementu



CEM I 42,5 R. Każdy z wymienionych składników mieszanki ma swoje określone zadanie do spełnienia:

- Łupek przywęglowy nieprzepalony – jest podstawowym składnikiem mieszanki oraz materiałem, którego parametry mają być poprawione poprzez zastosowanie pozostałych składników mieszanki. Ziarna kruszywa stanowią szkielet nośny kompozytu, zaś drobne frakcje pełnią rolę wypełniacza. Ponieważ jest to podstawowy składnik mieszanki, to dodatki pozostałych składników są liczone jako procentowy dodatek określany w stosunku do suchej masy łupka przywęglowego nieprzepalonego. Do badań przedstawionych w pracy 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.



Rys. 3.1. a) Łupek przywęglowy nieprzepalony nr 1; b) łupek przywęglowy nieprzepalony nr 2 [fot. własne]

- Rozdrobnione odpady gumowe – są najważniejszym dodatkiem do łupka przywęglowego nieprzepalonego. W pracy zostaną rozpatrzone efekty zastosowania zróżnicowanych zawartości dodatków odpadów gumowych na wielkość parametrów fizyko–mechanicznych związanej mieszanki. Odpady gumowe pochodzą z mechanicznego rozdrabniania opon samochodów osobowych, zostały rozdrobnione do uziarnienia 0/2 mm. Celem zastosowania odpadów gumowych jest stworzenie izolacji wokół ziaren łupka przywęglowego nieprzepalonego, utrudniającej swobodne rozchodzenie się wody oraz jej penetrację w głąb materiału. W przypadku związanej mieszanki przewiduje się również, że rozdrobnione odpady gumowe wpłyną na obniżenie sztywności kompozytu, zwiększając zakres deformacji oraz poprawią równomierność rozchodzenia się naprężeń. W efekcie pozwala to na zmianę mechaniki zniszczenia kompozytu z kruchego pęknięcia na mechanikę zniszczenia, porównywalną z tą obserwowaną dla rozciągania stali, dodając obszar płynięcia materiału w zakresie obciążeń zbliżonych do niszczących.



Rys. 3.2. Rozdrobnione odpady gumowe zastosowane w badaniach [fot. własna]

- Popiół lotny krzemionkowy – dodatek popiołu w przypadku prezentowanych w pracy badań ma znaczenie drugorzędne. Jego głównym zadaniem jest doziarnienie mieszanki w taki sposób, aby uzyskać możliwie jak najbardziej zamkniętą strukturę. Jest to wymagane ze względu na zastosowanie rozdrobnionych odpadów gumowych, których właściwości nie mogą być w pełni wykorzystane w przypadku porowatej struktury stwardniałej mieszanki, z dużą zawartością wolnych przestrzeni. Zamiast popiołu lotnego krzemionkowego mógłby być zastosowany dowolny wypełniacz (np. wapienny, stosowany przy produkcji mieszanek mineralno–asfaltowych). Jednak ze względu na wpływ popiołu lotnego krzemionkowego na poprawę wytrzymałości wiązań hydraulicznych matrycy cementowej, zdecydowano o jego zastosowaniu.



Rys. 3.3. Popiół lotny krzemionkowy zastosowany w badaniach [fot. własna]

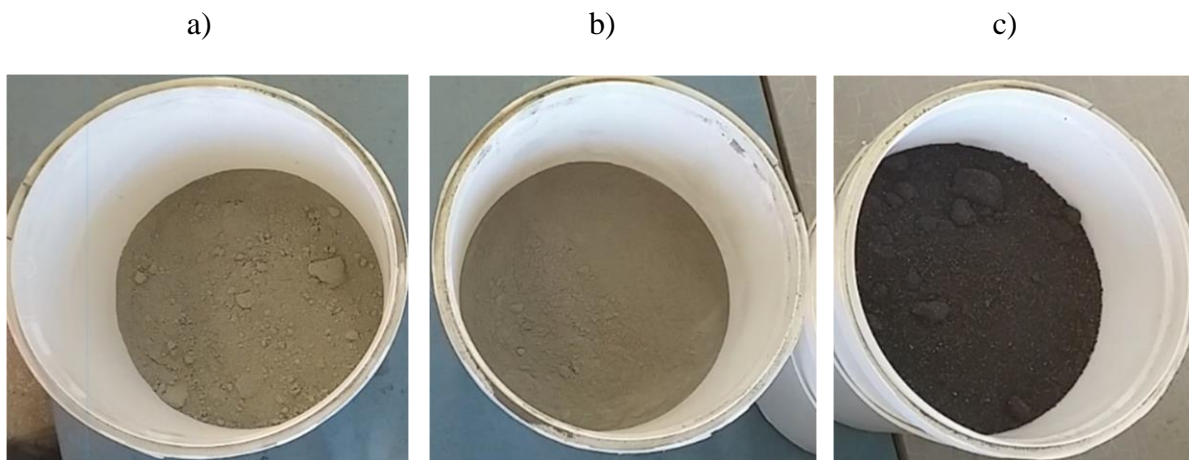
- Cement portlandzki CEM I 42,5 R – rolą cementu w przypadku opisywanej mieszanki jest zbudowanie wiązań hydraulicznych pozwalających na utrzymanie kształtu stwardniałego kompozytu oraz uzyskanie zadowalających parametrów wytrzymałościowych. Wybrano podstawowy cement CEM I w celu wyeliminowania ewentualnego wpływu dodatków do cementu na parametry kompozytu.

### 3.1.3 Przygotowanie mieszanki kompozytowej

Podczas przygotowania mieszanki ŁGPC pojawiają się duże problemy z segregowaniem jej składników. Jest to spowodowane wprowadzeniem do mieszanki rozdrobnionych odpadów gumowych, których gęstość jest zbliżona lub niższa od gęstości wody oraz tym, że odpady nie są nasiąkliwe. W związku z tym przy próbie wymieszania wszystkich składników na sucho, a następnie mieszania połączonego z dodawaniem wody, dochodzi do wyniesienia cząsteczek odpadu gumowego ku górze wraz z wodą oraz w efekcie rozsegregowania mieszanki.

W związku z powyższym, została określona procedura przygotowania mieszanki ŁGPC, pozwalająca na uzyskanie odpowiedniej jednorodności kompozytu:

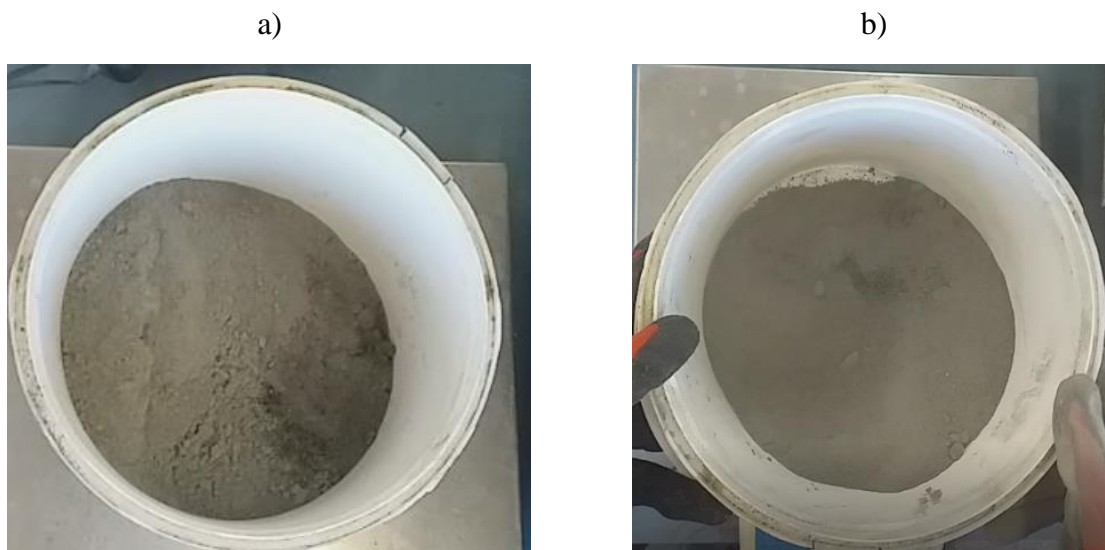
- Przygotowanie składników – wszystkie składniki, które mogą ulec zawilgoceniu, powinny być wysuszone do stałej masy w temperaturze do 105°C
- Przygotowanie mieszanki spoiwowej GPC:
  - Odważenie poszczególnych składników mieszanki spoiwowej: rozdrobnione odpady gumowe, popiół lotny krzemionkowy, cement (Rys. 3.5). Masy składników mieszanki spoiwowej muszą być ustalone zgodnie z receptą, jako procentowe dodatki obliczane w stosunku do suchej masy łupka przywęglowego nieprzepalonego. Odważone składniki należy przesypać do osobnego naczynia



Rys. 3.5. Odważone składniki mieszanki spoiwowej: a) cement portlandzki CEM I 42,5 R; b) popiół lotny krzemionkowy; c) rozdrobnione odpady gumowe [fot. własne]

- Przygotowane składniki mieszanki spoiwowej należy wymieszać na sucho, aż do momentu równomiernego rozproszczenia cząsteczek rozdrobnionych odpadów gumowych (Rys. 3.6)





Rys. 3.6. a) Składniki mieszanki przed homogenizacją; b) składniki zhomogenizowane [fot. własne]

- Do wymieszanych składników mieszanki spoiwowej należy następnie dodawać wodę. Ilość wody do mieszanki spoiwowej ustalono jako 50% ilości wody potrzebnej do uzyskania wilgotności optymalnej dla całej mieszanki ŁGPC. Po określeniu odpowiedniej ilości wody, należy ją stopniowo dodawać do mieszanki spoiwowej, ciągle mieszając. Pierwsza porcja wody powinna być niewielka, aby pozwolić na zawilgocenie mieszanki spoiwowej tak, żeby była urabialna w dłoniach. Następne porcje wody dolewamy w momencie ujednorodnienia mieszanki po jej pierwszej porcji (Rys. 3.7). Odpowiednio przygotowana mieszanka spoiwowa powinna być plastyczna oraz zachowywać nadany jej kształt



Rys. 3.7. a) Jednorodna mieszanka spoiwowa po pierwszym dodaniu wody;  
b) jednorodna mieszanka spoiwowa po ostatnim dodaniu wody [fot. własne]

- Przygotowanie mieszanki ŁGPC
  - Odważenie odpowiedniej ilości łupka przywęglowego nieprzepsalonego oraz umieszczenie go w mieszadle hakowym (Rys. 3.8).



Rys. 3.8. Łupek przywęglowy nieprzepsalony w misie mieszadła hakowego [fot. własna]

- Do mieszanego łupka przywęglowego nieprzepsalonego należy partiami dodawać mieszankę spoiwową. Po dodaniu mieszanki spoiwowej całość należy mieszać jeszcze przez około 2 min, tak by uzyskać jednorodną mieszankę (Rys. 3.9). Cały proces mieszania łupka przywęglowego nieprzepsalonego z mieszanką spoiwową nie powinien przekraczać 3 min. Zbyt krótki czas mieszania może doprowadzić do uzyskania niejednorodnej mieszanki, zaś zbyt długie mieszanie, szczególnie w mieszadle hakowym, może doprowadzić do roztarcia niektórych ziaren kruszywa, prowadząc do zmiany uziarnienia

a)



b)



Rys. 3.9. a) Łupek przywęglowy nieprzepsalony z dodatkiem mieszanki spoiwowej; b) jednorodna mieszanka ŁGPC [fot. własne]

- Do jednorodnej „suchej” mieszanki ŁGPC należy stopniowo dodawać pozostałą ilość wody wymaganą do uzyskania wilgotności optymalnej. Po dodaniu wody całość należy mieszać jeszcze przez 2 min. Całkowita długość mieszania na mokro nie powinna przekroczyć 3 min (Rys. 3.10).



Rys. 3.10. Jednorodna mieszanka ŁGPC [fot. własna]

- Uwagi :
  - Należy zwracać szczególną uwagę na dokładne mieszanie składników w każdym z „suchych” etapów mieszania. Niejednorodności mieszanki mogą być trudne do usunięcia w późniejszych etapach mieszania
  - Należy zwracać szczególną uwagę na dodawania wody partiami. Zbyt duże dodatki wody mogą prowadzić do rozsegregowania mieszanki, a w szczególności do oddzielenia się cząsteczek rozdrobnionych odpadów gumowych od pozostałej części mieszanki spoiwowej
  - Dobre przygotowanie mieszanki będzie uzależnione w głównej mierze od ilości dodatku rozdrobnionych odpadów gumowych. Wraz ze zwiększającą się zawartością odpadów gumowych mogą pojawiać się coraz większe trudności z homogenizacją składników

## 3.2 Plan Badań

### 3.2.1 Wstęp

Plan badawczy mieszanki ŁGPC zakładał wykonanie badań określających wpływ zastosowania zróżnicowanych dodatków rozdrobnionych odpadów gumowych na właściwości mieszanki. W tym celu zostały wykonane podstawowe badania pozwalające na charakterystykę bazowych parametrów wykorzystywanych składników, badania opisujące interakcję uzyskanego kompozytu z wodą oraz badania wytrzymałościowe.



W ramach badań opisujących interakcje mieszanki ŁGPC z wodą zostały wykonane badania: nasiąkliwości masowej oraz wysokości podciągania kapilarnego. Badania nasiąkliwości masowej oraz wysokości podciągania kapilarnego mają służyć do określenia wpływu zawartości miazgi gumowej na izolowanie ziaren kruszywa od wody. Parametry te mają posłużyć, jako informacja, czy tak skomponowany kompozyt może pracować w otoczeniu o bardzo dużej wilgotności.

W ramach badań wytrzymałościowych zostały wykonane następujące testy:

- Wytrzymałości na ściskanie po 7 dniach dojrzewania
- Wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania
- Obciążenia cyklicznego po 28 dniach dojrzewania

Podczas badań wytrzymałościowych określono:

- Wartość wytrzymałości na ściskanie
- Maksymalne deformacje
- Zastępczy moduł sztywności oraz moduł sprężystości Younga
- Zakres pracy sprężystej oraz plastycznej mieszanki

W ramach badań wytrzymałościowych został wykorzystany system DIC (Digital Image Correlation) ARAMIS 3D [gom.com]. System pomiarowy zastosowano do pomiaru odkształcalności kompozytu.

Wykonano również badania podstawowych parametrów poszczególnych składników mieszanki. Badania przeprowadzono dla łupków przywęglowych, popiołu lotnego oraz rozdrobnionych odpadów gumowych. Wykonano badanie składu granulometrycznego, badanie wskaźnika piaskowego oraz wilgotności optymalnej.

Badania wykonano dla dwóch etapów:

- Etap „1”
- Etap „2”

Badania zostały podzielone na poszczególne etapy ze względu na czas, w którym je wykonano oraz rodzaj materiałów bazowych, których użyto do produkcji mieszanki.

Badania wstępne zostały opublikowane w pracy Walotka [2017]. Ich zakres obejmował badania charakteryzujące podstawowe parametry fizyko–mechaniczne mieszanki spoiwowej GPC, badania mieszanki ŁGPC oraz wykorzystanych materiałów. Badania przeprowadzone dla mieszanki spoiwowej GPC oraz mieszanki ŁGPC, obejmowały kontrolę wpływu zróżnicowanej zawartości 3 składników mieszanki (rozdrobnione odpady gumowe, popiół lotny krzemionkowy, cement CEM I 42,5 R). Mieszanki wykonane w ramach badań wstępnych zostały wykonane dla łupka przywęglowego nieprzespalonego nr 1.

Badania oraz ich wyniki zawarte w etapie „1” miały na celu skorygowanie recept przygotowanych w ramach badań wstępnych. Korekta polegała na kontroli wpływu zróżnicowanej zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych na wielkość uzyskanych

parametrów. Zawartość pozostałych składników mieszanki została w tym celu ustalona jako stała dla wszystkich serii wykonanych próbek. W ramach etapu „1” zostały przeprowadzone badania mieszanek ŁGPC, z użyciem łupka przywęglowego nieprzepalonego nr 1.

Badania oraz ich wyniki uzyskane dla etapu „2” są finalną częścią pracy. Badania w tym etapie zostały przeprowadzone na receptach mieszanek wynikających z etapu „1”. Mieszanki ŁGPC zostały wykonane na bazie łupka przywęglowego nieprzepalonego nr 2, w celu określenia powtarzalności uzyskanych wyników przy zastosowaniu zróżnicowanego kruszywa podstawowego. Przeprowadzony program badawczy w etapie „2” pokrywa się z badaniami wykonanymi w ramach etapu „1”, został poszerzony o badania z wykorzystaniem systemu DIC ARAMIS 3D w celu szczegółowej charakterystyki zwiększonej odkształcalności oraz sprężysto–plastycznego charakteru pracy przygotowanych mieszanek kompozytowych.

### 3.2.2 Badania zawarte w etapie „1”

#### Recepty mieszanek przygotowanych do badań:

Tablica 3.1. Zawartość dodatków do łupka przywęglowego nieprzepalonego nr 1

Recepta	Odpady gumowe [%]	Popiół lotny [%]	Cement CEM I 42,5R [%]
G0	0	5	5
G5	5	5	5
G10	10	5	5
G15	15	5	5

#### Przeprowadzone badania materiałów, wykorzystanych do przygotowania mieszanki:

- Analiza sitowa łupka przywęglowego nieprzepalonego nr 1 „na sucho” – PN-EN 933-1:2012
- Analiza sitowa łupka przywęglowego nieprzepalonego nr 1 „na mokro” – PN-EN 933-1:2012
- Badanie wskaźnika piaskowego dla łupka przywęglowego nieprzepalonego nr 1 – PN-EN 933-8:2012
- Badanie wilgotności optymalnej dla łupka przywęglowego nieprzepalonego nr 1 – PN-EN 13286-2:2010
- Analiza sitowa popiołu lotnego krzemionkowego – PN-EN 933-1:2012
- Analiza sitowa rozdrobnionych odpadów gumowych – PN-EN 933-1:2012
- Badanie CBR łupka przywęglowego nieprzepalonego – PN-EN 13286-47:2012

#### Badania przeprowadzone dla mieszanek ŁGPC według tablicy 3.1:

- Badanie wilgotności optymalnej – PN-EN 13286-2:2010
- Badanie nasiąkliwości – PN-B-06250:1988
- Badanie podciągania kapilarnego – metoda autorska „B”

- Badanie wytrzymałości na ściskanie po 7 dniach pielęgnacji próbek walcowych o wymiarach 80 x 80 mm – PN-S-06103:1997
- Badanie wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach pielęgnacji próbek walcowych o wymiarach 80 x 80 mm – PN-S-06103:1997
- Badanie obciążenia cyklicznego – metoda autorska wykonana w oparciu o metodę Sasa i Głuchowskiego [2012]

### 3.2.3 Badania zawarte w etapie „2”

#### Recepty mieszanek przygotowanych do badań:

Tablica 3.2. Zawartość dodatków do łupka przywęglowego nieprzepsalonego nr 2

Recepta	Odpady gumowe [%]	Popiół lotny [%]	Cement CEM I [%]
G0	0	5	5
G5	5	5	5
G10	10	5	5
G15	15	5	5

#### Przeprowadzone badania materiałów, wykorzystanych do przygotowania mieszanki:

- Analiza sitowa łupka przywęglowego nieprzepsalonego nr 2 „na sucho” – PN-EN 933-1:2012
- Analiza sitowa łupka przywęglowego nieprzepsalonego nr 2 „na mokro” – PN-EN 933-1:2012
- Badanie wpływu 5-krotnego zagęszczania na uziarnienie łupka przywęglowego nieprzepsalonego nr 2 – PN-EN 933-1:2012
- Badanie wpływu 5-krotnego zagęszczania na uziarnienie łupka przywęglowego nieprzepsalonego nr 2 z dodatkiem 10% odpadów gumowych – PN-EN 933-1:2012
- Badanie wskaźnika piaskowego łupka przywęglowego nieprzepsalonego nr 2 – PN-EN 933-8:2012

#### Badania przeprowadzone dla mieszanek ŁGPC według tablicy 3.2:

- Badanie wilgotności optymalnej – PN-EN 13286-2:2010
- Badanie nasiąkliwości – PN-B-06250:1988
- Badanie podciągania kapilarnego – metoda autorska „B”
- Badanie wytrzymałości na ściskanie po 7 dniach pielęgnacji próbek walcowych o wymiarach 80x80 mm – PN-S-06103:1997
- Badanie wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach pielęgnacji próbek walcowych o wymiarach 80x80 mm – PN-S-06103:1997
- Badanie obciążenia cyklicznego – metoda autorska wykonana w oparciu o metodę Sasa i Głuchowskiego [2012]

## 4 Wyniki badań

### 4.1 Etap „1”

#### 4.1.1 Wyniki badań zastosowanych materiałów

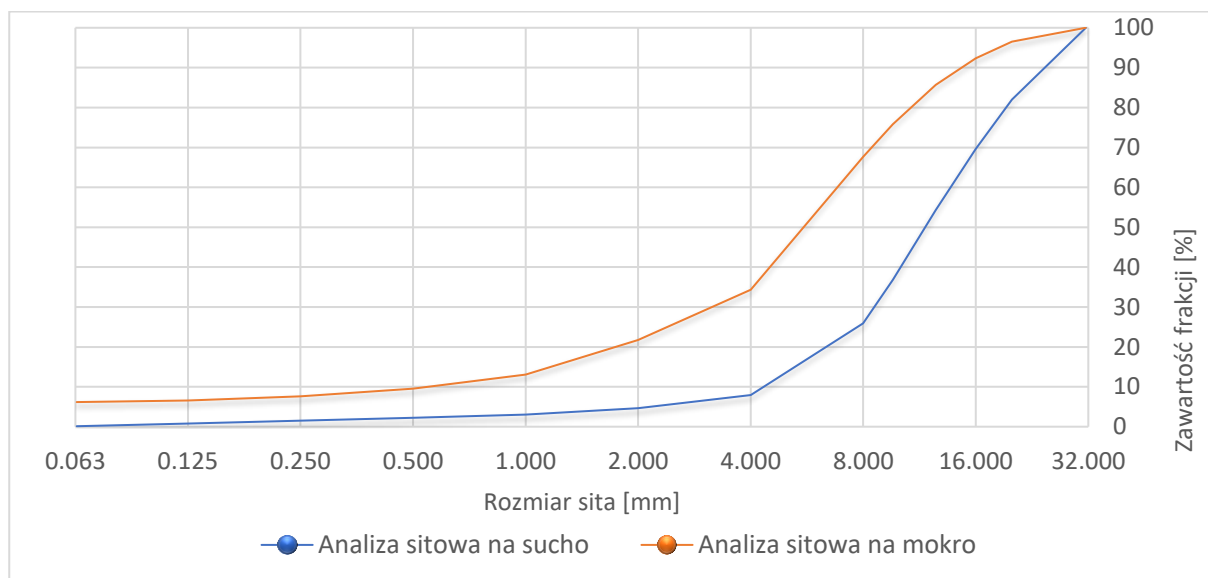
#### Łupek przywęglowy nieprzepsalony nr 1

Tablica 4.1. Analiza sitowa łupka przywęglowego nieprzepsalonego nr 1 wykonana „na sucho” oraz „na mokro”

	Analiza sitowa wykonana "na sucho"		Analiza sitowa wykonana "na mokro"	
Masa próbki [g]	5000.6		5000.6	
Masa po płukaniu [g]	–		4697.6	
Sito [mm]	Odsiew [%]	Krzywa [%]	Odsiew [%]	Krzywa [%]
31.5	0.00	99.98	0.00	100.00
20.0	17.98	82.00	3.46	96.54
16.0	12.37	69.63	4.20	92.34
12.5	15.33	54.30	6.66	85.68
9.6	17.45	36.85	9.89	75.79
8.0	10.93	25.92	8.19	67.59
4.0	17.96	7.96	33.26	34.34
2.0	3.35	4.61	12.59	21.74
1.0	1.55	3.06	8.65	13.09
0.50	0.86	2.20	3.59	9.50
0.25	0.67	1.53	1.93	7.57
0.125	0.70	0.83	0.99	6.59
0.063	0.71	0.12	0.41	6.17
DNO	0.12		6.17	

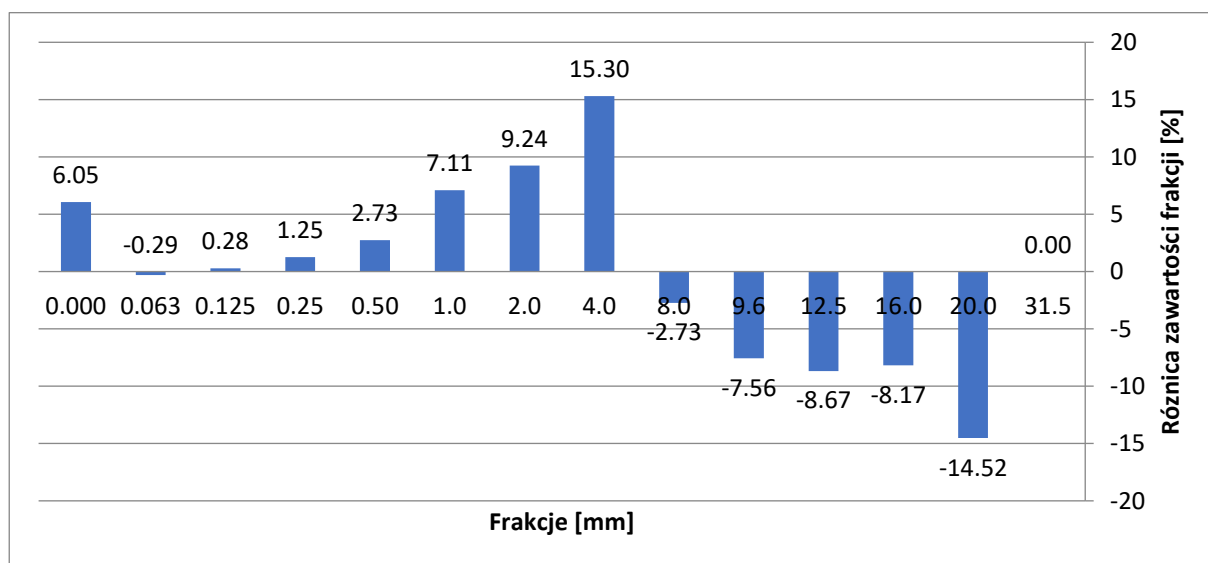
W tablicy 4.1 przedstawiono wyniki przesiewu tej samej próbki łupka przywęglowego nieprzepsalonego nr 1 wykonane metodami „na sucho” oraz „na mokro”. Badanie wykonano w celu kontroli wpływu przepłukiwania kruszywa na jego uziarnienie. W metodzie „na sucho” próbka po wysuszeniu do stałej masy została przesiana na zestawie sit. Analiza sitowa „na sucho” obarczona jest błędem pomiarowym wynikającym z niemożności oddzielenia wszystkich pyłów oraz ilów od powierzchni większych ziaren. Następnie ta sama próbka kruszywa została poddana płukaniu pod bieżącą wodą na sicie 0,063 mm. Kruszywo w ramach płukania znajdowało się przez około 2 godziny w stanie pełnego zanurzenia (przepłukiwanie na sicie) oraz 5 godzin w stanie wysokiego zawilgocenia (w trakcie suszenia). Po wysuszeniu

próbka została ponownie przesiana na zestawie sit. Na rysunku 4.1 przedstawiono przebieg krzywych uziarnienia badanych próbek.



Rys. 4.1. Krzywe uziarnienia łupka przywęglowego nieprzepalonego nr 1 uzyskane w metodzie „na mokro” oraz „na sucho”

Badane kruszywo ma uziarnienie w granicach 0/31,5 mm. W badanej próbce główną frakcją występującą są żwiry 92,04% dla analizy „sitowej na sucho” oraz 65,66% dla analizy sitowej wykonanej „na mokro”. Rozbieżności w wynikach badania uziarnienia kruszywa wynikają z rodzaju zastosowanej metody. W przypadku analizy sitowej „na mokro” odnotowujemy 6,17% frakcji mniejszych niż 0,063 mm, gdzie w przypadku analizy sitowej „na sucho” określono ich zawartość na poziomie 0,12%. Jednak różnice w zawartości grubszych frakcji wynikają z degradacji uziarnienia kruszywa spowodowanego działaniem wody. Na rysunku 4.2 przedstawiono różnice w zawartości poszczególnych frakcji, w zależności od metody badania.

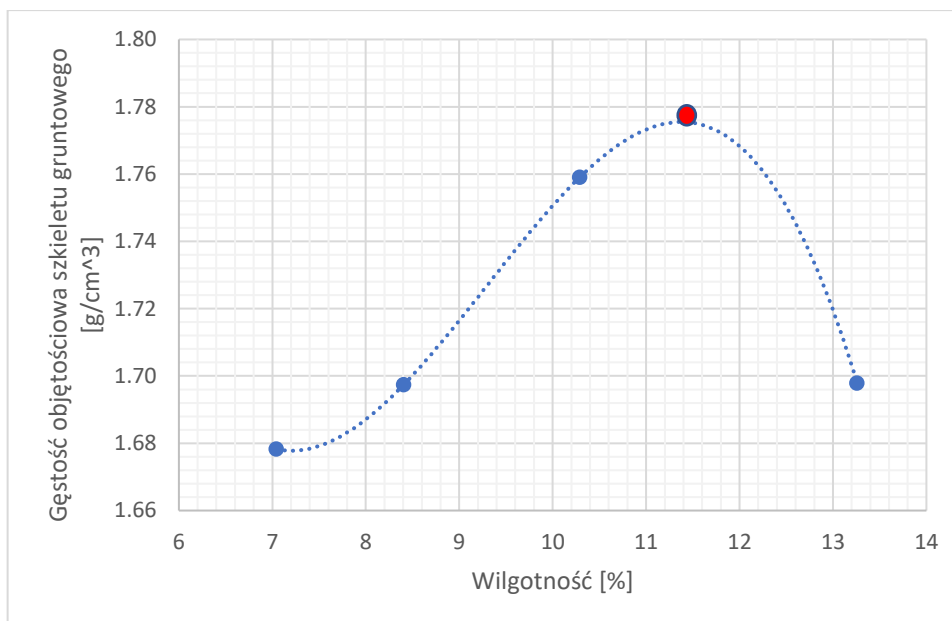


Rys. 4.2. Różnice w zawartości poszczególnych frakcji kruszywa uzyskane metodą „na sucho” oraz „na mokro”

W przypadku frakcji drobnych o uziarnieniu do 4 mm (pomijając frakcje drobniejsze od 0,063mm) odnotowujemy ich przyrost po wykonaniu płukania kruszywa. Frakcje te powstały w wyniku rozpadu frakcji grubszych od 8 mm. Przyrost lub zmniejszenie zawartości danej frakcji jest proporcjonalne do jej wielkości. Im większa frakcja, tym większy przyrost jej zawartości (przy grupie frakcji do 4 mm) oraz tym większy jej ubytek (przy grupie frakcji powyżej 8 mm). Na podstawie powyższych danych można stwierdzić, że badane kruszywo wykazuje skłonność do degradacji uziarnienia pod wpływem wody.

Na próbce przedstawionego łupka przywęglowego nieprzepsalonego nr 1 przeprowadzono badanie wskaźnika piaskowego. Cylinder nr 1 uzyskał wartość wskaźnika równą 19,35%, cylinder nr 2 17,91%. Po uśrednieniu wartości, dla próbki ustalono wskaźnik piaskowy na poziomie 18,63%, co wskazuje, iż badane kruszywo jest materiałem wysadzinowym ( $SE < 25$ ) [PN-EN 933-8:2014].

Dla łupka przywęglowego nieprzepsalonego nr 1 przeprowadzono również badanie wilgotności optymalnej według drugiej metody Proctora. Wyniki badania przedstawiono na rysunku 4.3. Na podstawie wykresu ustalono, iż dla badanej próbki kruszywa wilgotność optymalna wynosi 11,38%, zaś maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego wynosi  $1,775 \text{ g/cm}^3$ .



Rys. 4.3. Wykres zależności gęstości objętościowej szkieletu gruntowego od wilgotności łupka przywęglowego nieprzepsalonego nr 1

Na rysunku 4.4 przedstawiono wyniki badania kalifornijskiego wskaźnika nośności (CBR), uzyskane dla próbki łupka przywęglowego nieprzepsalonego nr 1, zagęszczonego przy wilgotności optymalnej. Badanie obejmowało oznaczenie wskaźnika nośności zagęszczonej próbki kruszywa oraz pęcznienia liniowego, spowodowanego nasączeniem próbki w wodzie. Pomiaru pęcznienia dokonywano, aż do momentu jego zakończenia, przez 10 dni od momentu



zagęszczenia próbki. Po upływie czasu pielęgnacji, wykonano badanie wskaźnika nośności. Wyniki pomiarów pęcznienia liniowego przedstawiono w tabelicy 4.2.

Badana próbka łupka przywęglowego nr 1 osiągnęła wartość kalifornijskiego wskaźnika nośności na poziomie 10,2%, przy penetracji trzpienia równej 5,0 mm. Zgodnie z Katalogiem Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych [GDDKiA, 2012] kruszywo spełnia wymagania nośności gruntu G1. Wartości kalifornijskiego wskaźnika nośności wyznaczono z następujących zależności:

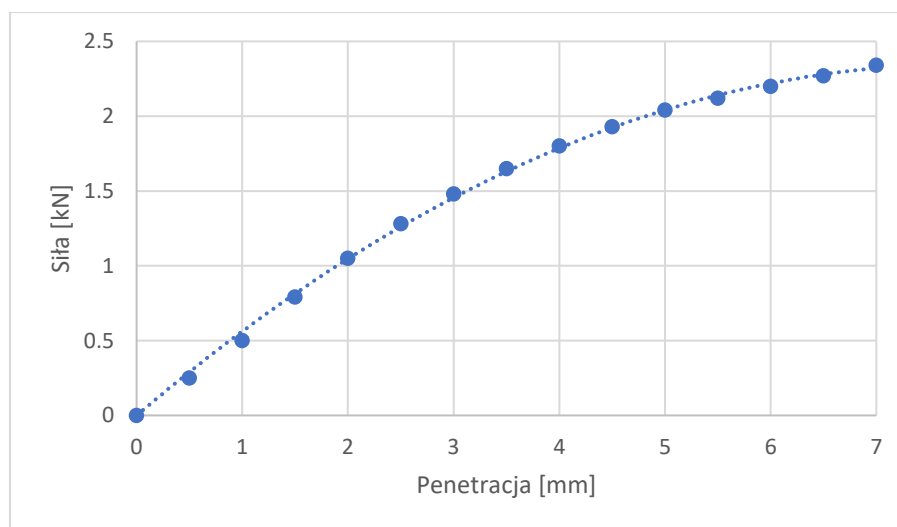
$$CBR_{2,5} = \frac{F_{2,5}}{13,2} * 100\% \quad (4.1)$$

$$CBR_{5,0} = \frac{F_{5,0}}{20} * 100\% \quad (4.2)$$

$$CBR = \max(CBR_{2,5}; CBR_{5,0}) \quad (4.3)$$

gdzie:

- $CBR_{2,5}$  – kalifornijski wskaźnik nośności przy penetracji trzpienia 2,5 mm, [%]
- $CBR_{5,0}$  – kalifornijski wskaźnik nośności przy penetracji trzpienia 5,0 mm, [%]
- $F_{2,5}$  – siła odczytana przy zagłębieniu trzpienia równym 2,5 mm [kN]
- $F_{5,0}$  – siła odczytana przy zagłębieniu trzpienia równym 5,0 mm [kN]



Rys. 4.4. Wykres zależności penetracji od siły potrzebnej do wciśnięcia trzpienia

Pęcznienie liniowe określono w stosunku do wysokości zagęszczonej próbki (120 mm), zgodnie ze wzorem:

$$P[\%] = \frac{P}{120} * 100\% \quad (4.4)$$

gdzie:

- $P$  – pęcznienie próbki wyrażone w [mm]

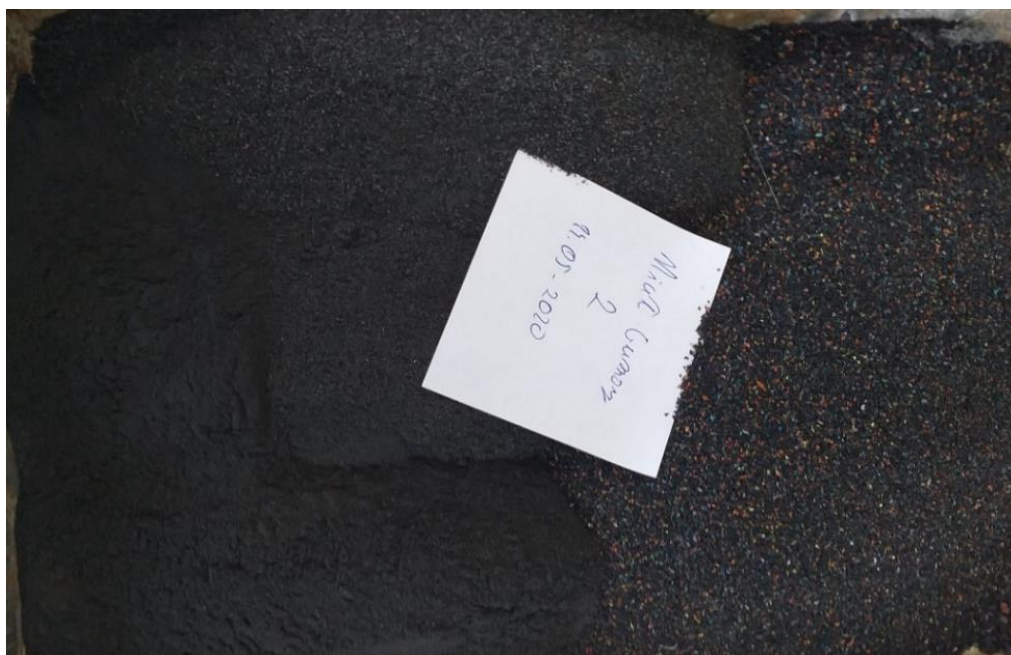
Tablica 4.2. Wyniki pomiaru pęcznienia próbki łupka przywęglowego nieprzealonego nr 1 w trakcie pielęgnacji

	Czas [doby]		
	0	3	10
Pęcznienie [mm]	0	0.14	0.22
Pęcznienie [%]	0.00%	0.12%	0.18%

Badana próbka uzyskała pęcznienie równe 0,14 mm po 3 dobach nasączenia oraz 0,22 mm po 10 dobach nasączenia. W stosunku do początkowej wysokości próbki pęcznienie po 3 dobach nasączenia wynosi 0,12% oraz 0,18% po 10 dobach nasączenia. Badana próbka kruszywa nie wykazuje dużego pęcznienia.

### Rozdrobnione odpady gumowe

Na rysunku 4.5 przedstawiono próbkę rozdrobnionych odpadów gumowych po wykonaniu analizy sitowej. Badane odpady gumowe pochodzą z procesu mechanicznego rozdrabniania zużytych opon samochodów osobowych. W procesie rozdrabniania odpady gumowe są oczyszczane z części metalowych oraz tekstylnych. Końcowym produktem procesu jest miał gumowy o uziarnieniu 0/2 mm.

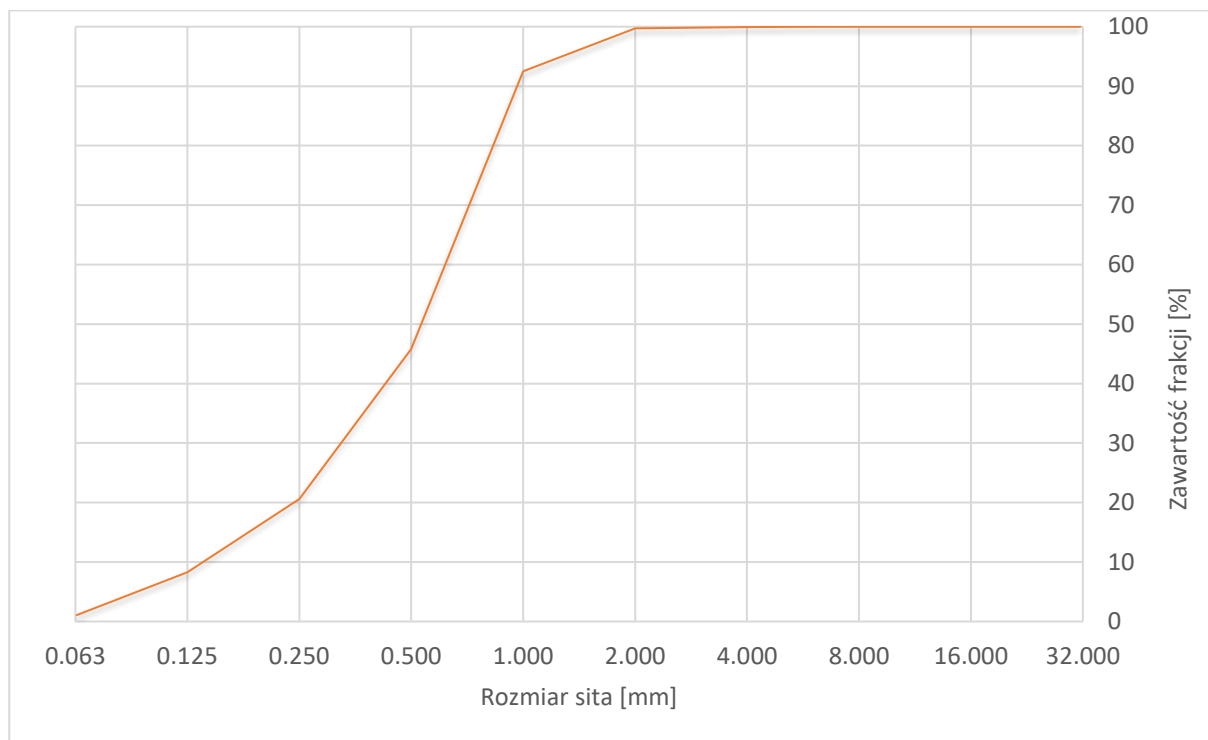


Rys. 4.5. Rozdrobnione odpady gumowe po analizie sitowej [fot. własna]

Wilgotność naturalna odpadów równa jest 1,5%. Zawartość metali oraz związków niebezpiecznych jest na bardzo niskim poziomie i nie powinna stanowić zagrożenia dla życia lub zdrowia ludzkiego. W tablicy 4.3 przedstawiono wyniki badania uziarnienia zastosowanych rozdrobnionych odpadów gumowych. Ze względu na charakterystykę materiału analiza sitowa została wykonana metodą „na sucho”.

Tablica 4.3. Wynik badania uziarnienia rozdrobnionych odpadów gumowych

Analiza sitowa odpadów gumowych		
Masa próbki [g]	1006	
Sito [mm]	Odsiew [%]	Krzywa [%]
31.5	0.00	100.00
22.4	0.00	100.00
16.0	0.00	100.00
11.2	0.00	100.00
8.0	0.00	100.00
5.6	0.02	99.98
4.0	0.06	99.92
2.0	0.18	99.74
1.0	7.22	92.52
0.50	46.72	45.81
0.25	25.19	20.62
0.125	12.35	8.27
0.063	7.20	1.07
DNO	1.07	



Rys. 4.6. Krzywa uziarnienia rozdrobnionych odpadów gumowych

Na podstawie danych z tablicy 4.3 przygotowano wykres uziarnienia rozdrobnionych odpadów gumowych (Rys. 4.6). Badany materiał, zgodnie z deklaracją producenta stanowi miał gumowy o uziarnieniu 0/2 mm. Największą frakcją zawartą w rozdrobnionych odpadach gumowych jest frakcja 0,5/1 mm, której zawartość wynosi 46,72%. W materiale występuje nadziarno o uziarnieniu do 8 mm i zawartości 0,08%.

### **Popiół lotny krzemionkowy**

W badaniach wykorzystano popiół lotny krzemionkowy (V), powstały w wyniku spalania węgla kamiennego. Zastosowany popiół należy do grupy popiołów lotnych mało aktywnych (zawartość CaO między 3,5 a 7,0%). Na rysunku 4.7 przedstawiono próbkę popiołu lotnego krzemionkowego (V) po badaniu uziarnienia.

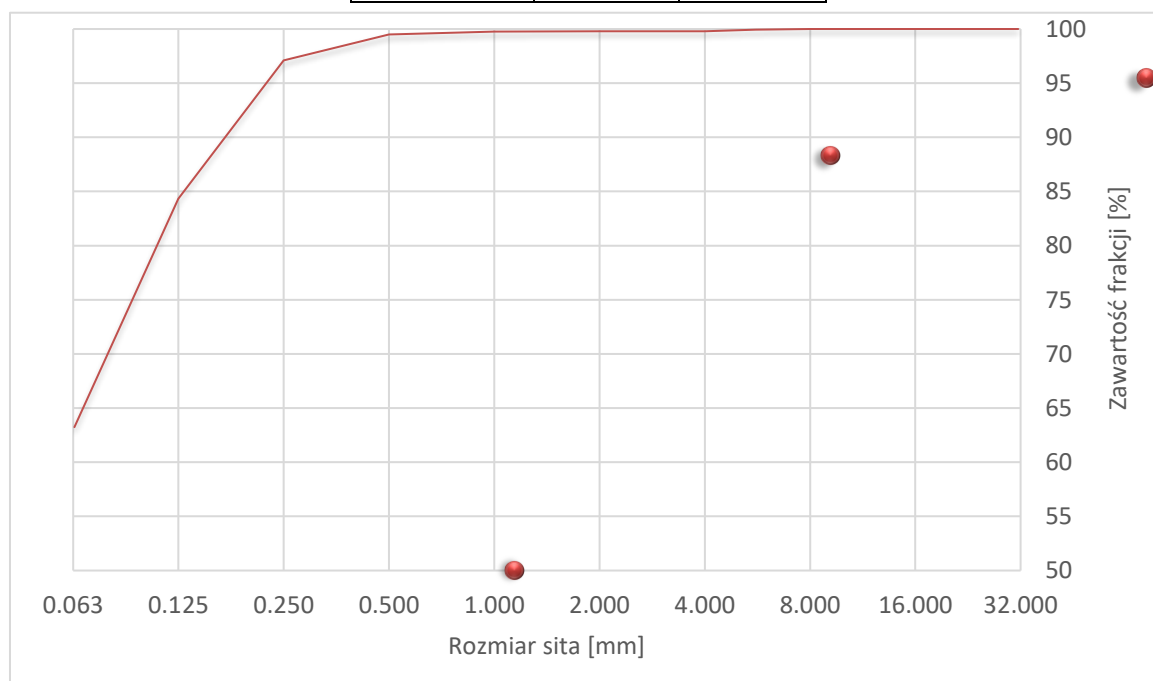


Rys. 4.7. Próbkę popiołu lotnego krzemionkowego (V) po badaniu uziarnienia [fot. własna]

W tablicy 4.4 przedstawiono wyniki badania uziarnienia popiołu lotnego krzemionkowego, zaś na rysunku 4.8 przedstawiono krzywą przesiewu materiału.

Tablica 4.4. Skład ziarnowy popiołu lotnego krzemionkowego (V)

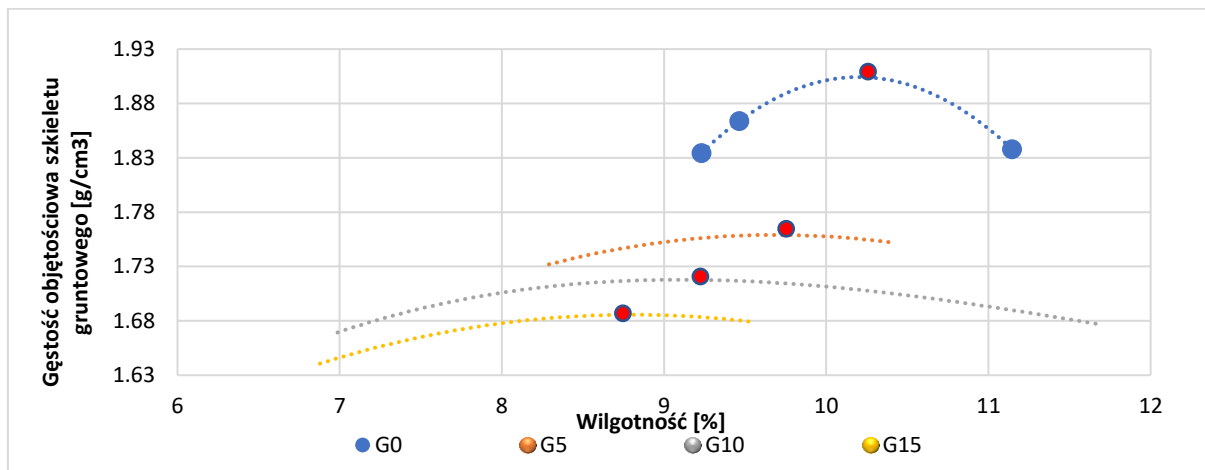
Popiół lotny krzemionkowy (V)		
Masa próbki [g]	401	
Sito [mm]	Odsiew [%]	Krzywa [%]
31.5	0.00	100.00
22.4	0.00	100.00
16.0	0.00	100.00
11.2	0.00	100.00
8.0	0.00	100.00
5.6	0.05	99.95
4.0	0.15	99.80
2.0	0.00	99.80
1.0	0.05	99.75
0.50	0.25	99.50
0.25	2.39	97.11
0.125	12.77	84.34
0.063	21.10	63.24
0.000	63.24	



Rys. 4.8. Krzywa uziarnienia popiołu lotnego krzemionkowego (V)

#### 4.1.2 Wyniki badań mieszanek ŁGPC przygotowanych według tablicy 3.1

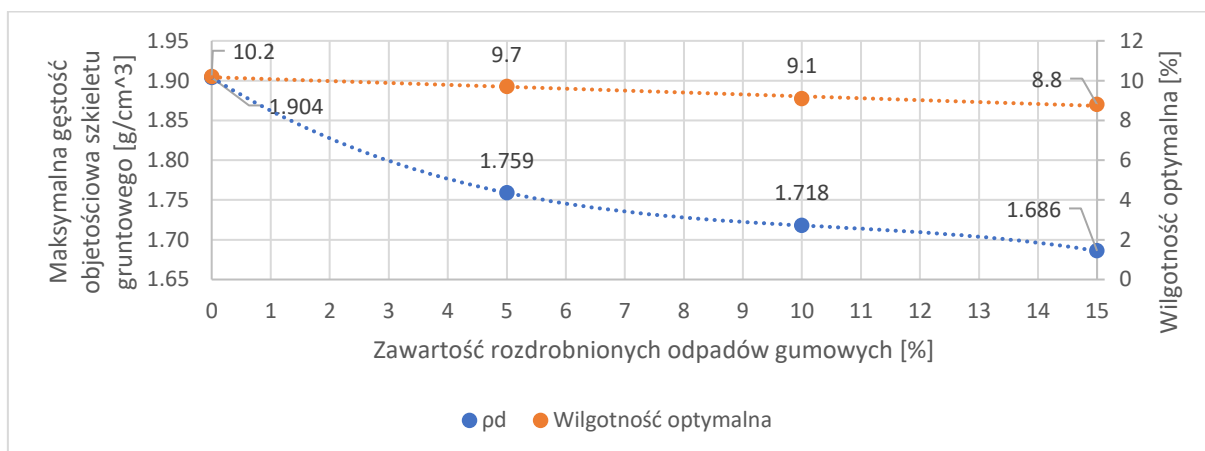
Na rysunku 4.9 przedstawiono wyniki badania wilgotności optymalnej mieszanek ŁGPC wykonanych zgodnie z recepturami przedstawionymi w tablicy 3.1.



Rys. 4.9. Wykres zależności gęstości objętościowej szkieletu gruntowego od wilgotności dla mieszanek G0, G5, G10, G15.

