



BARTŁOMIEJ KRAWCZYK¹⁾

PIOTR MACKIEWICZ²⁾

DARIUSZ DOBRUCKI³⁾

USE OF PLASTIC WASTE IN CEMENT-BOUND LAYERS

WYKORZYSTANIE ODPADÓW Z TWORZYW SZTUCZNYCH DO WYTWORZENIA MIESZANEK ZWIĄZANYCH CEMENTEM

STRESZCZENIE. Tematem artykułu są badania nad możliwością wykorzystania materiałów pochodzących z recyklingu odpadów z tworzyw sztucznych. Materiały te zastosowano do wytworzenia mieszanek związanych cementem, przeznaczonych do warstw konstrukcji nawierzchni drogowej oraz podłoża ulepszanego. Przeprowadzono analizy na podstawie badań laboratoryjnych odpadów plastikowych, kruszywa oraz mieszanek związanych cementem. Badania obejmowały analizę składu ziarnowego i zagęszczalności, badania wytrzymałości na ścislenie (wczesnej – po 7 dniach; docelowej – po 28 dniach), badania mrozoodporności oraz badania kalifornijskiego wskaźnika nośności CBR. Wyniki badań odniesiono do obowiązujących krajowych wymagań technicznych. Wykazano możliwość stosowania materiałów z recyklingu odpadów plastikowych jako alternatywę dla klasycznie stosowanych materiałów.

SŁOWA KLUCZOWE: odpady plastikowe, recykling, warstwy związane cementem.

ABSTRACT. The article presents research on the possible use of material obtained during recycling of plastic waste. The materials were used in production of cement-bound mixtures for road pavement layers or improved subgrade. The analyses were based on laboratory tests of plastic waste, aggregate and cement-bound mixtures. The tests encompassed particle size distribution, compaction, compressive strength (early – after 7 days; final – after 28 days), frost resistance and California Bearing Ratio (CBR). The obtained results were evaluated in the light of the current national technical requirements. It was shown that plastic waste may be used as an alternative to classic materials.

KEYWORDS: cement-stabilized layers, plastic waste, recycling.

DOI: 10.7409/rabdim.023.012

¹⁾ Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Katedra Dróg, Mostów, Kolei i Lotnisk, Wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 41, 50-370 Wrocław; b.krawczyk@pwr.edu.pl (✉)

²⁾ Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Katedra Dróg, Mostów, Kolei i Lotnisk; piotr.mackiewicz@pwr.edu.pl

³⁾ Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Katedra Dróg, Mostów, Kolei i Lotnisk; dariusz.dobrucki@pwr.edu.pl

1. WPROWADZENIE

Temat ponownego wykorzystania różnych materiałów z recyklingu w budownictwie drogowym jest tematem bardzo aktualnym, także w Polsce, o czym świadczą przeprowadzone w ostatnich latach programy badawcze [1-7] i dostępne publikacje, jak choćby [8, 9]. Do tej pory w ograniczonym zakresie analizowano możliwość wykorzystania problematycznych odpadów z recyklingu tworzyw sztucznych.

Tworzywa sztuczne (zwane potocznie plastikami) to materiały pochodzenia organicznego, produkowane z surowców kopalnych lub odnawialnych. Z ekonomicznego i technologicznego punktu widzenia odpady tworzyw sztucznych stanowią potencjalne alternatywne źródło materiałów, mogących po odpowiednim przetworzeniu zastąpić klasyczne materiały wykorzystywane w budownictwie drogowym. Podział tworzyw sztucznych, materiały z recyklingu tworzyw sztucznych oraz ich wykorzystanie w różnych gałęziach przemysłu omówione zostało szeroko w [10] oraz – przez autorów – w [11]. We wstępnych badaniach [11] wykazano również, że największy potencjał wykorzystania odpadów tworzyw sztucznych w inżynierii drogowej istnieje przy wytwarzaniu mieszanek związanych cementem, do których stosować można niesegregowane odpady (w odróżnieniu od regranulatów), niemające innego znanego zastosowania w przemyśle.

Dotychczas nie opracowano skutecznych recept uwzględniających dodawanie odpadów z tworzyw sztucznych do materiałów budowlanych zawierających cement. Ze względu na dużą niejednorodność odpadów wymagane jest wykonywanie odrębnych badań w zależności od ich typu. Znane są sposoby dodawania odpadów do materiałów w budownictwie kubaturowym. Stosuje się je jako dodatek do cegieł [12, 13], kostek brukowych [14] oraz – ze względu na ich małą masę – do produkcji różnych płytek [15, 16]. Zauważono także możliwość stosowania odpadów w budownictwie drogowym celem częściowego lub całkowitego zastąpienia kruszywa [17-20]. Stwierdzono także przydatność odpadów do stabilizacji lub wzmocnienia różnych gruntów. Przeprowadzono eksperymenty polegające na wzmocnianiu gruntów gliniastych dodatkiem odpadów w zakresie 4%, wskazując na zmianę wskaźnika CBR [21]. Stosowano w gruntach również włókna o różnych wymiarach, analizując zmiany wilgotności oraz gęstości [22], a także wytrzymałości na ściskanie [23]. W pracy [24] analizowano także różne rozmiary odpadów z tworzyw sztucznych, dążąc do optymalizacji ich doboru dla wybranych cech materiałowych. W tym przypadku wyniki pokazały, że zastosowanie zawartości 3% wag. odpadowego włókna 10 cm z tworzywa sztucznego doprowadziło do wzrostu modułu dynamicznego o 28,12% i zmniejszenia ugięcia powierzchni o 21,35% w porównaniu z gruntem naturalnym. Należy mieć

1. INTRODUCTION

Reuse of various waste materials in road construction is a subject of current interest - also in Poland, as shown by the research projects realized in the recent years [1-7] and the available publications, such as [8, 9]. So far, the possibility of reuse of problematic waste from the process of plastic recycling has been analyzed to a limited extent.

Synthetic materials (plastics) include materials of organic origin, produced from fossil or renewable resources. From technical and economic perspective, plastic waste constitutes an alternative source of materials that may, after adequate processing, replace classic materials used in road construction. Classification of plastics and waste materials from plastic recycling, along with their usage in various industry sectors, were discussed in detail in [10] and – by the authors – in [11]. Preliminary research [11] indicated that the greatest potential for reuse of plastic waste in road engineering is associated with production of cement-bound mixtures – in this case, it is possible to use non-segregated plastic waste (as opposed to regranulated plastics), which does not have any other known application in the industry.

No effective recipes incorporating addition of plastic waste to cement-bound road construction materials have been developed so far. Due to the considerable non-uniformity of waste, it is necessary to perform separate tests depending on the type of waste. There are known methods of adding waste to construction materials used