Próbka przygotowana według recepty G0 uzyskała maksymalną wartość gęstości objętościowej szkieletu gruntowego równą  $1,904 \text{ g/cm}^3$  przy wilgotności optymalnej równej 10,2%. Dla próbki G5 wartość maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego wynosi  $1,759 \text{ g/cm}^3$  przy wilgotności optymalnej wynoszącej 9,7%, w przypadku próbki G10 wartości te wynosiły odpowiednio  $1,718 \text{ g/cm}^3$  oraz 9,1%, zaś dla próbki G15  $1,686 \text{ g/cm}^3$  i 8,8%.

Na podstawie powyższych danych można stwierdzić, iż zwiększająca się zawartość dodatku odpadów gumowych wpływa na zmniejszenie się wartości maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego oraz wilgotności optymalnej. Przebieg tej zależności przedstawiono na rysunku 4.10.



Rys. 4.10. Zależność maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego oraz wilgotności optymalnej od zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych w mieszance

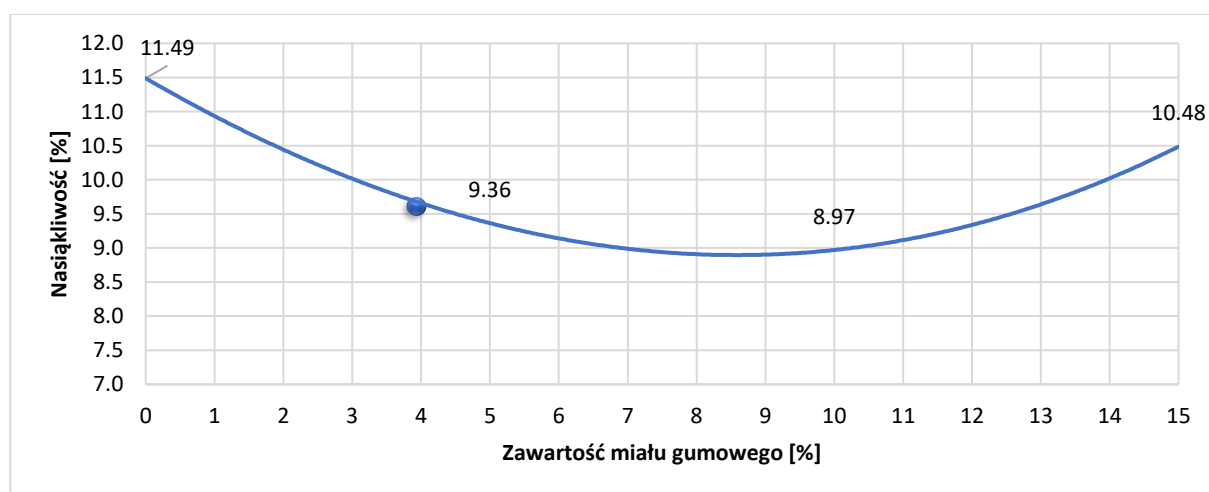


Wpływ rosnącej zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych jest przeciwnie proporcjonalny do uzyskiwanej wartości wilgotności optymalnej. Wraz ze wzrostem zawartości odpadów gumowych, spada wartość wilgotności optymalnej. Spadek ten wynosi około 0,5% na każde 5% dodatku odpadów gumowych. Podobnie jest w przypadku wpływu zawartości odpadów gumowych na wartość maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego. Jednak największy spadek wartości maksymalnej gęstości szkieletu gruntowego odnotowano pomiędzy próbkami G0 oraz G5. Dalsze zwiększanie dodatku odpadów gumowych powoduje coraz mniejsze zmiany wartości gęstości objętościowej szkieletu gruntowego.

Zjawisko to jest spowodowane zastępowaniem mineralnych cząsteczek cząsteczkami odpadów gumowych, które charakteryzują się niższą od pozostałych składników gęstością objętościową oraz odpornością na działanie wody (brak nasiąkliwości oraz wpływu wody na układanie się ziaren). W związku z tym zastosowanie odpadów gumowych pozwala uzyskać odpowiednie zagęszczenie przy mniejszym dodatku wody, co może pozytywnie wpłynąć już na etapie zabudowy, na ziarna łupka przywęglowego nieprzepsalonego. Obniżenie wartości gęstości objętościowej pozwoli zaś na odciążenie konstrukcji, wykonanej z tego materiału, co przy zachowaniu jego odpowiednich parametrów wytrzymałościowych, umożliwi wykonanie lżejszej i jednocześnie odpowiednio trwałej konstrukcji.

Na rysunku 4.11 przedstawiono przebieg zależności nasiąkliwości masowej próbek od zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych w mieszance. Badanie zostało przeprowadzone na 3 próbkach walcowych (80x80 mm) wykonanych dla każdej z recept przedstawionych w tabelicy 3.1.

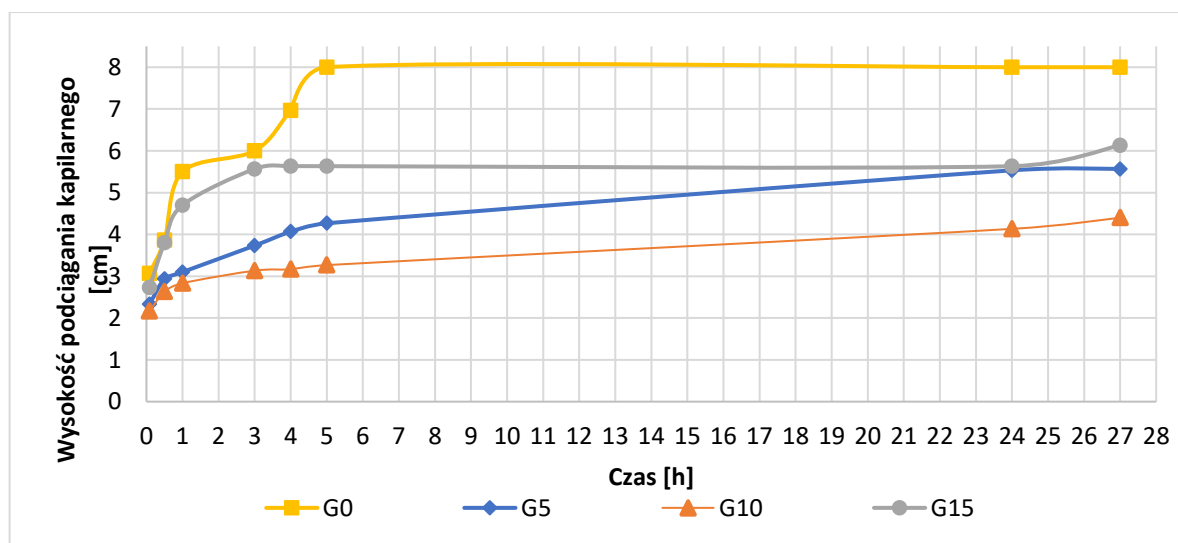
Próbki kontrolne G0, w których składzie nie zastosowano rozdrobnionych odpadów gumowych, osiągnęły najwyższą wartość nasiąkliwości masowej równą 11,49%. Drugi z kolei wynik uzyskały próbki serii G15, osiągając nasiąkliwość równą 10,48%. Trzeci w kolejności wynik uzyskały próbki serii G5 uzyskując nasiąkliwość równą 9,36%. Najlepszy, a co za tym idzie najniższy wynik nasiąkliwości uzyskały próbki serii G10. Średnia wartość nasiąkliwości wynosiła 8,97%.



Rys. 4.11. Wykres zależności nasiąkliwości masowej od zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych

Najniższą nasiąkliwością charakteryzują się próbki z 10% dodatkiem rozdrobnionych odpadów gumowych wynoszącą 8,97%. Największą różnicę nasiąkliwości pomiędzy poszczególnymi receptami uzyskano stosując 5% rozdrobnionych odpadów gumowych (G5). Taka ilość dodatku powoduje zmniejszenie nasiąkliwości w stosunku do mieszanki G0 o 2,13% uzyskując wynik 9,36%. Zastosowanie dodatku kolejnych 5% rozdrobnionych odpadów gumowych (recepta G10) powodują, że obniżenie nasiąkliwości jest już znacznie mniejsze i wynosi 0,39% w stosunku do recepty G5. Natomiast zastosowanie 15% dodatku rozdrobnionych odpadów gumowych powoduje zwiększenie się wartości nasiąkliwości o 1,51% w stosunku do recepty G10, przez co badane próbki uzyskały nasiąkliwość zbliżoną do nasiąkliwości próbek kontrolnych (G0). Takie zachowanie materiału pokrywa się z obserwacjami poczynionymi dla badań zawartych w etapie „0” i wynika ze zbyt dużego rozluźnienia struktury materiału spowodowanego większą zawartością odpadów gumowych, które rozprężając się po zagęszczeniu próbki powodują powstawanie większych zawartości wolnych przestrzeni, które mogą wchłaniać wodę.

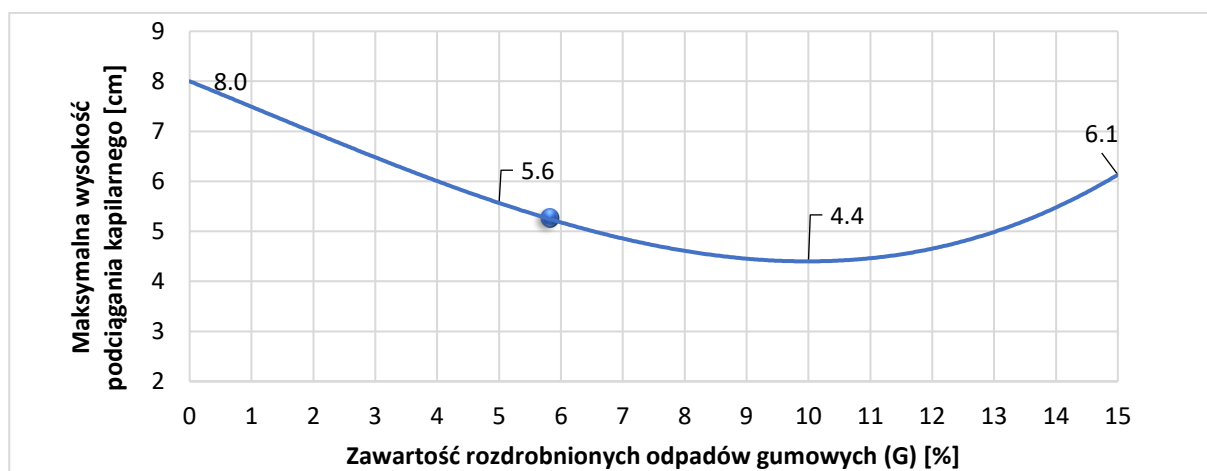
Na rysunku 4.12 przedstawiono wyniki badania podciągania kapilarnego próbek wykonanych według recept przedstawionych w tabelicy 3.1. Do badania wykorzystano po 3 próbki dla każdej z recept, zaś samo badanie trwało 27 godzin.



Rys. 4.12. Wykres zmiany wysokości podciągania kapilarnego w czasie

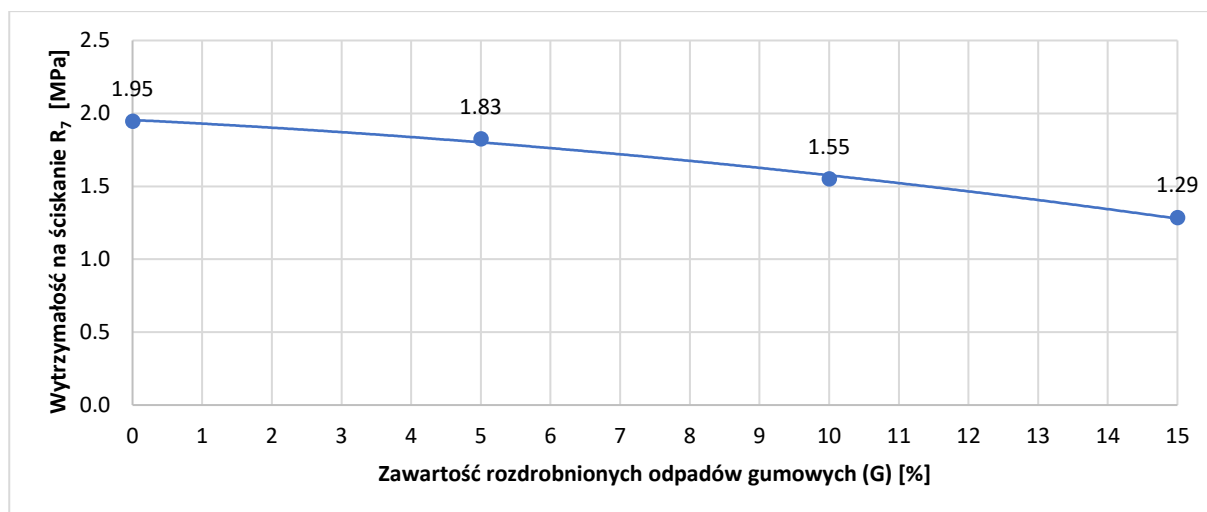
Próbki kontrolne, bez zawartości odpadów gumowych (G0) odnotowały najszybszy średni przyrost wysokości podciągania kapilarnego równy 1,6 cm/h, uzyskując maksymalną wartość podciągania równą wysokości próbki (80 mm) już w 5 godzinie badania. Próbki serii G5, G10 oraz G15, niezależnie od zawartości dodatku odpadów gumowych, uzyskały wysokości podciągania kapilarnego niższe niż wysokość próbki, nawet po 27 godzinach badania. Najwyższą wartość wysokości podciągania kapilarnego oraz jego najszybszy przyrost spośród tych próbek odnotowano dla próbki G15, która uzyskała maksymalną wartość podciągania kapilarnego równą 6,1 cm. W przypadku tej recepty po 3 godzinie badania nastąpiła stabilizacja uzyskanych pomiarów na wysokości około 5,6 cm, a sama średnia prędkość przyrostu wysokości podciągania kapilarnego wynosiła 0,23 cm/h. Próbki wykonane

według recepty G5 uzyskały drugi w kolejności wynik podciągania kapilarnego. Średnia wartość maksymalnego podciągania kapilarnego wynosi 5,6 cm. Średnia prędkość przyrostu wysokości podciągania kapilarnego jest w przypadku tej recepty niższa niż uzyskana dla recepty G15 i wynosi 0,21cm/h. Najniższą wartość maksymalnej wysokości podciągania kapilarnego oraz jego najwolniejszy przyrost odnotowano dla próbek wykonanych według recepty G10. Próbki te uzyskały średnią wartość maksymalnej wysokości podciągania kapilarnego równą 4,4 cm, a średnia prędkość przyrostu wysokości podciągania kapilarnego wynosiła 0,16 cm/h. Na rysunku 4.13 przedstawiono zależność pomiędzy maksymalną wysokością podciągania kapilarnego, a zawartością rozdrobnionych odpadów gumowych w mieszance.



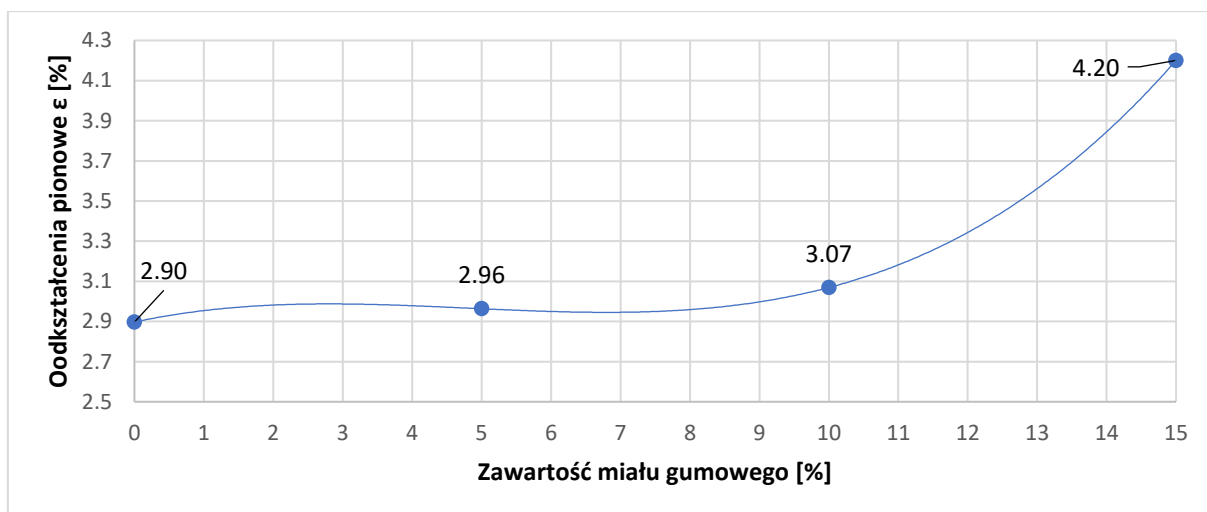
Rys. 4.13. Wykres zależności maksymalnej wysokości podciągania kapilarnego od zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych w mieszance

Na rysunku 4.14 przedstawiono wyniki badania wytrzymałości na ściskanie próbek po 7 dniach pielęgnacji. Przeprowadzone badania wytrzymałościowe obejmowały kontrolę siły niszczącej oraz deformacji przy niej występującej. Badanie zostało przeprowadzone na 3 próbkach dla każdej z recept.



Rys. 4.14. Wykres zależności wytrzymałości na ściskanie po 7 dniach pielęgnacji od zawartości rozdrobnionych gumowych mieszance

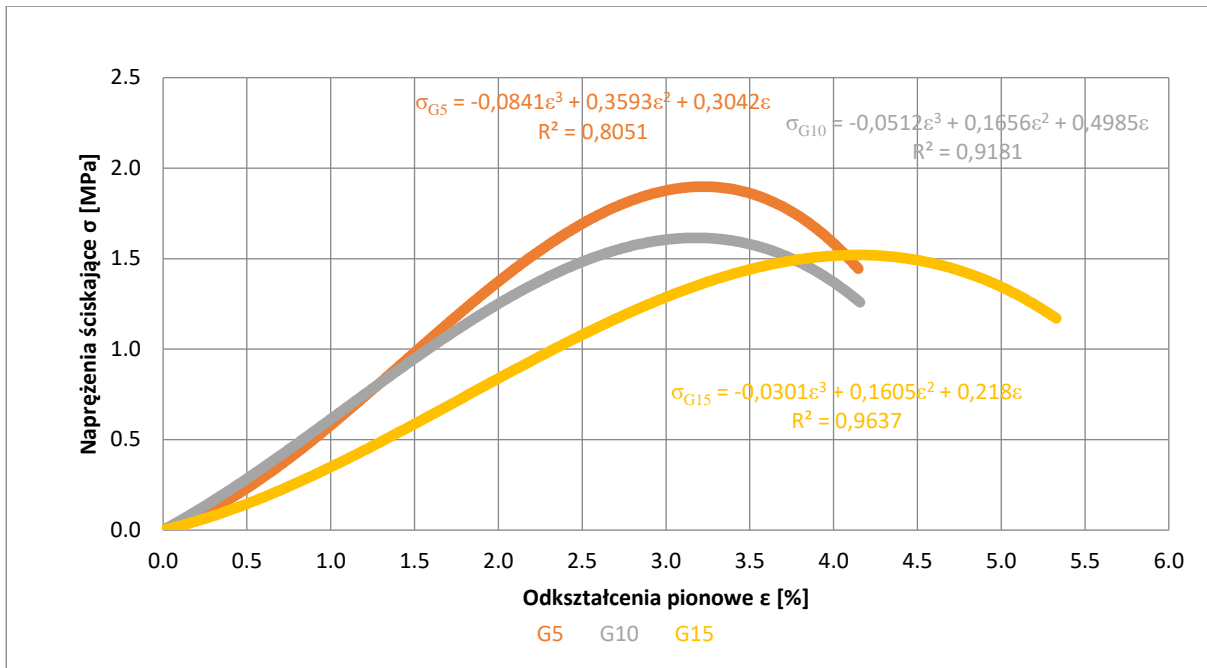
W wyniku badania wytrzymałościowego najwyższą wartość wytrzymałości na ściskanie uzyskały próbki serii G0, czyli próbki kontrolne. Próbki te uzyskały średnią wartość wytrzymałości na ściskanie równą 1,95 MPa. Próbki, które zawierały w swoim składzie rozdrobnione odpady gumowe uzyskiwały niższe wartości wytrzymałości. Próbki G5 uzyskały wartości wytrzymałości na ściskanie na poziomie 1,83 MPa, w przypadku próbek serii G10 wartość wytrzymałości wynosiła 1,55 MPa, zaś dla próbek serii G15: 1,29 MPa. Spadek wytrzymałości spowodowany zastosowaniem rozdrobnionych odpadów gumowych jest efektem spodziewanym, ponieważ zastępuje się wytrzymałe ziarna kruszywa i matrycy cementowo–popiołowej cząsteczkami odpadów gumowych, charakteryzujących się elastycznością oraz podatnością. Spadek ten jednak nie jest stały. Najniższe obniżenie wartości wytrzymałości na ściskanie obserwuje się przy zastosowaniu 5% dodatku odpadów gumowych, spadek ten wyniósł 0,12 MPa. Dla mieszanki G10 wartość wytrzymałości wykazała dalszy spadek o 0,28 MPa w stosunku do serii G5. W przypadku serii G15 odnotowujemy kolejne obniżenie wytrzymałości na ściskanie o 0,26 MPa w stosunku do serii G10. W związku z tym można stwierdzić, iż 5% dodatek rozdrobnionych odpadów gumowych ma najmniejszy wpływ na obniżenie wartości wytrzymałości, zaś dodatki zastosowane w seriach G10 oraz G15 prezentują podobny stopień obniżenia wytrzymałości na ściskanie.



Rys. 4.15. Wykres zależności odkształceń podłużnych od zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych w mieszance po 7 dniach pielęgnacji

Na rysunku 4.15 przedstawiono zależność pomiędzy uzyskanymi przy zniszczeniu próbek średnimi wartościami odkształceń podłużnych, a zawartością rozdrobnionych odpadów gumowych.

Jak można zaobserwować, próbki G0, G5 oraz G10 uzyskują bardzo zbliżone wartości maksymalnych odkształceń podłużnych. Wynoszą one kolejno 2,9% dla próbek G0, 2,96% dla próbek G5 oraz 3,07% dla próbek G10. Można w związku z tym stwierdzić, iż zawartość rozdrobnionych odpadów gumowych nie ma wpływu na odkształcalność próbek przy teście wytrzymałościowym po 7 dniach pielęgnacji. Dopiero 15% dodatek rozdrobnionych odpadów gumowych spowodował znaczący wzrost odkształceń podłużnych do poziomu 4,2%, co stanowi wzrost o około 1,2% w stosunku do pozostałych próbek.



Rys. 4.16. Wykres zależności naprężenie – odkształcenie dla próbek serii G5, G10, G15 po 7 dniach pielęgnacji

W badaniu wytrzymałościowym po 7 dniach pielęgnacji próbek, poza kontrolą maksymalnej siły niszczącej oraz maksymalnej deformacji przy jakiej ona występowała, dokonywano również stałej kontroli naprężeń oraz odkształceń. Pomiar odkształceń oraz naprężeń obejmował próbki serii G5, G10 oraz G15.

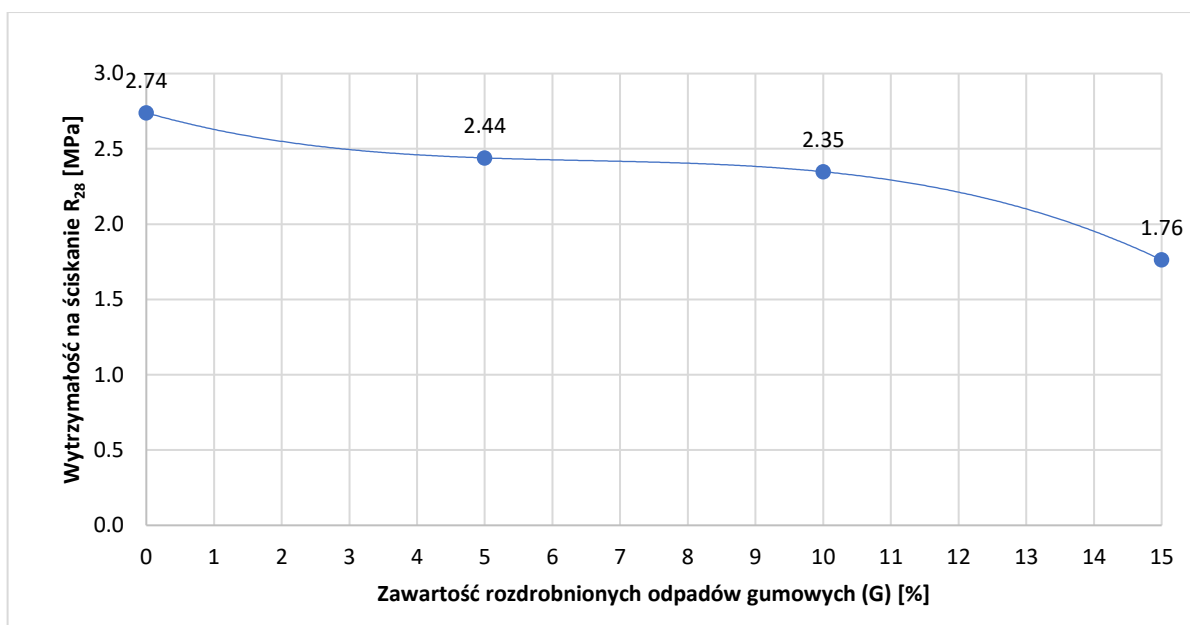
Na rysunku 4.16 zaznaczono chmury punktów odpowiadające relacji naprężenie odkształcenie przy badaniu wytrzymałości na ściskanie. Następnie na bazie punktów dopasowano linie trendu uśredniające uzyskane dane. Analizując kształt oraz przebieg linii trendu można stwierdzić, iż nie występuje znaczna różnica pomiędzy próbkami serii G5 oraz G10, oprócz osiągniętego maksymalnego naprężenia. W przypadku serii G15 można już zaobserwować znaczne obniżenie sztywności materiału (wolniejszy przyrost naprężeń w stosunku do odkształceń) oraz zmianę zachowania próbki w czasie jej zniszczenia. Próbki serii G15 wykazują wolniejszy spadek naprężenia po zniszczeniu w stosunku do próbek serii G5 oraz G10, dla których w momencie zniszczenia następuje gwałtowny spadek wartości naprężeń. Dla próbek serii G5, zakres, w którym próbki utrzymują naprężenia powyżej 90% maksymalnej wartości, rozciąga się w przedziale 2,4–3,9%, co daje długość przedziału równą 1,5%. W przypadku próbek serii G10 przedział ten występuje pomiędzy 2,3–3,9%, co daje długość przedziału 1,6%, zaś w przypadku próbek G15 przedział ten mieści się pomiędzy 2,7–5,3%, co oznacza, iż w tym przypadku długość przedziału wynosi 2,6%. Wyniki te świadczą o wpływie rozdrobnionych odpadów gumowych na mechanikę zniszczenia materiału. Próbki serii G5 oraz G10 charakteryzowały się mechaniką zbliżoną do kruchego pęknięcia, co oznacza, iż w momencie osiągnięcia maksymalnej wartości naprężeń oraz dalszym przyroście odkształceń odczytywane wartości naprężeń znacząco malały. W przypadku próbek serii G15 obserwowany spadek naprężeń jest znacznie wolniejszy, dzięki czemu próbka prezentuje wysoką wytrzymałość w szerokim zakresie odkształceń. Ostatnim już aspektem zwracającym

uwagę, przy okazji analizy przedstawionych danych, są zmiany w wartości współczynnika korelacji  $R^2$  odzwierciedlającego dokładność opisu otrzymanych wyników badań przez funkcję trendu. Biorąc pod uwagę, iż każda z analizowanych chmur punktów została opisana wielomianową funkcją 3-go stopnia, można stwierdzić, iż zmiany w wartości współczynnika korelacji spowodowane są zmianami w rozrzutach uzyskanych danych. Wartości współczynników korelacji określonych dla linii trendu poszczególnych recept przedstawiono poniżej:

- G5 –  $R^2=0,8051$
- G10 –  $R^2=0,9181$
- G15 –  $R^2=0,9637$

Wraz ze wzrostem zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych wartości współczynników korelacji również rosną. Świadczy to o zmniejszeniu się rozrzutów pomiędzy wynikami uzyskanymi dla poszczególnych próbek wykonanych w ramach jednej recepty wraz ze wzrostem zawartości odpadów gumowych w nich występujących. Można to wytłumaczyć zmniejszaniem się sztywności badanego kompozytu wraz ze zwiększaniem się zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych. To prowadzi bezpośrednio do równomiernego rozchodzenia się naprężeń w próbce, przez co większa jej część jest wciągana do współpracy. Dzięki temu, zjawiska lokalne, które w przypadku kruszywowych mieszanek związanych spoiwem mają bardzo duży wpływ na globalne zachowanie badanego materiału, są niwelowane i nie wpływają w tak dużym stopniu na uzyskiwane wyniki.

Na rysunku 4.17 przedstawiono wyniki badania wytrzymałości na ściskanie próbek po 28 dniach ich pielęgnacji. Badanie zostało przeprowadzone dla serii G0, G5, G10 oraz G15 na grupie 3 próbek wykonanych dla każdej z recept.

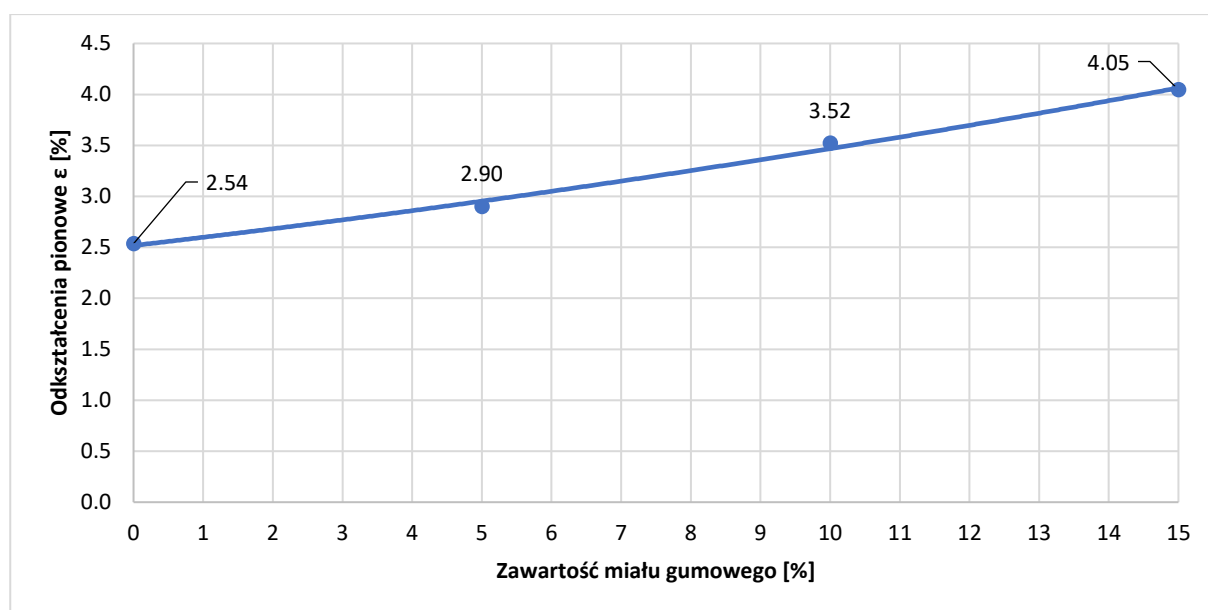


Rys. 4.17. Wykres zależności wytrzymałości na ściskanie próbek od zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych, po 28 dniach pielęgnacji



Podczas badania wytrzymałościowego po 28 dniach pielęgnacji próbki serii G0 uzyskały najwyższą wartość wytrzymałości na ściskanie równą 2,74 MPa. Dla próbek serii G5 wartość wytrzymałości na ściskanie wynosi 2,44 MPa, dla próbek G10 2,35 MPa, zaś dla próbek serii G15 1,76 MPa. Podobnie, jak w przypadku badania wytrzymałości na ściskanie próbek po 7 dniach ich pielęgnacji, wzrastające zawartości dodatków rozdrobnionych odpadów gumowych powodowały obniżanie się uzyskiwanych wartości wytrzymałości na ściskanie. Największe ubytki wytrzymałości uzyskano dla próbek serii G5 oraz G15. Różnice wytrzymałości na ściskanie pomiędzy serią G5 i G0 wynosiła 0,30 MPa, zaś pomiędzy serią G15 i G10 0,59 MPa. Dla dodatków 5 i 10% rozdrobnionych odpadów gumowych różnica w wytrzymałości równa jest 0,09 MPa. Wyniki te świadczą o tym, iż dodatki rozdrobnionych odpadów gumowych mniejsze lub równe 10% będą najkorzystniejsze dla otrzymanej mieszanki pod kątem wytrzymałościowym, gdyż uzyskujemy najmniejsze spadki wytrzymałości, a jednocześnie uzyskujemy korzyści wynikające z mniejszej nasiąkliwości oraz wysokości podciągania kapilarnego.

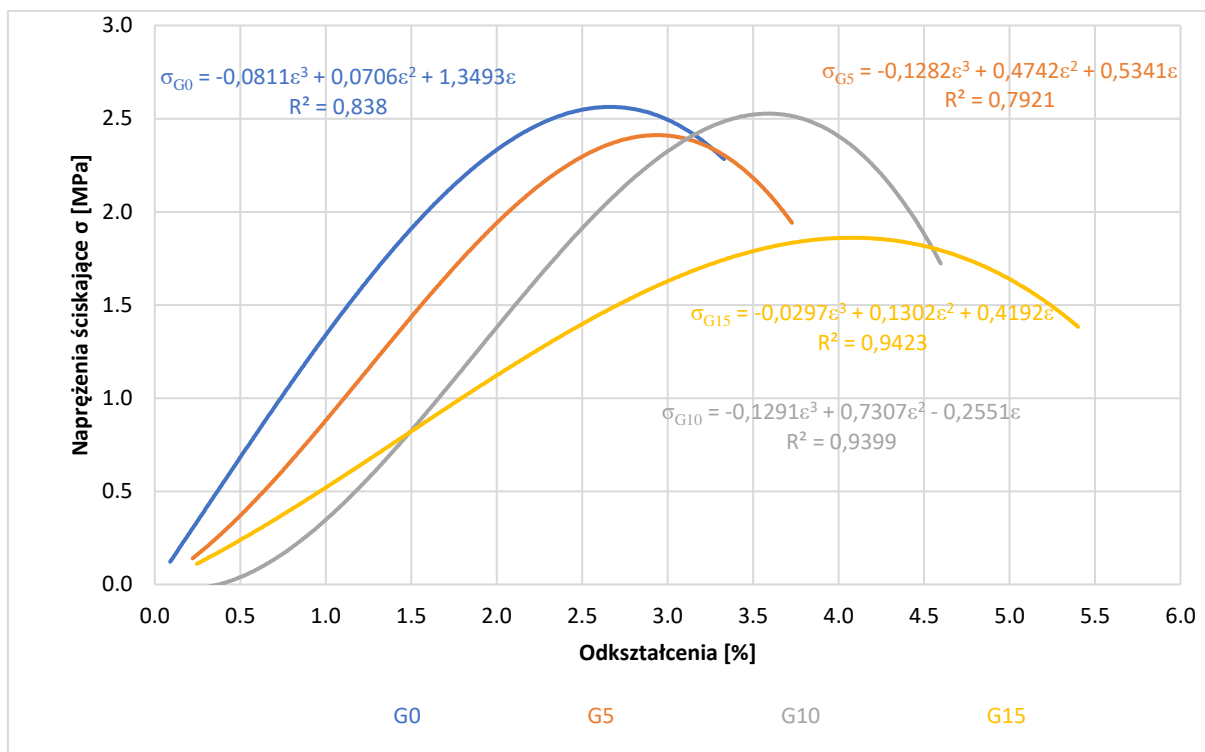
Na rysunku 4.18 przedstawiono wykres zależności maksymalnych odkształceń podłużnych mierzonych w momencie zniszczenia próbki od zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych.



Rys. 4.18. Wykres zależności maksymalnych odkształceń podłużnych od zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych w mieszance po 28 dniach pielęgnacji próbek

Wraz ze wzrostem zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych rośnie również wartość odkształcenia w momencie zniszczenia. Próbki G0 uzyskały odkształcenia równe 2,54%, dla próbek G5 odkształcenia te wynosiły 2,90%, dla próbek G10 3,52%, zaś dla próbek G15 odkształcenia wynoszą 4,05%. Zaobserwowano, że zwiększające się ilości dodatków rozdrobnionych odpadów gumowych będą powodowały coraz większy przyrost odkształcalności próbki.

Badanie wytrzymałościowe wykonane po 28 dniach pielęgnacji próbek, poza kontrolą maksymalnej siły ściskającej oraz odkształceń przy niej występujących, obejmowało również stałą kontrolę zależności naprężenie – odkształcenie. Wyniki badania zostały zaprezentowane na rysunku 4.19.



Rys. 4.19. Zbiorczy wykres linii trendu dla zależności naprężenie – odkształcenie dla próbek G0, G5, G10, G15 po 28 dniach pielęgnacji próbek

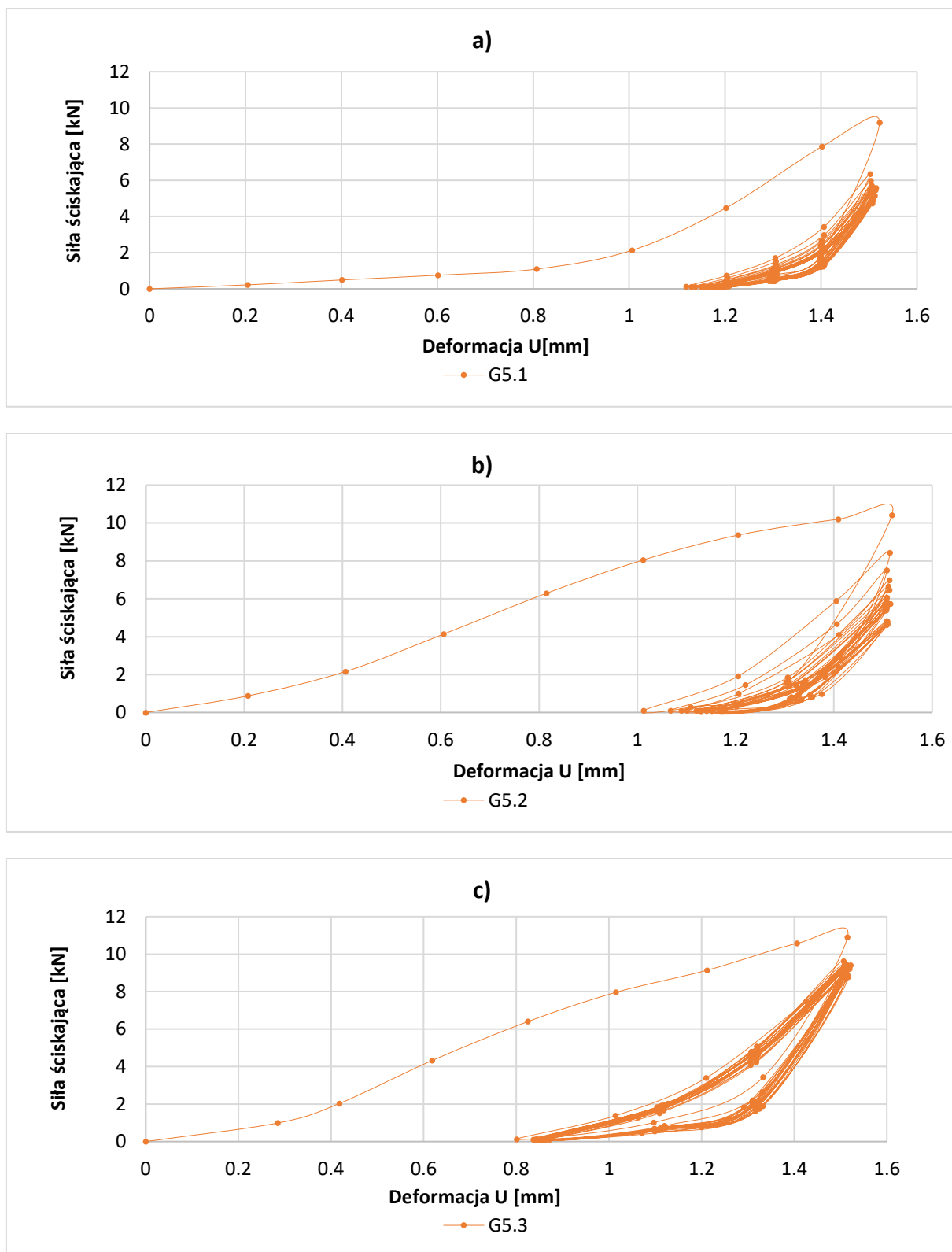
Na rysunku 4.19 oznaczono linie trendu opisujące chmury punktów uzyskane w badaniu, w celu zwiększenia przejrzystości wykresu, nie oznaczono na nim punktów. Jak można zauważyć, zawartość rozdrobnionych odpadów gumowych wpływa na gwałtowność zniszczenia próbki przy jej obciążaniu. Podobnie jak dla próbek po 7 dniach pielęgnacji, określono ją jako wielkość przedziału odkształceń, w którym próbki zachowują wartość naprężeń powyżej 90% maksymalnych. Przedziały te dla poszczególnych mieszanek są następujące:

- Dla mieszanki G0: 2,2–3,0% – długość przedziału wynosi 0,8%
- Dla mieszanki G5: 2,4–3,5% – długość przedziału 1,1%
- Dla mieszanki G10: 2,7–4,3% – długość przedziału wynosi 1,6%
- Dla mieszanki G15: 3,0–5,1% – długość przedziału wynosi 2,1%

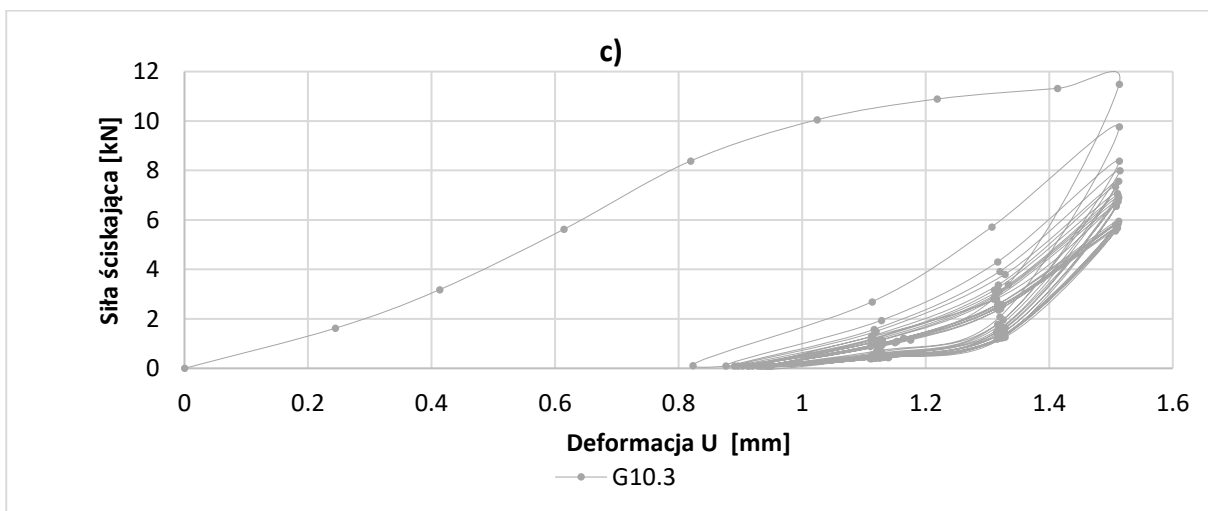
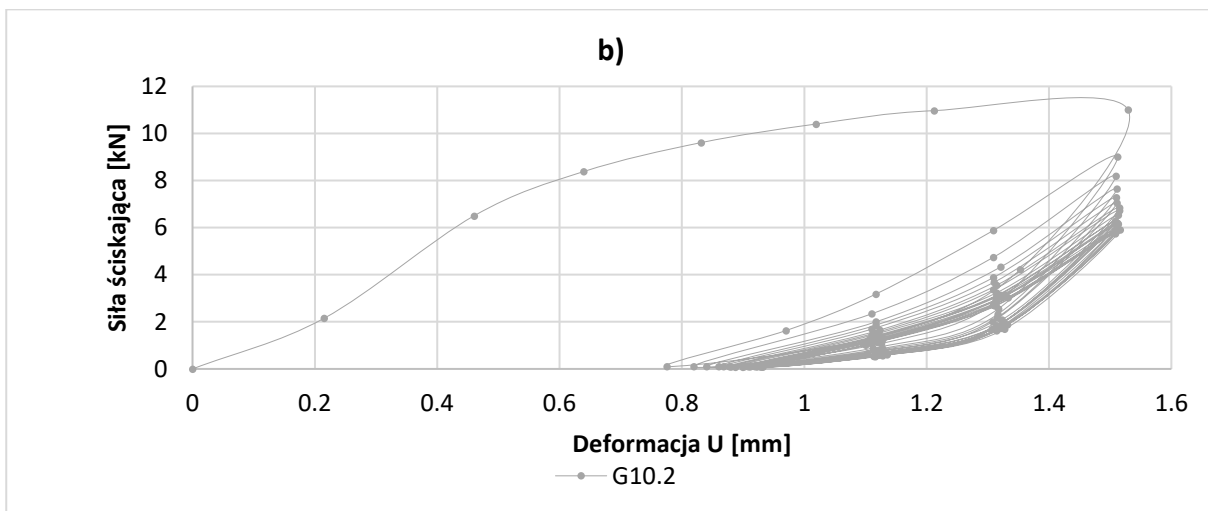
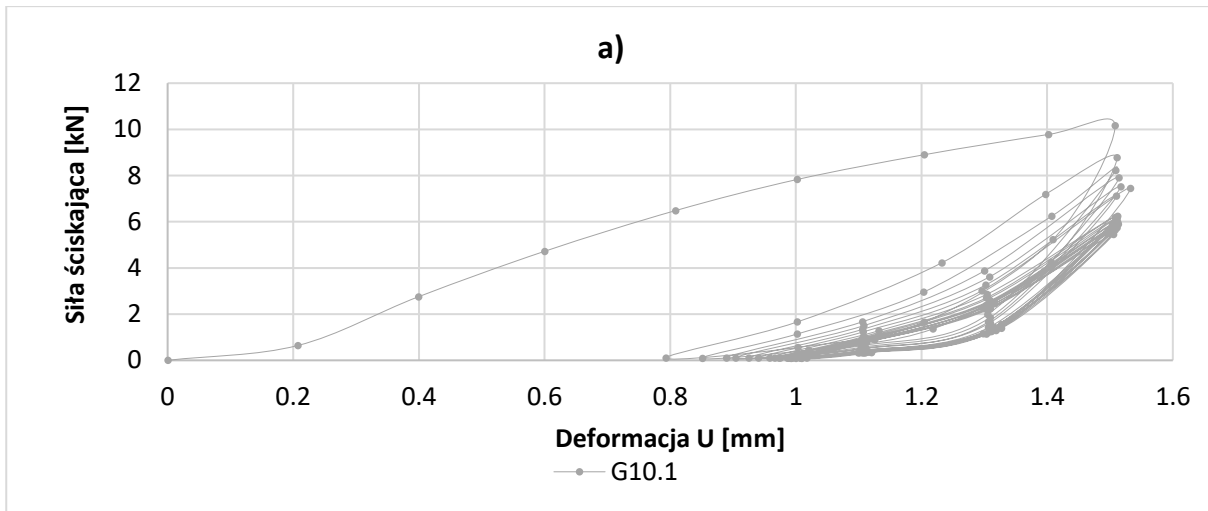
Zgodnie z powyższymi danymi można stwierdzić, iż wraz ze wzrostem zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych zwiększa się przedział odkształceń, w którym próbka w czasie obciążenia utrzymuje naprężenia powyżej 90% wytrzymałości na ściskanie. W przypadku 5% dodatku rozdrobnionych odpadów gumowych wielkość przedziału wzrasta o 0,3% w stosunku do próbek G0. Natomiast w przypadku dodatków 10 oraz 15%, powiększenie przedziału wynosi około 0,5%, dla kolejnych zawartości, czyli dla próbek G10

w stosunku do próbek G5 i dla próbek G15 w stosunku do próbek G10. Takie zachowanie badanych próbek świadczy o wpływie rozdrobnionych odpadów gumowych na globalną pracę materiału kompozytowego. Wraz ze wzrostem zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych zwiększa się równomierność rozchodzenia się naprężeń po objętości badanych próbek, przez co większa ich część jest jednocześnie wciągana do współpracy. To pozwala na przesunięcie progu odkształceń, przy którym materiał ulegnie całkowitemu zniszczeniu, dzięki czemu tego typu kompozyt wyróżnia się bezpieczniejszą pracą w warunkach bardzo dużych obciążeń lub nawet przeciążenia. Powyższą tezę potwierdzają również wartości współczynnika korelacji  $R^2$ , którego wartość rośnie wraz ze wzrostem zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych. Wzrost wartości współczynnika korelacji jest bezpośrednim dowodem na zmniejszenie się rozrzutów pomiędzy uzyskanymi wynikami w ramach jednej mieszanki. Wraz ze wzrostem zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych próbki uzyskują coraz to niższe wartości naprężenia przy porównywalnych poziomach odkształceń. To świadczy o wpływie odpadów gumowych na zmniejszanie się modułu sztywności badanych kompozytów. Wynika to z zastępowania sztywnych ziaren mineralnych kruszywa, cząsteczkami rozdrobnionych odpadów gumowych, o znacznie niższej sztywności.

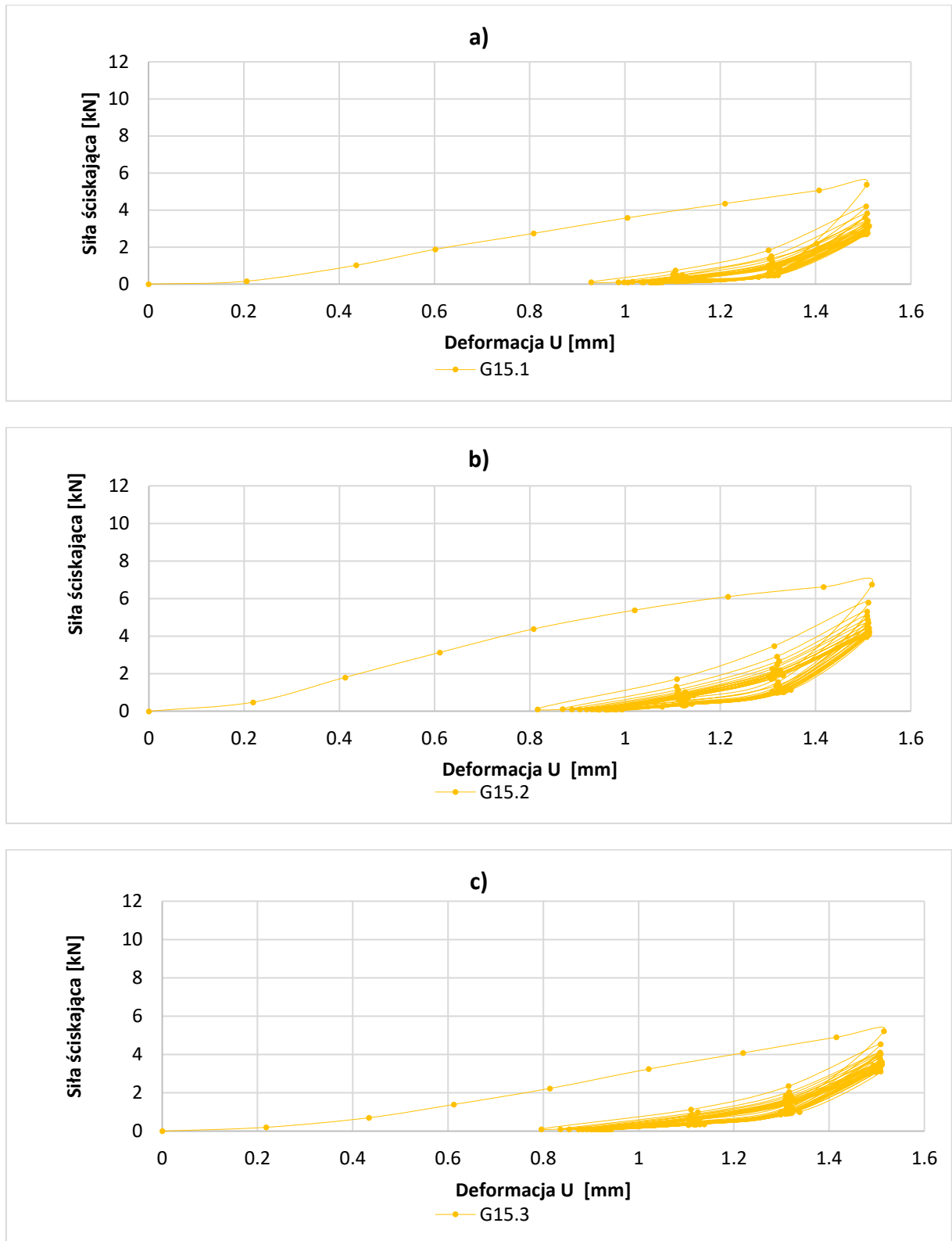
W etapie „1” zostało wykonane badanie w warunkach obciążenia cyklicznego, którego celem było ustalenie wpływu zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych na sztywność, zakres odkształceń plastycznych i sprężystych oraz trwałość zmęczeniową badanych kompozytów. Badanie zostało przeprowadzone na próbkach wykonanych z mieszanek G5, G10 oraz G15. Na podstawie danych dotyczących siły ściskającej oddziaływującej na próbki oraz deformacji nią wywołanych, sporządzono wykresy pętli histerez każdej z badanych próbek (Rys. 4.20a÷4.22c). W każdym przypadku wyraźnie odznacza się I cykl obciążenia próbki, w którym powstają znaczne deformacje plastyczne sięgające od 0,8 do 1,1 mm. Następnie próbki przechodzą w zakres pracy sprężystej osiągając maksymalne deformacje ustalone zgodnie z procedurą badania 1,5 mm. We wszystkich przypadkach w I cyklu obciążenia odnotowuje się najwyższą wartość siły oddziaływującej na próbkę oraz największy spadek wartości tej siły pomiędzy pierwszym a drugim cyklem. Świadczy to o częściowym zniszczeniu próbki w zakresie tych deformacji. Następnie w ramach kolejnych cykli obciążenia i odciążenia od 2 do 20, próbki wykazują podobny charakter pracy, zróżnicowany jedynie zakresem deformacji sprężystych oraz sił oddziaływujących na próbkę.



Rys. 4.20. Zależność siła–deformacja dla próbki a) G5.1; b) G5.2; c) G5.3



Rys. 4.21. Zależność siła–deformacja dla próbki a) G10.1; b) G10.2; c) G10.3



Rys. 4.22. Zależność siła–deformacja dla próbki a) G15.1; b) G15.2; c) G15.3



Próbki serii G5 (Rys. 4.20a–c) wykazują największe rozrzuty wyników. Ich zakres deformacji sprężystych sięga:

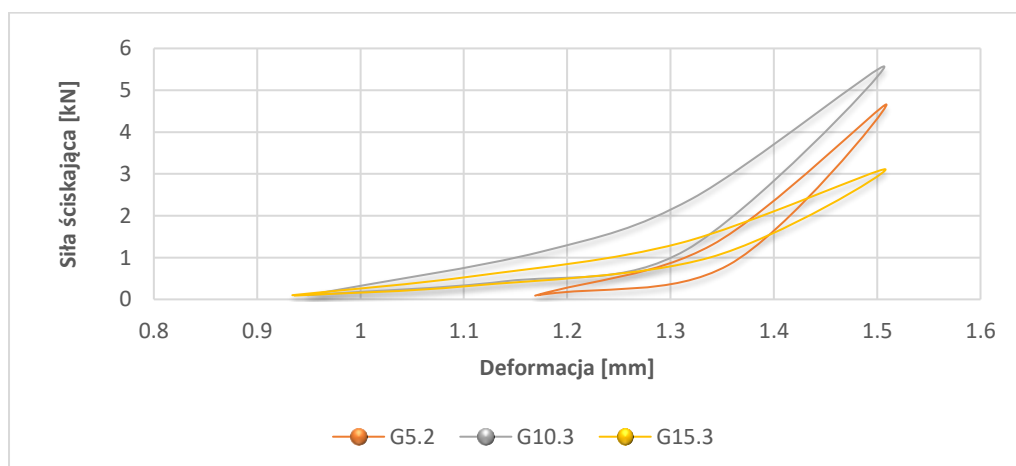
- 1,16 mm dla próbki G5.1
- 1,00 mm dla próbki G5.2
- 0,8 mm dla próbki G5.3

Podobnie jest w przypadku pomiaru siły ściskającej, która wynosiła:

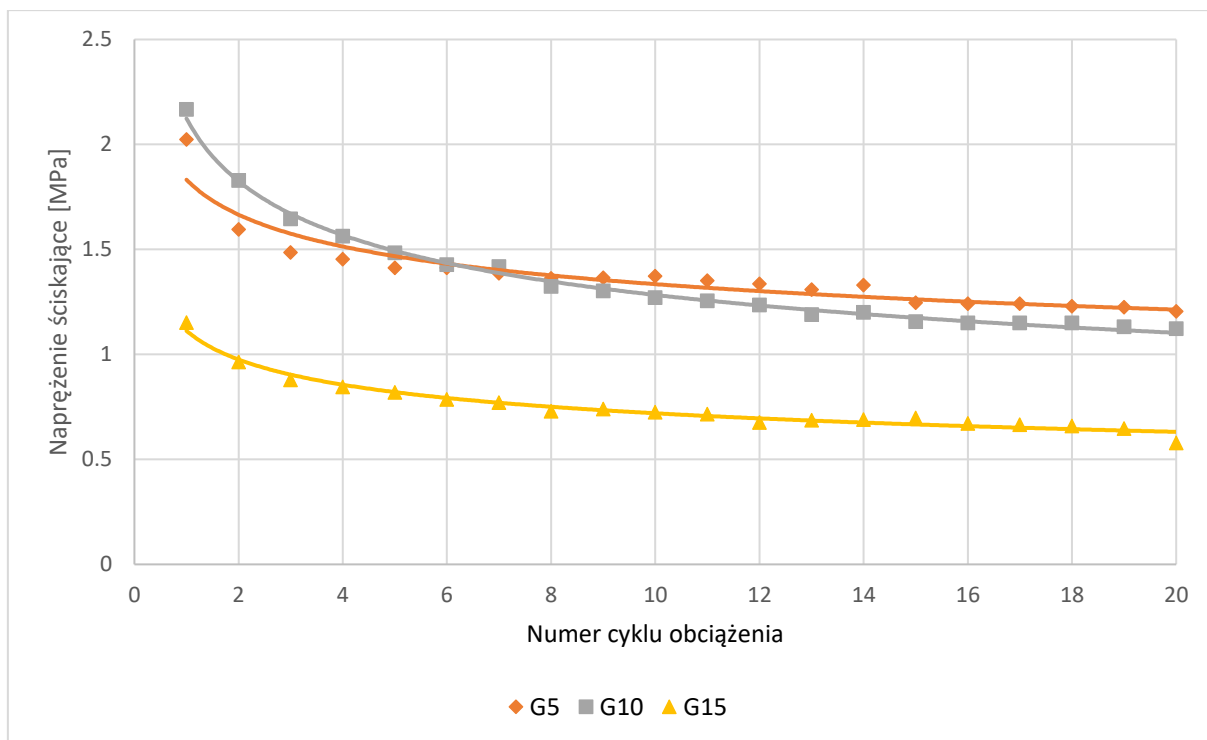
- 6,0 kN dla próbki G5.1
- 8 kN dla próbki G5.2
- 9,9 kN dla próbki G5.3

Próbki te wykazują jednak niewielkie zmiany w wartościach deformacji oraz sił ściskających pomiędzy kolejnymi cyklami obciążenia. W przypadku próbek serii G10, rozrzuty w odczytanych wynikach są mniejsze niż w przypadku serii G5. Zakres deformacji sprężystych rozpoczyna się dla każdej z próbek od około 0,8 mm, zaś maksymalne wartości siły ściskającej wynoszą około 9 kN. Próbki G10 wykazują również tendencję do szybszego wytracania uzyskiwanych wartości sił oraz deformacji w pierwszych 3–4 cyklach obciążenia. Próbki serii G15 wykazują zbliżony do próbek G10 zakres deformacji sprężystych rozpoczynający się w okolicach 0,8 mm oraz najniższe wartości odczytywanych sił. Wynoszą one około 4 kN dla próbek G15.1 i G15.3 oraz 5,9 kN dla próbki G15.2.

Na rysunku 4.23 przedstawiono ostatnie pętle histerezy dla wybranych próbek pochodzących serii G5, G10 oraz G15. Jak można zauważyć, próbka serii G10 charakteryzuje się najwyższymi wartościami deformacji sprężystych oraz sił oddziaływujących na próbkę. Zakres deformacji sprężystych zaczyna się dla nich w okolicy 0,95 mm oraz osiągają wartość maksymalną dla siły równej 5,6 kN. W przypadku próbki serii G5 mamy do czynienia z najkrótszym zakresem deformacji sprężystych rozpoczynającym się w okolicach 1,17 mm oraz pośrednimi wartościami sił wynoszącymi 4,8 kN. Próbki G15 prezentują zakres deformacji sprężystych porównywalny z serią G10 (około 0,95 mm) oraz najniższymi odczytanymi wartościami siły o maksymalnej wartości 3 kN.



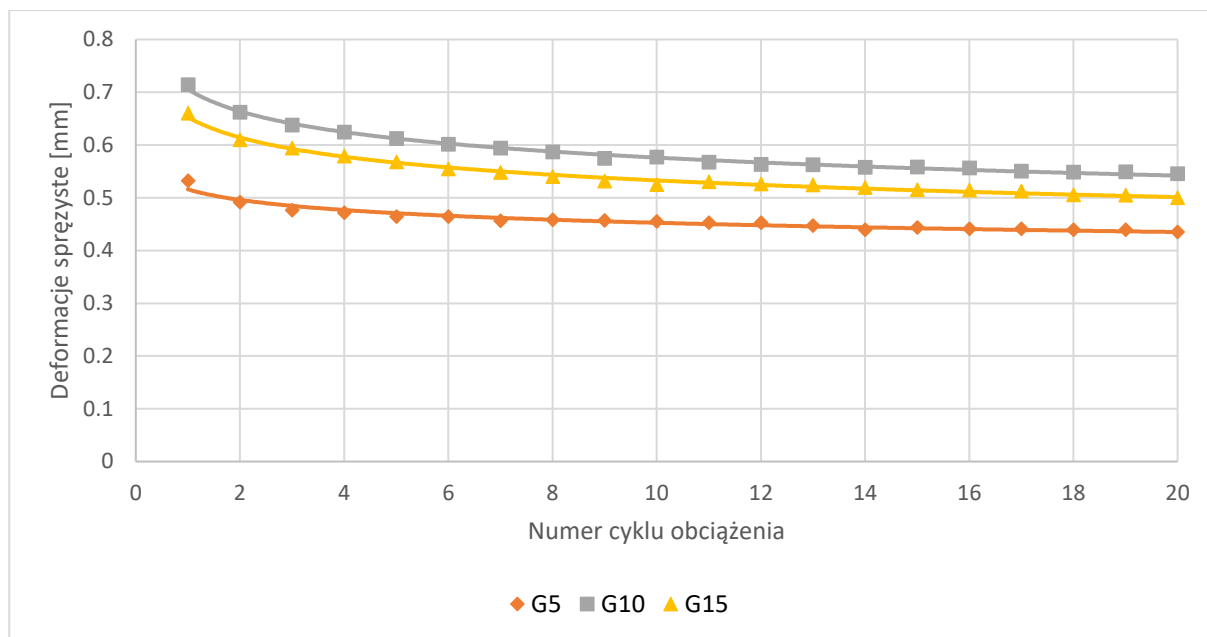
Rys. 4.23. Porównanie ostatniej pętli zależności siła–deformacja dla próbek G5, G10 oraz G15 po 28 dniach pielęgnacji próbek



Rys. 4.24. Średnie wartości maksymalnych naprężeń w każdym z cykli badania dla mieszanek G5, G10 oraz G15 po 28 dniach pielęgnacji próbek

Na rysunku 4.24 przedstawiono wartości średnich naprężeń ściskających wyznaczonych przy maksymalnych deformacjach w każdym cyklu badania. Najwyższe wartości odczytanych naprężeń uzyskują próbki serii G10, jednak tylko do 7 cyklu obciążenia, ponieważ od 8 cyklu najwyższe wyniki uzyskują próbki serii G5. Stan ten utrzymują się aż do 20 cyklu badania. Próbki serii G15 prezentują najniższe wartości naprężeń, jednak odnotowano dla nich najniższą amplitudę spadku wartości naprężeń pomiędzy pierwszym oraz ostatnim cyklem badania. Wszystkie przebadane próbki wykazują podobną tendencję do zmniejszania się różnic pomiędzy naprężeniami uzyskanymi w sąsiednich cyklach badania.

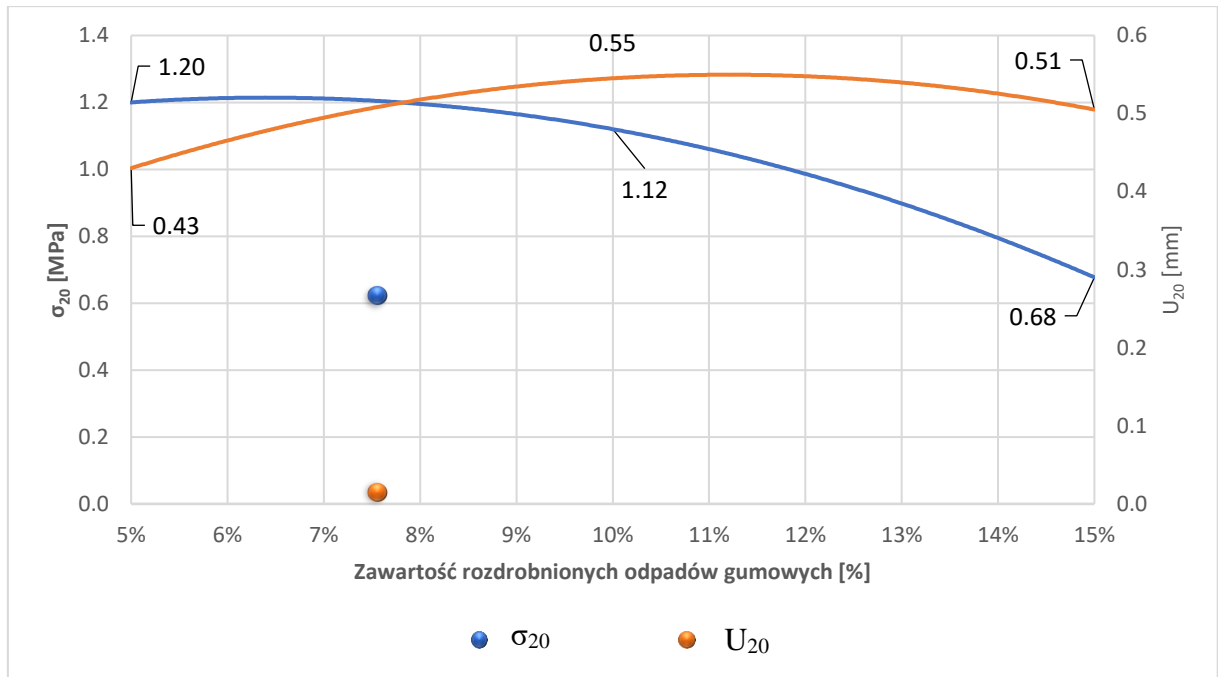
Podobnych obserwacji dokonano w przypadku analizy średnich wartości deformacji sprężystych uzyskanych przez próbki w każdym cyklu badania. Dane te przedstawiono na rysunku 4.25. Nie zaobserwowano tak dużej różnicy w wartościach deformacji uzyskiwanych dla pierwszego oraz ostatniego cyklu badania, jak w przypadku naprężeń. Wielkość deformacji ulega większym zmianom w cyklach obciążenia 1–5, dla cykli 6–20 obserwowane zmiany są mniejsze oraz mają charakter liniowy, o niskim współczynniku nachylenia funkcji. Próbki serii G10 uzyskały najwyższe wartości deformacji sprężystych od 0,71 mm w 1 cyklu obciążenia, do 0,55 mm w 20 cyklu obciążenia. Na drugim miejscu pod względem wielkości uzyskanych deformacji sprężystych uplasowały się próbki serii G15. Deformacje sprężyste wynoszące 0,66 mm dla 1 cyklu obciążenia oraz 0,50 mm dla 20 cyklu obciążenia. Próbki G5 uzyskały najniższe wartości deformacji sprężystych równe 0,53 mm dla 1 cyklu obciążenia oraz 0,44 mm dla 20 cyklu obciążenia.



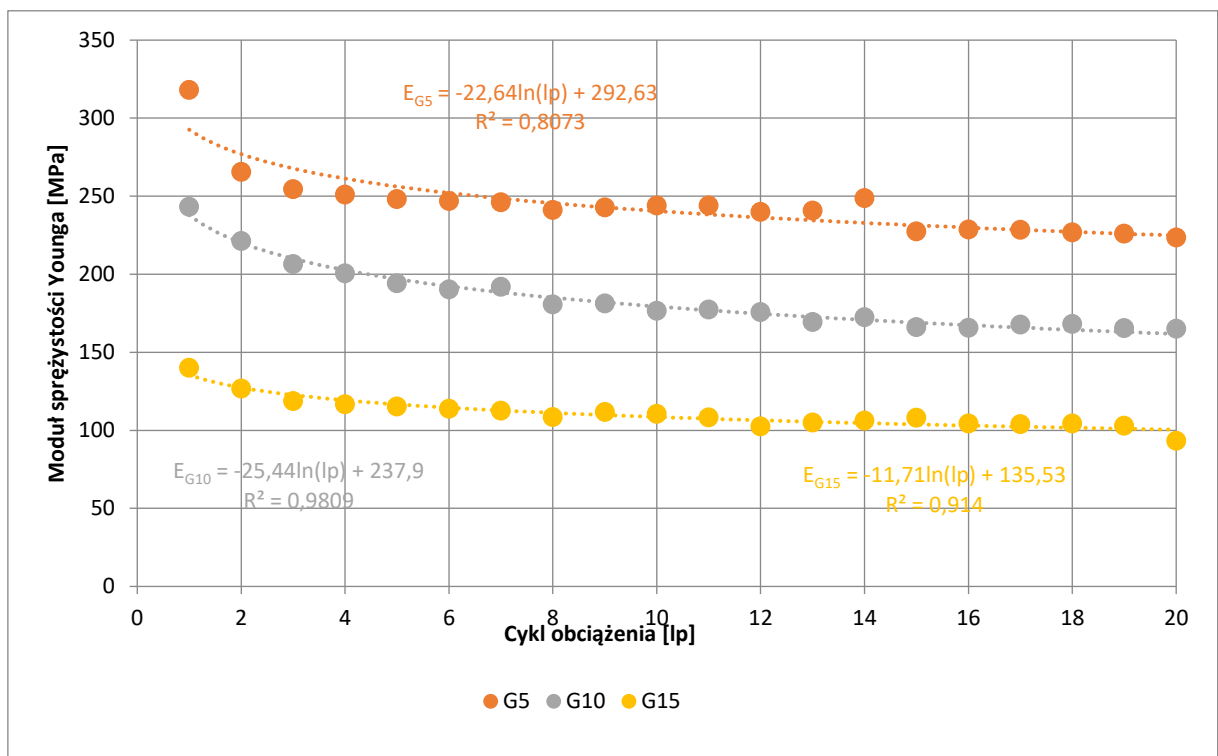
Rys. 4.25. Średnie wartości deformacji sprężystych w każdym z cykli badania dla mieszanek G5, G10 oraz G15 po 28 dniach pielęgnacji próbek

Na podstawie danych dotyczących naprężeń ( $\sigma_{20}$ ) oraz deformacji sprężystych ( $U_{20}$ ) uzyskanych w ostatnim cyklu badania, przedstawiono zależność tych wartości od zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych w próbkach (Rys. 4.26). Można zauważyć, że rosnące zawartości dodatków rozdrobnionych odpadów gumowych powodują zmniejszanie się wartości naprężeń. Jednak różnica w naprężeniach pomiędzy 5 oraz 10% dodatkiem rozdrobnionych odpadów gumowych, jest niewielka i wynosi 0,08 MPa. Znaczny spadek naprężeń odnotowujemy dopiero pomiędzy dodatkiem 10 a 15%, gdzie wynosi on 0,44 MPa. Analizując wpływ zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych na wielkość deformacji sprężystych można zauważyć, że nie powodują one ciągłego zwiększania się wartości tych deformacji. W przypadku 5% dodatku rozdrobnionych odpadów gumowych uzyskujemy wartość deformacji sprężystej równą 0,43 mm. Zwiększenie zawartości odpadów gumowych do poziomu 10% powoduje również zwiększenie się wartości deformacji sprężystych do wartości 0,55 mm (wzrost o 0,12 mm). Jednak kolejne zwiększenie zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych do 15% spowodowało spadek wartości deformacji sprężystych do wartości 0,51 mm (spadek o 0,04 mm).

Spośród przebadanych próbek najkorzystniejsze parametry, tj.: najwyższe wartości naprężeń oraz deformacji sprężystych, uzyskały próbki serii G10, dla których wartości naprężenia wynosiły 1,12 MPa, a deformacje sprężyste 0,55 mm. Optymalny dodatek rozdrobnionych odpadów gumowych, określony na podstawie rysunku 4.26 pozwalający uzyskać najwyższe wartości badanych parametrów wynosi około 7,9%. Może to zapewnić uzyskanie wartości naprężeń równych 1,20 MPa oraz deformacji sprężystych równych 0,50 mm.



Rys. 4.26. Wykres zależności naprężeń oraz deformacji w 20-tym cyklu badania od zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych, po 28 dniach pielęgnacji próbek



Rys. 4.27. Średnie wartości modułu sprężystości Younga w poszczególnych cyklach badania dla mieszanek G5, G10 oraz G15, po 28 dniach pielęgnacji próbek

Na podstawie wcześniej uzyskanych danych dotyczących średnich maksymalnych naprężeń oraz deformacji sprężystych próbek w poszczególnych cyklach badania, obliczono moduły sprężystości Younga badanych mieszanek (Rys. 4.27) według wzoru:

$$E = \frac{\sigma_{spr}}{\varepsilon_{spr}} \quad (4.5)$$

gdzie:

- $\sigma_{spr}$  – naprężenia sprężyste
- $\varepsilon_{spr}$  – odkształcenia sprężyste, obliczane na podstawie deformacji sprężystych przy założeniu wysokości próbki równej 80 mm, według wzoru:

$$\varepsilon_{spr} = \frac{DY_{spr}}{L} \quad (4.6)$$

gdzie:

- $DY_{spr}$  – deformacje sprężyste
- $L$  – wysokość próbki równa 80 mm

W przypadku wszystkich badanych mieszanek, w początkowych cyklach badania (około 5 cyklu) można zauważyć szybszy spadek wartości modułu sprężystości. W późniejszych cyklach wartość modułu maleje, jednak szybkość jego redukcji jest niższa.

Tablica 4.5. Zestawienie wartości modułu sprężystości w pierwszym oraz 20-tym cyklu badania

Mieszanka	Moduł sprężystości w pierwszym cyklu badania [MPa]	Moduł sprężystości w 20-tym cyklu badania [MPa]
G5	318,1	223,6
G10	243,2	165,2
G15	140,2	93,4

W tablicy 4.5 przedstawiono wartości modułu sprężystości w pierwszym i ostatnim cyklu badania dla mieszanek G5, G10 oraz G15. Na podstawie otrzymanych wartości można stwierdzić, że dodatki rozdrobnionych odpadów gumowych zmniejszają wartości modułu sprężystości w pierwszym jak i ostatnim cyklu obciążenia. Spadek wartości nie jest równomierny. Różnica pomiędzy wartością modułu sprężystości uzyskanego w pierwszym cyklu obciążenia, dla mieszanki G10 oraz G5 wynosi 74,9 MPa, zaś pomiędzy mieszankami G15 oraz G10 103,0 MPa. Zastosowanie dodatków rozdrobnionych odpadów gumowych wykazało również wpływ na zmniejszenie wartości modułu sprężystości pomiędzy pierwszym a ostatnim cyklem obciążenia. Najmniejszy spadek wartości uzyskano dla mieszanki G15 46,7 MPa, najwyższy dla mieszanki G5 94,5 MPa. Jednak w odniesieniu spadku wartości jako procentowego ubytku początkowego modułu sprężystości, prezentuje się on następująco:

- G5 – 29,71%
- G10 – 32,07%
- G15 – 33,34%

#### 4.1.3 Podsumowanie wyników badań zawartych w etapie 1

Dodatki rozdrobnionych odpadów gumowych powodują:

- Zmniejszenie wartości wilgotności optymalnej przygotowanych mieszanek. Wartość wilgotności optymalnej spada o około 0,5% na każde 5% dodatku rozdrobnionych odpadów gumowych
- Zmniejszenie się maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego (określonej według II metody Proctora). 5% dodatek rozdrobnionych odpadów gumowych spowodował obniżenie się wartości maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego o 0,145 g/cm<sup>3</sup>; 10% dodatek obniżył tę wartość o 0,186 g/cm<sup>3</sup>, zaś 15% dodatek o 0,218 g/cm<sup>3</sup>
- Obniżenie wartości nasiąkliwości badanych mieszanek. W przypadku próbek kontrolnych G0 ich nasiąkliwość masowa wynosiła 11,49%. 5% dodatek odpadów gumowych spowodował obniżenie się wartości nasiąkliwości masowej do 9,36%; przy 10% dodatku rozdrobnionych odpadów gumowych odnotowano kolejny spadek wartości nasiąkliwości masowej do wartości 8,97%; w przypadku próbek o najwyższej 15% zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych uzyskano wzrost wartości nasiąkliwości masowej do 10,48%
- Zmniejszenie szybkości oraz wysokości podciągania kapilarnego badanych próbek. Próbki kontrolne G0 uzyskały maksymalną wysokość podciągania kapilarnego równą wysokości próbki (8,0 cm) już w 5 godzinie badania. W przypadku próbek, w których zastosowano rozdrobnione odpady gumowe, uzyskano wysokości podciągania kapilarnego niższe od wysokości próbki, przy 27 godzinnej kontroli. Próbki o 5% zawartości odpadów gumowych uzyskały wysokość podciągania kapilarnego równą 5,6 cm, przy 10% dodatku odpadów gumowych uzyskano wysokość podciągania kapilarnego równą 4,4 cm, zaś przy 15% dodatku wysokość podciągania kapilarnego wynosiła 6,6 cm
- Obniżanie wartości wytrzymałości na ściskanie. Próbki kontrolne G0 uzyskały wytrzymałość na ściskanie po 7 dniach pielęgnacji równą 1,95 MPa oraz 2,74 MPa po 28 dniach pielęgnacji. 5% dodatek rozdrobnionych odpadów gumowych spowodował obniżenie wartości wytrzymałości do 1,83 MPa po 7 dniach pielęgnacji oraz do 2,44 MPa po 28 dniach pielęgnacji. 10% dodatek odpadów gumowych powodował kolejne obniżenie wartości wytrzymałości na ściskanie do 1,55 MPa po 7 dniach pielęgnacji i 2,35 MPa po 28 dniach pielęgnacji. W przypadku 15% dodatku rozdrobnionych odpadów gumowych uzyskano wartości wytrzymałości na ściskanie równe 1,29 MPa po 7 dniach pielęgnacji oraz 1,76 MPa po 28 dniach pielęgnacji
- Wzrost odkształcalności badanych próbek. Próbki kontrolne G0 uzyskały maksymalną odkształcalność przy zniszczeniu równą 2,9% dla badania po 7 dniach pielęgnacji oraz 2,54% po 28 dniach pielęgnacji. 5% dodatek odpadów gumowych spowodował podwyższenie się odkształcalności próbek do 2,96% po 7 dniach pielęgnacji oraz 2,90% po 28 dniach pielęgnacji. Przy 10% dodatku



odkształcalność próbek wynosiła 3,07% po 7 dniach pielęgnacji oraz 3,52% po 28 dniach pielęgnacji. Próbki z 15% dodatkiem odpadów gumowych uzyskały odkształcalność równą 4,2% po 7 dniach pielęgnacji oraz 4,05% po 28 dniach pielęgnacji

- Zwiększenie się zakresu odkształceń, w których badane próbki utrzymują naprężenia powyżej 90% maksymalnych naprężeń niszczących. Próbki G0 po 28 dniach pielęgnacji utrzymywały naprężenia powyżej 90% maksymalnych w przedziale odkształceń o długości 0,8%. Dla próbek z 5% zawartością odpadów gumowych przedział ten wynosił 1,5% przy badaniu po 7 dniach pielęgnacji oraz 1,1% przy badaniu po 28 dniach pielęgnacji. 10% dodatek odpadów gumowych skutkowało zwiększeniem się długości przedziału do 1,6% przy 7 dniach pielęgnacji oraz do 1,6% przy 28 dniach pielęgnacji, zaś w przypadku 15% dodatku długości tych przedziałów wynosiły 2,6% przy 7 dniowej pielęgnacji oraz 2,1% przy 28 dniowej pielęgnacji próbek
- Zwiększenie zakresu deformacji sprężystych odczytanych w trakcie cyklicznego obciążenia. Wszystkie badane próbki wykazywały podobną tendencję do szybszego redukowania odczytywanych wartości naprężeń oraz deformacji sprężystych w pierwszych cyklach badania (1–6), aby następnie zmniejszyć szybkość ich redukcji w dalszych cyklach obciążenia. Próbki z 5 oraz 10% dodatkiem rozdrobnionych odpadów gumowych wykazywały porównywalne wartości naprężeń ściskających we wszystkich 20 cyklach obciążenia, wartości te mieściły się w przedziale od 2,17 do 1,12 MPa. Próbki z 15% dodatkiem rozdrobnionych odpadów gumowych uzyskały najmniejsze wartości naprężeń ściskających, mieszczące się w przedziale od 1,15 do 0,58 MPa. W przypadku pomiarów zakresu deformacji sprężystych, próbki z 5% zawartością odpadów gumowych uzyskały wartości deformacji mieszczące się w zakresie 0,53–0,43 mm. Dla próbek z 10% dodatkiem odpadów zakres ten wynosił 0,71–0,55 mm, zaś w przypadku próbek o 15% zawartości odpadów 0,66–0,50 mm. Na podstawie powyższych danych określono również moduły sprężystości Younga. Badania potwierdziły, iż wraz ze wzrostem zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych wartości modułów spadają. Próbki G5 uzyskały najwyższe wartości modułu sprężystości, mieszczące się w zakresie 318,1–223,6 MPa, a procentowy spadek wartości wynosił 29,71%. Próbki G10 uzyskały wartości modułu sprężystości pomiędzy 243,2 a 165,2 MPa z procentowym spadkiem wartości równym 32,07%, zaś w przypadku próbek G15 wartości modułu mieściły się w zakresie 140,2–93,4 MPa, z procentowym spadkiem równym 33,34%

## 4.2 Etap „2”

### 4.2.1 Wyniki badań zastosowanych materiałów

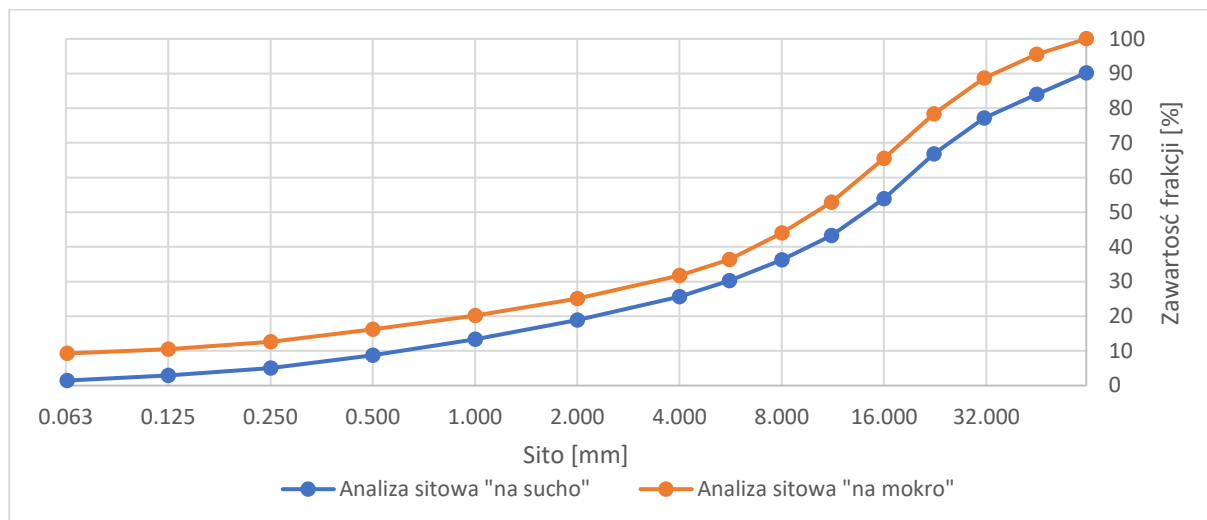
#### Łupek przywęglowy nieprzepalony nr 2

W tablicy 4.6 przedstawiono wyniki badania składu granulometrycznego łupka przywęglowego nieprzepalonego nr 2 wykorzystanego do wykonania próbek laboratoryjnych do badań zawartych w etapie 2. Kruszywo pochodziło z zakładu CTL Haldex i było oznaczone jako produkt odwęglania odpadów górniczych. W tablicy 4.6 przedstawiono wyniki badania składu granulometrycznego metodą „na sucho” oraz przy wykorzystaniu metody „mokrej”. Badanie ma na celu wskazanie, czy i w jakim stopniu, kruszywo ulega rozpadowi w środowisku wodnym.

Tablica 4.6. Wyniki badania składu granulometrycznego próbek łupka przywęglowego nieprzepalonego nr 2 metodą „na sucho” oraz „na mokro”

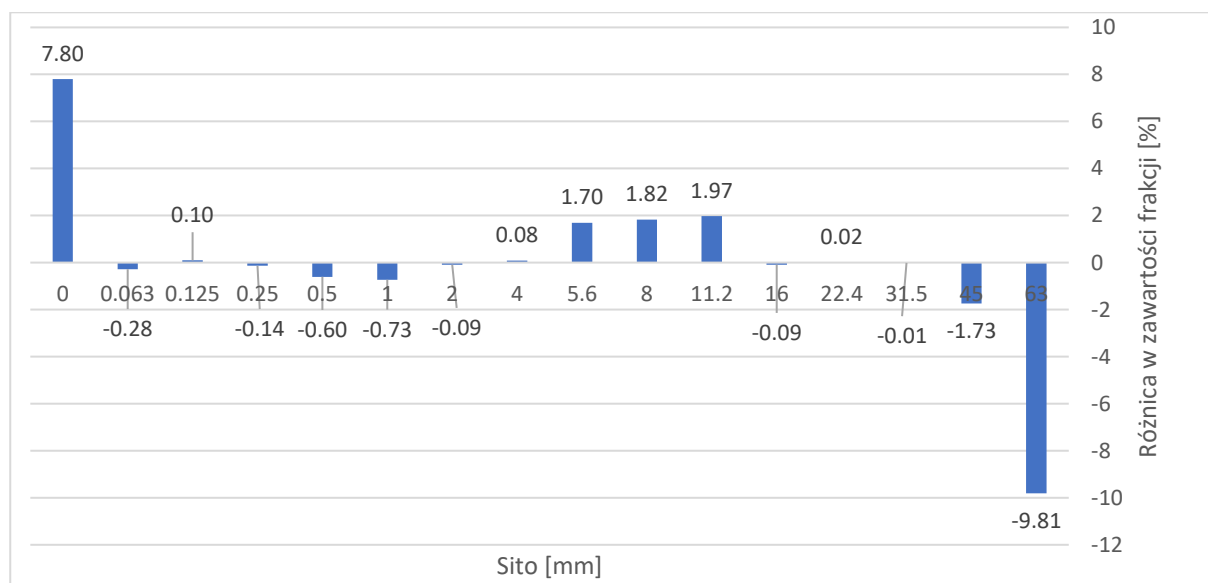
Próbka	Metoda „na sucho”		Metoda „na mokro”	
Masa próbki [g]	23982.6		23982.6	
Masa próbki po płukaniu [g]	23982.6		21825.4	
Sito [mm]	Odsiew [%]	Krzywa przesiewu [%]	Odsiew [%]	Krzywa przesiewu [%]
63	9.81	90.19	0.00	100.00
45	6.19	84.00	4.46	95.54
31.5	6.82	77.18	6.81	88.73
22.4	10.34	66.84	10.37	78.37
16	12.92	53.91	12.84	65.53
11.2	10.69	43.22	12.66	52.87
8	7.00	36.22	8.83	44.05
5.6	5.97	30.25	7.67	36.38
4	4.61	25.63	4.69	31.68
2	6.71	18.93	6.61	25.07
1	5.62	13.31	4.89	20.18
0.5	4.57	8.73	3.97	16.21
0.25	3.74	4.99	3.60	12.61
0.125	2.06	2.94	2.15	10.46
0.063	1.50	1.44	1.21	9.25
DNO	1.44		9.25	

Na podstawie danych z tablicy 4.6 przygotowano wykresy krzywych uziarnienia, które przedstawiono na rysunku 4.28.



Rys. 4.28. Wykres krzywych przesiewu łupka przywęglowego nieprzepszonego nr 2 uzyskane w wyniku badania próbek metodami „na sucho” oraz „na mokro”

W przypadku obu krzywych przesiewu mamy do czynienia z kruszywem o ciągłym uziarnieniu 0/63 mm. W przypadku krzywej uzyskanej w metodzie „na sucho” można zaobserwować mniejszą zawartość frakcji drobnych mniejszych od 0,063 mm oraz większą zawartość frakcji grubych powyżej 63 mm, w stosunku do krzywej uzyskanej metodą „na mokro”. Poza tym obie krzywe nie prezentują większych różnic w uziarnieniu. Dokładny rozkład zmian uziarnienia kruszywa, wynikający z jego wystawienia na działanie wody towarzyszące płukaniu, przedstawiono na rysunku 4.29.



Rys. 4.29. Różnice w uziarnieniu badanej próbki łupka przywęglowego nieprzepszonego nr 2 powstałe w wyniku płukania

W wyniku płukania rozpadowi uległy wszystkie ziarna kruszywa większe od 63,0 mm, co stanowi spadek zawartości frakcji o 9,81%. Zauważalnemu zmniejszeniu uległa również

zawartość frakcji 45,0 mm, która zmniejszyła się o 1,73%. Zawartość pozostałych frakcji zmniejszyła się nieznacznie do około 0,73% dla frakcji większej od 1,0 mm. W miejsce rozpadających się frakcji kruszywa powstały frakcje drobne, największe przyrosty odnotowano dla frakcji mniejszych od 0,063 mm, ich przyrost wynosi 7,80%. Kolejne przyrosty w zawartościach frakcji odnotowujemy dla frakcji 5,6 mm przyrost o 1,70%; frakcji 8,0 mm przyrost o 1,82% oraz frakcji 11,2 mm, gdzie odnotowano przyrost o 1,97%. Przedstawione dane świadczą o występowaniu tendencji do degradacji wielkości ziaren kruszywa w wyniku oddziaływania wody również w przypadku łupka przywęglowego nieprzepsalonego nr 2. Kruszywo to wykazuje jednak mniejszą skłonność do degradacji uziarnienia niż łupki przywęglowy nieprzepsalony nr 1, dla którego redukcja oraz przyrosty zawartości frakcji w wyniku przepłukiwania były większe (Rys. 4.2).

Dla łupka przywęglowego nieprzepsalonego nr 2 przeprowadzono badania wpływu zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych na rozdrabnianie kruszywa w czasie jego zagęszczania. W tym celu przygotowano 3 próbki łupka przywęglowego nr 2 odsiane do uziarnienia 0/31,5 mm oraz 3 próbki łupka z 10% dodatkiem rozdrobnionych odpadów gumowych. Próbki zostały poddane badaniu składu ziarnowego przed oraz po ich 5-krotnym zagęszczeniu zgodnym z II metodą Proctora. Wyniki badań przedstawiono w tablicach 4.7 oraz 4.8.

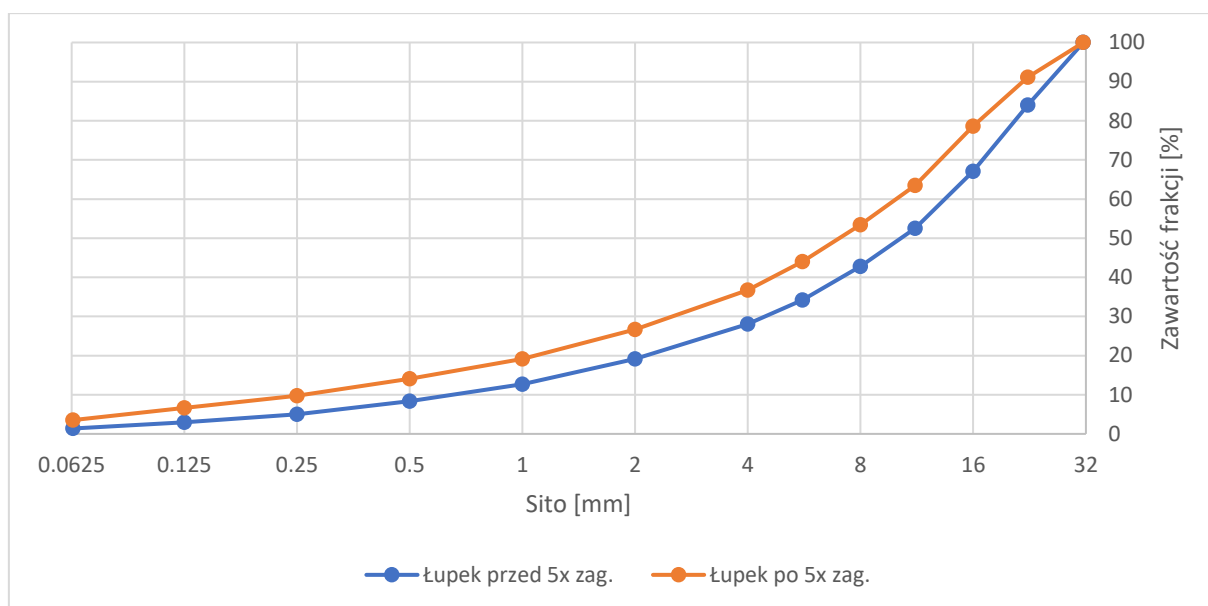
Tablica 4.7. Skład granulometryczny próbek łupka przywęglowego nieprzepsalonego nr 2 przed 5-krotnym oraz po 5-krotnym zagęszczeniu

Próbka	Przed 5-krotnym zagęszczeniem		Po 5-krotnym zagęszczeniu	
Masa próbki [g]	15093.2		15056.8	
Sito [mm]	Odsiew [%]	Krzywa przesiewu [%]	Odsiew [%]	Krzywa przesiewu [%]
31.5	0.00	100.00	0.00	100.00
22.4	15.98	84.02	8.90	91.10
16	16.96	67.06	12.52	78.58
11.2	14.52	52.54	15.07	63.51
8	9.73	42.82	10.07	53.44
5.6	8.60	34.22	9.40	44.04
4	6.19	28.03	7.30	36.74
2	8.87	19.16	10.05	26.68
1	6.48	12.68	7.55	19.13
0.5	4.32	8.36	5.04	14.09
0.25	3.38	4.99	4.38	9.71
0.125	2.06	2.93	3.07	6.65
0.063	1.55	1.38	3.12	3.53
DNO	1.38		3.53	

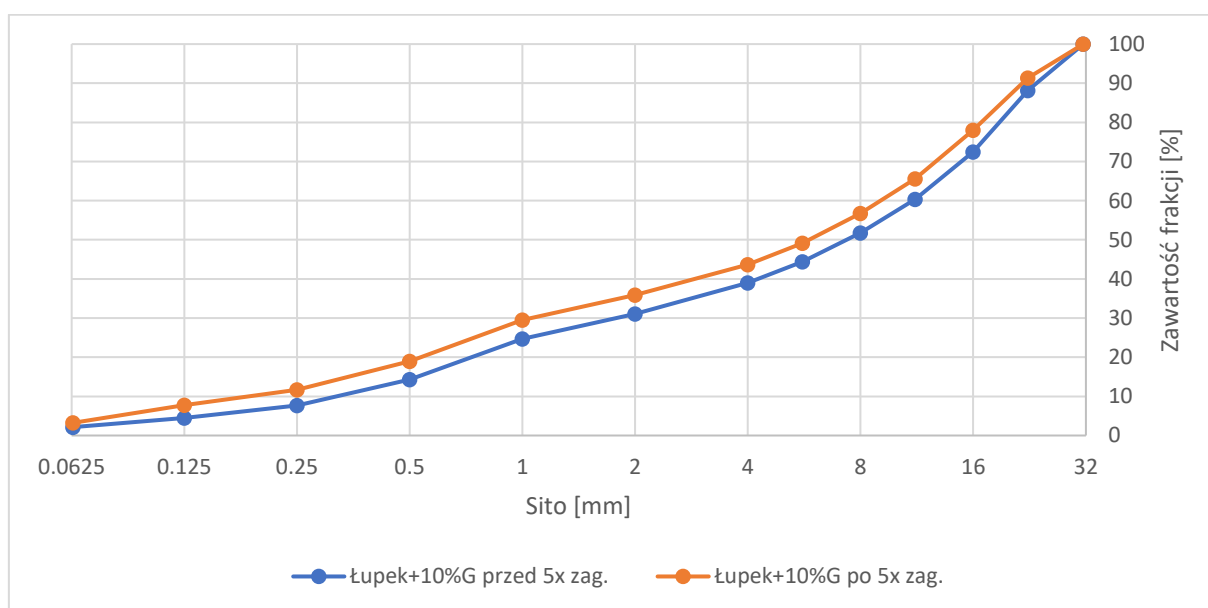
Tablica 4.8. . Skład granulometryczny próbek łupka przywęglowego nieprzepszonego nr 2 z 10% dodatkiem rozdrobnionych odpadów gumowych przed 5-krotnym oraz po 5-krotnym zagęszczeniu

Próbka	Przed 5-krotnym zagęszczeniem		Po 5-krotnym zagęszczeniu	
Masa próbki [g]	16523.4		16479.8	
Sito [mm]	Odsiew [%]	Krzywa przesiewu [%]	Odsiew [%]	Krzywa przesiewu [%]
31.5	0.00	100.00	0.00	100.00
22.4	11.89	88.11	8.66	91.34
16	15.69	72.43	13.37	77.98
11.2	12.07	60.36	12.43	65.55
8	8.63	51.74	8.77	56.78
5.6	7.34	44.39	7.67	49.11
4	5.41	38.98	5.44	43.67
2	7.92	31.06	7.78	35.89
1	6.37	24.69	6.41	29.48
0.5	10.36	14.33	10.53	18.95
0.25	6.62	7.71	7.26	11.70
0.125	3.24	4.47	3.91	7.78
0.063	2.32	2.14	4.55	3.23
DNO	2.14		3.23	

Na podstawie powyższych tablic przygotowano wykresy krzywych przesiewu. Rysunek 4.30 odpowiada próbkom łupka przywęglowego nieprzepszonego nr 2 przed oraz po zagęszczeniu i rysunek 4.31 odpowiada próbkom łupka przywęglowego nieprzepszonego nr 2 z 10% dodatkiem rozdrobnionych odpadów gumowych przed i po zagęszczeniu.



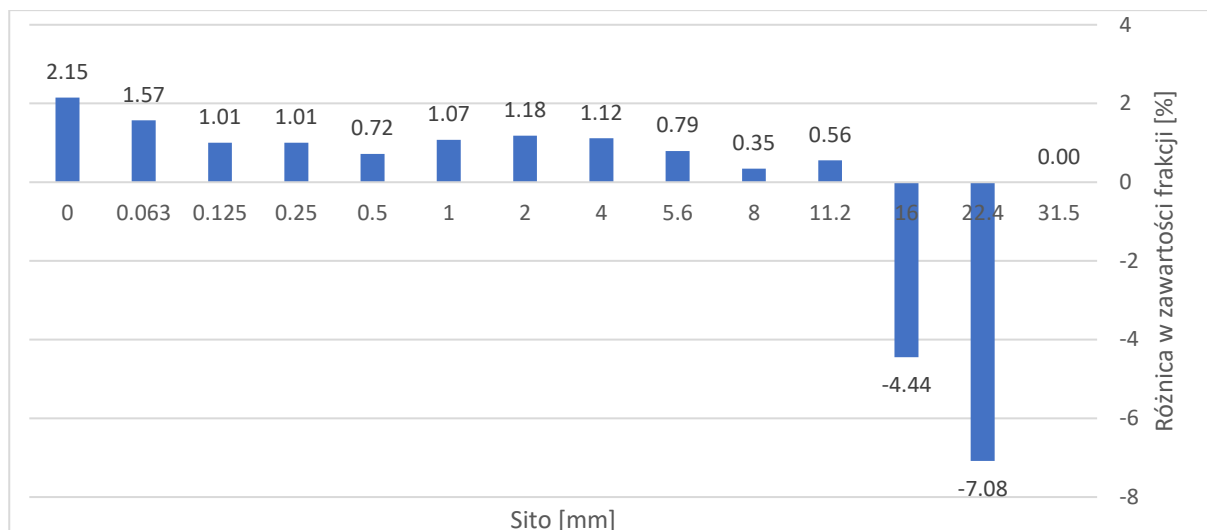
Rys. 4.30. Krzywe uziarnienia łupka przywęglowego nieprzepalonego nr 2 przed oraz po 5-krotnym zagęszczeniu



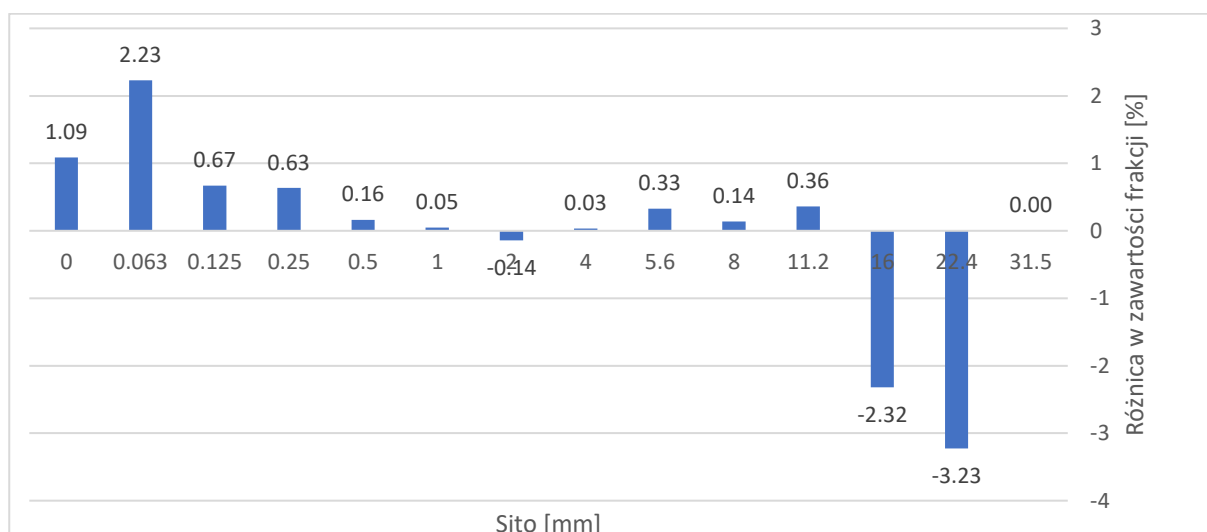
Rys. 4.31. Krzywe uziarnienia łupka przywęglowego nieprzepalonego nr 2 z 10% dodatkiem rozdrobnionych odpadów gumowych przed oraz po 5-krotnym zagęszczeniu

W przypadku obu badanych zestawów próbek można zaobserwować przyrost zawartości frakcji drobnych poniżej 0,063 mm, który wynika z 5-krotnego zagęszczenia. Dla próbek w których zastosowano rozdrobnione odpady gumowe widoczny jest znacznie mniejszy przyrost zawartości frakcji drobnych. W celu dobrego zobrazowania zmian powstałych w uziarnieniu obu zestawów próbek przygotowano rysunki 4.32 oraz 4.33, na których przedstawiono procentowe zmiany w zawartości poszczególnych frakcji.





Rys. 4.32. Zmiany zawartości frakcji spowodowane 5-krotnym zagęszczaniem łupka przywęglowego nieprzepszonego nr 2



Rys. 4.33. Zmiany zawartości frakcji spowodowane 5-krotnym zagęszczaniem łupka przywęglowego nieprzepszonego nr 2 z dodatkiem 10% rozdrobnionych odpadów gumowych

Jak można zauważyć na rysunkach 4.32 oraz 4.33 w przypadku obu zestawów próbek zmniejszeniu ulega zawartość frakcji 16,0 mm oraz 22,4 mm. Zawartość pozostałych frakcji (mniejszych od 16,0 mm) ulega zwiększeniu. W przypadku zestawu próbek złożonego z samego kruszywa odnotowujemy spadek zawartości frakcji 16,0 mm oraz 22,4 mm o kolejno 4,44 i 7,08%; oraz wzrost zawartości frakcji mniejszych od 16,0 mm, który oscyluje w przedziale od 0,35 do 2,15%. Dla próbek, w których zastosowano 10% dodatek rozdrobnionych odpadów gumowych, odnotowano o około połowę niższe spadki zawartości frakcji 16,0 oraz 22,4 mm wynoszące kolejno 2,32 oraz 3,23%. Wzrost zawartości pozostałych frakcji jest nieznaczny (poniżej 0,5%) poza frakcjami od 0,250 do 0,000 mm, gdzie przyrosty oscylują w granicach 0,63 do 2,23%.

Przedstawione wyniki świadczą o wpływie dodatku rozdrobnionych odpadów gumowych na zabezpieczenie ziaren kruszywa przed ich rozdrabnianiem w trakcie jego

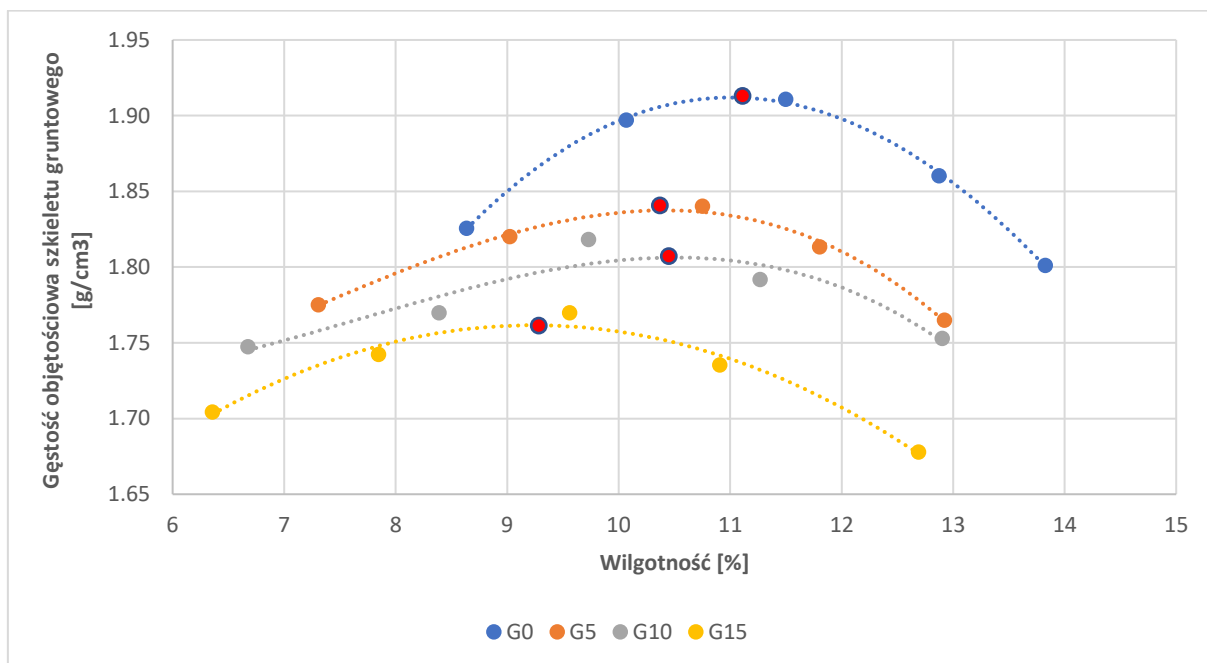
zagęszczania. 10% dodatek rozdrobnionych odpadów gumowych pozwala na około 50% ograniczenie rozdrabniania frakcji powyżej 16,0 mm.

Na 2 próbkach łupka przywęglowego nieprzepalonego nr 2 przeprowadzono badanie wskaźnika piaskowego. Próbka nr 1 uzyskała wartości wskaźnika piaskowego równe 31,36 dla cylindra nr 1 oraz 30,18 dla cylindra nr 2, w uśrednieniu badana próbka uzyskała wartość wskaźnika piaskowego równą 30,77. W przypadku próbki nr 2 uzyskano wartości wskaźnika piaskowego równe 30,12 dla cylindra nr 1 oraz 28,99 dla cylindra numer 2. Po uśrednieniu próbka nr 2 uzyskała wskaźnik piaskowy o wartości 29,56. Wyniki badań obu próbek kruszywa uśredniono i ustalono, że badany łupek przywęglowy nieprzepalony nr 2 charakteryzuje się wskaźnikiem piaskowym o wartości 30,16, co świadczy, iż zgodnie z PN-EN 933-8:2012 jego wysadzinowość określa się jako wątpliwą (SE zawierające się w przedziale 25–35).

#### 4.2.2 Wyniki badań mieszanek ŁGPC według tablicy 3.2

Dla próbek wykonanych zgodnie z tablicą 3.2, w których wykorzystano łupek przywęglowy nieprzepalony nr 2, przeprowadzono badania o zakresie zbliżonym do zakresu etapu „1”. Celem badań było sprawdzenie czy przedstawiona mieszanka spoiwowa powoduje otrzymanie podobnych wyników badań przy wykorzystaniu innego kruszywa.

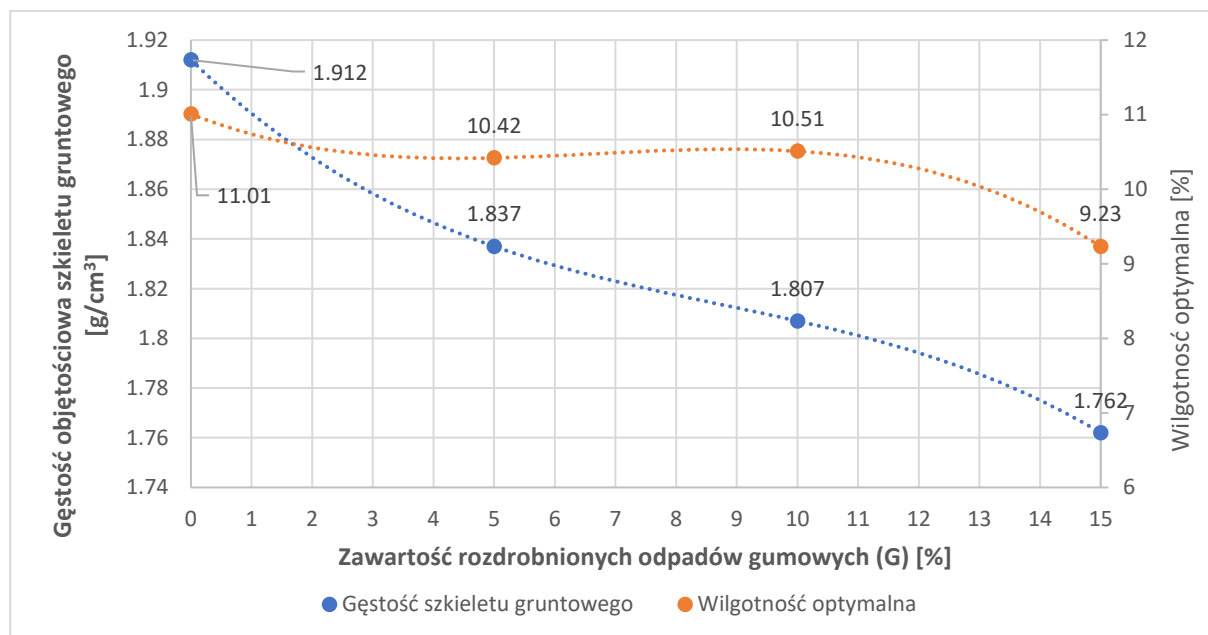
Na rysunku 4.34 przedstawiono wyniki badania wilgotności optymalnej przeprowadzonego na mieszankach przygotowanych według składu przedstawionego w tablicy 3.2. Na podstawie uzyskanych wartości wilgotności optymalnych zagęszczono próbki walcowe o wymiarach 80x80 mm wykorzystane do dalszych badań.



Rys. 4.34. Wykres zależności gęstości objętościowej szkieletu gruntowego od wilgotności dla mieszanek G0, G5, G10 oraz G15

Na podstawie przedstawionych na wykresie zależności gęstości objętościowej szkieletu gruntowego od wilgotności mieszanki opracowano linie trendu, pod postacią wielomianów

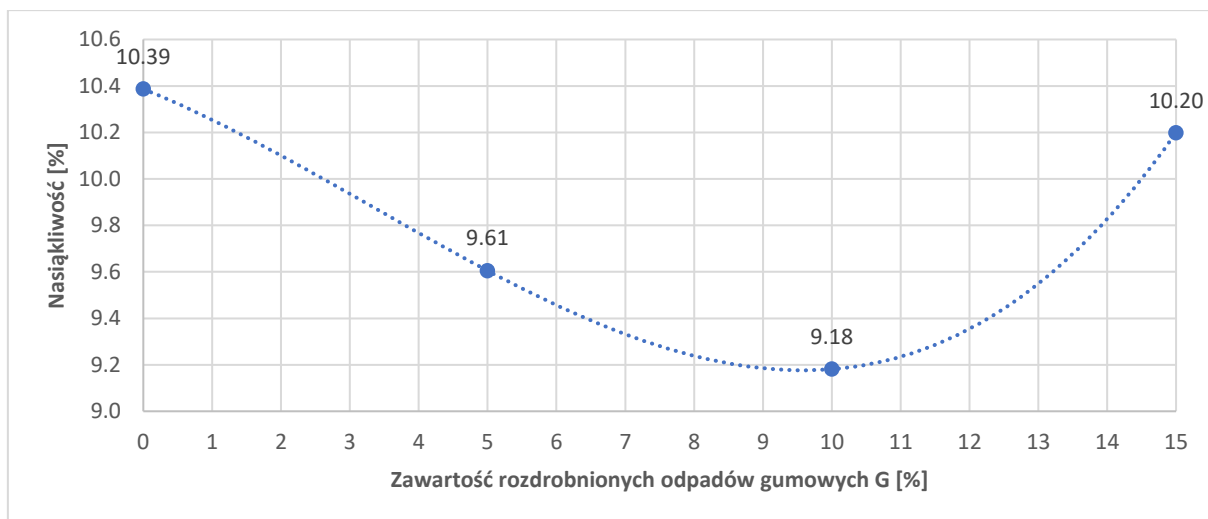
3-go stopnia. Linie trendu posłużyły do określenia wartości wilgotności optymalnych oraz odpowiadających im maksymalnym wartościom gęstości objętościowej szkieletu gruntowego. Wartości te przedstawiono na rysunku 4.35, gdzie uzależniono je od zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych występujących w mieszance.



Rys. 4.35. Wykres zależności gęstości objętościowej szkieletu gruntowego oraz wilgotności optymalnej od zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych w mieszance

Na podstawie rysunku 4.35 można stwierdzić, iż wraz ze zwiększaniem się zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego maleje. Największy spadek gęstości szkieletu gruntowego odnotowuje się w przypadku dodatku 5%, kolejne dodatki prezentują mniejszy wpływ na jej wartość. Podobną zależność obserwujemy się w przypadku wilgotności optymalnej. Jednak tym razem można zauważyć, iż największy wpływ mają dodatki 5 oraz 15%. W przypadku dodatku 10% nie odnotowuje się znaczących zmian wartości wilgotności optymalnej.

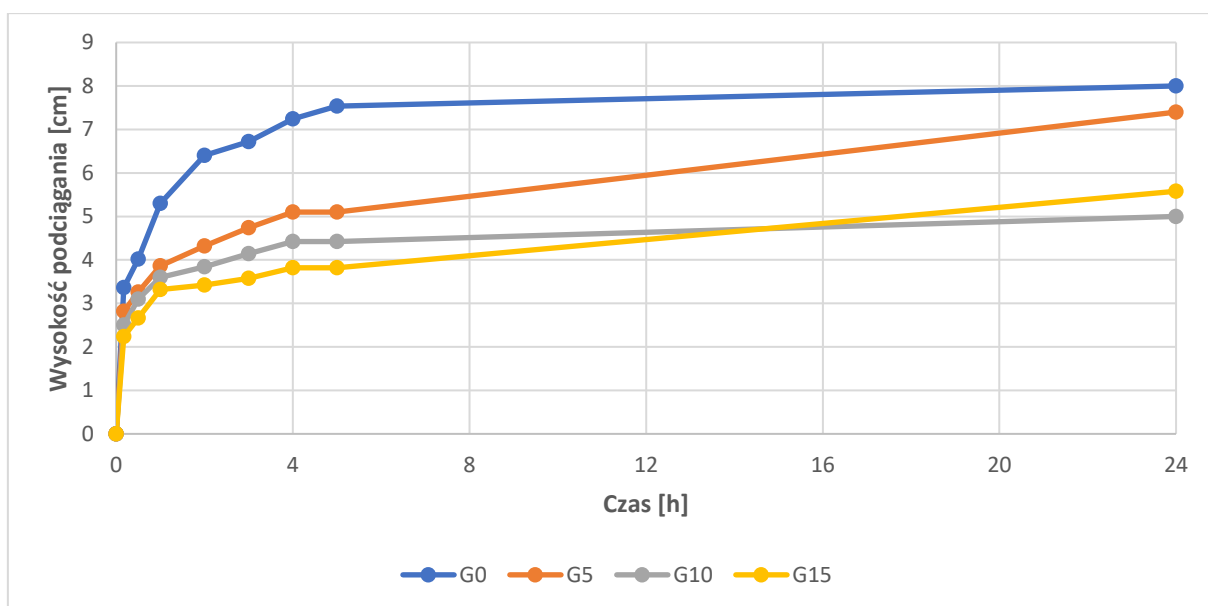
Na rysunku 4.36 przedstawiono wyniki nasiąkliwości masowej badanych mieszanek. Do badania przeznaczonych zostało 5 próbek wykonanych z mieszanek G0, G5, G10 oraz G15. Próbki zostały przebadane po 28 dniach pielęgnacji. Dane zostały przedstawione w formie wykresu zależności uzyskanej wartości nasiąkliwości od zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych występujących w mieszance.



Rys. 4.36. Wykres zależności nasiąkliwości od zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych w mieszance

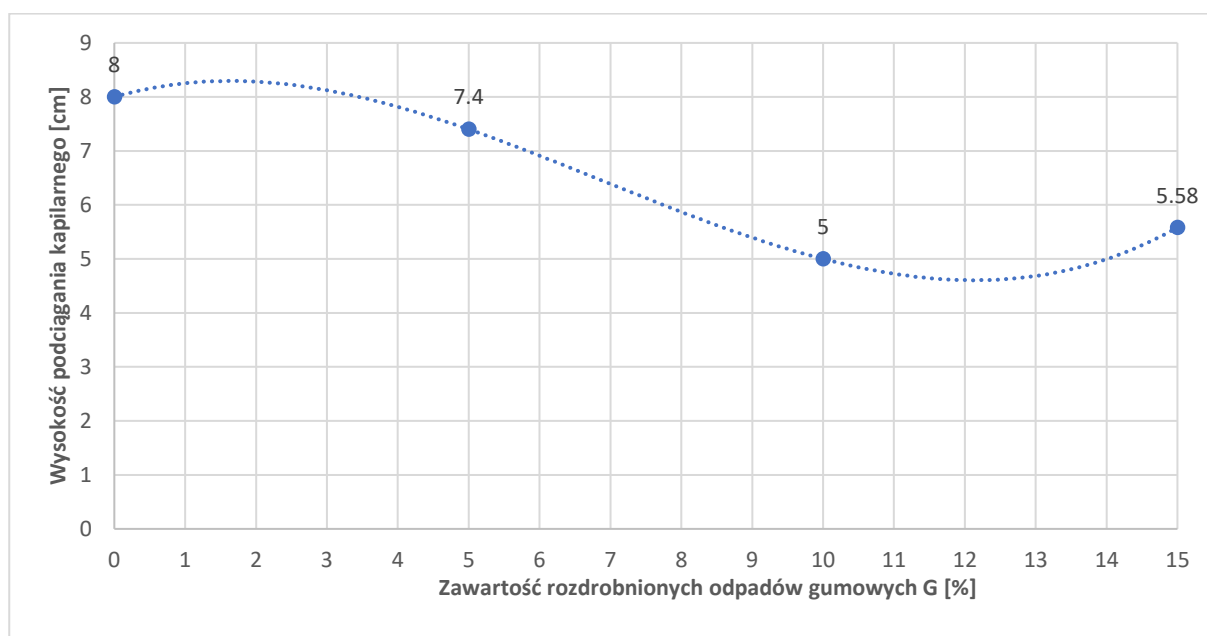
Najwyższe wartości nasiąkliwości masowej uzyskały próbki o 0% oraz 15% zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych, odpowiednio 10,39 oraz 10,20%. Próbki G5 uzyskały nasiąkliwość masową o wartości 9,61%. W przypadku próbek serii G10 wartość nasiąkliwości wynosiła 9,18% i była to najniższa wartość uzyskana przez badane mieszanki. Wyniki te świadczą o wpływie zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych na zmniejszanie się nasiąkliwości masowej, jednak do określonej granicy (około 10%), po przekroczeniu której odpady gumowe zaczynają powodować zwiększanie się nasiąkliwości.

Na rysunku 4.37 przedstawiono wyniki badania podciągania kapilarnego przeprowadzonego na próbkach serii G0, G5, G10 oraz G15, na 5 próbkach dla każdej z przygotowanych recept. Badanie trwało 24 godziny i obejmowało stałą kontrolę wysokości podciągania wody przez próbki. Rysunek ilustruje przebieg przyrostu wysokości podciągania kapilarnego wody przez próbki w czasie.



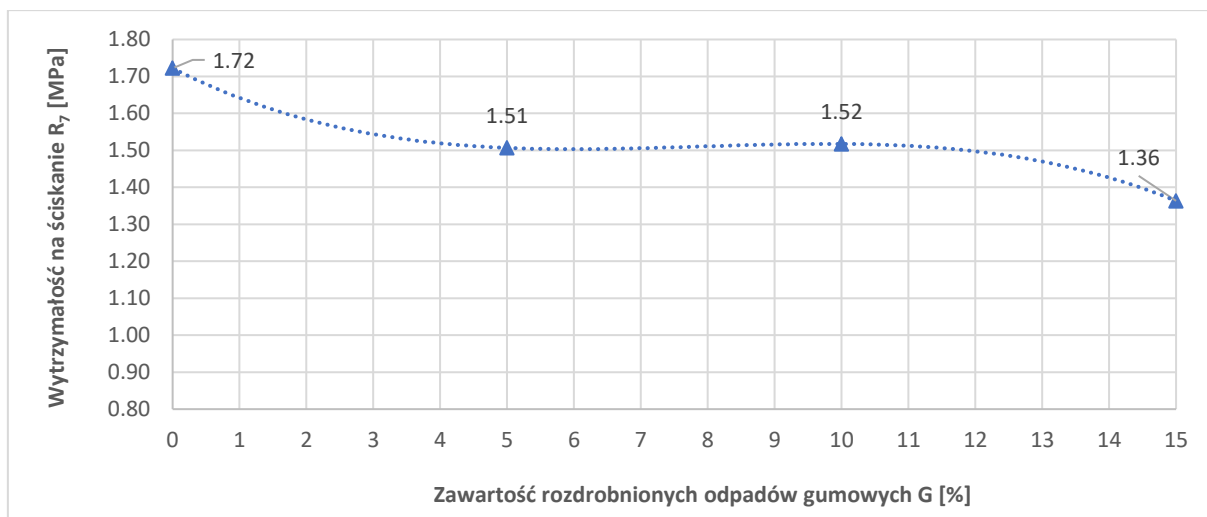
Rys. 4.37. Wykres przyrostu wysokości podciągania kapilarnego wody przez próbki w czasie

Próbki serii G0 jako jedyne z badanych próbek uzyskały maksymalną wysokość podciągania kapilarnego w czasie trwania badania. Wykazywały również największą szybkość przyrostu wysokości podciągania kapilarnego w porównaniu do pozostałych próbek. Wraz ze wzrostem zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych szybkość przyrostu podciągania kapilarnego malała. Próbki G5 charakteryzowały się drugą w kolejności szybkością przyrostu wysokości podciągania kapilarnego oraz po 24 godzinach obserwacji uzyskały maksymalną wysokość podciągania równą 7,4 cm. W przypadku próbek G10 odnotowano trzecią w kolejności szybkość przyrostu wysokości podciągania kapilarnego, natomiast końcowo wysokość podciągania kapilarnego wynosiła 5,0 cm. Próbki G15 cechowały się najwolniejszym przyrostem podciągania kapilarnego spośród wszystkich przebadanych mieszanek, jednak końcowo próbki te uzyskały wysokość podciągania kapilarnego równą 5,58 cm, co stanowi wynik o 0,58 cm wyższy niż w przypadku próbek G10. Na rysunku 4.38 przedstawiono przebieg zależności maksymalnych wysokości podciągania kapilarnego wody od zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych w mieszance.



Rys. 4.38. Wykres zależności maksymalnej wysokości podciągania kapilarnego od zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych.

Na rysunku 4.39 przedstawiono wyniki badania wytrzymałości na ściskanie po 7 dniach pielęgnacji próbek. Do badania wykorzystano po 5 próbek wykonanych dla każdej recepty G0, G5, G10 oraz G15. Rysunek przedstawia zależność pomiędzy wytrzymałością na ściskanie po 7 dniach pielęgnacji, a zawartością rozdrobnionych odpadów gumowych występujących w próbkach.

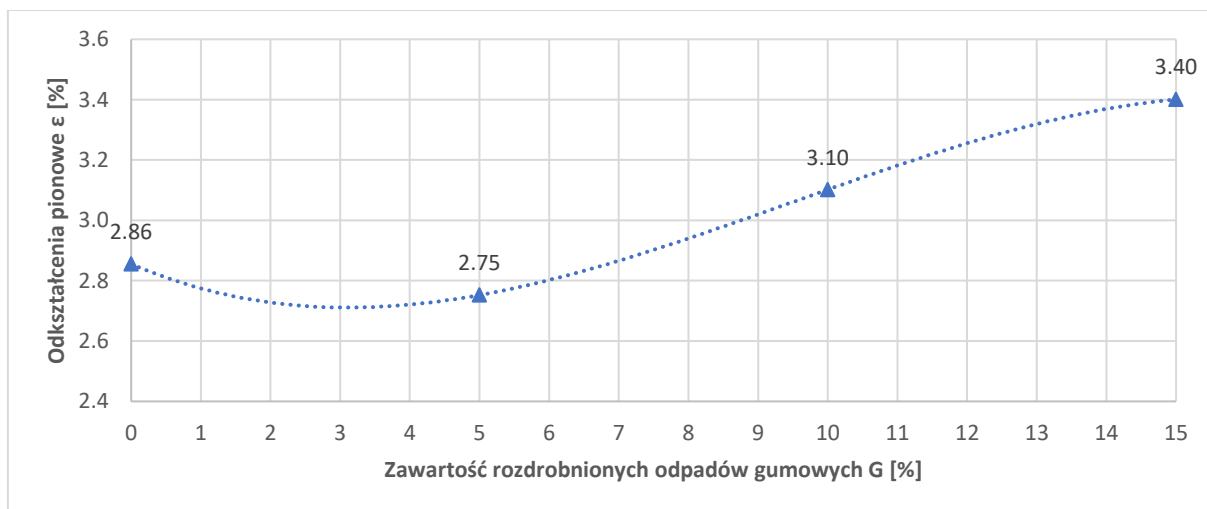


Rys. 4.39. Wykres zależności wytrzymałości na ściskanie po 7 dniach pielęgnacji próbek od zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych

Próbki G0 uzyskały wartości wytrzymałości na ściskanie równe 1,72 MPa, w przypadku próbek G5 odnotowano wytrzymałości o wartościach 1,51 MPa, dla próbek G10 pomierzone wytrzymałości wynosiły 1,52 MPa. Próbki G15 uzyskały wytrzymałości równe 1,36 MPa.

Na podstawie przedstawionych wartości wytrzymałości na ściskanie można zauważyć znaczący wpływ zastosowania 5% dodatku rozdrobnionych odpadów gumowych, który spowodował obniżenie wytrzymałości z 1,72 do 1,51 MPa. Wzrost zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych w mieszance do 10%, nie spowodował już dodatkowego spadku wytrzymałości. Próbki te uzyskały wytrzymałość równą 1,52 MPa. Dopiero przy 15% dodatku rozdrobnionych odpadów gumowych można zaobserwować kolejny spadek wytrzymałości na ściskanie do wartości 1,36 MPa.

Rysunek 4.40 przedstawia zależność pomiędzy odkształceniami przy zniszczeniu próbek, a zawartością rozdrobnionych odpadów gumowych.

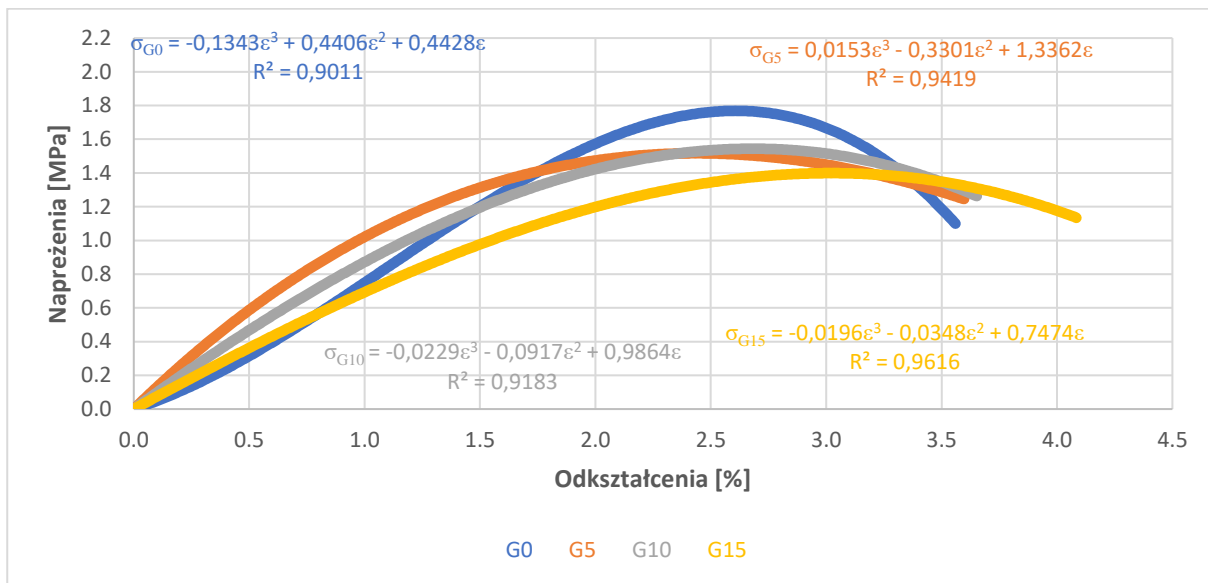


Rys. 4.40. Wykres zależności odkształceń uzyskanych przy zniszczeniu próbki od zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych po 7 dniach pielęgnacji próbek



Jak wynika z rysunku 4.40, próbki G0 uzyskały odkształcenia równe 2,86%, zaś dla próbek G5 odnotowano odkształcenia o wartości 2,75%. W przypadku próbek G10 uzyskano wartości odkształceń równe 3,10%, zaś próbki G15 uzyskały odkształcenia równe 3,40%. Poza różnicą występująca pomiędzy próbką G0 oraz G5, gdzie próbka nie zawierająca w swoim składzie rozdrobnionych odpadów gumowych uzyskuje wyższą wartość odkształcenia, zwiększająca się zawartość rozdrobnionych odpadów gumowych wpływa na zwiększanie się odkształcalności próbek.

Na rysunku 4.41 przedstawiono przebieg zależności naprężenia–odkształcenia uzyskany dla badanych mieszanek.

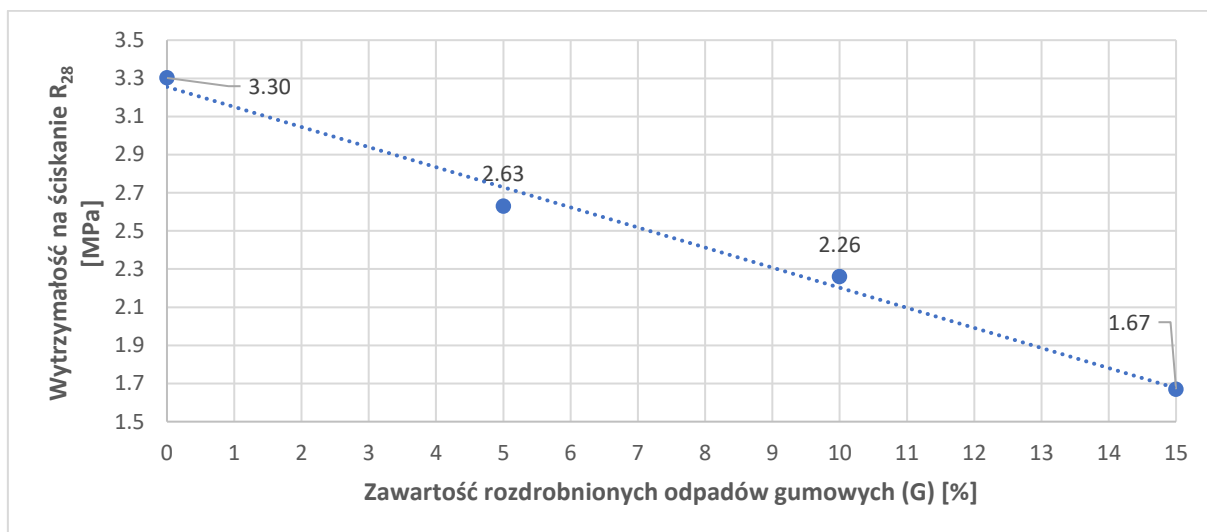


Rys. 4.41. Wykres zależności naprężenie–odkształcenie w pierwszym cyklu obciążenia po 7 dniach pielęgnacji próbek

Po analizie wyników można stwierdzić, że wszystkie próbki pracują w podobnych zakresach odkształceń oraz nie zauważono dużych różnic w początkowej sztywności próbek. Różnice zauważalne są przy kontroli przedziału odkształceń, w których próbki utrzymują powyżej 90% maksymalnych naprężeń. Dla próbek G0 przedział ten rozciąga się od 2,0 do 3,1% (długość przedziału 1,1%), próbki G5 uzyskały przedział odkształceń mieszczący się pomiędzy 1,3 do 3,6% (długość przedziału 2,3%). Próbki serii G10 utrzymują naprężenia wyższe niż 90% maksymalnych wartości w przedziale od 1,5 do 3,2% (długość przedziału 1,7%), zaś w przypadku próbek G15 przedział ten mieści się między 1,75 a 4,2% (długość przedziału 2,45%). Wyniki te świadczą o wpływie rozdrobnionych odpadów gumowych na mechanikę zniszczenia próbek, powodując zmniejszenie gwałtowności zniszczenia pod postacią kruchego pęknięcia, dodając wydłużoną strefę płynięcia materiału w strefie naprężeń zbliżonych do niszczących. Wyniki te nie pozwalają jednak, w przypadku badań 7–dniowych, na określenie wpływu zmiennych zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych na dokładną wartość odkształceń w warunkach wysokich naprężeń.

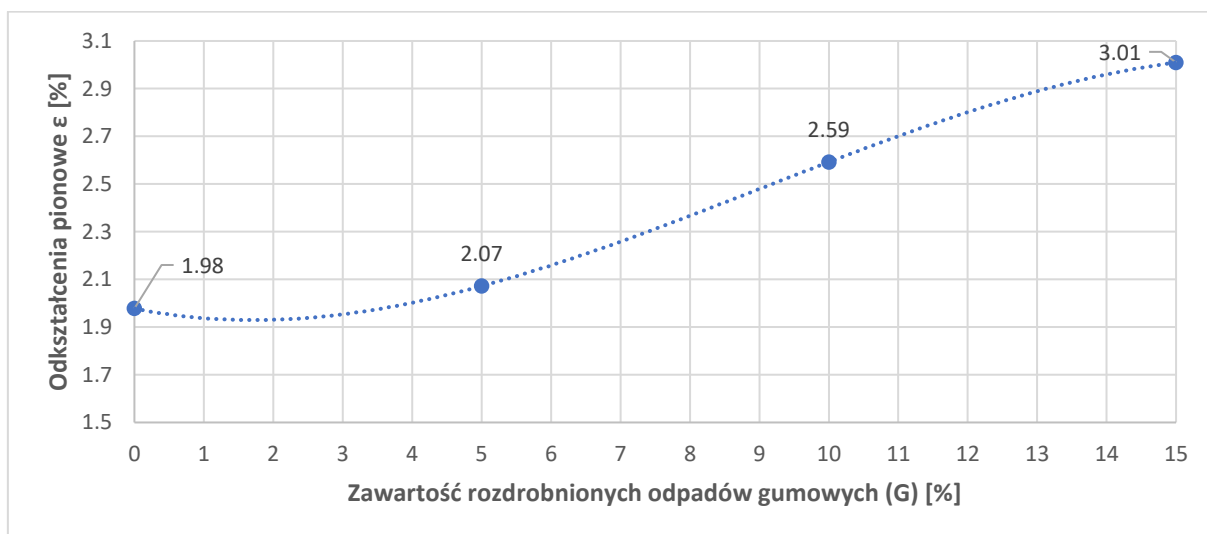
Na rysunkach 4.42 oraz 4.43 przedstawiono wyniki badania wytrzymałości na ściskanie próbek po 28 dniach pielęgnacji. Do badania przygotowano po 5 próbek dla każdej z mieszanek.

Na wykresach przedstawiono zależność wartości średniej wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach pielęgnacji od zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych (Rys. 4.42) oraz zależność wartości średnich odkształceń przy zniszczeniu próbki od zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych (Rys. 4.43).



Rys. 4.42. Wykres zależności średniej wytrzymałości na ściskanie od zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych po 28 dniach pielęgnacji próbek

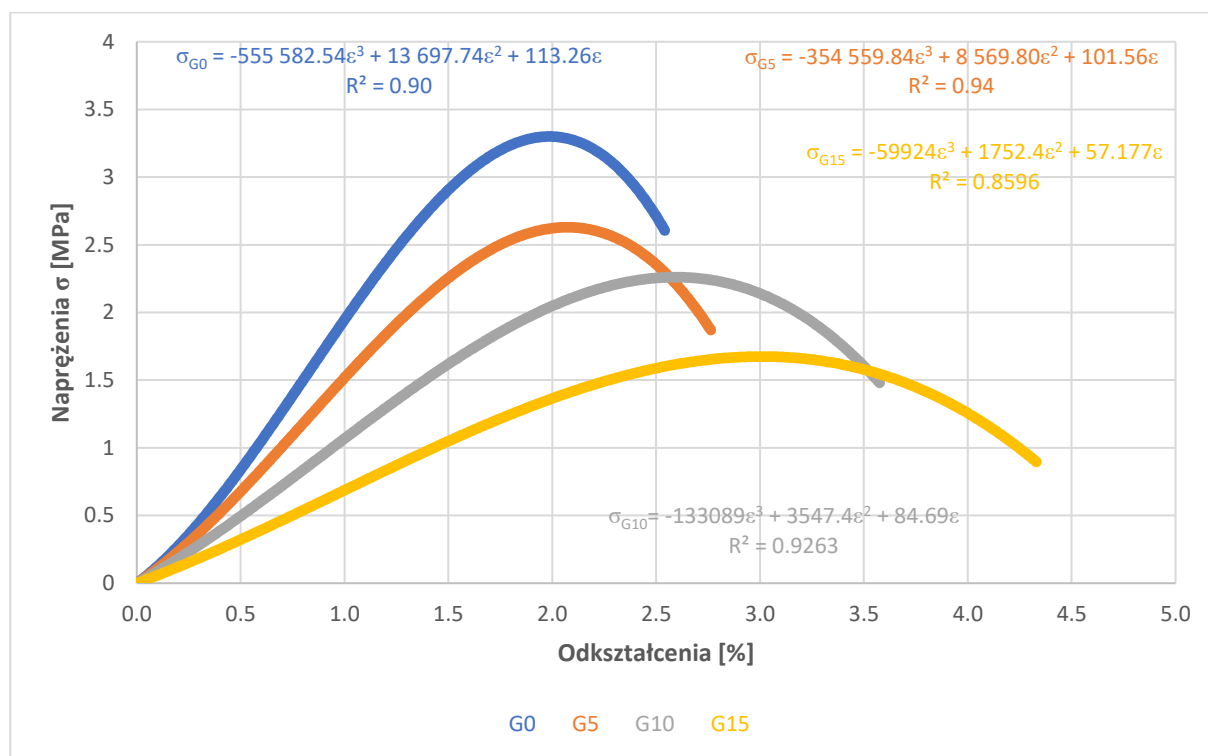
Przedstawiona zależność ma charakter zbliżony do liniowej (współczynnik  $R^2=0,9891$ ). Wartość średniej wytrzymałości na ściskanie jest przeciwnie proporcjonalna do zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych i spada o około 0,55 MPa na każde 5% dodatku rozdrobnionych odpadów gumowych. Największą różnicę stwierdzono pomiędzy mieszankami G0 oraz G5 wynoszącą 0,67 MPa, najniższą zaś pomiędzy mieszankami G5 oraz G10. Świadczy to o mniejszym wpływie dodatków rozdrobnionych odpadów gumowych mieszających się między 5–10%.



Rys. 4.43. Wykres zależności średnich odkształceń od zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych po 28 dniach pielęgnacji próbek

W przypadku zależności odkształceń od zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych, ich wpływ nie jest liniowy. To znaczy, iż w przypadku mieszanek G0 oraz G5 nie odnotowujemy znacznych różnic pomiędzy uzyskanymi wartościami (ok. 0,09%). W związku z tym można stwierdzić, że dodatki rozdrobnionych odpadów gumowych mniejsze bądź równe 5% nie powodują zwiększenia odkształcalności próbek pod wpływem przykładanych obciążeń, jednak powodują zmniejszenie wartości wytrzymałości na ściskanie. Znaczący wzrost wartości odkształceń odnotowujemy dopiero dla próbek G10 oraz G15. W tym przypadku wpływ zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych na odkształcalność wynosi około 0,47% na każde 5% dodatku.

Dokonano również oceny zależności naprężenia–odkształcenia. Przebieg tych zależności przedstawiono na rysunku 4.44. Na podstawie chmury punktów uzyskanych z przeprowadzenia pomiarów na 5 próbkach przygotowanych dla każdej z mieszanek, określono linie trendu prezentujące wyniki badań.



Rys. 4.44. Wykres relacji naprężenie – odkształcenie przy ściskaniu badanych mieszanek po 28 dniach pielęgnacji próbek

Rozdrobnione odpady gumowe wpływają również na zachowanie się próbek pod obciążeniem. Wraz ze wzrostem zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych maleje sztywność badanych mieszanek, co skutkuje mniejszym przyrostem naprężeń w stosunku do odkształceń przy wyższych zawartościach odpadów w mieszance. W przypadku próbek G0 mamy do czynienia z klasyczną mechaniką kruchego pęknięcia. Próbką przy osiągnięciu maksymalnych dla niej wartości naprężeń gwałtownie traci swoją wytrzymałość w wyniku powstałych w jej strukturze zarysowań. Próbkę zawierającą w sobie rozdrobnione odpady gumowe charakteryzują się wolniejszym spadkiem naprężeń w przedziale ich maksymalnych

wartości. Spadek ten jest tym wolniejszy, im większa jest zawartość dodatku. W celu określenia wpływu zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych na szybkość zmniejszania się naprężeń w przedziale ich wartości maksymalnych, określono długości przedziałów w których mieszanki utrzymują naprężenia równe ok. 90% wartości naprężeń maksymalnych:

- G0 – 0,8%
- G5 – 0,85%
- G10 – 1,2%
- G15 – 1,4%

Jak można zauważyć, dodatek 5% rozdrobnionych odpadów gumowych powoduje niewielką zmianę długości przedziału w porównaniu do mieszanki kontrolnej G0. Dopiero w przypadku mieszanek G10 oraz G15 zarejestrowano znaczące zwiększenie się długości przedziału.

#### 4.2.3 Podsumowanie wyników badań nasiąkliwości, podciągania kapilarnego oraz wytrzymałości na ściskanie po 7 i 28 dniach pielęgnacji próbek

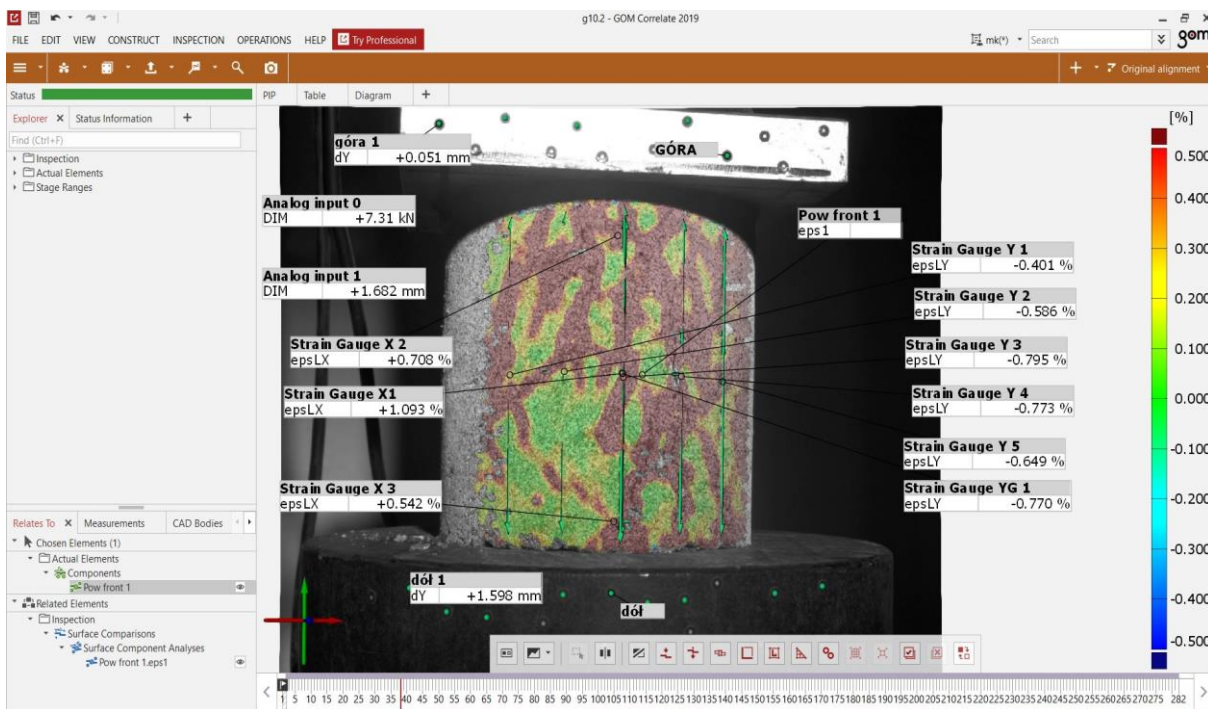
Dodatki rozdrobnionych odpadów gumowych powodują:

- Zmniejszenie się gęstości objętościowej szkieletu gruntowego wraz ze wzrostem zawartości dodatku
- Zmniejszenie się wartości wilgotności optymalnej określonej dla poszczególnych mieszanek. Wpływ ten nie jest liniowy, największe obniżenie wartości wilgotności optymalnej powodują dodatki 5 oraz 15%, w przypadku dodatku 10% nie obserwuje się większych zmian w stosunku do dodatku 5%
- Zmniejszenie nasiąkliwości masowej badanych próbek. Dodatki 5 oraz 10% powodują zmniejszenie nasiąkliwości do 9,61 oraz 9,18%. W przypadku dodatku 15% uzyskuje się wartości nasiąkliwości zbliżone do mieszanki G0
- Zmniejszenie się wysokości oraz szybkości podciągania kapilarnego wody. Próbki zawierające w swoim składzie dodatki rozdrobnionych odpadów gumowych uzyskały wysokość podciągania kapilarnego niższą niż wysokość próbek, w przeciwieństwie do próbek kontrolnych (G0). Spośród przebadanych mieszanek najniższą wartość wysokości podciągania kapilarnego uzyskały próbki, w składzie których zastosowano 10% dodatek
- Zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie badanych próbek po 7 oraz 28 dniach pielęgnacji. W przypadku badania po 7 dniach pielęgnacji wpływ zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych na wytrzymałość ma charakter nieliniowy ze względu na niewielkie różnice w wytrzymałościach próbek o zawartości 5 oraz 10%. W badaniu po 28 dniach pielęgnacji wpływ ten jest bliski liniowemu, spadek wytrzymałości wynosi około 0,55 MPa na każde 5% dodatku rozdrobnionych odpadów gumowych
- Zwiększenie się odkształcalności badanych próbek w badaniu wytrzymałościowym po 7 oraz 28 dniach pielęgnacji. Wpływ ten jest zbliżony w przypadku obu okresów pielęgnacji próbek

- Zwiększenie się strefy płynięcia materiału w zakresie wysokich wartości naprężeń. W efekcie wraz ze wzrostem zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych badane próbki wykazują coraz mniej cech mechanizmu kruchego pęknięcia przy obciążeniu

#### 4.2.4 Wyniki badania cyklicznego obciążenia

W etapie „2” do badania obciążenia cyklicznego zastosowano system pomiarowy ARAMIS 3D, wykorzystujący cyfrową korelację obrazu, w celu precyzyjnego określania deformacji zachodzących na powierzchni badanych próbek. Aparatura ARAMIS 3D została połączona z maszyną wytrzymałościową, w której wykonywane było badanie, w celu bezpośredniego odczytywania sił oddziaływujących na próbkę oraz deformacji. Próbki były obserwowane za pomocą kamer, które umożliwiały określenie deformacji zachodzących na powierzchni próbek. Badanie zostało wykonane na próbkach po 28 dniach pielęgnacji, pokrytych stochastycznym wzorem (jak na Rys. 2.31a). Na rysunku 4.45 przedstawiono układ narzędzi pomiarowych systemu ARAMIS 3D wykorzystanych do badania próbek.



Rys. 4.45. Przykład narzędzi pomiarowych systemu ARAMIS 3D zastosowanych przy badaniu obciążenia cyklicznego

Na rysunku 4.45 przedstawiono następujące elementy, które służyły do wykonywania pomiarów:

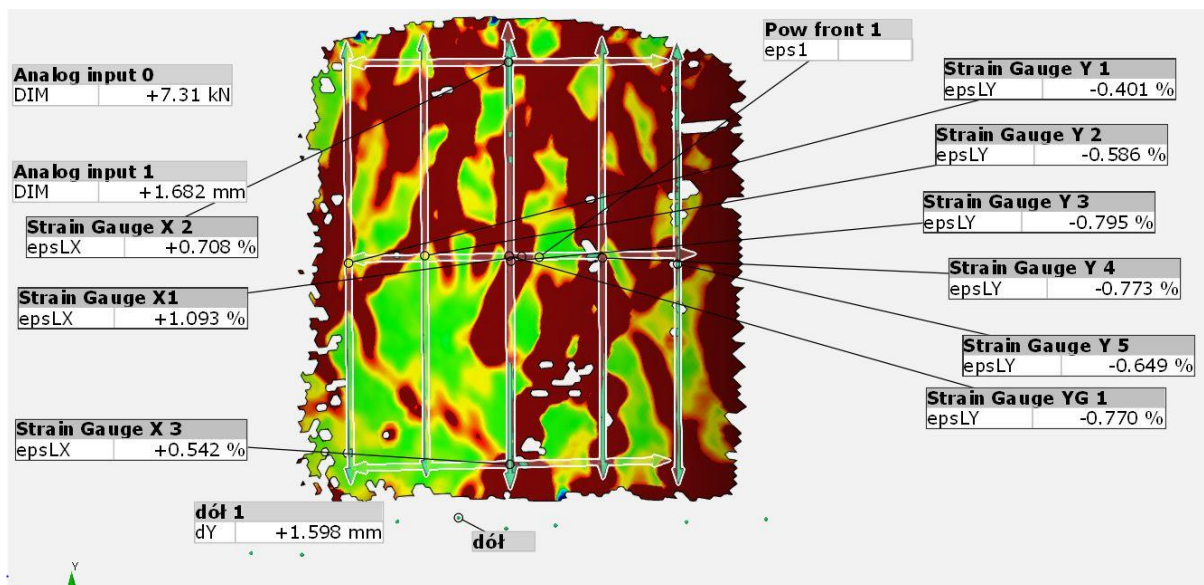
- Analog input 0 – połączenie jednostki obliczeniowej z prasą wytrzymałościową służące do stałego odczytywania siły ściskającej działającej na badaną próbkę. Ze względu na „zaszumienie” odczytów pochodzących z prasy wytrzymałościowej, wartości zostały skorygowane za pomocą tymczasowego filtra dwumianowego o wartości 2 (wartość „2” odpowiada liczbie sąsiadujących

klatek nagrania, które są brane pod uwagę przy uśrednianiu odczytanej wartości siły)

- Analog input 1 – połączenie jednostki obliczeniowej z prasą wytrzymałościową służący do stałego odczytywania wartości przemieszczenia realizowanego przez prasę. Ze względu na duże „zaszumienie” odczytywanych wartości, odczyt pełnił funkcję kontrolną
- Dół 1 – punkty stałe oznaczone na dolnej (ruchomej) półce maszyny wytrzymałościowej. Służyły one do precyzyjnego pomiaru wartości deformacji pionowych próbki, wymuszanych przez prasę wytrzymałościową
- Góra 1 – punkty stałe oznaczone na górnej (nieruchomej) półce maszyny wytrzymałościowej. Służyły one do kontroli wychylenia przegubowej przystawki do ściskania próbek
- Pow.Front.1 – element powierzchniowy zbudowany na podstawie stochastycznego wymalowania próbek, służył do pomiaru odkształceń głównych występujących na powierzchni próbki, zgodnie z legendą kolorystyczną przedstawioną po prawej stronie rysunku (zakres odkształceń głównych od +0,5% do -0,5%)
- Strain Gauge  $X_i$  ( $i=1,2,3$ ) – wirtualne tensometry naniesione na powierzchnię frontową próbki pozwalające określać odkształcenia poprzeczne spowodowane ściskaniem próbki, na różnych wysokościach badanego obiektu. Tensometry miały długość ok. 55 mm, dobór tak dużej bazy pomiarowej wynikał z próby jak najdokładniejszego pomiaru globalnych odkształceń poprzecznych próbki. Tensometry były rozłożone w następujący sposób:
  - Strain Gauge X1 – tensometr poprzeczny umieszczony w środku wysokości próbki służący do pomiaru maksymalnych odkształceń poprzecznych próbki
  - Strain Gauge X2 – tensometr poprzeczny umiejscowiony w górnej widocznej strefie próbki, służący do pomiarów odkształceń poprzecznych przy górnej przystawce ściskającej
  - Strain Gauge X3 – tensometr poprzeczny umiejscowiony w dolnej widocznej części próbki, służący do pomiarów odkształceń poprzecznych przy dolnej przystawce ściskającej
- Strain gauge  $Y_i$ ,  $i \in \langle 1;5 \rangle$  – wirtualne tensometry naniesione na powierzchnię frontową próbki, pozwalające określać odkształcenia pionowe spowodowane ściskaniem próbki. Tensometry te miały długość ok. 70 mm. Dobór tak dużej bazy pomiarowej wynikał z próby jak najdokładniejszego pomiaru globalnych odkształceń pionowych próbki. Tensometry były rozmieszczane od lewej do prawej widocznej strony próbki. Liczba tensometrów zależna była od jakości gradientu wymalowanego na powierzchni próbki i wynosiła od 4 do 6. Wartości odkształceń pionowych były następnie uśredniane dla całej próbki



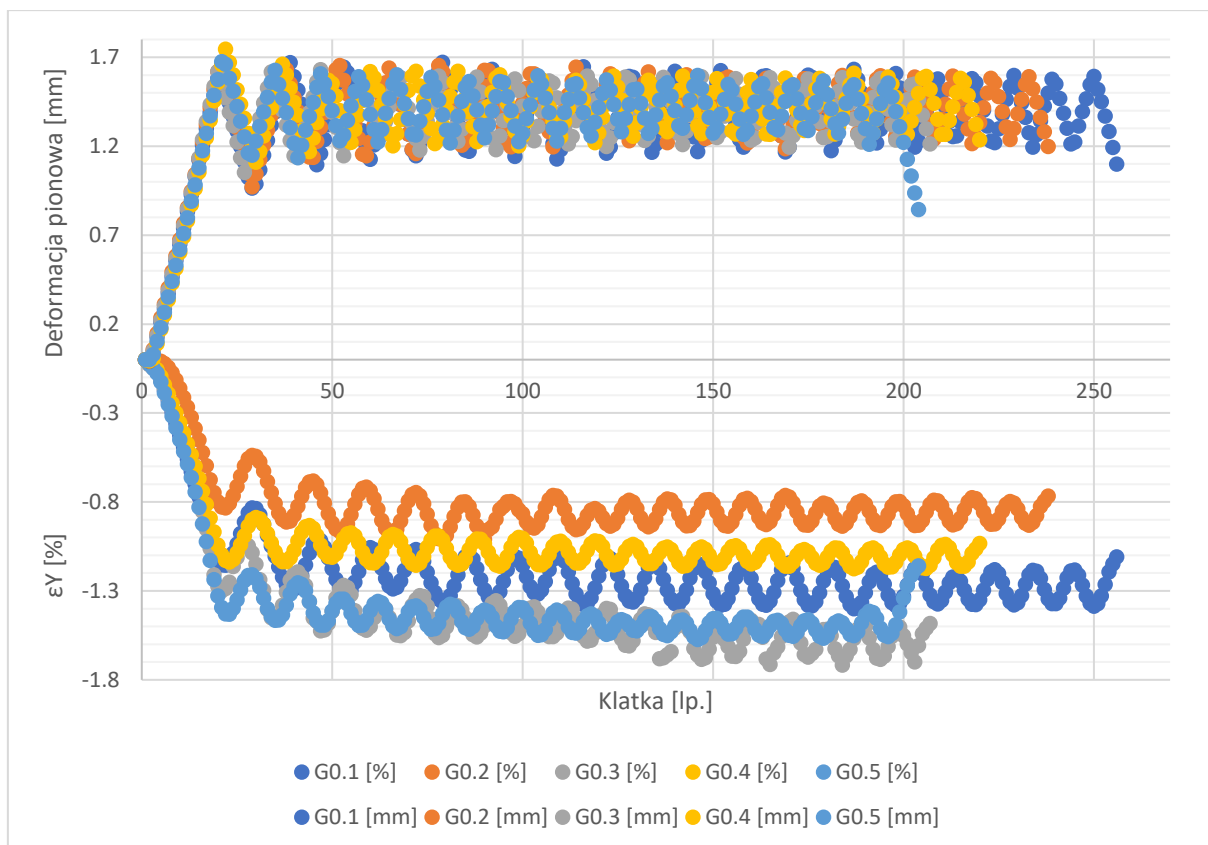
Na rysunku 4.46 przedstawiono widok wygenerowanego modelu powierzchni frontowej badanej próbki wraz z naniesionymi tensometrami.



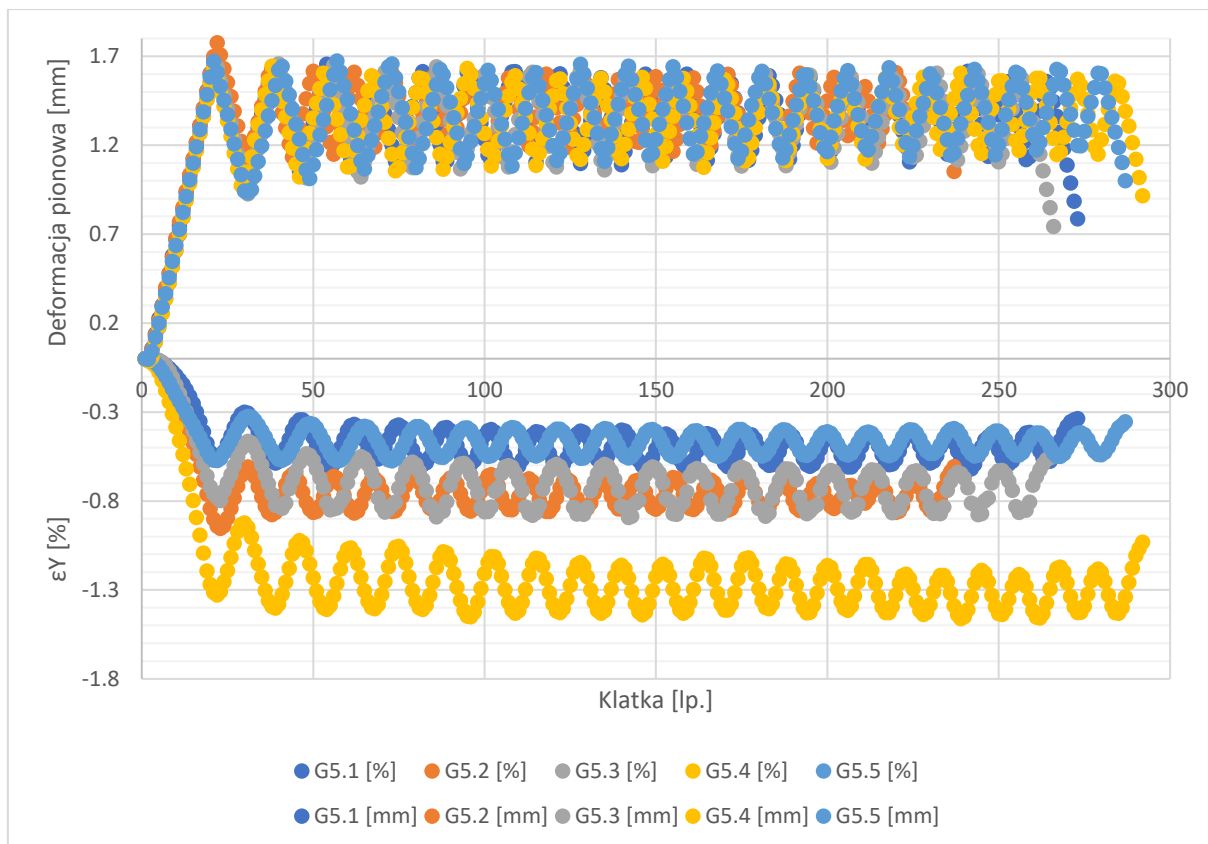
Rys. 4.46. Przykład wygenerowanego modelu powierzchni frontowej badanej próbki wraz z rozmieszczeniem wirtualnych tensometrów

Celem przeprowadzonych pomiarów było określenie wpływu zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych na globalną deformację próbki przy znanym obciążeniu oraz określenie zakresu deformacji sprężystych, a następnie skorelowanie tych wartości z odkształceniami podłużnymi i poprzecznymi odczytywanymi na powierzchni próbki za pomocą wirtualnych tensometrów. Dodatkowo, obserwacjom podlegały odkształcenia główne powstające na powierzchni próbki, pokazujące miejsca powstawania zarysowań, ich propagację oraz poziom rozkładu odkształceń po całej powierzchni próbki.

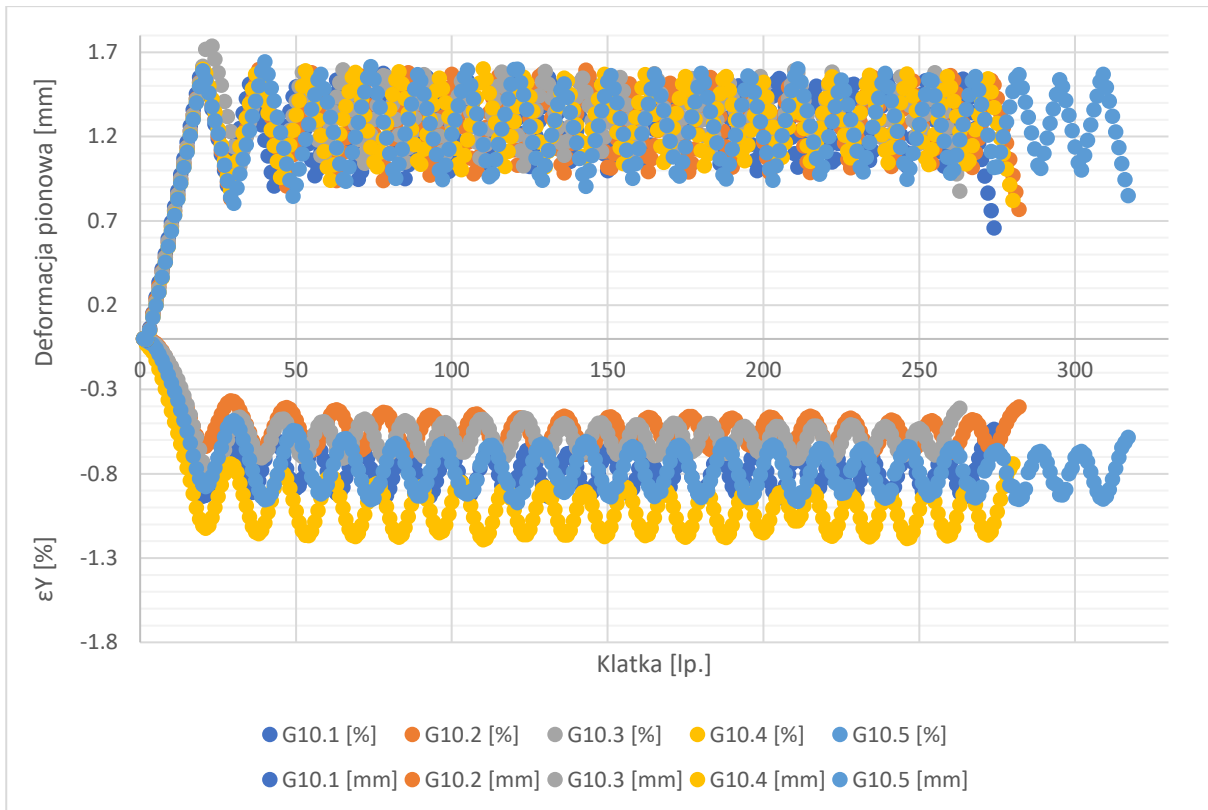
Na rysunkach 4.47÷4.50 przedstawiono wyniki pomiaru deformacji pionowych oraz odkształceń pionowych zarejestrowanych na poszczególnych próbkach mieszanek G0, G5, G10 oraz G15. Dodatkowo wartości osi pionowych odpowiadają wartościom globalnych deformacji pionowych [mm] wymuszonych na próbce przez ruch dolnej półki maszyny wytrzymałościowej. Ujemne wartości osi pionowej odpowiadają odkształceniom pionowym [%], jakie zostały zarejestrowane na powierzchni próbki za pomocą wirtualnych tensometrów. Dane dotyczące odkształceń pionowych zostały określone jako średnia arytmetyczna wartości odkształceń pionowych zarejestrowanych przez poszczególne tensometry wirtualne ulokowane na powierzchni próbki. Na osi poziomej przedstawiono kolejne klatki nagrania, rejestrowane podczas pomiarów.



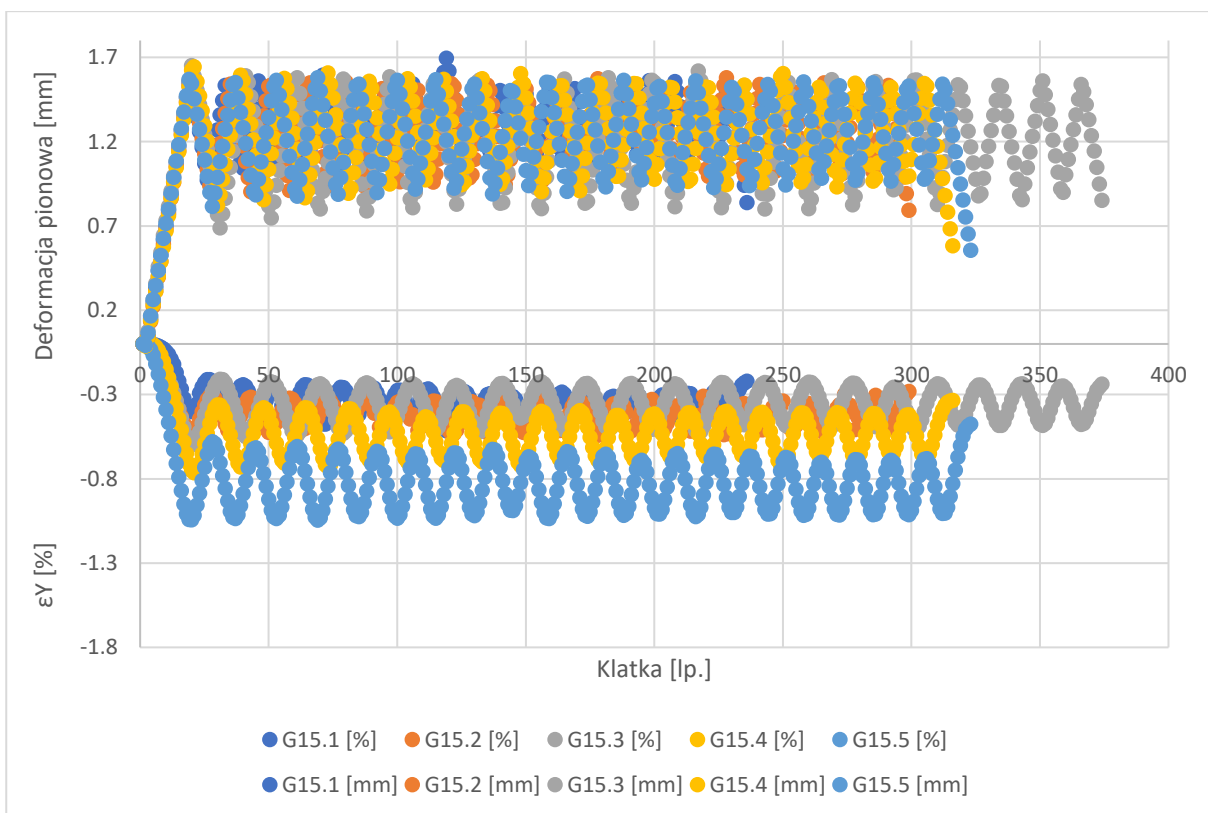
Rys. 4.47. Wyniki pomiaru deformacji oraz odkształceń pionowych dla próbek serii G0



Rys. 4.48. Wyniki pomiaru deformacji oraz odkształceń pionowych dla próbek serii G5



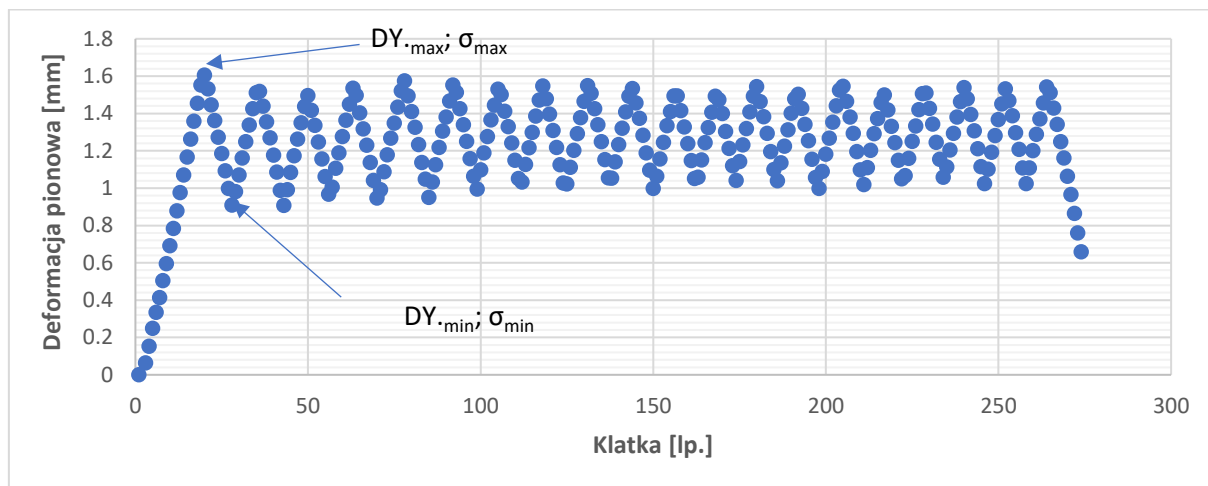
Rys. 4.49. Wyniki pomiaru deformacji oraz odkształceń pionowych dla próbek serii G10



Rys. 4.50. Wyniki pomiaru deformacji oraz odkształceń pionowych dla próbek serii G15

#### 4.2.5 Analiza deformacji pionowych

W pierwszej kolejności zostanie przeprowadzona analiza deformacji, którym została poddana próbka w czasie badania. Do tego celu przygotowano rysunek 4.51, na którym zilustrowano parametry wykorzystane do tej analizy.



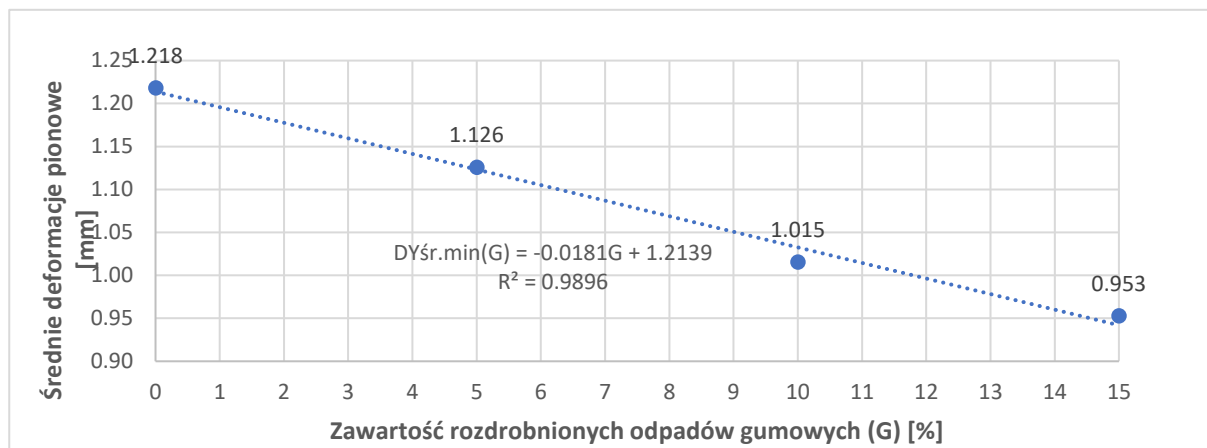
Rys. 4.51. Objasnienie parametrów wykorzystanych w analizie deformacji pionowych

Na rysunku 4.51 oznaczono następujące parametry:

- $DY_{max}$  – maksymalne wartości deformacji w pojedynczym cyklu obciążenia, zgodnie z procedurą badania równe ok. 1,5 mm
- $DY_{min}$  – minimalne wartości deformacji w pojedynczym cyklu obciążenia, dalej nazywane deformacjami plastycznymi
- $\sigma_{max}$  – maksymalne naprężenia w pojedynczym cyklu obciążenia
- $\sigma_{min}$  – minimalne naprężenia w pojedynczym cyklu obciążenia, zgodnie z założeniem badania wynoszą one około 0,02 MPa

Oznaczone powyżej wartości zostały określone we wszystkich cyklach obciążenia dla każdej próbki, a następnie uśrednione w ramach próbek wykonanych z jednej mieszanki.

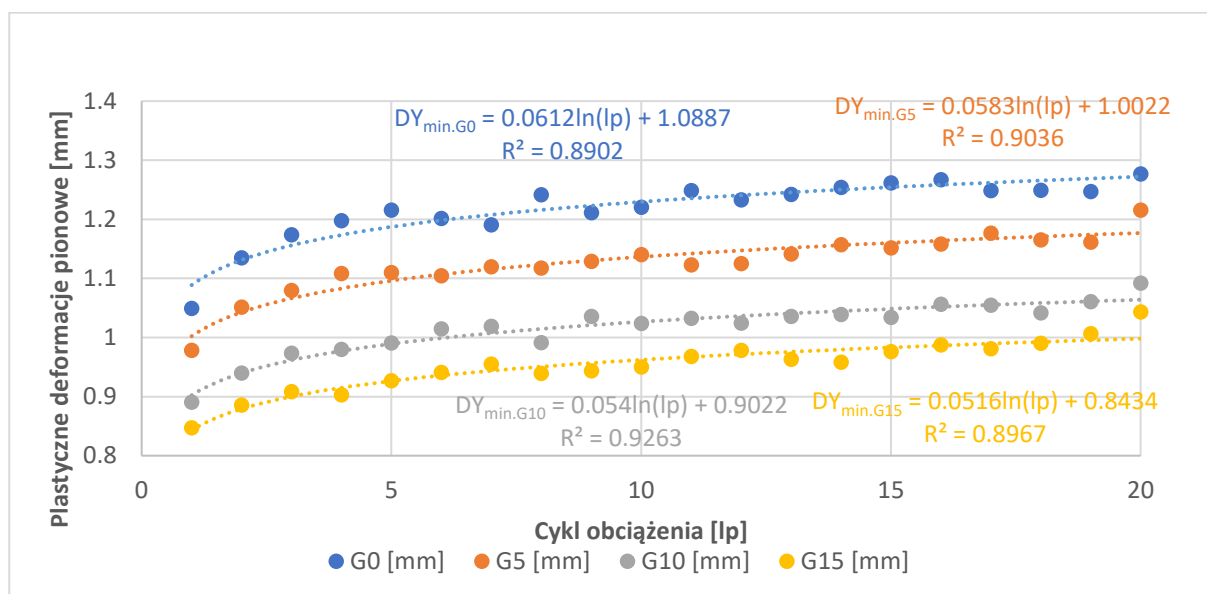
Analizując uzyskane wartości deformacji pionowych, widać, iż wraz ze wzrostem zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych wzrasta również amplituda pomiędzy największymi oraz najmniejszymi wartościami deformacji pionowych odnotowanych dla poszczególnych cykli obciążenia. Na rysunku 4.52 przedstawiono przebieg zależności uśrednionych wartości pionowych deformacji plastycznych uzyskanych we wszystkich cyklach obciążenia ( $DY_{sr.min}$ ) od zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych.



Rys. 4.52. Wykres zależności średnich plastycznych deformacji pionowych  $DY_{\text{śr.min}}$  od zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych w mieszance

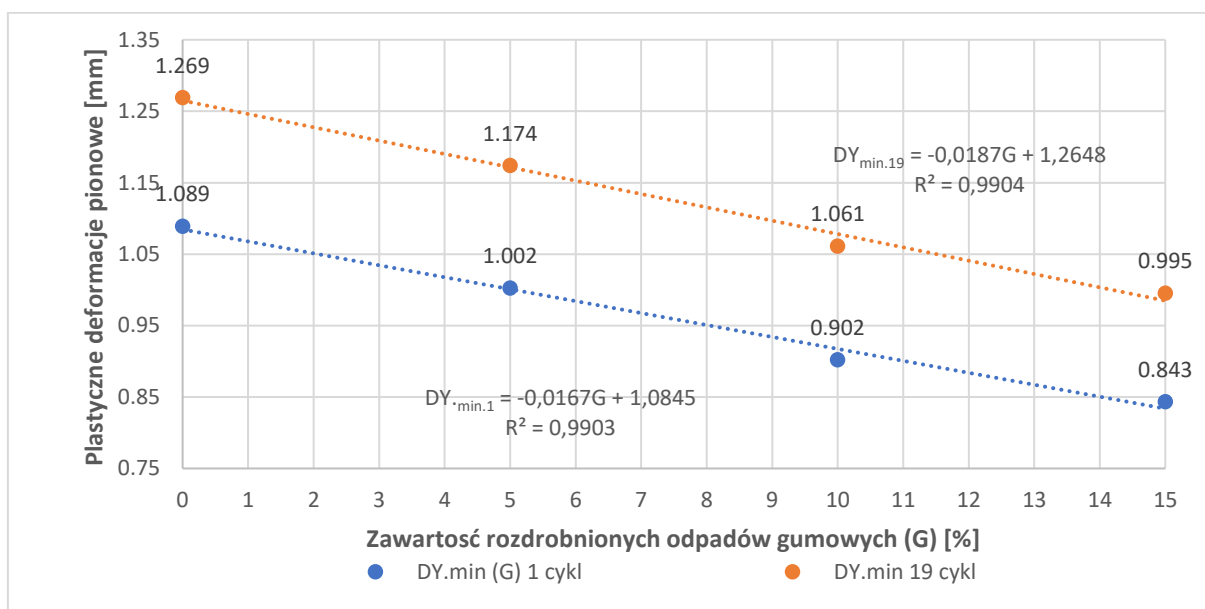
Jak wynika z rysunku 4.52 zależność pomiędzy wartościami  $DY_{\text{śr.min}}$  a zawartością rozdrobnionych odpadów gumowych ma charakter liniowy, a wartości te zmniejszają się o około 0,1 mm na każde 5% dodatku rozdrobnionych odpadów gumowych. Wraz ze wzrostem zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych wielkość średnich deformacji plastycznych uzyskanych dla poszczególnych mieszanek zmniejsza się.

W celu dokładniejszej analizy zmian zachodzących pomiędzy poszczególnymi cyklami obciążenia, z wartości przedstawionych na rysunkach 4.47÷4.50, wyodrębniono wartości deformacji plastycznych dla każdego cyklu obciążenia. Dane te przedstawiono na rysunku 4.53, osobno dla każdej z analizowanych mieszanek. Na osi pionowej przedstawiono wartości deformacji próbek, a na osi poziomej cykle obciążenia próbki. Do analizy były brane wartości uzyskane w pierwszym oraz dziewiętnastym cyklu badania. Cykl 20 nie został poddany pełnej analizie ze względu na błąd przy wyłączaniu maszyny wytrzymałościowej, powodujący nieścisłości w wynikach pomiarów uzyskanych dla części badanych próbek.



Rys. 4.53. Wartości deformacji plastycznych uzyskane dla mieszanek w każdym kolejnym cyklu obciążenia

Analizując wykres zmian wartości średnich deformacji plastycznych, można zauważyć wśród badanych próbek trend do zwiększania się wartości deformacji plastycznych wraz z każdym następnym cyklem obciążenia. Widoczny jest wpływ zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych na wielkość przyrostu tych deformacji w początkowych cyklach obciążenia. W przypadku próbek kontrolnych G0 widoczne jest, iż wartości deformacji plastycznych przyrastają najszybciej w pierwszych 5 cyklach obciążenia, następnie w cyklach od 5 do 19 przyrost ten jest mniejszy i wykazuje charakter zbliżony do liniowego. Dla próbek G5 zwiększony przyrost deformacji plastycznych widoczny jest dla pierwszych 4 cykli, zaś w przypadku próbek G10 oraz G15 dla pierwszych 3 cykli. Zawartość rozdrobnionych odpadów gumowych wpływa na wielkość przyrostu deformacji plastycznych w początkowych cyklach obciążenia, ale również ma wpływ na zmniejszanie się wartości deformacji plastycznych w pierwszym, jak i ostatnim cyklu obciążenia. Przedstawione wartości zostały opisane za pomocą funkcji logarytmicznych. Na rysunku 4.54 przedstawiono zależność wartości deformacji plastycznych uzyskanych w pierwszym oraz ostatnim cyklu obciążenia od zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych.



Rys. 4.54. Wykres zależności deformacji plastycznych uzyskanych w pierwszym oraz dziewiętnastym cyklu obciążenia od zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych

Z rysunku 4.54 wynika, że przebieg zależności dla pierwszego, jak i ostatniego cyklu obciążenia ma charakter liniowy. Widoczna jest jednak tendencja do zmniejszania się skuteczności dodatku przy jego zawartości większej lub równej 10%. Dodatki 10 oraz 15% wskazują na mniejszą redukcję wartości deformacji plastycznych niż dodatek 5%. Wartości współczynnika kierunkowego „a” występującego w funkcjach liniowych opisujących przedstawione zależności wskazują, iż linia trendu opisująca spadek wartości deformacji plastycznych dla dziewiętnastego cyklu obciążenia jest nachylona pod większym kątem względem poziomej osi układu współrzędnych niż linia trendu określona dla wartości w cyklu pierwszym ( $-0,0187 < -0,0167$ ). Pozwala to stwierdzić, że rozdrobnione odpady gumowe oprócz wpływu na wielkość deformacji plastycznych, wpływają również na zmniejszenie się

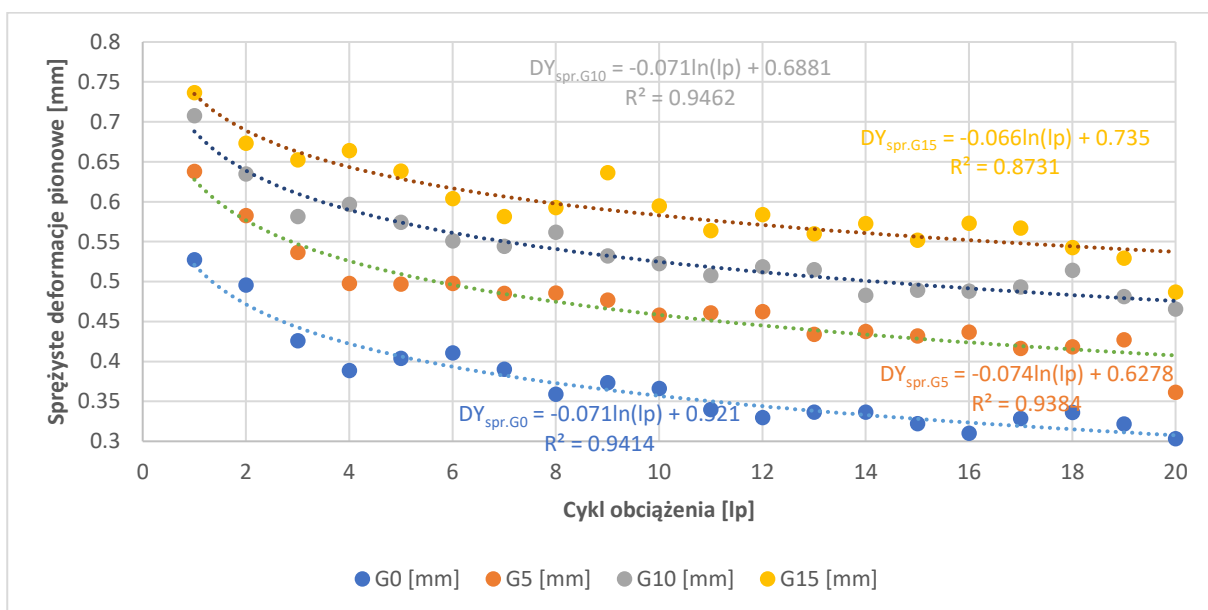


przyrostu wartości deformacji plastycznych pomiędzy pierwszym a ostatnim cyklem obciążenia.

Najistotniejszym parametrem deformacji, pod kątem badania wytrzymałościowego w warunkach obciążenia cyklicznego, są wartości deformacji sprężystych. Deformacje sprężyste w tym przypadku są określone, jako różnica pomiędzy wartościami maksymalnych deformacji, zgodnymi z założonym wymuszeniem około 1,5 mm, a wartościami deformacji plastycznych uzyskanych przy kontrolowanym odciążeniu próbki do minimalnej wartości siły ściskającej równej 0,1 kN, według poniższego równania:

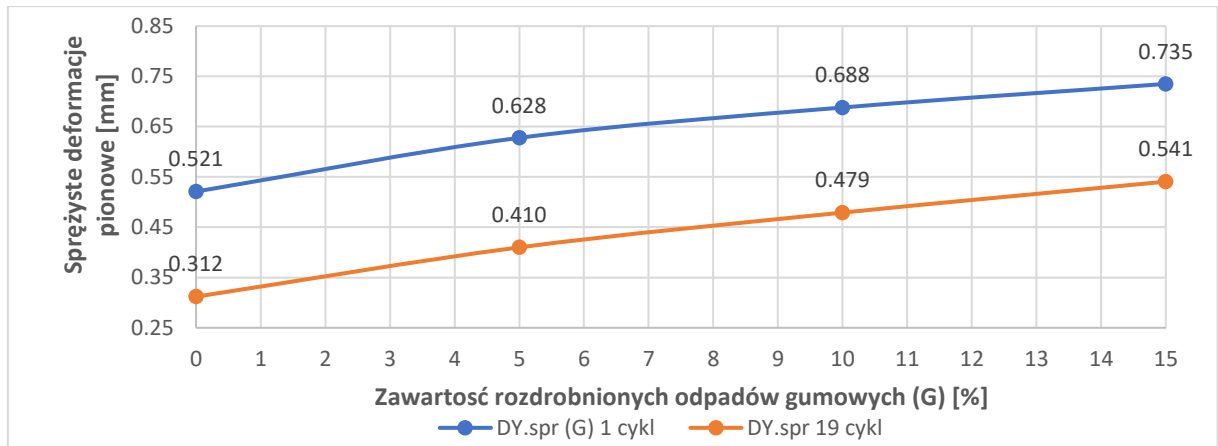
$$DY_{spr} = DY_{max} - DY_{min} \quad (4.7)$$

Uśrednione wartości deformacji sprężystych uzyskane przez badane mieszanki w poszczególnych cyklach obciążenia przedstawiono na rysunku 4.55.



Rys. 4.55. Wartości deformacji sprężystych uzyskanych w poszczególnych cyklach obciążenia

Analizując różnice pomiędzy wartościami deformacji plastycznych uzyskanymi dla poszczególnych mieszanek, można zaobserwować analogiczny wpływ zawartości odpadów gumowych na zmiany wartości parametru w pierwszych cyklach badania. Próbkę kontrolną G0 oraz próbkę G5 prezentują dużą redukcję wartości deformacji plastycznych w pierwszych 4 cyklach obciążenia. W dalszych cyklach ubytek ten jest znacznie mniejszy. W przypadku mieszanek G10 oraz G15 gwałtowna redukcja wartości tych deformacji odnotowywany jest tylko dla pierwszych 3 cykli obciążenia, dalej ubytek ten jest mniejszy. Widoczna jest redukcja skuteczności zastosowanego dodatku wraz ze wzrostem jego zawartości. W celu zaprezentowania omawianej zależności przygotowano rysunek 4.56, na którym zilustrowano przebieg zależności wartości deformacji sprężystych uzyskanych w pierwszym oraz dwunastym cyklu obciążenia od zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych. Wartości deformacji sprężystych zostały obliczone na podstawie funkcji logarytmicznych jakimi opisano zależności przedstawione na rysunku 4.55.

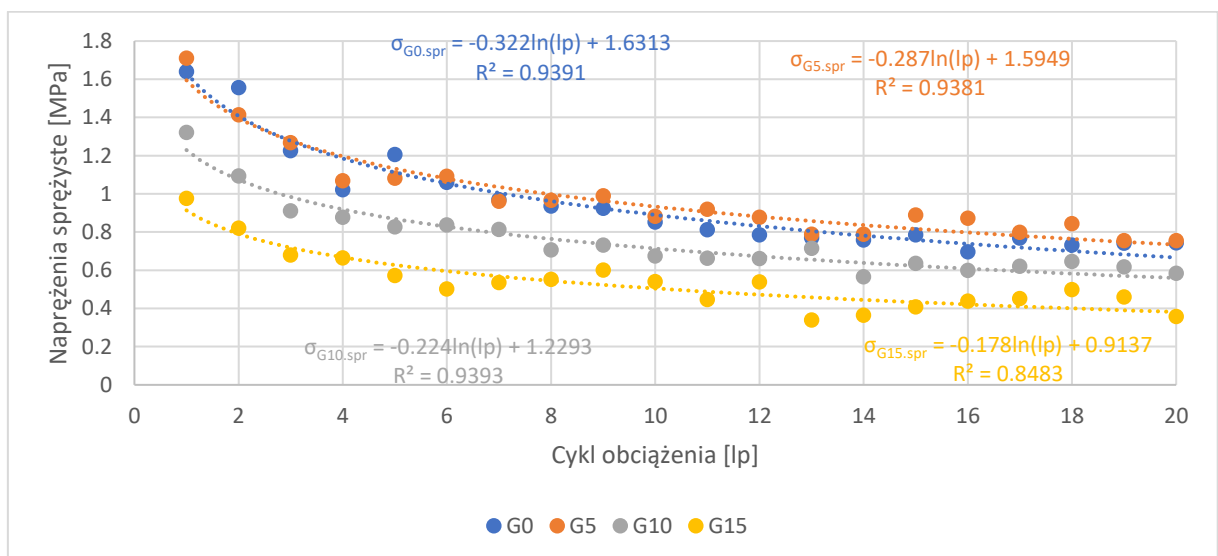


Rys. 4.56. Wykres zależności deformacji sprężystych w pierwszym i dziewiętnastym cyklu obciążenia od zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych

Z rysunku 4.56 wynika, iż w przypadku deformacji sprężystych w pierwszym, jak i ostatnim analizowanym cyklu obciążenia, największy przyrost obu wartości odnotowano dla dodatku rozdrobnionych odpadów gumowych równego 5%. Przy większych dodatkach widoczna jest około 50% redukcja jego skuteczności. Świadczy to o pewnej granicznej użyteczności zastosowania dodatku rozdrobnionych odpadów gumowych pod kątem zwiększania zakresu deformacji sprężystych. Najlepsze efekty jego zastosowania będą uzyskiwane dla zawartości dodatków od 5 do 10%. Wpływ zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych na różnicę pomiędzy deformacjami sprężystymi uzyskanymi w pierwszym oraz ostatnim analizowanym cyklu obciążenia jest pomijalny.

W trakcie badania, poza pomiarami deformacji, kontroli podlegały również naprężenia powstające w badanych próbkach. Na rysunku 4.57 przedstawiono uśrednione wartości naprężeń sprężystych (naprężeń odczytywanych w zakresie deformacji sprężystych próbki) w kolejnych cyklach obciążenia określonych według poniższego wzoru:

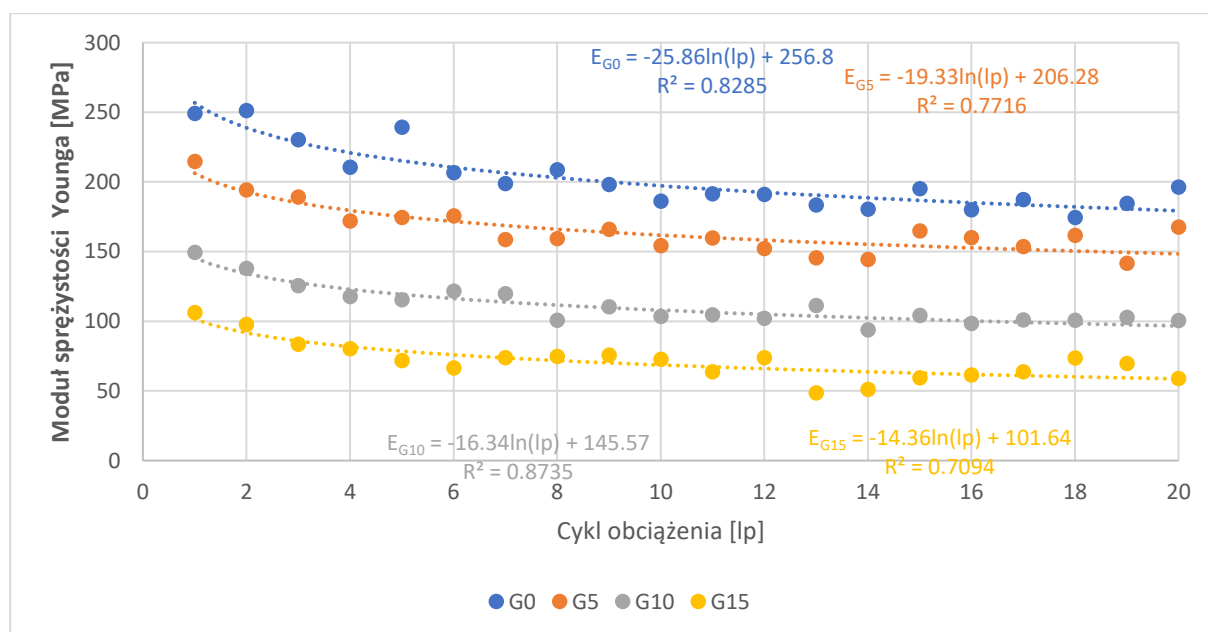
$$\sigma_{spr} = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (4.8)$$



Rys 4.57. Średnie wartości naprężeń sprężystych dla poszczególnych cykli obciążenia badanych mieszanek

W przypadku naprężeń wyznaczonych w zakresie deformacji sprężystych można zauważyć, iż nie ma dużej różnicy pomiędzy wartościami odczytywanymi dla próbek kontrolnych G0 oraz próbek G5. Obie mieszanki uzyskują wartości naprężeń od ok. 1,7 do 0,75 MPa. Mieszanki te odnotowały również największą redukcję wartości naprężeń między pierwszym a ostatnim analizowanym cyklem obciążenia. Ubytek ten wynosi około 0,95 MPa. Większe zawartości dodatku rozdrobnionych odpadów gumowych skutkują ciągłym zmniejszaniem się wartości odczytywanych naprężeń. Dla mieszanki G10 naprężenia te wynoszą od 1,3 do 0,6 MPa (spadek wartości o 0,7 MPa). Mieszanka G15 uzyskała wartości naprężeń od około 1,0 do 0,5 MPa (spadek o 0,5 MPa). Na podstawie powyższych danych można stwierdzić, iż zawartość rozdrobnionych odpadów gumowych powyżej 5% wpływa na zmniejszanie się wartości naprężeń odczytywanych w pierwszym cyklu obciążenia. Naprężenia w ostatnim cyklu obciążenia również ulegają redukcji przy dodatku odpadów gumowych większym niż 5%, jednak w tym przypadku ubytek ten jest równomierny i wynosi około 0,1 MPa na każde 5% dodatku.

Na podstawie omówionych deformacji sprężystych oraz naprężeń sprężystych, obliczono moduły sprężystości Younga badanych mieszanek według wzorów 4.5 oraz 4.6. Wartości modułów sprężystości, w poszczególnych cyklach obciążenia przedstawiono na rysunku 4.58.



Rys. 4.58. Wartości modułów sprężystości Younga w poszczególnych cyklach badania

Wraz ze wzrostem zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych wartości modułów sprężystości maleją w pierwszym, jak i w ostatnim cyklu obciążenia. Wartości modułów sprężystości przedstawiono w tabelicy 4.9. Na podstawie tych danych można stwierdzić, iż wpływ zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych na wartości modułów sprężystości jest przeciwnie proporcjonalny, ponieważ odnotowujemy redukcję modułu sprężystości o około 50 MPa na każde 5% dodatku. Zawartość odpadów gumowych wpływa również na wartość redukcji modułu sprężystości między pierwszym a ostatnim analizowanym cyklem obciążenia.

Najmniejszą redukcję wartości uzyskuje się w przypadku mieszanki G15, najwyższą zaś w przypadku mieszanki G0.

Tablica 4.9. Wartości modułów sprężystości Younga dla pierwszego oraz ostatniego cyklu badania

Mieszanka	Moduł sprężystości w pierwszym cyklu badania [MPa]	Moduł sprężystości w 19-tym cyklu badania [MPa]
G0	256,8	179,3
G5	206,3	148,4
G10	145,6	96,6
G15	101,6	58,6

W odniesieniu wartości redukcji modułu sprężystości do jego początkowej wartości, mieszanki prezentują następujące procentowe zmniejszenie jego wartości:

- G0 – 30,18%
- G5 – 28,07%
- G10 – 33,64%
- G15 – 42,32%

Na podstawie tych wartości można stwierdzić, iż procentowo najniższy ubytek wartości modułu odnotowano dla mieszanki G5, najwyższy zaś dla mieszanki G15.

#### 4.2.6 Podsumowanie pomiarów deformacji w cyklicznych obciążeniach

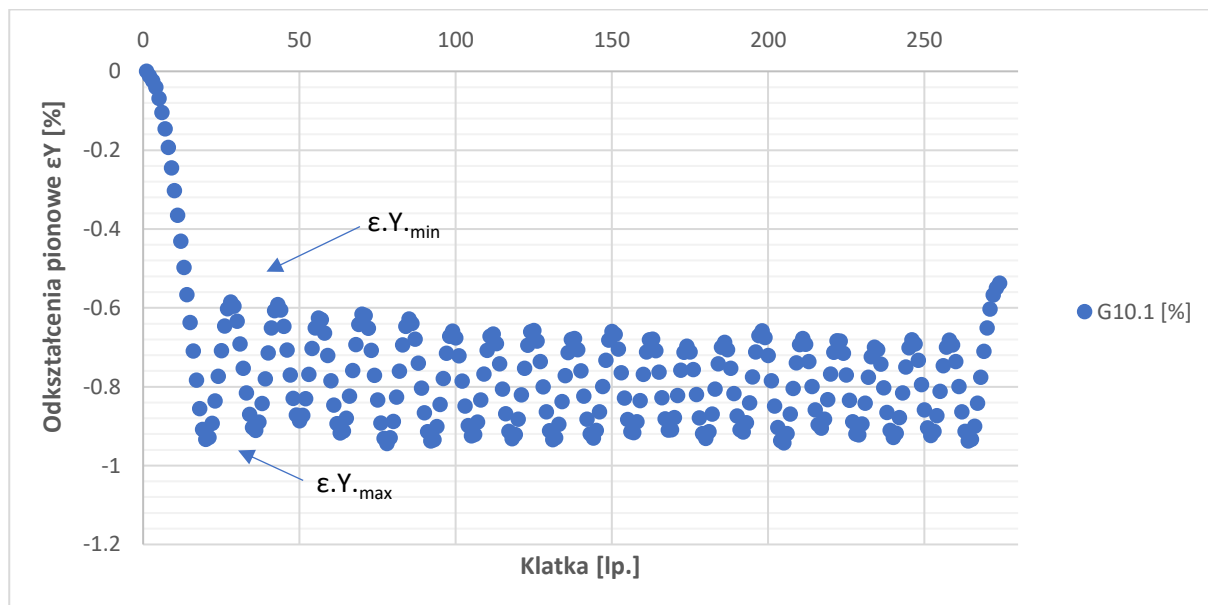
Reasumując przedstawione wyniki pomiarów deformacji oraz naprężeń w badaniu obciążenia cyklicznego, można stwierdzić, iż dodatki rozdrobnionych odpadów gumowych powodują:

- Redukcję uśrednionych wartości dla wszystkich cykli obciążenia deformacji plastycznych badanych mieszanek. Wartości deformacji plastycznych mieszanek zmniejszają się o około 0,1 mm na każde 5% dodatku rozdrobnionych odpadów gumowych
- Nieznaczne zmniejszenie przyrostu wartości deformacji plastycznych pomiędzy pierwszym a ostatnim cyklem obciążenia próbki
- Zwiększanie się zakresu deformacji sprężystych, w jakim pracuje próbka pod wpływem cyklicznego przykładania obciążeń. Wartości deformacji sprężystych ulegają zwiększeniu wraz ze wzrostem zawartości odpadów gumowych. Zależność wartości deformacji sprężystych od zawartości odpadów gumowych wskazuje, iż skuteczność dodatku (zdolność do zwiększania zakresu deformacji sprężystych) maleje wraz ze zwiększaniem się zawartości dodatku. W efekcie dodatki odpadów gumowych większe lub równe 10% powodują przyrost wartości deformacji sprężystych o około 50% mniejszy niż dodatki mniejsze od 10%.

- Zmniejszenie różnic wartości deformacji sprężystych w początkowych cyklach obciążenia
- Zmniejszanie się wartości naprężeń odczytywanych przy pracy w zakresie sprężystym dla dodatków większych lub równych 10%. Dodatkowo, przy tych zawartościach dodatków, wartości naprężeń w zakresie sprężystym odnotowują mniejszy ubytek swojej wartości pomiędzy pierwszym a ostatnim cyklem obciążenia
- Redukcję wartości modułu sprężystości wraz ze zwiększaniem się zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych. Ubytek ten jest liniowy i wynosi około 50 MPa na każde 5% dodatku
- Zmniejszenie różnic wartości modułu sprężystości pomiędzy pierwszym i ostatnim cyklem obciążenia dla dodatku równego 5%

#### 4.2.7 Analiza wartości odkształceń pionowych

Odkształcenia pionowe zostały pomierzone za pomocą wirtualnych tensometrów zainstalowanych na powierzchni próbek z wykorzystaniem oprogramowania GOM Correlate (rysunki 4.47÷4.50). Analiza wartości uzyskanych w poszczególnych cyklach badania została przeprowadzona w taki sam sposób, jak w analizie deformacji pionowych. Na rysunku 4.59 przedstawiono w jaki sposób określone były analizowane parametry.



Rys. 4.59. Objasnienie parametrów wykorzystanych w analizie odkształceń pionowych

Na rysunku 4.59 przedstawiono następujące parametry:

- $\epsilon.Y_{\min}$  – minimalne wartości odkształceń pionowych dla cyklu obciążenia, przy odciążeniu próbki do naprężenia 0,02 MPa, dalej nazywane odkształceniami plastycznymi [%]
- $\epsilon.Y_{\max}$  – maksymalne wartości odkształceń pionowych odczytane dla cyklu obciążenia przy wymuszeniu deformacji równej ok. 1,5 mm [%]

Na rysunkach 4.47÷4.50 można zauważyć rozbieżności w wartościach odkształceń pionowych. W przypadku pomiarów deformacji wraz ze zwiększaniem się wartości rozdrobnionych odpadów gumowych zmieniały się tylko wartości deformacji plastycznych. Przy pomiarach odkształceń widoczny jest wpływ zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych na wielkość wartości odkształceń oraz na rozrzuty wyników pomiarów pomiędzy próbkami pochodzącymi z tej samej mieszanki. W celu sprawdzenia wpływu zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych na te rozrzuty, obliczone zostały odchylenia standardowe populacji dla mieszanek. Wartości te przedstawiono w tabelicy 4.10.

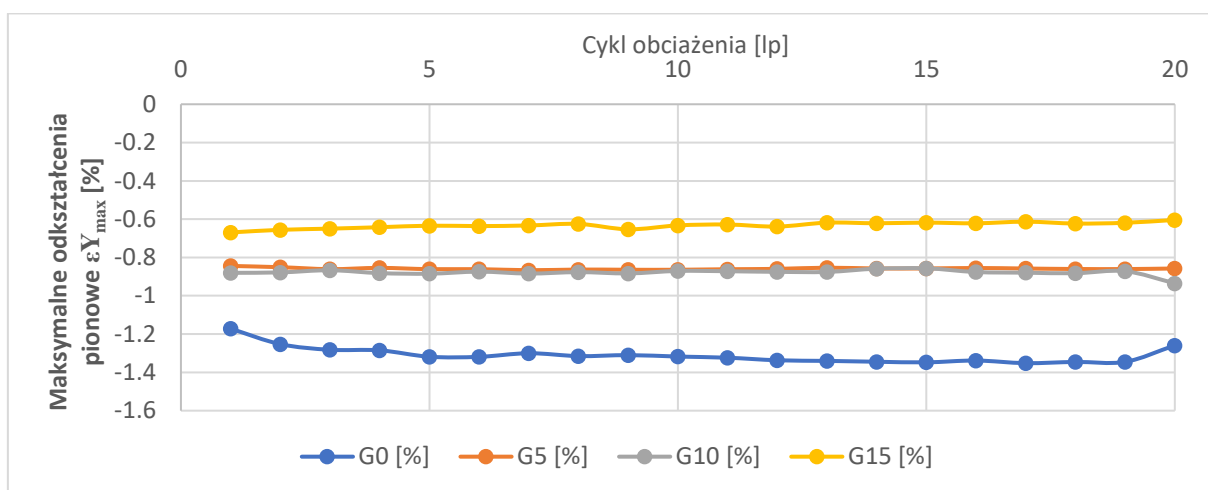
Tablica 4.10. Zestawienie wartości odchylenia standardowego populacji dla badanych mieszanek

Mieszanka	Odchylenie standardowe	
	Deformacja [-]	Odkształcenie [-]
G0	0,281	0,344
G5	0,272	0,333 (0,187)*
G10	0,265	0,226
G15	0,268	0,219 (0,108)*

\* – w nawiasie podano wartość odchylenia standardowego populacji po odrzuceniu próbki o wynikach najbardziej odstających od reszty

Na podstawie wartości przedstawionych w tabelicy 4.10 można stwierdzić, iż dla pomiarów deformacji wszystkie mieszanki prezentują podobne wartości odchylenia standardowego. Jednak w przypadku odkształceń pionowych widoczne jest, iż wraz ze wzrostem zawartości odpadów gumowych wartość odchylenia standardowego maleje, co świadczy o ich wpływie na zmniejszanie się rozbieżności pomiędzy uzyskanymi wynikami.

Na rysunku 4.60 przedstawiono wartości  $\epsilon.Y_{\max}$  uzyskane dla mieszanek we wszystkich cyklach obciążenia.



Rys. 4.60. Wartości maksymalnych odkształceń pionowych  $\epsilon.Y_{\max}$  w poszczególnych cyklach badania dla mieszanek G0, G5, G10 oraz G15



Zwiększające się zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych powodują zmniejszanie się wartości  $\varepsilon.Y_{\max}$ . Mieszanka G0 uzyskała wartości  $\varepsilon.Y_{\max}$  wynoszące około 1,3%, dodatki 5 oraz 10% skutkowały porównywalnym zmniejszeniem wartości odkształceń pionowych do około 0,9%, zaś kolejny skok wartości odnotowano przy dodatku 15%, który spowodował zmniejszenie wartości odkształceń do około 0,6%. Dodatkowo zauważalnym jest, iż tylko w przypadku mieszanki G0 wartości  $\varepsilon.Y_{\max}$  ulegają zwiększeniu z 1,17% w pierwszym cyklu obciążenia do 1,28% w 3 cyklu obciążenia. Pozostałe mieszanki uzyskują zbliżone wartości  $\varepsilon.Y_{\max}$  we wszystkich cyklach obciążenia.

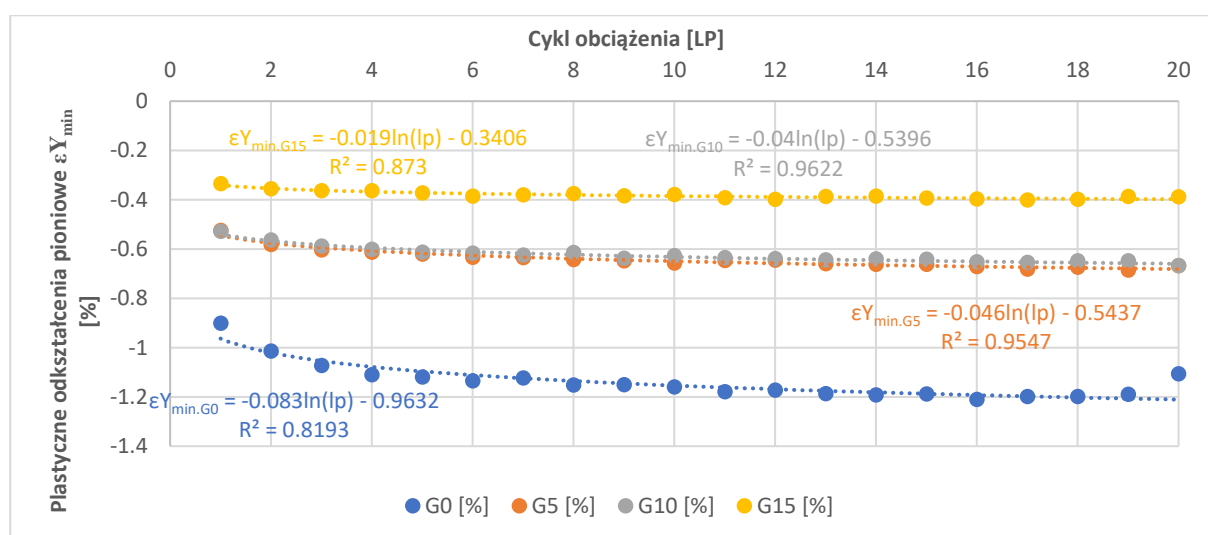
Wartości te jednak zdają się nie korelować z wartościami maksymalnych deformacji pionowych  $D.Y_{\max}$ , które zgodnie z założeniem badania wynosiły 1,5 mm. Przy wykorzystaniu poniższego wzoru [Encyklopedia fizyki, 1973], wartości  $\varepsilon.Y_{\max}$  powinny wynosić w przybliżeniu 2%.

$$\varepsilon = \lim_{L \rightarrow 0} \frac{\Delta L}{L} \quad (4.9)$$

gdzie:

- $\Delta L$  – zmiana długości próbki pod wpływem obciążenia, w tym przypadku równa  $D.Y_{\max}$
- $L$  – wysokość próbki równa około 80 mm

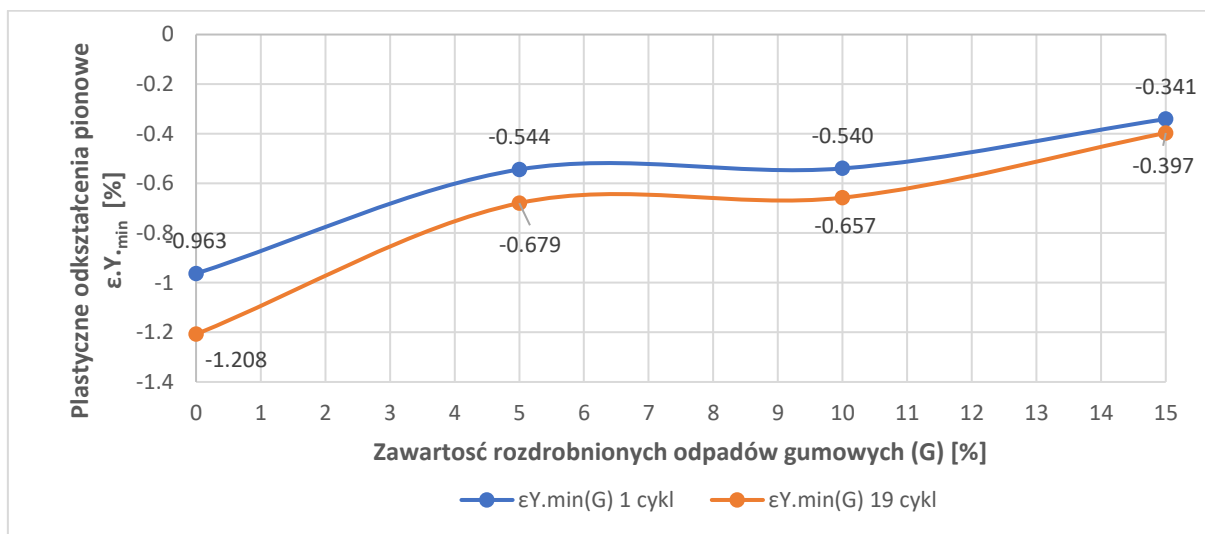
Różnica pomiędzy wartościami  $\varepsilon.Y_{\max}$  wynikającymi z pomiarów a tymi które można policzyć na podstawie  $D.Y_{\max}$ , wynika z wpływu rozdrobnionych odpadów gumowych na postaciowe odkształcenie próbki pod wpływem obciążenia. Na rysunku 4.61 przedstawiono wartości odkształceń plastycznych  $\varepsilon.Y_{\min}$ , uzyskane dla mieszanek we wszystkich cyklach obciążenia.



Rys. 4.61. Wartości odkształceń plastycznych  $\varepsilon.Y_{\min}$  dla mieszanek G0, G5, G10 oraz G15

Z rysunku 4.61 wynika, że wartości odkształceń plastycznych wykazują analogiczną zależność, jak w przypadku odkształceń maksymalnych  $\varepsilon.Y_{\max}$ . To oznacza, że rozdrobnione odpady gumowe wpływają na zmniejszenie się wartości odczytywanych odkształceń

plastycznych, jednak nie jest to wpływ liniowy. Dodatki 5 oraz 10% wykazują porównywalny wpływ na analizowaną wartość. Można również zauważyć, iż tylko w przypadku mieszanki G0 występuje znaczące zwiększenie się wartości odkształceń plastycznych w pierwszych 3 cyklach obciążenia. W przypadku pozostałych próbek takie zjawisko nie jest obserwowane, jednak wszystkie próbki wykazują tendencję do zwiększania się wartości odkształceń plastycznych pomiędzy pierwszym a ostatnim cyklem obciążenia. W celu analizy tych zmian obliczono wartości odkształceń plastycznych dla pierwszego oraz dziewiętnastego cyklu obciążenia, na podstawie dopasowanych do wyników linii trendu, będących funkcjami logarytmicznymi. Wartości te przedstawiono na rysunku 4.62.



Rys. 4.62. Wykres zależności wartości  $\varepsilon_{Y_{min}}$  uzyskanych w pierwszym oraz dziewiętnastym cyklu obciążenia od zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych

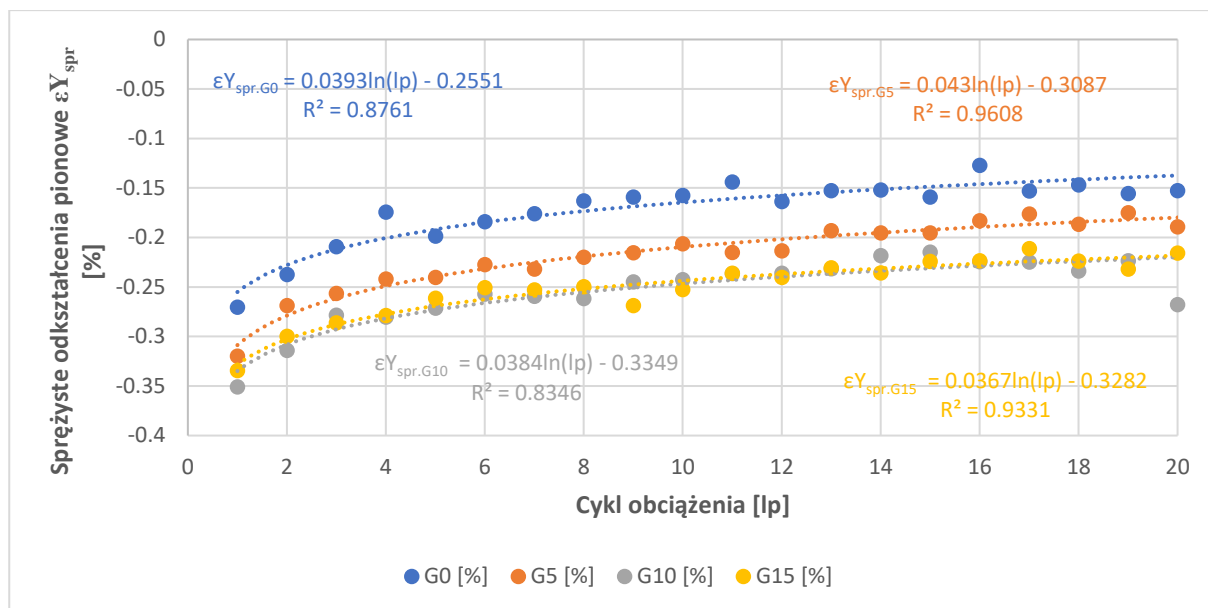
Z rysunku 4.62 wynika, że zawartość rozdrobnionych odpadów gumowych wpływa na zmianę wartości odkształceń plastycznych pomiędzy pierwszym a dziewiętnastym cyklem obciążenia. Zarejestrowano następujące zmiany:

- G0 – 0,244%
- G5 – 0,135%
- G10 – 0,118%
- G15 – 0,056%

Odształcenia sprężyste zostały obliczone dla każdego cyklu obciążenia na podstawie następującej zależności:

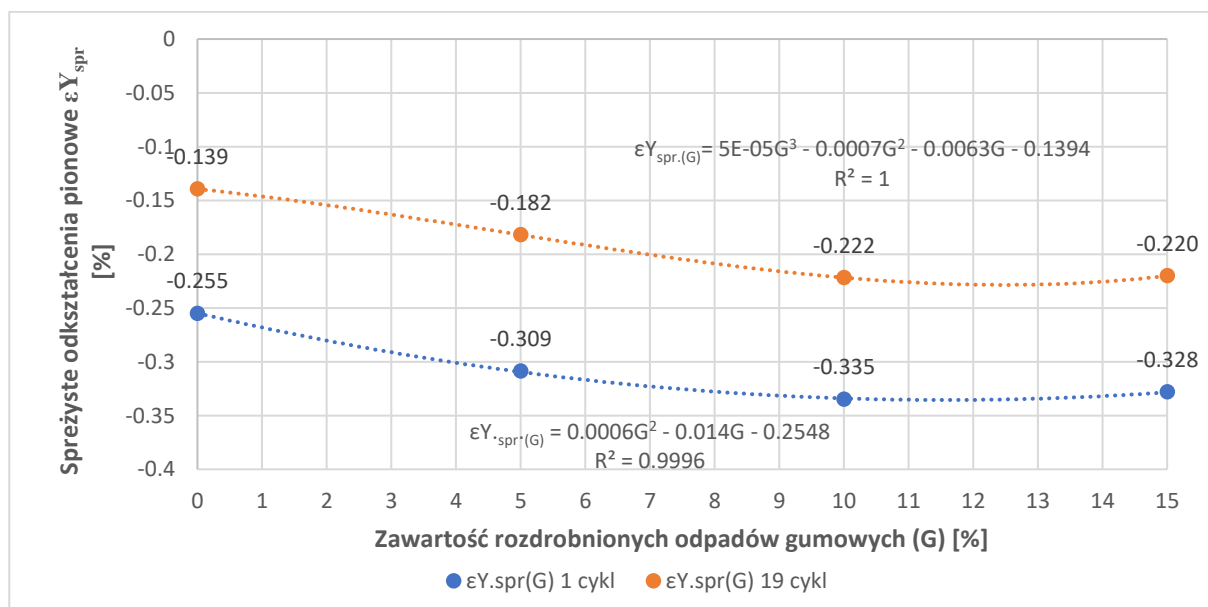
$$\varepsilon_{Y_{spr}} = \varepsilon_{Y_{max}} - \varepsilon_{Y_{min}} \quad (4.10)$$

Wartości odkształceń sprężystych ( $\varepsilon_{Y_{spr}}$ ), określone dla badanych mieszanek w poszczególnych cyklach obciążenia, przedstawiono na rysunku 4.63.



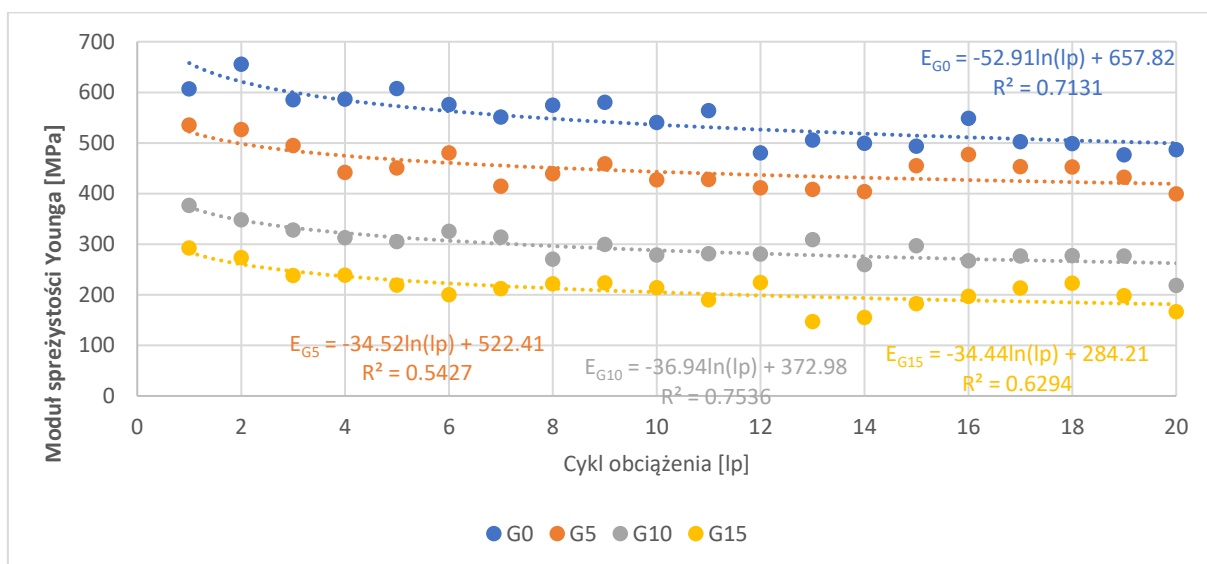
Rys. 4.63. Wartości odkształceń sprężystych dla mieszanek G0, G5, G10 oraz G15

W przypadku wartości odkształceń sprężystych można zauważyć, iż najmniejsze wartości uzyskuje mieszanka kontrolna G0. Dodatki rozdrobnionych odpadów gumowych powodują zwiększanie się wartości odkształceń sprężystych, jednak wpływ ten zmniejsza się wraz ze zwiększaniem się zawartości dodatku, ponieważ mieszanki G10 oraz G15 prezentują bardzo zbliżone wartości. W przypadku mieszanki G0 widoczna jest również większa redukcja wartości odkształceń sprężystych w pierwszych 3 cyklach obciążenia niż w przypadku pozostałych mieszanek. Wartości  $\epsilon Y_{spr}$  dla poszczególnych mieszanek zostały opisane liniami trendu pod postacią funkcji logarymicznych o wykładniku naturalnym. Na podstawie tych funkcji obliczono wartości  $\epsilon Y_{spr}$  w pierwszym oraz dziewiętnastym cyklu obciążenia. Wartości te przedstawiono na rysunku 4.64.

Rys. 4.64. Wykres zależności  $\epsilon Y_{spr}$  w pierwszym oraz dziewiętnastym cyklu obciążenia od zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych

Na podstawie rysunku 4.64 można stwierdzić, iż w przypadku odkształceń sprężystych w pierwszym cyklu obciążenia najwyższe bezwzględne wartości uzyskuje się przy dodatkach rozdrobnionych odpadów gumowych około 10%. Dodatki mniejsze lub większe będą skutkowały pogorszeniem otrzymywanych parametrów. W dziewiętnastym cyklu obciążenia najwyższe wartości odkształceń sprężystych odnotowuje się między dodatkiem 10 a 15%.

Na rysunku 4.65 przedstawiono wartości modułów sprężystości Younga. Obliczeń dokonano według wzoru 4.5.



Rys. 4.65. Wartości modułów sztywności Younga dla mieszanek G0, G5, G10 oraz G15

Wyznaczone wartości modułów sprężystości świadczą o wpływie rosnącej zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych na zmniejszanie się sztywności badanych mieszanek. Najwyższe wartości uzyskują mieszanki G0 oraz G5, najniższe zaś mieszanki G10 oraz G15. Wartości modułów sprężystości zostały opisane funkcjami pod postacią logarytmów naturalnych. Na podstawie tych funkcji obliczono wartości modułów sprężystości dla pierwszego oraz dziewiętnastego cyklu obciążenia. Wartości te przedstawiono w tabelicy 4.11.

Tablica 4.11. Wartości modułów sprężystości mieszanek w pierwszym oraz dziewiętnastym cyklu obciążenia

Mieszanka	Moduł sprężystości w pierwszym cyklu badania [MPa]	Moduł sprężystości w 19-tym cyklu badania [MPa]
G0	657.8	499.3
G5	522.4	419.0
G10	373.0	262.3
G15	284.2	181

Najniższą procentową redukcję sztywności uzyskano dla mieszanki G5 (19,8%), drugi w kolejności wynik uzyskano dla mieszanki G0 (24,1%). Największe procentowe ubytki modułu sztywności odnotowano dla mieszanek G10 oraz G15 (odpowiednio 29,7 oraz 36,3%).

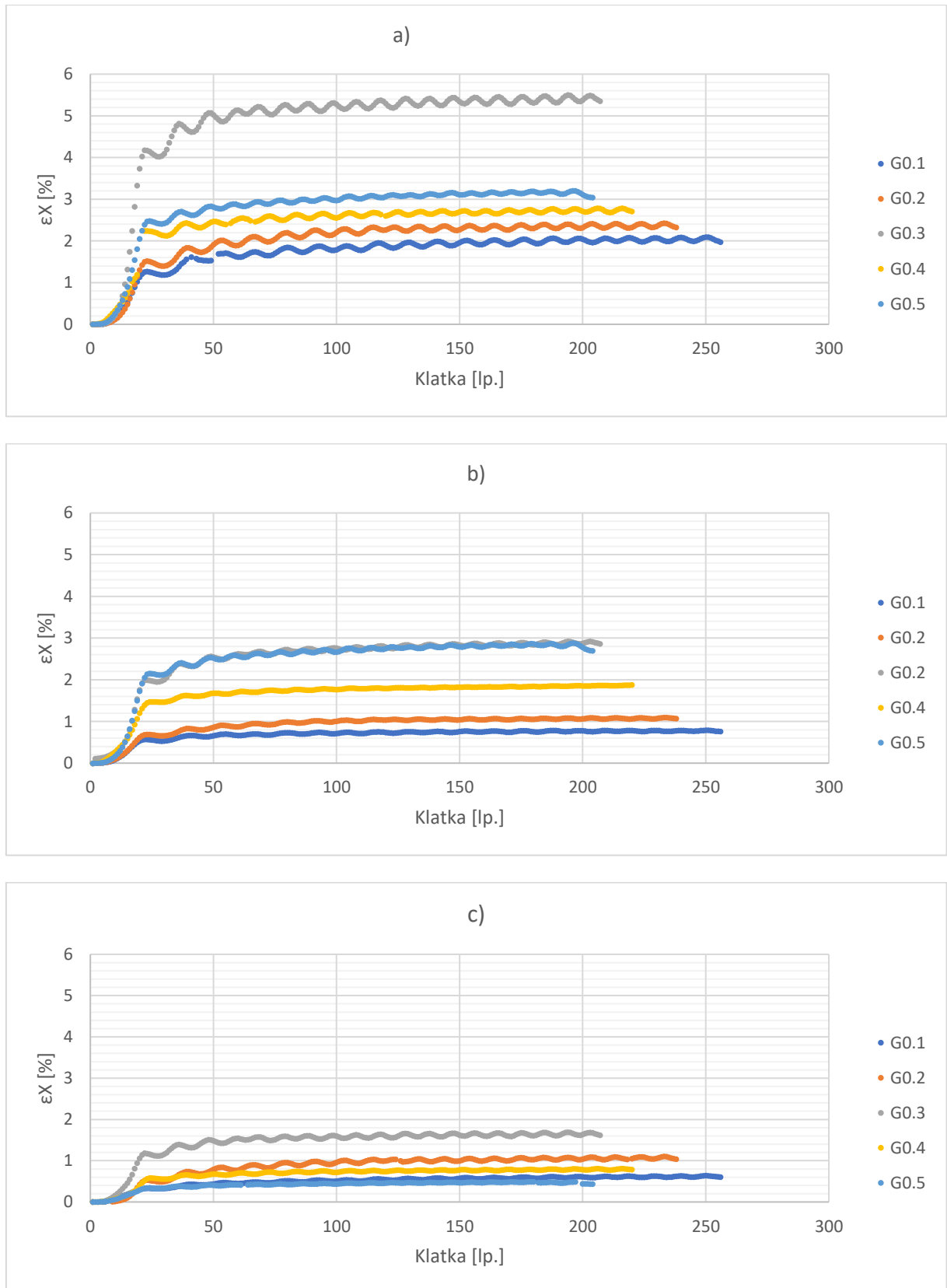
#### 4.2.8 Analiza wartości odkształceń poprzecznych

Na rysunkach 4.66÷4.69 przedstawiono wyniki pomiarów odkształceń poprzecznych w środku wysokości próbki, w jej górnej oraz dolnej części.

W tabelicy 4.12 przedstawiono uśrednione wartości odkształceń poprzecznych pomierzone na różnych wysokościach próbek, stosunki odkształceń poprzecznych odczytanych w środkowej części próbki do wartości odkształceń poprzecznych pomierzonych w jej górnej oraz dolnej części próbki oraz odchylenia standardowe.

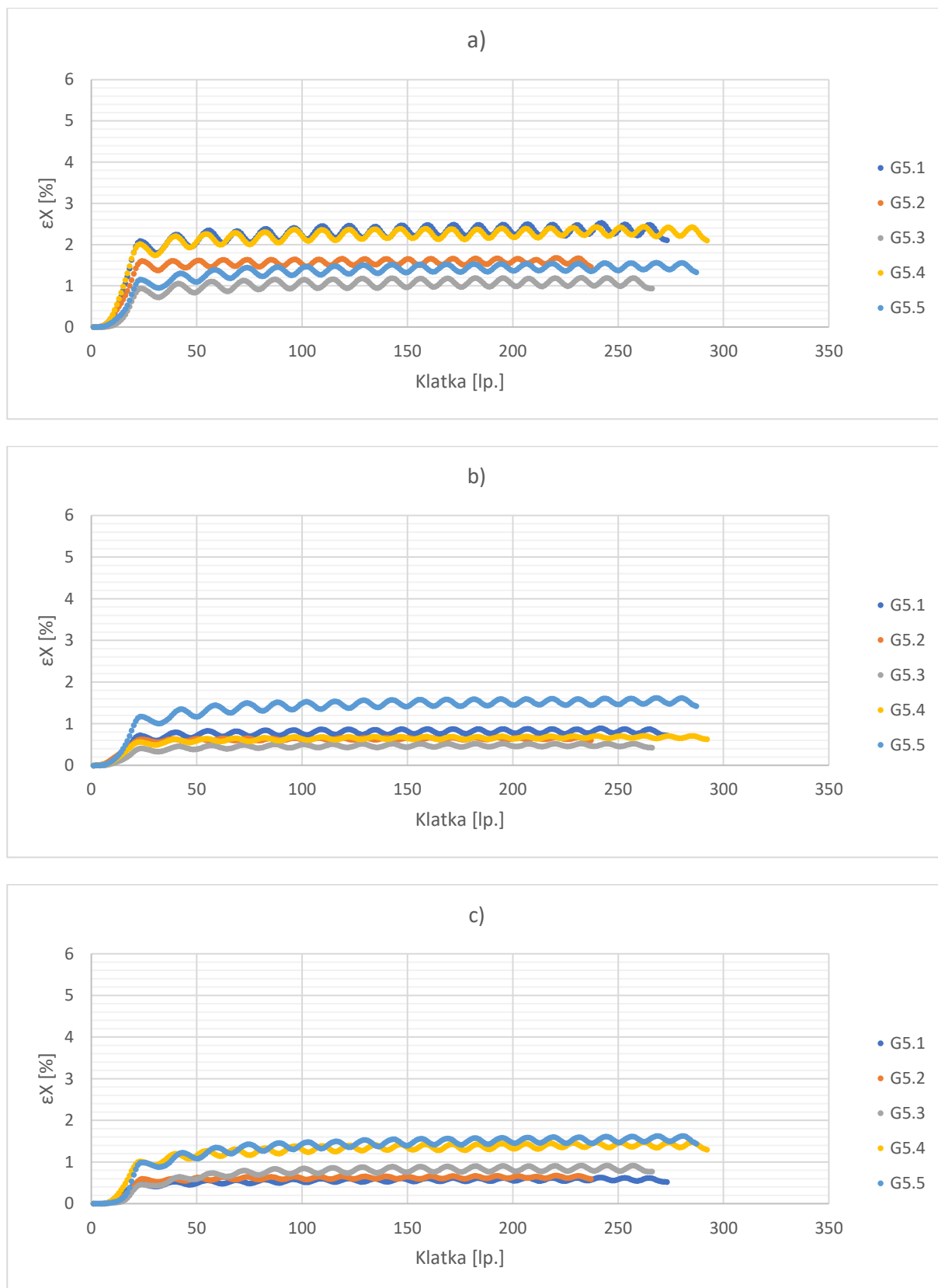
Tablica 4.12. Uśrednione wartości pomiarów odkształceń poprzecznych

Odształcenia poprzeczne		Próbki G0					Próbki G5					Próbki G10					Próbki G15				
		G0.1	G0.2	G0.3	G0.4	G0.5	G5.1	G5.2	G5.3	G5.4	G5.5	G10.1	G10.2	G10.3	G10.4	G10.5	G15.1	G15.2	G15.3	G15.4	G15.5
Tensometr środkowy	Wartości [%]	1.731	2.018	4.746	2.405	2.740	2.153	1.471	0.976	2.116	1.301	0.835	1.010	1.513	1.539	1.307	0.302	0.243	0.755	0.929	0.671
	Średnia [%]	2.728					1.604					1.241					0.580				
	Odchylenie standardowe	1.323					0.609					0.399					0.302				
Tensometr górny	Wartości [%]	0.686	0.869	2.480	1.640	2.449	0.750	0.598	0.439	0.617	1.368	0.481	0.675	0.656	0.654	0.438	0.252	0.325	0.629	0.883	0.570
	Średnia [%]	1.625					0.754					0.581					0.532				
	Odchylenie standardowe	0.903					0.384					0.168					0.259				
Tensometr dolny	Wartości [%]	0.504	0.925	1.429	0.675	0.406	0.525	0.576	0.720	1.245	1.327	0.421	0.547	0.358	0.824	1.110	0.071	0.212	0.511	0.365	0.331
	Średnia [%]	0.788					0.878					0.652					0.298				
	Odchylenie standardowe	0.429					0.428					0.334					0.162				
Średnie odchylenia standardowe dla mieszanki		0.885					0.474					0.300					0.241				
Stosunek odkształceń poprzecznych w środkowej części próbki do średniej z odkształceń w górnej oraz dolnej części próbek		2.26					1.96					2.01					1.39				

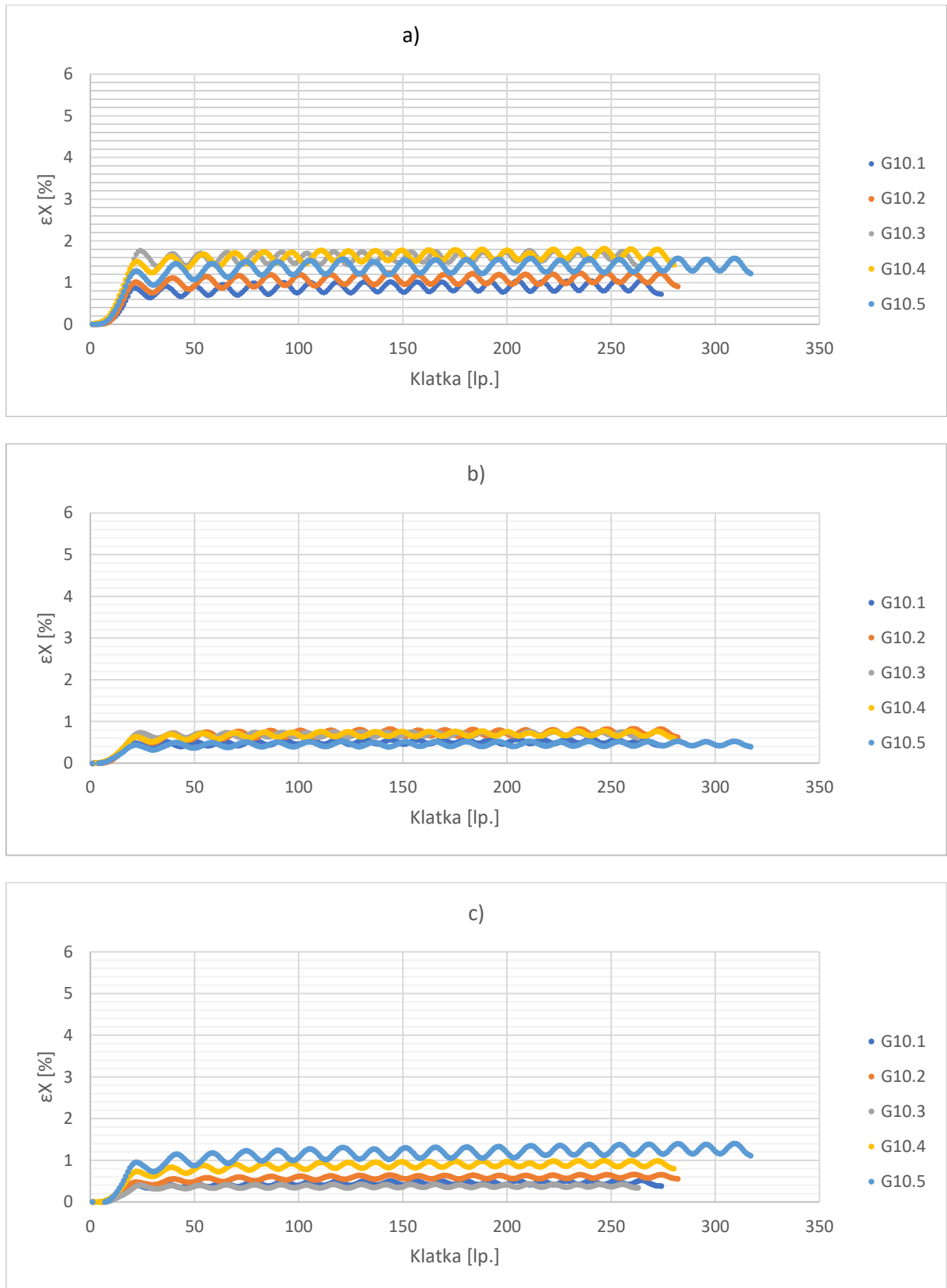


Rys. 4.66. Wartości odkształceń poprzecznych zarejestrowanych dla serii G0 na a) środku wysokości próbki; b) górnej części próbki; c) dolnej części próbki

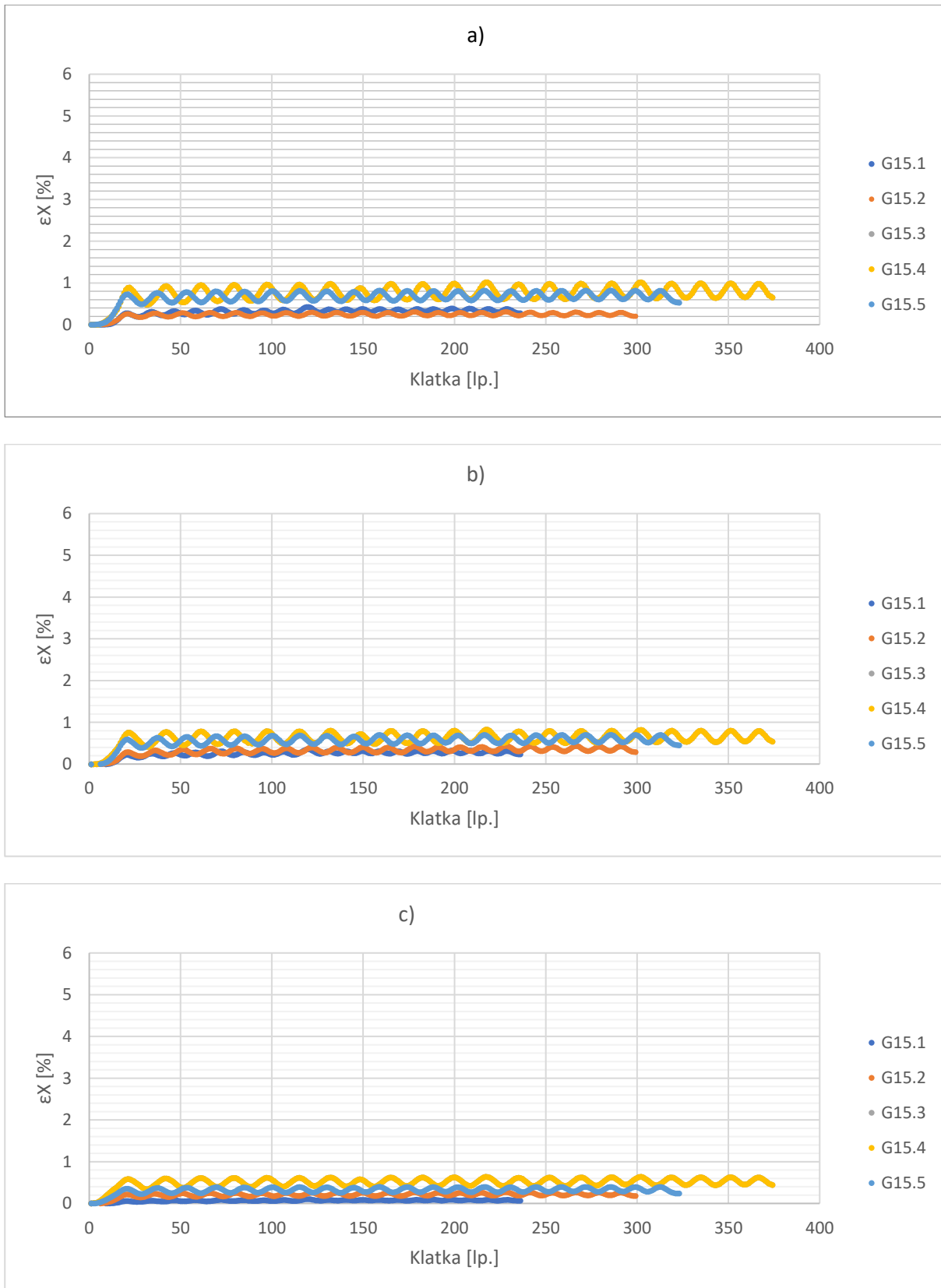




Rys. 4.67. Wartości odkształceń poprzecznych zarejestrowanych dla serii G5 na a) środku wysokości próbki; b) górnej części próbki; c) dolnej części próbki



Rys. 4.68. Wartości odkształceń poprzecznych zarejestrowanych dla serii G10 na a) środku wysokości próbki; b) górnej części próbki; c) dolnej części próbki



Rys. 4.69. Wartości odkształceń poprzecznych zarejestrowanych dla serii G15 na a) środku wysokości próbki; b) górnej części próbki; c) dolnej części próbki

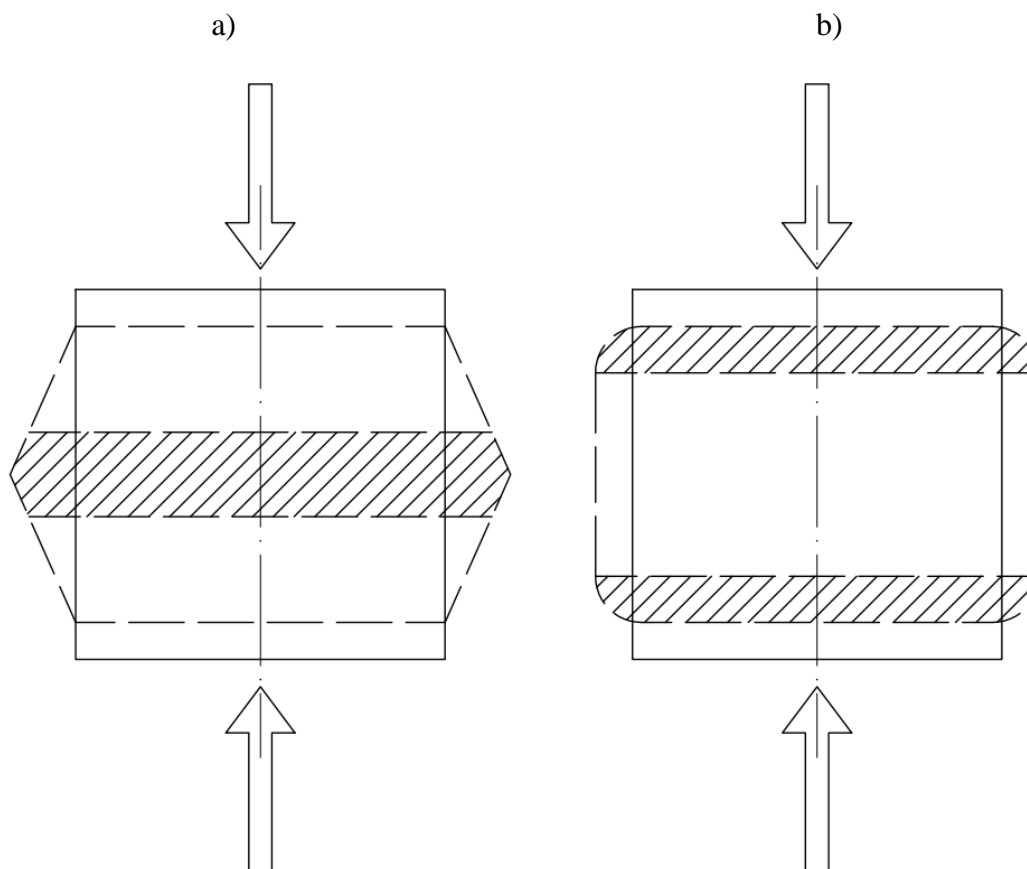
Analizując przedstawione dane, w pierwszej kolejności należy zwrócić uwagę na rozrzuty pomiędzy wynikami uzyskanymi w ramach jednej mieszanki. Wraz ze wzrostem zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych odczytywane wartości odkształceń poprzecznych prezentują coraz niższe rozrzuty, co potwierdzają również wartości odchylenia standardowego populacji.

Zawartość dodatku rozdrobnionych odpadów gumowych wpłynęła również na wartość odczytywanych odkształceń poprzecznych. Wpływ ten jest widoczny w środkowej, jak i dolnej oraz górnej części próbki. Wartości odkształceń poprzecznych spadają wraz ze wzrostem zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych. Dodatki rozdrobnionych odpadów gumowych wpłynęły również na stosunek odkształceń poprzecznych mierzonych w środkowej części wysokości próbki do odkształceń poprzecznych pomierzonych w górnej, jak i dolnej części próbki. Zgodnie z Dylągiem i in. [1997] i Leus [2013] wartości odkształceń poprzecznych mierzone w środku wysokości ściskanej próbki powinny być wyższe niż odkształcenia poprzeczne mierzone w górnej lub dolnej części próbki. Przy zastosowaniu dodatków rozdrobnionych odpadów gumowych wartości te zaczynają się wyrównywać, co obrazuje wartość stosunku odkształceń poprzecznych w środku wysokości próbki do uśrednionych wartości odczytanych z tensometrów dolnego i górnego. Wartość tego stosunku zbliża się do wartości 1,0 wraz ze wzrostem zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych. Wskazuje to na wyrównanie poprzecznej reakcji mieszanki na przykładane obciążenia.

Na rysunkach 4.66÷4.69 można również zauważyć, iż wraz ze wzrostem zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych zwiększają się amplitudy odkształceń, pomiędzy obciążeniem a odciążeniem próbki. Próbki kontrolne prezentują najniższe wartości amplitud odkształceń poprzecznych, niezależnie od miejsca w którym są mierzone. Amplitudy te są najwyraźniej widoczne dla próbek pochodzących z mieszanek G5 oraz G10. W przypadku próbek G15 amplitudy odkształceń są mniej wyraźne, co świadczy o negatywnym wpływie dodatków wyższych niż 10% na pracę mieszanki w zakresie sprężystym.

Jak wspomniano wcześniej, w części rozdziału dotyczącej analizy maksymalnych odkształceń pionowych, wartości odkształceń pionowych powinny być zbliżone do odkształceń wynikających z przeliczenia globalnych deformacji próbek. W związku z tym maksymalne odkształcenia pionowe powinny wynosić w przybliżeniu 2%. Jednak wraz ze wzrostem zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych wielkość odczytywanych wartości maleje, dotyczy to maksymalnych, jak i plastycznych odkształceń pionowych. Wynika to z wpływu dodatków rozdrobnionych odpadów gumowych na postać odkształcenia badanej próbki przy jednoosiowym ściskaniu. Próbki kontrolne G0 uzyskały odkształcenia pionowe o wartościach najbliższych odkształceniom teoretycznym oraz w efekcie odkształceniem przy ściskaniu określonym dla materiałów sztywnych charakteryzujących się kruchym pęknięciem. W przypadku takich materiałów, próbki odkształcają się w sposób przedstawiony na rysunku 4.70a. Naprężenia powstałe w próbce w wyniku jednoosiowego ściskania są przekazywane po długości próbki zgodnie z kierunkiem obciążenia. Naprężenia te następnie kumulują się w środku wysokości próbki (zakresowany obszar), gdzie dochodzi do zniszczenia badanej próbki. W efekcie, przy ściskaniu jednoosiowym, próbki sztywne charakteryzują się

odkształceniami poprzecznymi znacznie wyższymi w środku wysokości próbki, niż w jej górnej oraz dolnej części.



Rys. 4.70. Postać odkształcenia: a) próbki sztywnej; b) próbki o wysokiej zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych

Dla próbek zawierających w swoim składzie rozdrobnione odpady gumowe, im większa była zawartość dodatku tym ich postać odkształcenia była bliższa tej zaprezentowanej na rysunku 4.70b. W materiałach o niższej sztywności, w trakcie jednoosiowego ściskania, w pierwszej kolejności na obciążenie reagują strefy kontaktu z przystawkami ściskającymi (zakreskowane obszary) i dopiero po wyczerpaniu ich odkształcalności oddziaływania te są przekazywane dalej. W związku z tym w takich materiałach wartości odkształceń poprzecznych osiągają wyrównane wartości przy pomiarach realizowanych w środkowej oraz dolnej i górnej części próbki (poza strefą kontaktową).

Próbki G5, G10 oraz G15, prezentowały coraz niższe wielkości pomierzonych wartości odkształceń pionowych. Coraz większa część tych odkształceń była realizowana w strefach kontaktu próbki z przystawkami ściskającymi, gdzie ze względu na ograniczenia technologiczne oraz umieszczenie tensometrów krótszych od wysokości próbki, aparatura pomiarowa nie mogła ich pomierzyć. Potwierdza to również fakt, iż pomimo odczytywania coraz niższych wartości odkształceń pionowych, zakres odkształceń sprężystych zwiększał się wraz ze wzrostem dodatku rozdrobnionych odpadów gumowych, a wartości odkształceń poprzecznych, mierzonych na różnych wysokościach próbki, dążyły do wyrównania się.

Dowody potwierdzające to zjawisko można zauważyć również na mapach odkształceń pionowych badanych próbek oraz odpowiadającym im histogramom rozkładu odkształceń zaprezentowanych na rysunkach 4.71 oraz 4.72.

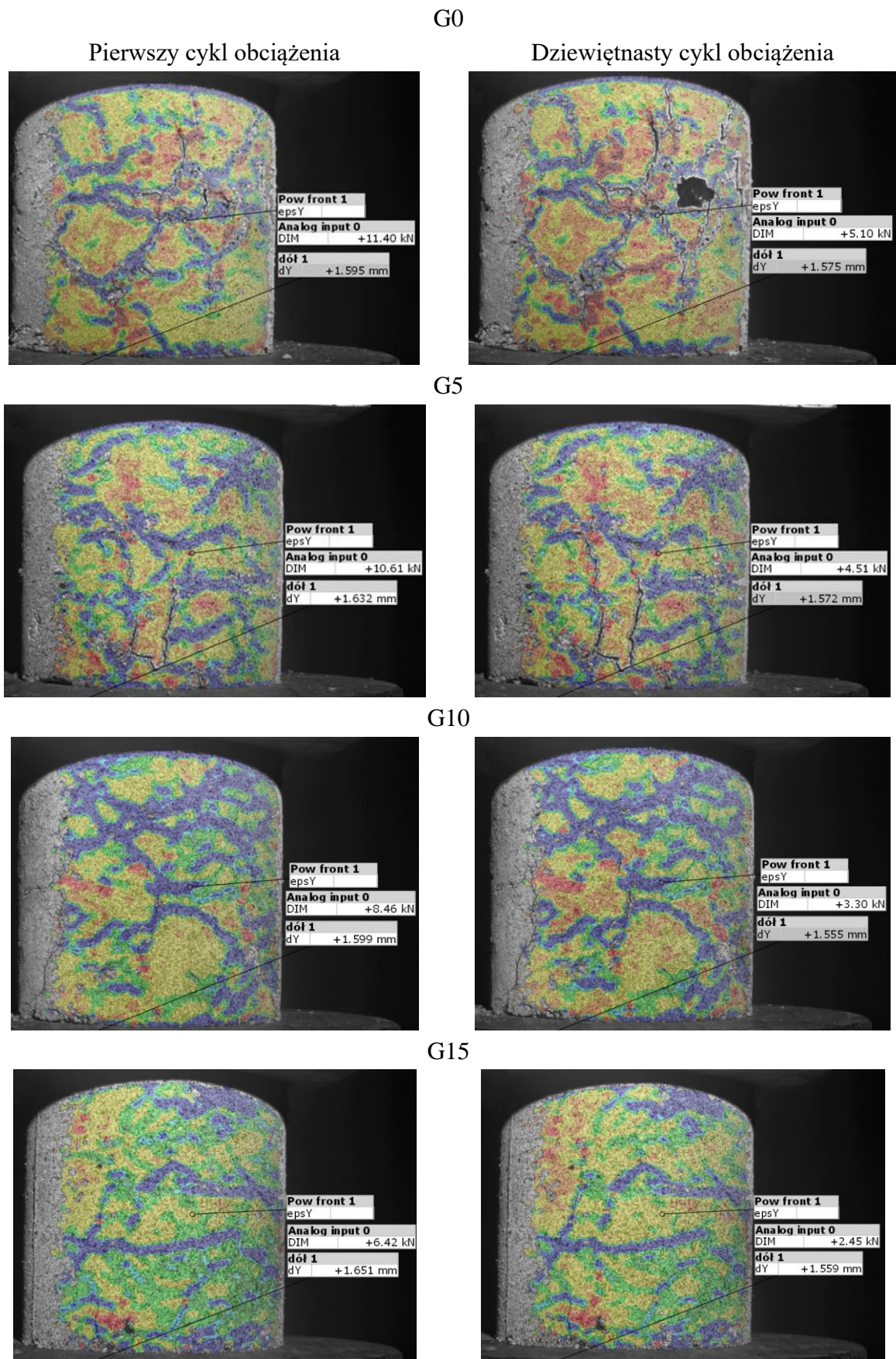
W przypadku próbek kontrolnych G0 pola o dużych wartościach odkształceń pionowych przyjmują kształt linii losowo zorientowanych w kierunku pionowym oraz poziomym. Linie te przecinają pola o odkształceniach bliskich zeru oraz zdają się kumulować w okolicy środka wysokości próbki. Warto również zwrócić uwagę na fakt, iż próbki G0 w dziewiętnastym cyklu obciążenia prezentują wyraźnie zarysowania a nawet wykruszenia badanej powierzchni próbki.

Wraz ze wzrostem zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych (mieszanki G5 oraz G10), pola o dużych wartościach odkształceń pionowych zaczynają coraz częściej przyjmować orientację poziomą oraz kumulować się bliżej górnej części próbki, która styka się z nieruchomą przystawką maszyny wytrzymałościowej. W przeciwieństwie do próbek kontrolnych G0, widoczne jest, iż obszary pomiędzy polami o najwyższych odkształceniach pionowych są również odkształcone. Odkształcenia pojawiające się poza głównymi „zarysowaniami” próbek, świadczą o większej równomierności przekazywania oddziaływań od obciążenia w głąb badanych próbek.

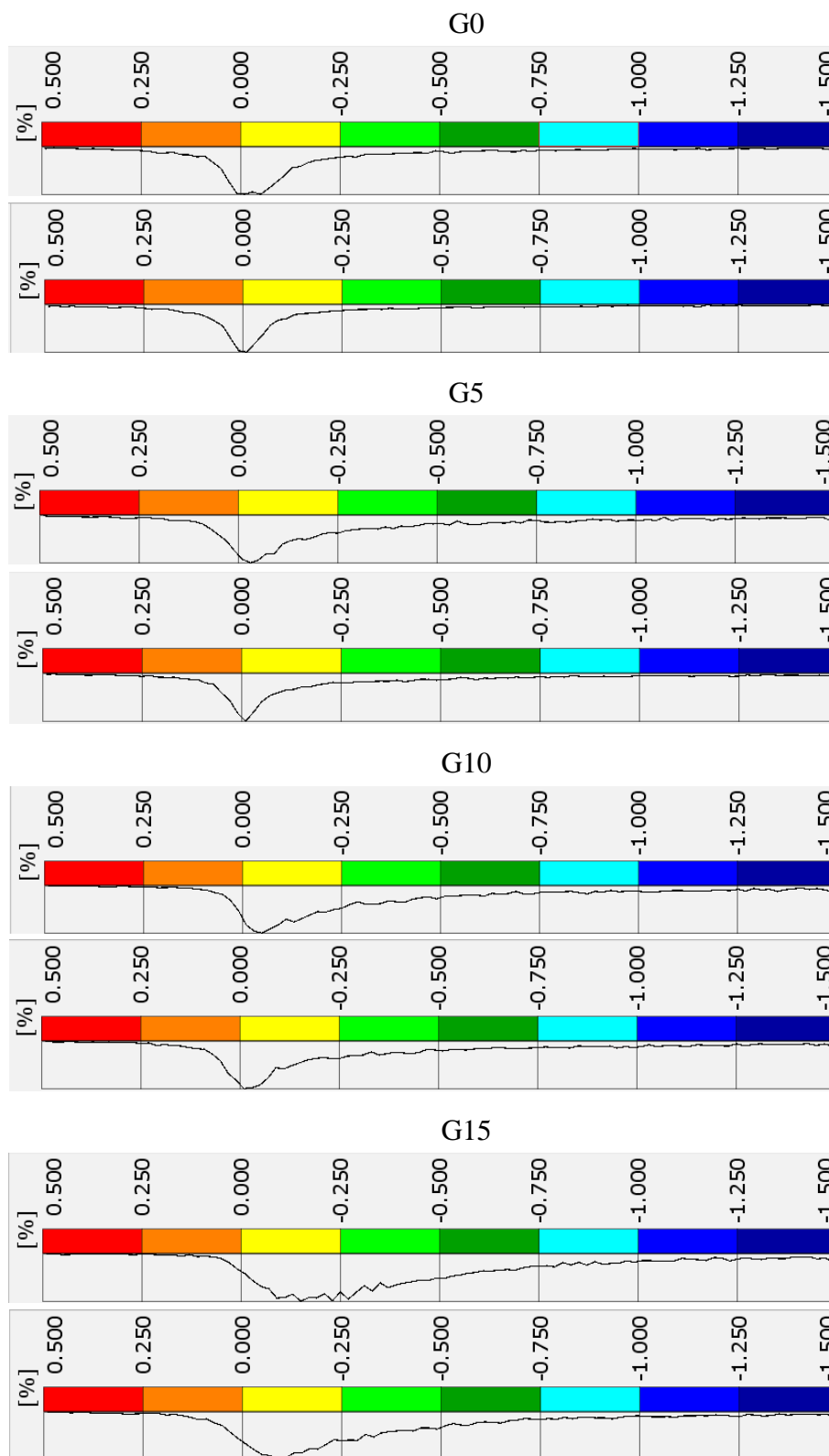
W przypadku próbek G15 obszary o dużych wartościach odkształceń pionowych są zorientowane głównie w kierunku poziomym, ich nagromadzenie jest obserwowane głównie przy górnej oraz dolnej krawędzi modelu trójwymiarowego oraz wąskiej strefie zlokalizowanej w środku wysokości próbki. Dodatkowo w tym przypadku praktycznie nie występują powierzchnie niewykazujące odkształceń pionowych i są one zastąpione strefami o odkształceniach mieszczących się w zakresie między 0,25 a 0,5%.

Wpływ rozdrobnionych odpadów gumowych na zwiększenie równomierności rozkładu odkształceń pionowych na badanej powierzchni próbki jest również bardzo dobrze widoczny na przedstawionych histogramach. Wraz ze wzrostem zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych zwiększa się udział pól o odkształceniach większych od 0%, natomiast w przypadku próbek kontrolnych G0, właśnie największy udział mają pola o zerowych odkształceniach.





Rys. 4.71. Mapy odkształceń pionowych przedstawione dla wybranych próbek w pierwszym oraz dziewiętnastym cyklu obciążenia przy maksymalnym wymuszeniu deformacji



Rys. 4.72. Histogramy rozkładu odkształceń pionowych w pierwszym oraz dziewiętnastym cyklu obciążenia przy maksymalnym wymuszeniu deformacji dla wybranych próbek przedstawionych na Rys. 4.71

#### 4.2.9 Podsumowanie pomiarów odkształceń w cyklicznych obciążeniach

Na podstawie przedstawionych wyników badań odkształceń próbek pod wpływem cyklicznego obciążenia można stwierdzić, iż rozdrobnione odpady gumowe w mieszance ŁGPC powodują:

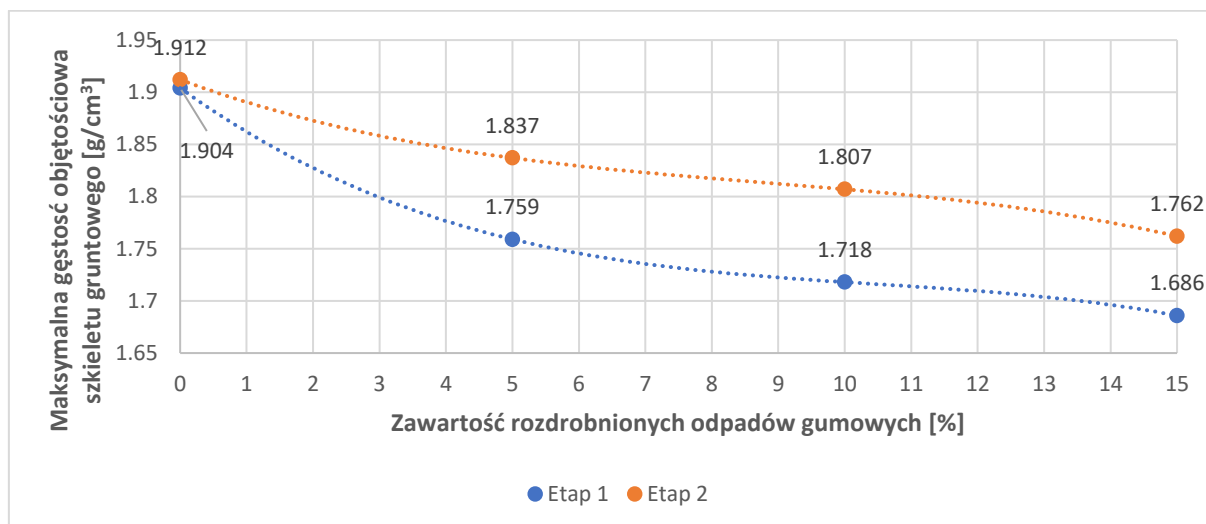
- Poprawę zbieżności wyników pomiarów odkształceń pionowych oraz poprzecznych. Im wyższa zawartość rozdrobnionych odpadów gumowych tym uzyskuje się mniejszą wartość odchylenia standardowego populacji
- Zmniejszenie się wartości odczytywanych maksymalnych odkształceń pionowych oraz plastycznych odkształceń pionowych. Wpływ ten nie jest równomierny, dodatki 5 oraz 10% prezentują podobną efektywność, zaś przy dodatku 15% odnotowujemy kolejną redukcję wartości mierzonych odkształceń
- Zmniejszenie się przyrostu wartości pionowych odkształceń plastycznych między pierwszym a dziewiętnastym cyklem obciążenia
- Powiększanie się zakresu odkształceń sprężystych w jakim mieszanka pracuje w ramach badania cyklicznego obciążenia. Wpływ ten nie jest równomierny, ponieważ wartości pionowych odkształceń sprężystych rosną przy dodatku rozdrobnionych odpadów gumowych równym 5 oraz 10%. Przy dodatku 15% odnotowujemy wartości porównywalne jak dla dodatku 10%
- Zmniejszenie się wartości modułów sprężystości oraz jego procentowego ubytku. Najmniejszy procentową redukcję wartości modułu sprężystości odnotowano dla próbek G5. Mieszanki G10 oraz G15 wykazują wyższy ubytek niż mieszanka kontrolna G0
- Zmniejszanie się wartości odczytywanych odkształceń poprzecznych mierzonych w środkowej oraz górnej i dolnej części próbki
- Powiększenie zakresu poprzecznych odkształceń sprężystych
- Wyrównywanie się wartości odkształceń poprzecznych mierzonych w środku wysokości próbki oraz w jej dolnej i górnej części

## 5 Podsumowanie

### 5.1 Zestawienie wyników badań

#### 5.1.1 Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego oraz wilgotność optymalna

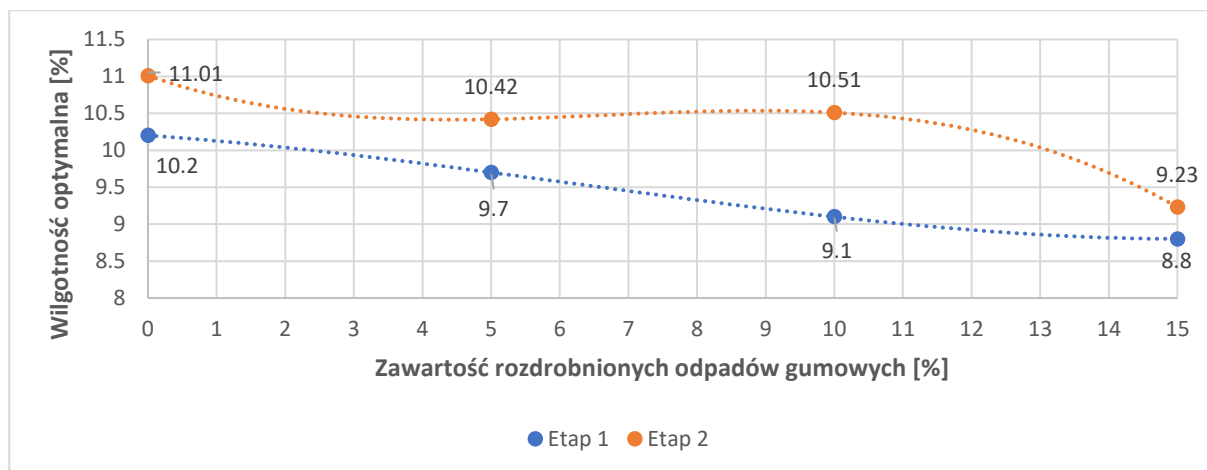
Na rysunku 5.1 przedstawiono zestawienie wyników badania maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego (według II metody Proctora) uzyskane dla łupków przywęglowych nieprzepalonych wykorzystanych w badaniach zawartych w etapie 1 oraz 2.



Rys. 5.1. Wykres zależności maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego od procentowej zawartości dodatku rozdrobnionych odpadów gumowych dla mieszanek badanych w etapie 1 oraz 2

Jak wynika z rysunku 5.1 dla badanych wariantów łupka przywęglowego nieprzepalonego uzyskano podobną charakterystykę wpływu zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych na wielkość maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego. W obu przypadkach dodatki te powodują zmniejszenie się maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego, jednak ze względu na różnice w uziarnieniu badanych łupków, w przypadku łupka przywęglowego nieprzepalonego nr 1 uzyskuje się największą redukcję przy zastosowaniu dodatku 5% rozdrobnionych odpadów gumowych.

Rysunek 5.2 przedstawia wykres zależności wilgotności optymalnej od zawartości dodatku rozdrobnionych odpadów gumowych. Otrzymano większe rozrzuty wyników niż dla zależności gęstości objętościowej szkieletu gruntowego.

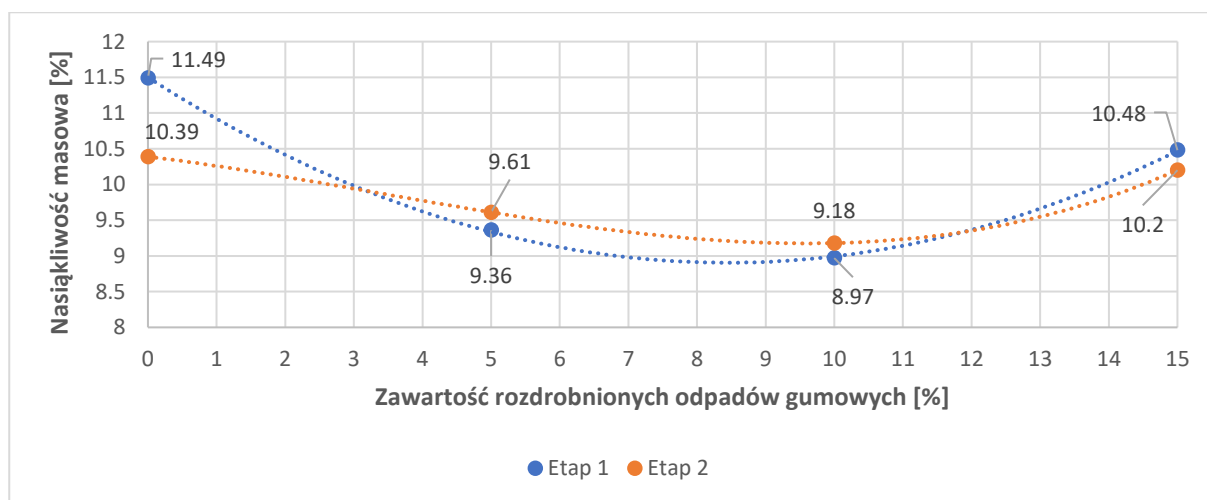


Rys. 5.2. Wykres zależności wilgotności optymalnej od procentowej zawartości dodatku rozdrobnionych odpadów gumowych dla mieszanek badanych w etapie 1 oraz 2

W etapie 1 zawartość dodatków rozdrobnionych odpadów gumowych wykazywała wpływ na wartość wilgotności optymalnej zbliżony do zależności liniowej. Wartość wilgotności optymalnej spadała o około 0,5% na każde 5% dodatku rozdrobnionych odpadów gumowych. W przypadku badania wykonanego dla łupka przywęglowego nieprzepsalonego nr 2, widoczne jest iż największe zmiany wilgotności optymalnej powodują dodatki 5 oraz 15%. Dodatek 10% nie wykazuje znaczącego wpływu.

### 5.1.2 Nasiąkliwość masowa oraz podciąganie kapilarne

Na rysunku 5.3 przedstawiono wyniki badania nasiąkliwości masowej badanych mieszanek uzyskane w etapie 1 oraz etapie 2.

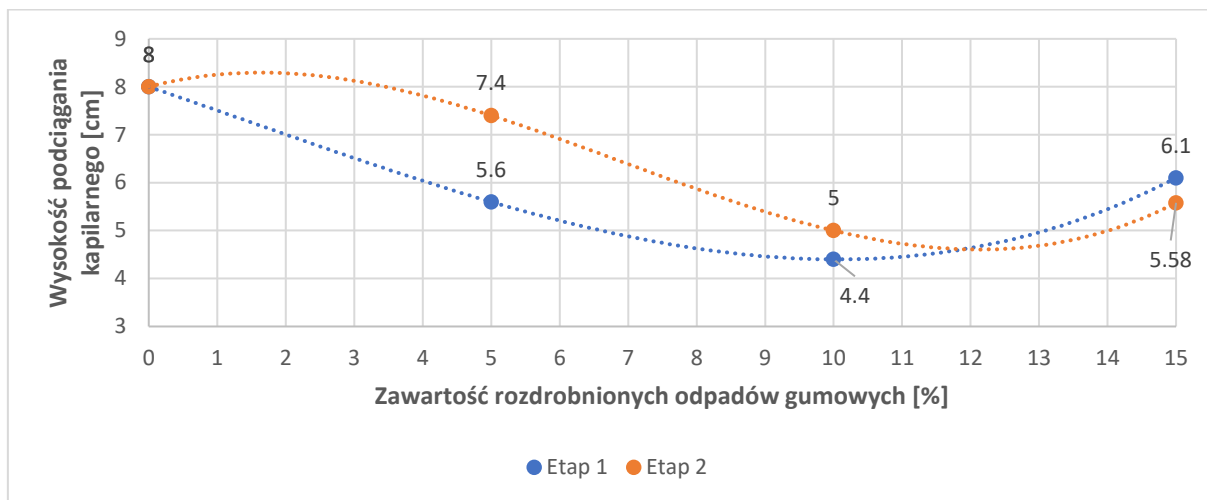


Rys. 5.3. Wykres zależności nasiąkliwości masowej od procentowej zawartości dodatku rozdrobnionych odpadów gumowych dla mieszanek badanych w etapie 1 oraz 2

Dla badanych łupków przywęglowych nieprzepsalonych wykorzystanych w etapie 1 oraz 2, widoczny jest analogiczny wpływ zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych na wartość nasiąkliwości masowej. W obu badanych przypadkach dodatki 5 oraz 10% powodowały zmniejszanie się nasiąkliwości badanych próbek. Najniższe wartości otrzymano



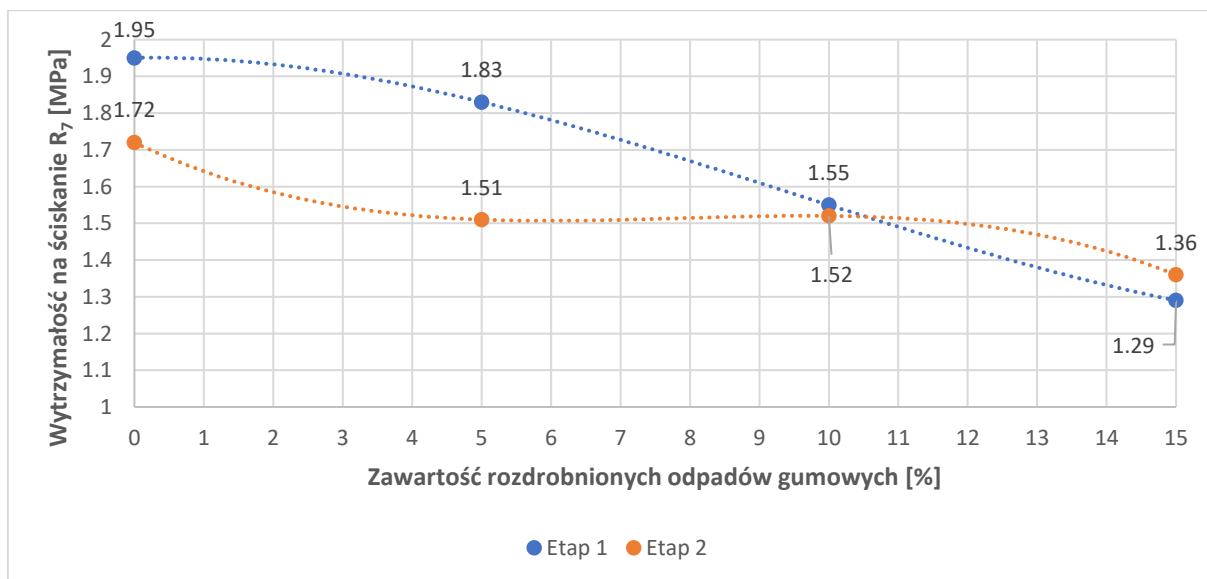
dla dodatku 10%. Dodatek rozdrobnionych odpadów gumowych równy 15% powodował zwiększenie się nasiąkliwości do wartości uzyskiwanych dla próbek kontrolnych (G0).



Rys. 5.4. Wykres zależności wysokości podciągania kapilarnego od procentowej zawartości dodatku rozdrobnionych odpadów gumowych dla mieszanek badanych w etapie 1 oraz 2

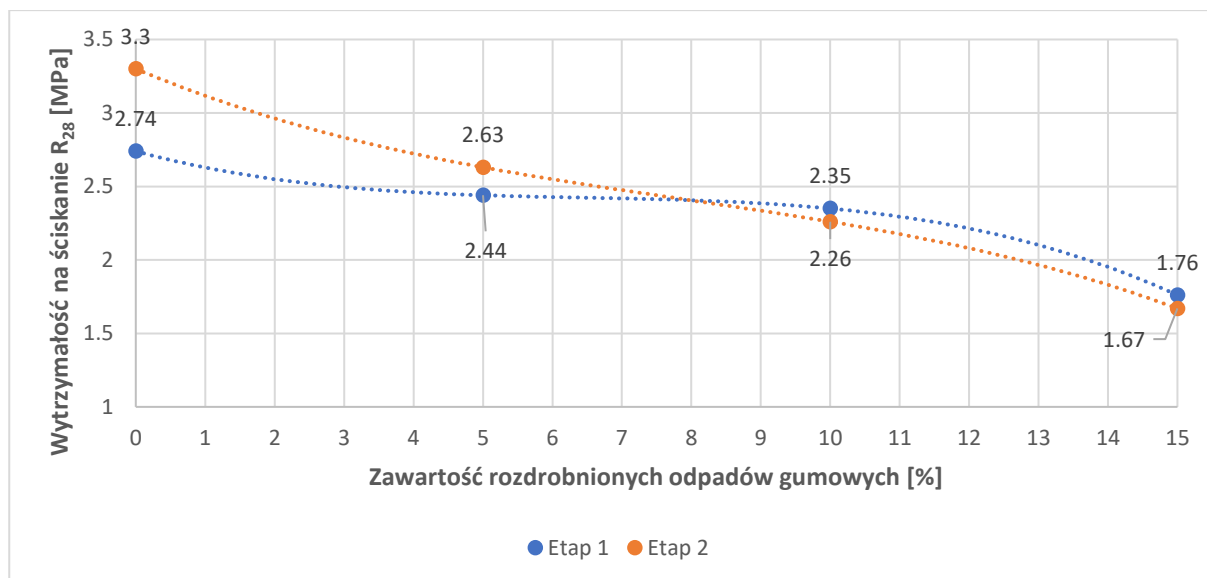
Na rysunku 5.4 przedstawiono porównanie wyników badania wysokości podciągania kapilarnego próbek wykonanych z łupka przywęglowego nr 1 oraz 2. W obu przypadkach widoczny jest porównywalny wpływ zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych na wysokość podciągania kapilarnego. Oznacza to, że zastosowanie dodatków spowodowało zmniejszenie wysokości podciągania wody przez próbki. Najniższe wartości podciągania uzyskuje się dla dodatku równego 10%. Korzystniejszy wpływ dodatku odnotowano dla łupka przywęglowego nieprzepalzonego nr 1, dla którego otrzymano najniższe wartości podciągania kapilarnego wody.

### 5.1.3 Wytrzymałość na ściskanie po 7 oraz 28 dniach pielęgnacji próbek



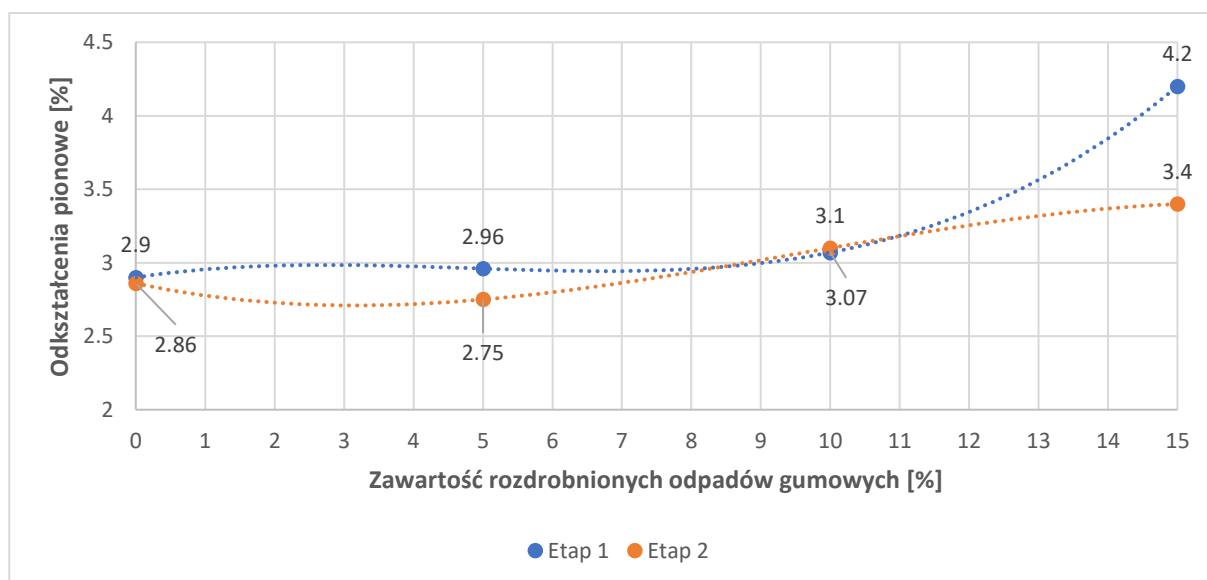
Rys. 5.5. Wykres zależności wytrzymałości na ściskanie, po 7 dniach pielęgnacji próbek, od procentowej zawartości dodatku rozdrobnionych odpadów gumowych dla mieszanek badanych w etapie 1 oraz 2



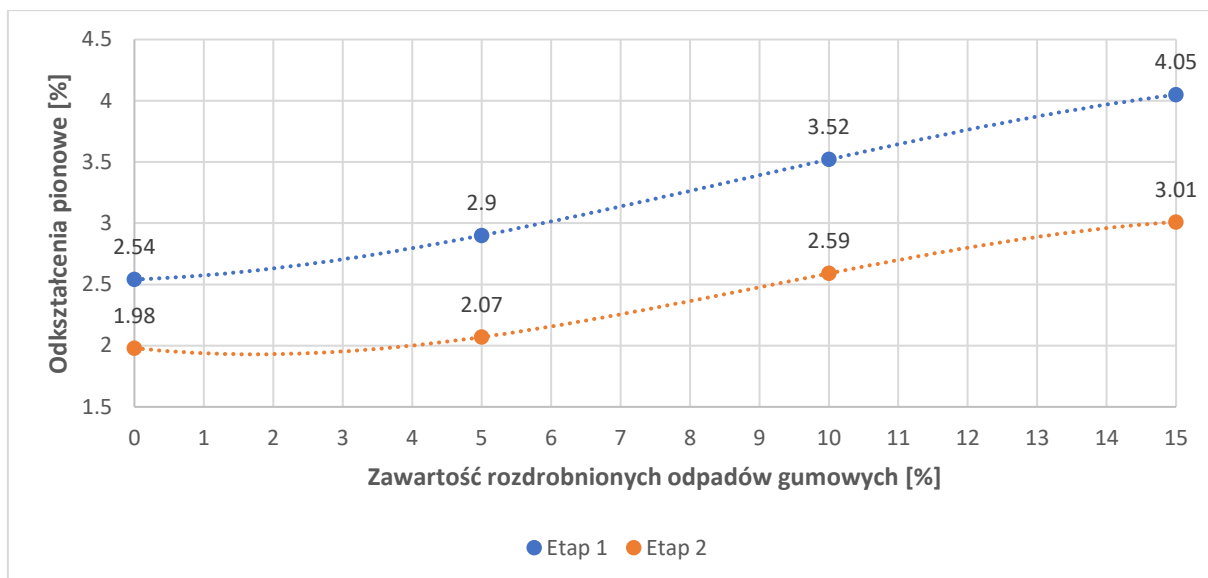


Rys. 5.6. Wykres zależności wytrzymałości na ściskanie, po 28 dniach pielęgnacji próbek, od procentowej zawartości dodatku rozdrobnionych odpadów gumowych dla mieszanek badanych w etapie 1 oraz 2

Na rysunkach 5.5 oraz 5.6 przedstawiono zależność wytrzymałości na ściskanie, po 7 oraz 28 dniach pielęgnacji próbek, od zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych, uzyskaną w etapie 1 oraz 2. W obu prezentowanych przypadkach dodatki rozdrobnionych odpadów gumowych powodują zmniejszanie się wartości wytrzymałości na ściskanie, szczególnie w przypadku pomiaru po 28 dniach pielęgnacji próbek. W badaniu wczesnej wytrzymałości, jedynie dodatek 5% prezentuje duże różnice pomiędzy wynikami uzyskanymi w etapie 1 oraz 2.



Rys. 5.7. Wykres zależności odkształceń podłużnych, po 7 dniach pielęgnacji próbek, od procentowej zawartości dodatku rozdrobnionych odpadów gumowych dla mieszanek badanych w etapie 1 oraz 2



Rys. 5.8. Wykres zależności odkształceń podłużnych, po 28 dniach pielęgnacji próbek, od procentowej zawartości dodatku rozdrobnionych odpadów gumowych dla mieszanek badanych w etapie 1 oraz 2

Pomiary maksymalnych odkształceń przy ściskaniu (Rys. 5.7 oraz 5.8) potwierdzają zbieżność wyników pomiędzy prezentowanymi etapami, podobnie jak w przypadku pomiaru wytrzymałości. W badaniu po 7-dniowym okresie pielęgnacji w obu etapach uzyskuje się bardzo zbliżone wartości odkształceń. W przypadku badania po 28 dniach możemy zaobserwować około 1% różnicę w uzyskanych wartościach odkształceń, pomiędzy etapami 1 oraz 2. Jednak sam trend zmian jest bardzo zbliżony.

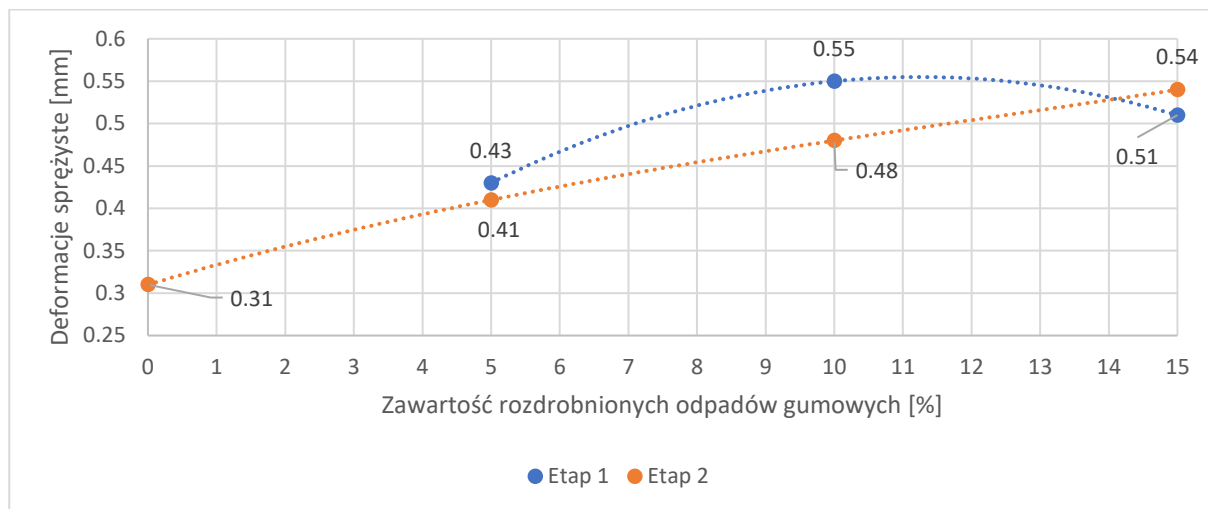
Tablica 5.1. Długości przedziałów odkształceń w których próbki utrzymują naprężenia wyższe niż 90% maksymalnych wartości

Mieszanka	Etap 1		Etap 2	
	R <sub>7</sub>	R <sub>28</sub>	R <sub>7</sub>	R <sub>28</sub>
G0	–	0,80%	1,10%	0,80%
G5	1,50%	1,10%	2,30%	0,85%
G10	1,60%	1,60%	1,70%	1,20%
G15	2,60%	2,10%	2,45%	1,40%

W tablicy 5.1 przedstawiono długości przedziałów odkształceń, w których próbki utrzymywały w czasie badania wytrzymałościowego po 7 oraz 28 dniach pielęgnacji próbek naprężenia wyższe lub równe 90% wartości maksymalnej. W przypadku obu etapów oraz obu wariantów badania wytrzymałościowego dodatki rozdrobnionych odpadów gumowych powodują zwiększanie się tego przedziału. W badaniach etapu 2, po 28 dniach pielęgnacji próbek, uzyskuje się mniejsze długości przedziału niż w etapie 1, zaś w przypadku badania po 7 dniach uzyskane wartości w obu etapach są bardzo zbliżone.

### 5.1.4 Obciążenie cykliczne

Na rysunku 5.9. przedstawiono zależność wartości deformacji sprężystych uzyskanych w ostatnim analizowanym cyklu obciążenia badania cyklicznego od zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych.



Rys. 5.9. Wykres zależności deformacji sprężystych w ostatnim cyklu obciążenia, po 28 dniach pielęgnacji próbek, od procentowej zawartości dodatku rozdrobnionych odpadów gumowych dla mieszanek badanych w etapie 1 oraz 2

Można zauważyć, że w przypadku badania wykonanego w ramach etapu 1 najwyższe wartości deformacji sprężystych uzyskuje się dla dodatku rozdrobnionych odpadów gumowych równego 10%. Dla pozostałych dodatków otrzymuje się mniejsze wartości tego deformacji sprężystych. W etapie 2 zależność deformacji sprężystych od procentowej zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych ma charakter liniowy.

Tablica 5.2. Wartości modułów sprężystości Younga mieszanek badanych w etapie 1 oraz 2

Mieszanka		Moduł sprężystości w 1 cyklu obciążenia [MPa]	Moduł sprężystości w ostatnim cyklu obciążenia [MPa]	Różnica pomiędzy wartościami modułów sprężystości [MPa]	Procentowy ubytek wartości modułu sprężystości [%]
Etap 1	G5	318,1	223,6	94,5	29,71
	G10	243,2	165,2	78,0	32,07
	G15	140,2	93,4	46,7	33,34
Etap 2	G0	256,8	179,3	77,5	30,18
	G5	206,3	148,4	57,9	28,07
	G10	145,6	96,6	49	33,64
	G15	101,6	58,6	43	42,32

W tabelicy 5.2 przedstawiono porównanie wartości modułów sprężystości mieszanek badanych w etapie 1 oraz 2. Otrzymane wartości pokazują, że w przypadku mieszanek badanych w etapie 1 uzyskano wyższe wartości modułu sprężystości. Jednak procentowe ubytki wartości modułu prezentują zbliżone wartości.

### 5.1.5 Możliwe zastosowania mieszanek ŁGPC w budownictwie drogowym

W tabelicy 5.3 przedstawiono minimalne wymagania wytrzymałościowe stawiane próbkom walcowym (o stosunku wysokości do średnicy próbki równemu 1,0) po 28 dniach pielęgnacji dla klas wytrzymałościowych [WT-5, 2010].

Tablica 5.3 Klasy wytrzymałościowe mieszanek związanych spoiwem hydraulicznym wg WT-5 [2010]

Wytrzymałość na ściskanie próbek po 28 dniach pielęgnacji [MPa]	Klasa wytrzymałości
Brak wymagań	C <sub>0</sub>
2	C <sub>1,5/2,0</sub>
4	C <sub>3/4</sub>
6	C <sub>5/6</sub>
10	C <sub>8/10</sub>
15	C <sub>12/15</sub>
20	C <sub>16/20</sub>
25	C <sub>20/25</sub>

Mieszanki G0, G5 oraz G10 wykonane dla obu etapów badań, uzyskały wartości wytrzymałości na ściskanie spełniające wymagania klasy wytrzymałościowej C<sub>1,5/2,0</sub>. Mieszanki G15 ze względu na zbyt niską wartość wytrzymałości na ściskanie nie spełniają wymagań i zostały zaklasyfikowane jako C<sub>0</sub> (por. z Rys. 5.6).

W tabelicy 5.4 przedstawiono wymagania, dotyczące klasy wytrzymałościowej, stawiane mieszankom związanym spoiwem hydraulicznym przy zastosowaniu ich do warstw konstrukcji drogowej, w zależności od przewidywanego obciążenia ruchem KR [WT-5, 2010].

Tablica 5.4 Wymagane klasy wytrzymałościowe stawiane mieszankom związanym spoiwem hydraulicznym wykorzystywanym w warstwach konstrukcji nawierzchni drogowej [WT-5, 2010]

Warstwa konstrukcji nawierzchni	Wymagana klasa wytrzymałości		
	KR1–KR2	KR3–KR4	KR5–KR6
Warstwa ulepszonego podłoża	C <sub>1,5/2,0</sub>	C <sub>1,5/2,0</sub>	C <sub>1,5/2,0</sub>
Warstwa podbudowy pomocniczej	C <sub>1,5/2,0</sub>	C <sub>3/4</sub>	C <sub>5/6</sub>
Warstwa podbudowy zasadniczej	C <sub>3/4</sub>	C <sub>5/6</sub>	C <sub>8/10</sub>

Na podstawie tabeli 5.4 można stwierdzić, że mieszanki G0, G5 oraz G10, pod kątem klasy wytrzymałościowej, mogą być stosowane do wykonania warstwy ulepszonego podłoża dla kategorii ruchu KR1–KR6 oraz do warstwy podbudowy pomocniczej przy KR1–KR2. Dodatkowym atutem przemawiającym za zastosowaniem mieszanek G5, a w szczególności G10, są ich zdolności do ograniczenia wartości nasiąkliwości masowej oraz wysokości podciągania kapilarnego spowodowane dodatkami rozdrobnionych odpadów gumowych. Pozwoli to na lepszą pracę wymienionych mieszanek oraz zabezpieczenie warstw na nich ułożonych przed negatywnym działaniem wody, przy wysokim zawilgoceniu warstw konstrukcji drogowej. Klasy wytrzymałościowe mieszanek mogą zostać podniesione poprzez zwiększenie zawartości cementu, w czasie ich projektowania. W badanych mieszankach zastosowano dodatek cementu w stosunku do masy łupka przywęglowego nieprzepsalonego równy 5%. Według WT-5 [2010] minimalna ilość cementu dla mieszanek o wielkości największych ziaren kruszywa między 8,0 a 31,5 mm wynosi 3%.

## 5.2 Wnioski

Otrzymane wyniki badań z etapu 1 oraz 2 wskazują, iż dodatki rozdrobnionych odpadów gumowych wykazują bardzo dobrą efektywność swojego działania niezależnie od rodzaju zastosowanego łupka przywęglowego nieprzepsalonego. To pozwala potwierdzić pierwszą tezę pracy o efektywności stosowania dodatku, niezależnie od pochodzenia kruszywa bazowego. Jedynie zastosowane dodatki rozdrobnionych odpadów gumowych równe 5% wykazują większą wrażliwość na wariant zastosowanego łupka przywęglowego nieprzepsalonego.

Badania wytrzymałościowe, przeprowadzone po 7 oraz 28 dniach pielęgnacji próbek, wskazują na wpływ zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych na zmniejszenie się wartości wytrzymałości na ściskanie oraz zwiększenie się odkształcalności wraz ze wzrostem zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych. Dla obu etapów badań wpływ zawartości dodatków był podobny. Najmniejszą redukcję wartości wytrzymałości na ściskanie odnotowuje się dla dodatków rozdrobnionych odpadów gumowych pomiędzy 5 a 10%.

Dla obu etapów badań udało się również ograniczyć nasiąkliwość masową i wysokość podciągania kapilarnego wody poprzez zastosowanie dodatków rozdrobnionych odpadów gumowych. Najniższe wartości omawianych parametrów uzyskano dla dodatku równego 10%. Pozwala to potwierdzić drugą tezę pracy mówiącą o wpływie zastosowanego dodatku na wartości tych parametrów. Ograniczenie nasiąkliwości oraz wysokości podciągania kapilarnego pozwala na lepszą pracę mieszanki w środowisku o dużej wilgotności. Ostateczne potwierdzenie tej tezy wymaga jeszcze przeprowadzenia badań w dłuższym okresie czasu.

Na podstawie przedstawionych wyników badania obciążenia cyklicznego można stwierdzić że:

- Zastosowanie dodatków rozdrobnionych odpadów gumowych pozwala na zwiększenie zakresu pionowych deformacji sprężystych. W etapie 1 najwyższe wartości zakresu podłużnych deformacji sprężystych uzyskano dla dodatku równego 10%. W przypadku etapu 2 zakres ten wzrastał wraz ze wzrostem zawartości rozdrobnionych odpadów

gumowych, jednak jego efektywność spadała o 50% po przekroczeniu zawartości dodatku równej 10%.

- Zastosowanie dodatku rozdrobnionych odpadów gumowych pozwala na poprawę trwałości zmęczeniowej. Można to zaobserwować na podstawie zmniejszenia się różnicy wartości modułu sprężystości pomiędzy pierwszym a ostatnim cyklem obciążenia. Dla obu etapów badań najmniejszą procentową wartość spadku odnotowano dla dodatku rozdrobnionych odpadów gumowych równego 5%.

Wnioski, wynikające z badania obciążenia cyklicznego, pozwalają potwierdzić trzecią tezę pracy o pozytywnym wpływie zawartości rozdrobnionych odpadów gumowych na trwałość zmęczeniową mieszanki ŁGPC.

Na podstawie przedstawionych wyników badań można również stwierdzić, że dodatkami optymalnymi są rozdrobnione odpady gumowe o zawartości 5–10%. Pozwolą one na uzyskanie najniższych wartości wysokości podciągania kapilarnego oraz nasiąkliwości masowej przy możliwie najwyższych wartościach wytrzymałości na ściskanie i trwałości zmęczeniowej.

### **5.3 Dalsze kierunki badań**

Przedstawione wyniki badań stanowią wprowadzenie oraz dobre rozpoznanie charakterystyki zaprezentowanego kompozytu (mieszanki ŁGPC). Przeprowadzone badania i uzyskane wyniki potwierdziły postawione w pracy tezy. Jednocześnie pozwoliły zaklasyfikować mieszanki G5 oraz G10 jako zdadne do wykorzystania jako warstwy ulepszonego podłoża oraz podbudowy pomocniczej. Pomimo tego wymagane są jeszcze dodatkowe badania laboratoryjne w celu podjęcia próby zastosowania tej mieszanki w budownictwie drogowym. Wynika to z braku określenia mrozoodporności oraz trwałości w długim okresie czasu eksploatacji mieszanek oraz ich nietypowej (jak na mieszanki związane spoiwem) charakterystyki odkształcalności pod wpływem przyłożonych obciążeń. Wysoka odkształcalność mieszanek zawierających w sobie rozdrobnione odpady gumowe powoduje potrzebę skorelowania wymagań stawianych w WT-5 [2010] z rzeczywistą pracą warstwy z nich wykonanej. Ze względu na to przewiduje się następujące prace badawcze:

- Badania modułu sztywności pierwotnej i wtórnej (badanie płytą statyczną VSS oraz płytą dynamiczną VSD) modeli fragmentu konstrukcji nawierzchni, w których jako warstwę konstrukcyjną wykorzystano mieszanekę kompozytową ŁGPC
- Wykonanie poletek doświadczalnych oraz próbne obciążenia
- Badania laboratoryjne wykorzystujące DIC:
  - Badania mrozoodporności mieszanek
  - Specjalistyczne badania trwałości zmęczeniowej opierające się na dużej ilości cykli obciążenia
  - Badania dynamiczne ITCY według PN-EN 12697-26:2012



## Spis literatury

- Alfayez S., Suleiman A., Nehdi M. (2020):** Recycling tire rubber in asphalt pavements: State of the art., MDPI Sustainability, no.12, doi:10.3390/su12219076
- Amrani M., Taha Y., El Haloui Y., Benzaazoua M., Hakkou R. (2020):** Sustainable reuse of coal mine waste: experimental and economic assessments for embankments and pavement layer applications in Morocco, Minerals, 10(10), 851, <https://doi.org/10.3390/min10100851>
- Balachowski, L., Gotteland P. (2007):** Characteristics of tyre chips-sand mixtures from triaxial tests. Archives of Hydroengineering and Environmental Mechanics, 54, 3–14.
- Bapat J. (2001):** Performance of cement concrete with mineral admixtures, Advances in Cement Research, 13(4), 139–155.
- Baran P., Cholewa M., Zawisza E. (2013):** Problem jednoznacznego ustalenia parametrów wytrzymałości na ścinanie odpadów powęglowych i poenergetycznych, Rocznik Ochrona Środowiska, tom 15, 2071–2089.
- Białasz S. (2018):** Practice use of rubber recycles as a way to protect the environment. Ecological Engineering & Environmental Technology, 19(5), 63-74, <https://doi.org/10.12912/23920629/94958>
- Bing P., Xie H., Xu B., Dai F. (2006):** Performance of sub-pixel registration algorithms in digital image correlation, Meas. Sci. Technol., 17, 1615–1621.
- Blaber J., Adair B., Antoniou A., (2015):** Open-source 2D digital image correlation. Exp. Mech., no. 55, 1105–1122.
- Bobrowski D., Maćkowiak–Łybacka K. (1988):** Wybrane metody wnioskowania statystycznego, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań.
- Bossuyt S. (2013):** Chapter 34: Optimized patterns for digital image correlation, Proceedings of the 2012 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics, Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, Vol. 3, 239–248.
- Brandt S. (1974):** Metody statystyczne i obliczeniowe danych, Państwowe Wydawnictwo Narodowe, Warszawa.
- Brussier M.I., Gufan R.M., Zielikman E.G. (1990):** Sowiarszenstwowanie standartnego mietoda opriedie- lenija paramietrow porowej struktury bietona, Bieton i Żelezobieton.
- Bukowski H., Fabrycka W. (2019):** Budownictwo w obiegu zamkniętym w praktyce, Warszawa, 2019.
- Bušić R., Benšić M., Miličević I., Strukar K. (2020):** Prediction models for the mechanical properties of self-compacting concrete with recycled rubber and silica fume, Materials, 13, 1821. <https://doi.org/10.3390/ma13081821>

- Canal L.P., Gonzáles C., Molina-Aldareguía J.M., Segurado J., Llorca, J. (2012):** Application of digital image correlation at the microscale in fiber–reinforced composites. *Compos., Part A*, 43, 1630–1638.
- Cerbu C., Xu D., Wang H., Roşca I.C. (2018):** The use of digital image correlation in determining the mechanical properties of materials, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 399, 012007.
- Chen C.-Y., Lee M.-T. (2019):** Application of Crumb Rubber in Cement-Matrix Composite, *Materials*, 12, 529. <https://doi.org/10.3390/ma12030529>
- Chłędzyński S., Garbacik A. (2001):** Badania modelowe korozji siarczanowej faz mineralnych klinkieru portlandzkiego, *Prace IMMB, Opole*, nr 32, 19–34.
- Chu T.C., Ranson W.F., Sutton M.A., Peters W.H. (1985):** Application of digital–image–correlation techniques to experimental mechanics, *Exp. Mech.*, 25, 232–244.
- Ciołczyk A., Walotek K. (2018):** Reinforcement of unburned coal mining slate with the use of fly ashes binders, Reinforcement, sealing and anchoring of rock massif and building structures 2018, *The Proceedings of the 23rd International Seminar, Ostrava: Vysoka Skola Banska – Technicka Univerzita Ostrava*, 6–11.
- Duszyński A., Jasiński W., Pryga–Szulc A. (2018):** Kruszywa z łupka powęglowego – charakterystyka i zastosowanie w budownictwie drogowym, *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 472: 321–326, DOI: 10.5604/01.3001.0012.7101
- Dyląg Z., Jakubowicz A., Orłoś Z. (1997):** Wytrzymałość materiałów, Wydawnictwo Naukowo–Techniczne, Warszawa.
- Encyklopedia fizyki (1973):** tom. 2, Praca zbiorowa, PWN, s. 533.
- Fang J., Zhao L., Shi J. (2021):** Frost resistance and pore structure of concrete incorporated with rubber aggregates and Nano–SiO<sub>2</sub>, *Materials*, 14, 1170, <https://doi.org/10.3390/ma14051170>
- Filipowicz P., Borys M. (2006):** Zamiana w czasie wybranych parametrów geotechnicznych odpadów powęglowych wbudowanych w nasyp, *Woda–Środowisko–Obszary Wiejskie*, tom 6, zeszyt 1 (16), 99–114.
- Galos K., Hycnar E., Lewicka E., Ratajczak T., Szlugaj J., Wyszomirski P. (2009):** Mineralne surowce odpadowe z górnictwa i przeróbki, [w:] Ney R., red. *Surowce mineralne Polski, Mineralne surowce odpadowe*, Kraków: IGSMiE.
- Galos K., Szlugaj J. (2014):** Management of hard coal mining and processing wastes in Poland, *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, Vol. 30, Issue 4, 51–64.
- Galos K., Uliasz–Bocheńczyk A. (2005):** Źródła i użytkowanie popiołów lotnych ze spalania węgla w Polsce, *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, tom 21, 23–42.
- Garbacik A., Baran T. (2008):** Wpływ dodatku popiołu lotnego krzemionkowego z różną zawartością części palnych na właściwości cementu, *Dni Betonu*, 1–8.

- Gawlicki M., Małolepszy J. (2013):** Wykorzystanie odpadów przemysłowych w drogownictwie – zagrożenia, XXVI Konferencja Naukowo–Techniczna Awarie Budowlane, 23–38.
- Gawor Ł. (2013):** Zwałowiska pogórnice jako obiekty geoturystyczne na przykładzie Zagłębia Ruhry i Górnośląskiego Zagłębia Węglowego – waloryzacja i analiza porównawcza, CUPRUM, nr 3, 45–51.
- Gawor Ł. (2014):** Coal mining waste dumps as secondary deposits – examples from the Upper Silesian Coal Basin and the Lublin Coal Basin, *Geology, Geophysics & Environment*, nr. 40(3), 285–289.
- Gawor Ł. (2016):** Wykorzystanie doświadczeń międzynarodowych dla potrzeb rekultywacji i zagospodarowania zwałowisk odpadów pogórnich, *Prace Komisji Geografii Przemysłu Polskiego Towarzystwa Geograficznego*, 30(3), 228–238.
- Giergiczny Z. (2003):** Zasady klasyfikacji właściwości cementów według norm europejskich, *Drogi i mosty*, nr 2, 5–32.
- Giergiczny Z. (2009):** Popiół lotny składnikiem betonu – normalizacja i praktyka, *Budownictwo, Technologie, Architektura*, 40–43.
- Giergiczny Z., Gawlicki M. (2008):** Popiół lotny jako aktywny składnik cementów i dodatek mineralny do betonu, *Dni Betonu*, 1–17.
- Giergiczny Z., Małolepszy J., Szwabowski J., Śliwiński J., Sawicka V. (2002):** Cementy z dodatkami mineralnymi w technologii betonów nowej generacji, Wydawnictwo Instytut Śląski, Opole.
- Glinicka M. (2007):** Zagęszczalność piasku i odpadów z opon samochodowych oraz jej wpływ na właściwości mechaniczne, w: *Problemy Naukowo-Badawcze Budownictwa*, tom III, Materiały, Technologie i Organizacja w Budownictwie, Polska Akademia Nauk, Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok, 363–370.
- Glinicka M. (2013):** Właściwości mechaniczne mieszaniny gruntu i odpadów z opon samochodowych, *Civil and Environmental Engineering*, 4, 99–104.
- Góralczyk S., Mazela A., Stankiewicz J., Filipczyk M. (2009):** Przywęglowa skała płonna - odpad czy surowiec?. *Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej, Studia i Materiały*, 125 (35), 95–103.
- Gradkowski K., Wszyński K. (2010):** Ulepszanie i wzmacnianie warstw gruntu ubocznymi materiałami spalania i odpadowymi w drogowych budowlach ziemnych, *Drogownictwo*, nr 3, 87–90.
- Grodzicka A. (1999):** Trwałość betonów wysokowartościowych w aspekcie oddziaływania zmian termicznych, *Praca naukowo–badawcza nr NB–25*, ITB, Warszawa.

- Hadzima–Nyarko M., Nyarko E.K., Ademović N., Miličević I., Kalman Šipoš T. (2019):** Modelling the influence of waste rubber on compressive strength of concrete by Artificial Neural Networks, *Materials*, 12, 561. <https://doi.org/10.3390/ma12040561>
- He Z.H., Sutton M.A., Ranson W.F., Peters W.H. (1984):** Two dimensional fluid–velocity measurements by use of digital speckle correlation techniques, *Experimental Mechanics*, 24, 117–121.
- Hild F., Roux S. (2012):** Comparison of local and global approaches to digital image correlation, *Experimental Mechanics*, 52, 1503–1519.
- Hoult N.A., Take W.A., Lee C., Dutton M. (2013):** Experimental accuracy of two dimensional strain measurements using digital image correlation, *Engineering Structures*, 46, 718–726.
- IBDiM (2004):** Ocena i badania wybranych odpadów przemysłowych do wykorzystania w konstrukcjach drogowych, Warszawa.
- Jackiewicz–Rek W. (2010):** Betony wysokopopiołowe, *Materiały Budowlane*, 458, 18–20.
- Kassyk–Rokicka H. (1976):** Mierniki statystyczne, Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa.
- Kłojzy–Karczmarczyk B., Mazurek J., Paw K. (2016):** Możliwości zagospodarowania kruszyw i odpadów wydobywczych górnictwa węgla kamiennego ZG Janina w procesach rekultywacji wyrobisk odkrywkowych, *Gosp. Sur. Miner.*, 32, 3: 111–134.
- Kosiń, M. (2020):** The use of an optical system for bending and torsional analyses of open cold–formed profiles, *Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej, Czestochowa University of Technology*, 26, 83–88.
- Kowalska M., Jastrzębska M. (2017):** Pęcznienie mieszanek gruntu spoistego z granulatem gumowym, *Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice*, 261–270.
- Koziół W., Ciepliński A., Machniak Ł., Borecz A. (2015):** Kruszywa w budownictwie, Cz. 2. Kruszywa alternatywne, wrzesień – październik 2015, *Now. Bud. Inż.*, 5: 35–40.
- Kucharzyk P. (2004):** Technologia zakładów przeróbki mechanicznej odpadów pogórnich, *Inżynieria Mineralna*, tom 5, nr 2, 60–64.
- Kumar R., Reddy S., Baig S. (2014):** Zmiany wytrzymałości na ściskanie betonu, w którym część cementu zastąpiono dodatkami mineralnymi, *CWB-1*, 8–16.
- Kurdowski W. (1990):** Dodatki mineralne do cementu a trwałość betonu, *Monografia 106*, 1990, 109–120.
- Leus M. (2013):** Statyczna próba ściskania metali, *Instrukcja do Laboratorium Wytrzymałości Materiałów*, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Szczecin.
- Liu H., Liu Z. (2010):** Recycling utilization patterns of coal mining waste in China, *Resources Conservation and Recycling*, 54. 1331–1340. [10.1016/j.resconrec.2010.05.005](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.05.005)

- Liu H., Wang X., Jiao Y., Sha T. (2016):** Experimental investigation of the mechanical and durability properties of crumb rubber concrete, *Materials*, 9, 172, <https://doi.org/10.3390/ma9030172>
- Lo Presti D. (2013):** Recycled tyre rubber modified bitumens for road asphalt mixtures: A literature review, *Construction and Building Materials*, 49, 10.1016/j.conbuildmat.2013.09.007.
- Lu H., Cary P.D. (2000):** Deformation measurements by digital image correlation: Implementation of a second-order displacement gradient, *Experimental Mechanics*, 40, 393–400.
- Luszniewicz A. (1979):** Metody wnioskowania statystycznego, Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa.
- Lv J., Zhou T., Du Q., Li K., Sun K. (2019a):** Evaluation of stress–strain behavior of self-compacting rubber lightweight aggregate concrete under uniaxial compression loading. *Materials*, 12, 4064. <https://doi.org/10.3390/ma12244064>
- Lv J., Zhou T., Li K., Sun K. (2019b):** Shrinkage properties of self-compacting rubber lightweight aggregate concrete: Experimental and analytical studies, *Materials*, 12, 4059. <https://doi.org/10.3390/ma12244059>
- Lv J., Zhou T., Wu H., Sang L., He Z., Li G., Li K. (2020):** A New composite slab using crushed waste tires as fine aggregate in self-compacting lightweight aggregate concrete, *Materials*, 13, 2551, <https://doi.org/10.3390/ma13112551>
- Łączny J., Olszewski P., Gogola K., Bajerski A. (2011):** Czynniki wpływające na wybór technologii prewencyjnych, profilaktycznych i gaśniczych stosowanych na obiektach uformowanych z odpadów powęglowych, *Prace naukowe GIG: Górnictwo i Środowisko*, nr 4, 87–102.
- Łukowski P. (2015):** Rola domieszek we współczesnej technologii betonu, *Materiały Budowlane*, nr 518, 106–108.
- Machniak Ł., Koziół W. (2014):** Kruszywa alternatywne – baza zasobowa i kierunki wykorzystania w budownictwie, *Kruszywa: produkcja – transport – zastosowanie*, 4: 28–33.
- McCormick N., Lord, J. (2010):** Digital image correlation, *Mater. Today*, 13, 52–54.
- Mguil-Touchal S., Morestin F., Brunet M. (1997):** Various experimental applications of digital image correlation method. *Computer Methods and Experimental Measurements, Trans. Model. Simul.*, 16, 45–58.
- Mhaya M., Baghban A., Faridmehr M.H., Huseien I., Abidin G.F., Ismail M. (2021):** Performance evaluation of modified rubberized concrete exposed to aggressive environments, *Materials*, 14, 1900. <https://doi.org/10.3390/ma14081900>

- Nakano T., Yokoyama Sh., Uchida Sh., Maki I. (2007):** Badania podstawowe związane z produkcją cementu z popiołu ze spalania miejskich odpadów stałych, Część I. Charakterystyka popiołów i cementów specjalnych, CWB-4, 187–192.
- Oldakowska E. (2012a):** Możliwość zastosowania betonów modyfikowanych rozdrobnionymi odpadami gumowymi w budownictwie rolniczym, Aparatura Badawcza i Dydaktyczna, nr 2, 61–68.
- Oldakowska E. (2012b):** Modyfikowanie podbudowy dróg dojazdowych do obiektów wiejskich, Aparatura Badawcza i Dydaktyczna, nr 4, 51–56.
- Oldakowska E. (2014):** Wpływ dodatku z rozdrobnionych opon samochodowych na właściwości mechaniczne betonów stosowanych w budownictwie rolniczym, Aparatura Badawcza i Dydaktyczna, nr 1, 67–75.
- Oldakowska E. (2015):** Ocena wybranych właściwości betonów zwykłych z rozdrobnioną gumą ze zużytych opon samochodowych, Inżynieria Ekologiczna, Vol. 43, 49–54, DOI: 10.12912/23920629/58902
- Ostrowski M. (2015):** Klasyfikacja popiołów lotnych krzemionkowych kategorii S, Materiały Budowlane, nr 518, 112–114.
- Oyedele L., Ajayi O., Kadiri K. (2014):** Use of recycled products in UK construction industry: An empirical investigation into critical impediments and strategies for improvement, Resources, Conservation and Recycling, Vol. 93.
- Palanca M., Tozzi G., Cristofolini L. (2016):** The use of digital image correlation in the biomechanical area: A review. Int. Biomech., 3, 1–21.
- Pan B. (2018):** Digital image correlation for surface deformation measurement: Historical developments, recent advances and future goals, Meas. Sci. Technol., 29, 082001.
- Pan B., Qian K., Xie H., Asundi A. (2009):** Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: A review, Meas. Sci. Technol., 20, 062001.
- Pan B., Xie H., Wang Z., Qian K., Wang Z. (2008):** Study on subset size selection in digital image correlation for speckle patterns, Opt. Express, 16, 7037–7048.
- Parasiewicz W. (2009):** Recykling, tom 3(99), 48.
- Peters W.H., Ranson W.F. (1982):** Digital imaging techniques in experimental stress analysis, Optical Eng., 21, 427–431.
- Peters W.H., Ranson W.F., Sutton M.A., Chu T.C., Anderson J. (1984):** Applications of digital correlation method to rigid body mechanics, Optical Eng., 22, 738–743.
- Petrella A., Notarnicola M. (2021):** Lightweight cement conglomerates based on end-of-life tire rubber: effect of the grain size, dosage and addition of perlite on the physical and mechanical properties, Materials, 14, 225, <https://doi.org/10.3390/ma14010225>
- Pieczyrak J. (2010):** Characteristics and engineering usage of waste from coal mining, ACEE, no. 1, 77–84.



**Pilat J., Radziszewski P., Serbeńska A. (2011):** Drogi - drugie życie opon edroga.pl  
<https://edroga.pl/drogi-i-mosty/drogi-drugie-zycie-opon-04114905>

**Poozesh P., Baqersad J., Niezrecki C., Avitabile P., Harvey E., Yarala R. (2017):** Large-area photogrammetry based testing of wind turbine blades, *Mech. Syst. Signal Process.*, 86, 98–115.

**Rahman M.M. (2004):** Characterisation of dry process crumb rubber modified asphalt mixtures, Thesis submitted to the University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy, s.l.: University of Nottingham, School of Civil Engineering.

**Ramos T., Furtado A., Eslami S., Alves S., Rodrigues H., Arêde A., Tavares P.J., Moreira P. (2015):** 2D and 3D Digital image correlation in civil engineering—measurements in a masonry wall, *Procedia Eng.*, 114, 215–222.

**Reu P. (2012):** The art and application of DIC. Introduction to digital image correlation: Best practices and applications, *Exp. Tech.*, 36, 3–4.

**Robaczyński T. (2009):** Recykling opon. Cz. I. Źródła pozyskiwania zużytych opon, *Recykling*, tom 1, 22–23.

**Roux S., Hild F. (2006):** Stress intensity factor measurement from digital image correlation: post-processing and integrated approaches, *Int. J. Fract.*, 140, 141–157.

**Sas W., Gluchowski A. (2012):** Metodyka wyznaczania modułów sprężystości (E i Mr) na podstawie badania CBR pod obciążeniem cyklicznym, *Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska* nr 57, 171–181.

**Schreier H., Sutton M.A. (2002):** Systematic errors in digital image correlation due to under matched subset shape functions, *Exp. Mech.*, 42, 303–310.

**Skarżyńska K. (1996):** Wykorzystanie nieprzepalonych odpadów powęglowych w budownictwie drogowym, *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 4.

**Skarżyńska K. (1997):** Odpady powęglowe i ich zastosowanie w inżynierii lądowej i wodnej, *Akademia Rolnicza im. H. Kołłątaja, Kraków*.

**Skawińska A. (2019):** Badanie wpływu granulatu gumowego na kształtowanie wybranych właściwości mechanicznych zapraw cementowych, *Structure*, 256-264, DOI: 10.30540/sae-2019-019

**Smejda-Krzywicka A., Bociąg K., Skrodzka J., Piwowarczyk A., Rzymski W. (2012):** Przegląd metod recyklingu wyrobów gumowych, *Przetwórstwo tworzyw*, nr 5(149), 518–522.

**Sokół W., Tabor A. (1996):** Problemy zagospodarowania odpadów powęglowych z górnictwa węgla kamiennego w Polsce, *Przegląd Geologiczny*, 44, 7: 710–715.

**Starzyńska W. (2000):** Statystyka praktyczna, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.

**Sternik K. (2011):** Wpływ degradacji parametrów mechanicznych odpadów kopalnianych na stateczność skarpy głębokiego wykopu, *Czasopismo Techniczne*, 165–179.

**Stoilov G., Kavardzhikov V., Pashkouleva D. (2012):** A comparative study of random patterns for digital image correlation, *J. Theor. Appl. Mech.*, 42, 55–66.

**Strukar K., Šipoš T., Dokšanović T., Rodrigues H. (2018):** Experimental study of rubberized concrete stress–strain behavior for improving constitutive models, *Materials*, 11, 2245. <https://doi.org/10.3390/ma11112245>

**Sutton M.A., Orteu J.J., Schreier H.W. (2009):** Image correlation for shape, motion and deformation measurements. *Basic Concepts, Theory and Applications*, Springer: Berlin/Heidelberg, Germany.

**Sutton M.A., Wolters W.J., Peters W.H., Ranson W.F., McNeill S.R. (1983):** Determination of displacements using an improved digital correlation method, *Image and Vision Computing*, 1 (3), 133–139.

**Sutton M.A., Yan J.H., Tiwari V., Schreier H.W., Orteu J.J. (2008):** The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurements, *Opt. Lasers Eng.*, 46, 746–757.

**Sybilski D. (2009):** Zastosowanie odpadów gumowych w budownictwie drogowym, *Przegląd Budowlany*, nr 5, 37–44.

**Sybilski D., Bańkowski W., Horodecka R., Wróbel A., Mirski K. (2011):** Metoda modyfikacji mieszanki mineralno–asfaltowej gumą z zastosowaniem dodatku „tecRoad”, *Drogownictwo*, nr 6, 189–193.

**Szlugaj J. (2020):** Charakterystyka mineralogiczno-petrograficzna odpadów wydobywczych z wybranych kopalń węgla kamiennego w aspekcie ich wykorzystania do produkcji kruszyw mineralnych, Wydawnictwo Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków.

**Szydło A., Koba H. (2009):** Mieszanki mineralno–asfaltowe na bazie asfaltu modyfikowanego gumą redukujące hałas, Instytut Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.

**Śliwiński J., Tracz T., Deja J., Łagosz A. (2013):** Wybrane właściwości betonów z dodatkiem frakcjonowanego popiołu lotnego krzemionkowego i fluidalnego, *CWB–2*, 81–90.

**Tang Z., Liang J., Xiao Z., Guo C. (2012):** Large deformation measurement scheme for 3D digital image correlation method, *Opt. Lasers Eng.*, 50, 122–130.

**Torii K., Sasatana T., Kawamura M. (1998):** Chloride penetration into concrete incorporating mineral admixtures in marine environment, *Canmet/ACI Int. Conf. Fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete*, Bangkok Thailand, Vol. 2, 701–716.

**Turoń B., Ziaja D., Buda–Ożóg L., Miller B. (2018):** DIC in validation of boundary conditions of numerical model of reinforced concrete beams under torsion, *Arch. Civ. Eng.*, 64, 31–48.

**Vanlanduit S., Vanherzeele J., Longo R., Guillaume P. (2009):** A digital image correlation method for fatigue test experiments, *Opt. Lasers Eng.*, 47, 371–378.

**Verhulp E., van Rietbergen B., Huiskes R. (2004):** A three-dimensional digital image correlation technique for strain measurements in microstructures, *J. Biomech.*, 37, 1313–1320.

**Walotek K. (2017):** Analiza parametrów fizyko-mechanicznych łupków przywęglowych nieprzepalonych ulepszanych spoiwami z dodatkami odpadów gumowych, Rozprawa magisterska, Politechnika Śląska, Gliwice.

**Weetman C. (2016):** A simple diagram to contrast the 'take, make, waste' linear approach to the circular economy.

**Wilun Z. (2013):** Zarys geotechniki, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa.

**Wowkowicz P., Bojanowicz–Bablok A., Gaworek B. (2018):** Wykorzystanie odpadów z przemysłu wydobywczego i hutnictwa w Polsce, Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa, tom 20, 1335–1349.

**Xu Z. (2016):** Study on preparation of porous ceramics by using industrial wastes, 4th International Conference on Mechanical Materials and Manufacturing Engineering (MMME), 507–510.

**Yoneyama S., Murasawa G. (2009):** Digital image correlation, *Experimental Mechanics*, Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Eolss Publishers: Oxford, UK.

**Zarrinpour M.R., Chao S.H. (2017):** Shear strength enhancement mechanisms of steel fiber–reinforced concrete slender beams, *ACI Struct. J.*, 114, 729–742.

**Zhang D., Arola D.D. (2004):** Applications of digital image correlation to biological tissues, *J. Biomed. Opt.*, 9, 691–699.

**Zheng-fu B., Jihong D., Shaogang L., Hailong L., Shouguo M., Hui W. (2009):** The impact of disposal and treatment of coal mining wastes on environment and farmland, *Environmental Geology*, 58. 625–634, 10.1007/s00254-008-1537-0

## **Normy, Katalogi i Wytyczne:**

**PN–88/B–06250** Beton zwykły

**PN–60/B–04493** Grunty budowlane. Oznaczanie kapilarności biernej

**PN–86/B–02480** Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów

**PN–88/B–04481** Grunty budowlane. Badania próbek gruntu

**PN–S–96035:1997** Drogi samochodowe. Popioły lotne

**PN–S–06103:1997** Drogi samochodowe. Podbudowa z betonu popiołowego

**PN–S–02205:1998** Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania

**PN–EN 933–8:2012** Badania geometrycznych właściwości kruszyw. Część 8: Ocena zawartości drobnych cząstek. Badanie wskaźnika piaskowego

**PN-EN 12390-3:2002** Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badania

**EN 12697-24:2003** Mieszanki mineralno-asfaltowe. Metody badań. Część 24: Odporność na zmęczenie

**PN-EN 12697-26:2012** Mieszanki mineralno-asfaltowe. Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco. Część 26: Sztywność

**PN-EN 13286-2:2010** Mieszanki niezwiązane i związane hydraulicznie. Część 2: Metody badań laboratoryjnych gęstości na sucho i zawartości wody. Zagęszczanie metodą Proctora

**PN-EN 933-1:2012** Badania geometrycznych właściwości kruszyw. Część 1: Oznaczanie składu ziarnowego. Metoda przesiewania

**PN-EN 197-1:2012** Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku

**PN-EN 13286-47:2012** Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym. Część 47: Metoda badania do określenia kalifornijskiego wskaźnika nośności, natychmiastowego wskaźnika nośności i pęcznienia liniowego

**GDDKiA (2012):** Katalog typowych nawierzchni podatnych i półsztywnych

**WT-5 (2010):** Wytyczne techniczne nr 5. Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym do dróg krajowych

## **Strony internetowe:**

<https://ctl.pl/ctl/ctl-haldex>

**GUS (2002):** Koniunktura w przetwórstwie przemysłowym, budownictwie, handlu i usługach 2000–2022

<https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/koniunktura/koniunktura/koniunktura-w-przetworstwie-przemyslowym-budownictwie-handlu-i-uslugach-2000-2022-styczen-2022,4,57.html>

<http://www.gom.com.pl>

<https://www.gov.pl/web/klimat/goz>

<https://www.pse.pl/dane-systemowe>

<http://what-when-how.com/optical-measurementsmodeling-and-metrology/experimental-testing-2d-dic-and-fe-modeling-of-t-stub-model-part-1/>

## Załącznik 1 Procedury badań

### Analiza sitowa według PN-EN 933-1:2012:

#### Sprzęt pomocniczy:

- Komplet 9 sit o wymiarach boków kwadratowych: 40; 25; 10; 2; 1; 0,5; 0,25; 0,10 mm oraz 0,071 lub 0,063mm
- Wstrząsarka
- Parowniczkę średnicy 5–7 cm
- Moździerz z tłuczkiem i nakładką gumową
- Szczotka do czyszczenia sit

#### Przebieg badania

- Próbkę gruntu przeznaczonego do oznaczenia uziarnienia metodą sitową nie powinna zawierać ziaren o wymiarach większych niż 40 mm. Przed przystąpieniem do oznaczenia należy więc usunąć je z próbki
- W przypadku występowania części frakcji iłowych należy rozetrzeć próbkę w wodzie tłuczkiem i przemyć ją na sicie o wymiarach oczek 0,074 lub 0,06 mm i do analizy używać tylko pozostałość na sicie (cząstki drobniejsze ewentualnie należy rozdzielić na frakcję jedną z analiz sedymentacji)
- Przygotowaną w ten sposób próbkę suszy się w temperaturze 105–110 °C do stałej masy
- Z wysuszonej próbki gruntu należy odważyć z dokładnością nie mniejszą niż 0,1% próbkę do badań. Masa próbki w zależności od rodzaju gruntu wynosi: 200–250 g dla piasku drobnego, 250–500 g dla piasku średniego, 500–5000 g dla piasku grubego pospółki i żwiru
- Komplet czystych, suchych sit ustawia się w kolumnę w ten sposób, że na górze znajduje się sito o największym wymiarze oczek, a pod nim sita o kolejno coraz mniejszym wymiarze oczek. Pod sitem dolnym umieszcza się płaskie, dopasowane do sita naczynie do zbierania najdrobniejszych frakcji przesiewu. Każde sito powinno być osadzone sztywno, tak aby podczas przesiewu nie następowały przesunięcia sit względem siebie
- Zestawione sita umieszcza się na wstrząsarce, na górne sito wsypuje wysuszoną i zważoną próbkę, przykrywa górne sito szczelnym wieczkiem, całość przymocowuje się uchwytami i uruchamia wstrząsarkę
- Wstrząsanie powinno trwać 5 minut
- Po upływie 5 minut i wyłączeniu wstrząsarki należy sprawdzić, czy frakcje zostały całkowicie rozdzielone. W tym celu wyjmuje się z uchwytów wstrząsarki sito o najmniejszych wymiarach oczek i wstrząsa się je ręcznie przez co najmniej 1 minutę nad czystym arkuszem białego papieru lub kalki technicznej. Jeżeli na arkuszu po tej czynności znajdują się cząstki gruntu, przenosi się je do naczynia z najdrobniejszą frakcją, a całą próbkę wstrząsa się ponownie przez co najmniej 3 minuty

- Po zakończeniu przesiewania pozostałość na każdym sicie przenosi się do zważonej parowniczkę i waży z dokładnością nie mniejszą niż:
  - 0,01 g – jeśli masa ważonej frakcji nie przewyższa 50 g
  - 0,1 g – jeśli masa ważonej frakcji wynosi 50–500g
  - 1,0 g – jeśli masa ważonej frakcji jest większa niż 500 g

## **Badanie wskaźnika piaskowego według PN–EN 933–8:2012**

### **Cel badania:**

- Wskaźnik piaskowy służy do określenia przydatności kruszywa do stabilizacji mechanicznej, przy wykonywaniu podbudowy w nawierzchni ulepszonej
- Kontrola jakości gruntów stosowanych do stabilizacji spoiwami hydraulicznymi i lepiszczami bitumicznymi
- Określenie stopnia wysadzinowości gruntów
- Przydatność piasków do mas bitumicznych

### **Opis badania:**

- Przygotować około 600 g gruntu o wilgotności naturalnej, po uprzednim usunięciu ziaren o średnicy większej niż 4 mm
- Określić wilgotność gruntu "w" [%]
- Masa próbki gruntu "m" [g] przeznaczona do badań powinna wynosić:

$$m = 120 * \left(1 + \frac{w}{100}\right)$$

- Wlać roztwór roboczy do cylindra tak, aby jego poziom odpowiadał dolnej kresce
- Wsypać przez lejek do cylindra przygotowaną próbkę gruntu, a następnie usunąć pęcherzyki powietrza poprzez uderzenia dłonią w podstawę cylindra
- Po odczekaniu około 10 min, zatkać cylinder korkiem i poddać cylinder 90 wstrząsom (trzy wstrząsy na sekundę)
- Zdjąć korek i przemyć go nad cylindrem roztworem roboczym.
- Wprowadzić do cylindra rurkę wtryskową, spłukując ścianki cylindra, a następnie obniżyć ją do dna cylindra. Podnosząc ruchem obrotowym rurkę wtryskową przemywać roztworem piasek, aż do momentu, kiedy poziom roztworu osiągnie poziom górnej kreski. Wyciągnąć rurkę wtryskową
- Po 20 min zmierzyć wysokość "h<sub>1</sub>" liczoną od dna cylindra do górnego poziomu zawiesiny w roztworze
- Wprowadzić powoli tłoczek tak, aby oparł się na osadzie, zacisnąć śrubę zaciskową. Zmierzyć wysokość "h<sub>2</sub>" od dna cylindra do osi śrubki na tłoczku, odpowiada to wysokości osadzonego piasku



## Badanie wilgotności optymalnej według PN–EN 13286–2:2010

### Sprzęt pomocniczy:

- Aparat do zagęszczania (aparat Proctora)
- Sita o bokach oczek kwadratowych 6 i 10 mm
- Parownica duża o średnicy około 25 cm
- Tłuczek z nakładką gumową

### Przebieg badania:

- Próbkę gruntu przeznaczoną do badań suszy się w warunkach powietrzno–suchych. Masa próbki w stanie powietrzno–suchym powinna wynosić 2,5–3 kg na 1 dm<sup>3</sup> objętości cylindra użytego do badania
- Należy dobrać wariant badania (I–IV) w zależności od warunków, w jakich grunt będzie pracował
- Wysuszoną na powietrzu próbkę rozdrabnia się za pomocą tłuczka z nakładką gumową i przesiewa przez sito o odpowiednim wymiarze boku oczek
- Pozostałość na sicie waży się i oznacza jej procentową zawartość w próbce
- Do przesianej próbki dolewa się wodę destylowaną (lub wodę o składzie zbliżonym do wody gruntowej na danym obszarze badania) w ilości 60 cm<sup>3</sup> dla gruntów niespoistych i 100–150 cm<sup>3</sup> dla gruntów spoistych, licząc na 1 dm<sup>3</sup> objętości użytego cylindra. Próbkę z wodą miesza się starannie
- Próbkę umieszcza się w szczelnie zamkniętym naczyniu na co najmniej 15 godzin
- Waży się pusty cylinder z podstawą, ale bez kołnierza
- Ustala się objętość cylindra (bez kołnierza)
- Do cylindra (początkowo bez kołnierza) wkłada się taką ilość gruntu, aby utworzył on warstwę około 5–7 cm. Powierzchnię gruntu wyrównuje się, lekko ugniata i ubija w cylindrze ubijakiem, stosując liczbę uderzeń w zależności od przyjętej metody. Do ubijania stosuje się ubijaki ręczne lub mechaniczne
- Po ubiciu pierwszej warstwy wkłada się do cylindra następną porcję gruntu, przy czym przed włożeniem każdej kolejnej warstwy gruntu do cylindra powierzchnię uprzednio ubitej warstwy zdrapuje się ostrzem noża, a włożoną warstwę gruntu wyrównuje się i lekko ugniata. Liczba układanych warstw zależy od stosowanej metody
- Po zagęszczeniu drugiej warstwy w przypadku stosowania metody I i II lub czwartej warstwy w przypadku stosowania metody II i IV na cylindrze umieszcza się kołnierz
- Ilość gruntu wsypywanego przy ubijaniu kolejnych warstw należy dobierać tak, aby po ubiciu ostatniej warstwy ubity grunt wystawał 5–10 mm powyżej górnej krawędzi cylindra (wewnątrz kołnierza)
- Zdejmuje się z cylindra kołnierz i ścina nadmiar gruntu równo z krawędzią cylindra, zawsze od środka do krawędzi
- Po starannym oczyszczeniu zewnętrznych ścianek cylindra i jego podstawy waży się cylinder z gruntem ( $m_{wt}$ ).

- Wyjmuje się do parownicy grunt z cylindra i pobiera z niego próbkę w celu określenia wilgotności. Próbka powinna być pobierana z różnych miejsc (co najmniej 10). Masa próbki powinna wynosić co najmniej 50 g dla piasków i pyłów oraz co najmniej 30 g dla pozostałych gruntów drobnoziarnistych
- Oznacza się wilgotność próbki
- Pozostały w parownicy grunt rozdrabnia się i dodaje do niego taką ilość wody, aby jego wilgotność wzrosła o 1–2%
- Grunt starannie miesza się i powtarza się cykl ubijania
- Cykl powtarza się tak długo (za każdym razem zwiększając wilgotność gruntu o 1–2%), aż masa cylindra z gruntem zacznie się zmniejszać
- Uzyskane dane notuje się w dzienniku laboratoryjnym lub na specjalnym formularzu

## **Badanie CBR według PN–EN 13286–47:2012**

### **Aparatura:**

- Forma Proctora typu „B”
- Ubijak „A” lub „B”
- Waga o dokładności  $\pm 0,1$  g
- Aparat zgodny z PN EN 1097–5:2008 do określania zawartości wody
- Papierowe filtry
- Płyta podstawy jednolicie perforowana na co najmniej 1% powierzchni
- Perforowana górna płyta ze stopu aluminium z nastawnym trzpieniem zapewniającym gniazdo dla trzpienia czujnika zegarowego
- Górna płyta bez otworów ze stopu aluminium o grubości  $10 \pm 1$  mm z nadstawnym trzpieniem zawierającym gniazdo dla trzpienia czujnika zegarowego
- Urządzenie o dokładności 0,05 mm do pomiaru odkształcenia pionowego próbek przy badaniu kalifornijskiego wskaźnika nośności
- Zbiornik do nasycania próbki, wystarczająco duży pozwalający na zanurzenie formy Proctora typu B, najlepiej opierający się na podstawie z siatki
- Pierścienie obciążeniowe każdy o znanej masie  $\pm 100$  g, wewnętrznej średnicy  $53 \pm 1$  mm i zewnętrznej średnicy równej średnicy formy pomniejszonej o 5 mm
- Cylindryczny trzpień penetracyjny o średnicy  $50 \pm 0,5$  mm, którego dolny koniec powinien być wykonany z utwardzanej stali
- Prasa obciążająca o nacisku co najmniej 50 kN zdolna do wywierania siły na trzpień przy prędkości penetracji  $1,27 \pm 0,20$  mm/min. Prasa powinna być wyposażona w urządzenie wskazujące obciążenie z dokładnością do 5 N lub większą

### **Przygotowanie próbek:**

- Przymocować formę do płyty podstawy wraz z dołączoną nadstawką. Włożyć na płytę podstawy krążek dystansowy, umieścić na wierzchu krążka dystansowego antyprzyczepny środek, taki jak szorstki filtr papierowy. Kompletny zestaw do

określania kalifornijskiego wskaźnika nośności umieścić na masywnym podłożu, np. betonie lub cokole. Zagęszczać mieszankę w formie, stosując energię zagęszczania wg Proctora lub zmodyfikowaną metodą Proctora zgodnie z PN-EN 13286-2:2010

- Po zagęszczeniu usunąć nadstawkę i starannie wyrównać mieszankę równo z wierzchem formy i skontrolować wyrównanie przy użyciu stalowego liniału. Uzupełnić drobnym materiałem jakiegokolwiek dziury, który mogły powstać na wierzchu podczas wyrównywania
- Usunąć płytkę z podstawy i krążek dystansowy, zważyć i zanotować masę formy z mieszanką z dokładnością do 5 g

#### **Pielęgnacja próbki przy pełnym nasyceniu:**

- Umieścić krążek szorstkiego papieru filtracyjnego na perforowanej płycie podstawy, odwrócić formę zawierającą zagęszczoną próbkę i przymocować płytę podstawy do formy, tak aby próbka była w kontakcie z papierem filtracyjnym
- Umieścić papier filtracyjny na wierzchu próbki, następnie perforowaną górną płytę i wyposażenie z wymaganą liczbą pierścieniowych krążków obciążeniowych wokół trzpienia na perforowanej płycie. Użycie obciążenia będzie zależało od okoliczności i powinno być określone zgodnie z nimi
- Umieścić zestaw do badania kalifornijskiego wskaźnika nośności wraz z próbką w zbiorniku zanurzeniowym wypełnionym wodą o temperaturze  $20 \pm 2$  °C do poziomu, który pozwala na wolny dostęp wody od góry i od dołu próbki
- Zamocować i zabezpieczyć w formie urządzenie do pomiaru pionowego odkształcenia próbki
- Wykonać początkowy odczyt pęcznienia i pozwolić próbce nasiąkać, przez minimum 96 h utrzymywać stały poziom wody w tym okresie
- Jeżeli to wymagane, należy mierzyć rozszerzanie próbki z dokładnością do 0,05 mm w odpowiednim odstępie czasu, w zależności od szybkości pionowego pęcznienia i sporządzić wykres przyrostu wysokości, w zależności od upływu czasu lub od pierwiastka kwadratowego czasu
- Przy końcu okresu nasycania dokonać końcowych pomiarów i obliczyć ostateczne pęcznienie jako procent początkowej wysokości próbki
- Po ukończeniu nasycania usunąć urządzenie mierzące odkształcenie z zestawu do kalifornijskiego wskaźnika nośności i próbki, wyjąć zestaw wraz z próbką ze zbiornika i umożliwić odsączenie wody z próbki przez około  $15 \pm 1$  min.
- Usunąć krążki obciążeniowe i perforowaną płytę górną i płytę podstawy, zważyć i zanotować masę próbki i formy

#### **Procedura określania kalifornijskiego wskaźnika nośności:**

- Przyłączyć płytę podstawy do formy, tak aby płyta podstawy była w kontakcie z pierwotnym wierzchem próbki, a dolna powierzchnia próbki była odsłonięta i mogła być badana, a następnie umieścić formę na dolnej płycie dociskowej prasy

- Dla określenia kalifornijskiego wskaźnika nośności z obciążeniem, umieścić wymaganą liczbę krążków obciążeniowych na próbce. Jeżeli próbka uprzednio była poddana nasyceniu, obciążenie powinno być równe użytemu podczas okresu nasycania. Aby zapobiec unoszeniu się mieszanki i przedostawaniu się do otworu w obciążnikach, należy jeden krążek umieścić na mieszance przed osadzeniem trzpienia penetrującego, po czym należy umieścić pozostałe obciążniki
- Zależnie od oczekiwanego kalifornijskiego wskaźnika nośności i jeżeli jest to konieczne należy wyrzucić wstępną siłę na trzpień:
  - Wskaźnik do 5%–10 N
  - Wskaźnik powyżej 5%–40 N
- Zabezpieczyć w danym położeniu czujnik zegarowy penetrujący lub podobne urządzenie i zanotować początkowy odczyt zerowy
- Stosować takie obciążenie na tłok, aby szybkość penetracji w przybliżeniu wynosiła 1,27 mm/min. Notować odczyty obciążenia przy wzroście penetracji o 0,5 mm aż do całkowitej penetracji nie przewyższającej 10 mm
- Po zakończeniu badania wyjąć próbkę z formy. Określić średnią zawartość wody w próbce. Każda próbka do określenia zawartości wody powinna ważyć nie mniej niż 100 g dla drobnoziarnistych mieszanek i 500 g dla gruboziarnistych mieszanek. Zawartość wody powinna być określona zgodnie z PN EN 1097–5:2008

### **Badanie nasiąkliwości według PN–B–06250:1980**

#### **Przebieg badania:**

- Próbkę walcową o wymiarach 8x8 cm należy wysuszyć do stałej masy
- Zważyć oraz zanotować masę próbek
- Próbkę należy umieścić w szczelnym naczyniu oraz zalać wodą o temperaturze  $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$  na wysokość co najmniej 2,0 cm ponad górną powierzchnię próbki
- Próbkę należy nasączać aż do uzyskania stałej masy
- Po ustabilizowaniu się masy próbki należy zważyć i na podstawie różnicy masy obliczyć procentową nasiąkliwość próbki

### **Badanie podciągania kapilarnego (metoda autorska „A”)**

#### **Przebieg badania:**

- Badanie wykonuje się na co najmniej 3 próbkach dla każdej recepty
- Próbkę walcową o wymiarach 8x8 cm należy wysuszyć w warunkach powietrzno–suchych do utraty minimum połowy zawartości wody użytej podczas zagęszczania
- Próbkę należy zważyć i oznaczyć
- Następnie próbkę należy umieścić w naczyniu o płaskim dnie i dodać wody tak aby osiągnąć zanurzenie próbek równe 2 cm
- Po 10 minutach podciągania należy wykonać pierwszy pomiar przyrostu masy spowodowanej podciąganiem kapilarnym wody

- Następne pomiary należy przeprowadzić po 30, 60, 90..., 1440 minutach od umieszczenia próbek w wodzie

### **Badanie podciągania kapilarnego (metoda autorska „B”)**

#### **Przebieg badania:**

- Badanie wykonuje się na co najmniej 3 próbkach dla każdej recepty
- Próbki walcowe o wymiarach 8x8 cm należy wysuszyć w warunkach powietrzno-suchych do utraty minimum połowy zawartości wody użytej podczas zagęszczania
- Próbki należy zważyć i oznaczyć
- Następnie próbki należy umieścić w naczyniu o płaskim dnie i dodać wody tak aby osiągnąć zanurzenie próbek równe 2 cm
- Po 10 minutach podciągania należy wykonać pierwszy pomiar wysokości podciągania na podstawie śladu wilgoci na poboczniczy próbki
- Następne pomiary należy przeprowadzić po 30, 60, 90..., 1440 minutach od umieszczenia próbek w wodzie

### **Badanie wytrzymałości na ściskanie po 7 oraz 28 dniach pielęgnacji według PN-S-06103:1997**

#### **Aparatura:**

- Cylindryczna forma „popiołowa” o wymiarach 80x80 mm wraz z kołnierzem
- Ubijak ręczny „A” (lekki)
- Narzędzie do wyrównywania górnej powierzchni próbki (nóż lub paca)
- Blacha lub podstawka do wyrównywania górnej powierzchni próbki
- Pojemnik do przechowywania próbek w warunkach powietrzno – wilgotnych
- Pojemnik do przechowywania próbek w warunkach pełnego zanurzenia w wodzie
- Maszyna wytrzymałościowa

#### **Przygotowanie próbek:**

- Do cylindrycznej formy „popiołowej” o wymiarach 80x80 mm należy nasypać taką ilość zagęszczanego materiału, aby po zagęszczeniu jego wysokość sięgała około 50% wysokości cylindra (40 mm)
- Ułożoną warstwę zagęszczamy 15 uderzeniami ubijaka lekkiego, po zagęszczeniu górną powierzchnie warstwy należy zarysować na głębokość około 0,5 cm
- Po zagęszczeniu pierwszej warstwy na cylinder należy założyć kołnierz
- Do cylindra wraz z kołnierzem nakładamy drugą warstwę materiału, tak aby jej wysokość po zagęszczeniu sięgała około 1 cm ponad górną powierzchnię cylindra
- Ułożoną warstwę zagęszczamy 15 uderzeniami ubijaka lekkiego
- Cylinder wraz z kołnierzem oraz zagęszczonym materiałem przenosimy na podstawkę do wyrównywania próbek

- Po zdjęciu kołnierza należy za pomocą noża lub pacy ściąć nadmiar materiału do wysokości górnej krawędzi cylindra. Ścinanie materiału zawsze wykonujemy w kierunku od centrum do zewnętrznej krawędzi cylindra
- Wyrównane próbki opisujemy oraz wyciskamy z cylindra
- Po wyjęciu z cylindra próbki umieszczamy w pojemniku zabezpieczającym próbki przed wysychaniem (warunki powietrzno-wilgotne)

#### **Pielęgnacja próbek do badania wytrzymałości po 7 dniach:**

- Próbki przechowujemy przez 3 doby w temperaturze  $18 \pm 2^{\circ}\text{C}$  z zabezpieczeniem przed wysychaniem (warunki powietrzno-wilgotne)
- Następnie próbki na 1 dobę zanurzamy w wodzie na głębokość 2 cm licząc do dolnej podstawy próbki
- Następnie próbki zanurza się całkowicie w wodzie na 3 doby w temperaturze  $18 \pm 2^{\circ}\text{C}$
- Po 7 dobach pielęgnacji wykonuje się badanie wytrzymałościowe

#### **Pielęgnacja próbek do badania wytrzymałości po 28 dniach:**

- Próbki przechowujemy przez 14 dób w temperaturze  $18 \pm 2^{\circ}\text{C}$  w warunkach zabezpieczenia przed wysychaniem (warunki powietrzno – wilgotne)
- Następnie próbki zanurza się całkowicie w wodzie na kolejne 14 dób w temperaturze  $18 \pm 2^{\circ}\text{C}$
- Po 28 dniach pielęgnacji wykonuje się badanie wytrzymałościowe

#### **Przebieg badania wytrzymałościowego**

- Próbki po pielęgnacji poddaje się ścisaniu w maszynie wytrzymałościowej
- Ścisanie próbek odbywa się wzdłuż osi walca
- Przyrost ciśnienia wywieranego na próbkę powinien wzrastać z prędkością od 0,2 do 0,3 MN/m<sup>2</sup>
- Do obliczeń wytrzymałości próbki przyjmuje się najwyższą odczytaną siłę ściskającą
- Wytrzymałość oblicza się ze wzoru:

$$R = \frac{P}{F}$$

gdzie:

P – siła niszcząca

F – pole przekroju próbki

- Wytrzymałość próbek oblicza się z dokładnością 0,1 MN/m<sup>2</sup>, jako średnią arytmetyczną uzyskanych wyników (minimum 3)



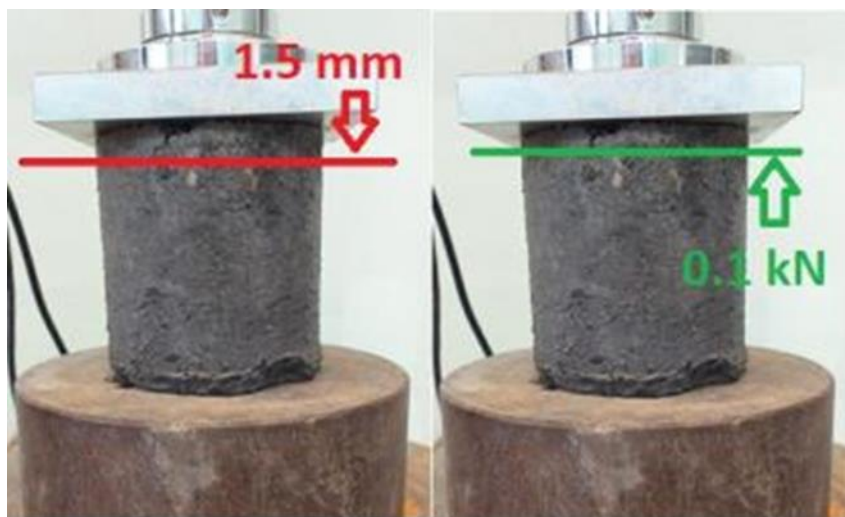
## Badanie obciążenia cyklicznego metoda autorska wykonana w oparciu o Sasa i Głuchowskiego [2012]

### Przygotowanie oraz pielęgnacja próbek:

- Próbki przygotowujemy w analogiczny sposób, jak w przypadku opisanego powyżej badania wytrzymałościowego
- Próbki przed badaniem są pielęgnowane przez 28 dni analogicznie, jak próbki do badania wytrzymałościowego opisanego powyżej

### Przebieg badania:

- Po zakończeniu okresy pielęgnacji próbkę umieszczamy w maszynie wytrzymałościowej
- Wstępnie obciążamy próbkę siłą około 1,5 kN, w celu wyrównania powierzchni kontaktowych próbki oraz zniwelowania luzów w przystawkach do ściskania
- Próbkę poddaje się 20 cyklom obciążenia oraz odciążenia lub do momentu zniszczenia próbki, przy prędkości przesuwu tłoka równej 1,27 mm/min
- W trakcie cyklicznego obciążania oraz odciążania próbki należy dokonywać stałej kontroli siły ściskającej oraz deformacji próbki
- Każdy z cykli obciążenia oraz odciążenia powinien składać się z (Rys. Z.1):
  - Wymuszenia na próbce deformacji równej 1,5 mm
  - Odciążenia próbki do uzyskania wartości siły ściskającej równej minimum 0,1 kN



Rys. Z.1. Schemat pojedynczego cyklu obciążenia oraz odciążenia próbki [fot. własne]

## Załącznik 2 Analiza statystyczna

Wnioskowanie statystyczne dla jednowymiarowych zmiennych losowych obejmuje estymację punktową i estymację przedziałową [Bobrowski i Maćkowiak–Łybacka, 1988; Brandt, 1974; Kassyk–Rokicka, 1976; Luszniwicz, 1979; Starzyńska, 2000].

Estymacja punktowa jednowymiarowej zmiennej losowej opiera się na określeniu statystyk położenia i rozproszenia pomiarów. Najczęściej stosowaną miarą położenia – tendencji centralnej, jest wartość oczekiwana zmiennej losowej, powszechnie zwana średnią arytmetyczną:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (\text{Z2.1})$$

Jako miarę rozproszenia stosuje się odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru  $s$  i współczynnik zmienności  $v$ . Wielkości te wyrażają się wzorami:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (\text{Z2.2})$$

$$v = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100\%. \quad (\text{Z2.3})$$

gdzie  $n$  oznacza liczebność zbioru pomiarów.

Jako miarę niepewności przypadkowej wartości średniej z próby  $\bar{x}$  przyjmujemy zazwyczaj odchylenie standardowe średniej  $s_{\bar{x}}$  z próby:

$$s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (\text{Z2.4})$$

W rozdziale 4 Wyniki badań podano uśrednione wartości parametrów fizyko-mechanicznych mieszanek ŁGPC. W rozumieniu statystyki matematycznej przedstawione wyniki były estymatami wartości jednowymiarowych zmiennych losowych, parametrów nasiąkliwości (N [%]), podciągania kapilarnego (h [cm]) oraz wytrzymałości na ściskanie po 7 oraz 28 dniach pielęgnacji [kN].

W tym załączniku przedstawiono analizę statystyczną uzyskanych wyników. Dla badanych parametrów przeprowadzono analizę statystyczną pod postacią estymaty punktowej. Określono rozproszenie wyników (odchylenia standardowe pojedynczego pomiaru i średniej arytmetycznej, współczynnik zmienności)

W tablicach Z.2.1 oraz Z.2.2 przedstawiono analizę statystyczną wyników badań wykonanych dla badanych mieszanek, odpowiednio w etapie 1 oraz 2. Analiza została przeprowadzona dla każdej z mieszanek oraz zbiorczo w ramach jednego badania.

Tablica Z.2.1. Zestawienie wyników analizy statystycznej dla badań zawartych w etapie 1

Badanie	Mieszanka	Liczba próbek	s	s <sub>x</sub>	v [%]
Nasiąkliwość N [%]	G0	3	0,47	0,27	4,1
	G5	3	0,13	0,08	1,43
	G10	3	0,04	0,02	0,45
	G15	3	0,15	0,09	1,43
Podciągnięcie kapilarne h [cm]	G0	3	0	0	0
	G5	3	0,5	0,29	9,04
	G10	3	0,26	0,15	6,01
	G15	3	0,51	0,3	8,37
Wytrzymałość na ściskanie po 7 dniach pielęgnacji próbek R <sub>7</sub> [MPa]	G0	3	0,04	0,02	2,08
	G5	3	0,13	0,08	7,15
	G10	3	0,08	0,04	4,98
	G15	3	0,13	0,08	10,22
Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach pielęgnacji próbek R <sub>28</sub> [MPa]	G0	3	0,14	0,04	5,16
	G5	3	0,38	0,11	15,59
	G10	3	0,09	0,03	3,76
	G15	3	0,08	0,02	4,76

Tablica Z.2.2. Zestawienie wyników analizy statystycznej dla badań zawartych w etapie 2

Badanie	Mieszanka	Liczba próbek	s	s <sub>x</sub>	v [%]
Nasiąkliwość N [%]	G0	5	0,31	0,14	3,03
	G5	5	0,26	0,11	2,66
	G10	5	0,12	0,05	1,26
	G15	5	0,62	0,18	6,08
Podciągnięcie kapilarne h [cm]	G0	5	0	0	0
	G5	5	0,37	0,16	4,97
	G10	5	1,23	0,55	24,58
	G15	5	1,34	0,6	24,02
Wytrzymałość na ściskanie po 7 dniach pielęgnacji próbek R <sub>7</sub> [MPa]	G0	5	0,2	0,09	11,85
	G5	5	0,06	0,03	3,74
	G10	5	0,1	0,05	6,7
	G15	5	0,09	0,04	6,32
Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach pielęgnacji próbek R <sub>28</sub> [MPa]	G0	5	0,21	0,1	6,49
	G5	5	0,18	0,08	6,66
	G10	5	0,1	0,05	4,58
	G15	5	0,03	0,01	1,75

Wszystkie przedstawione badania, poza badaniem podciągania kapilarnego wykonanego w etapie 2, prezentują niewielkie wartości odchylenia standardowego pomiaru, odchylenia standardowego średniej oraz współczynnika zmienności. Świadczy to o dużej wiarygodności wartości dla wykonanych pomiarów.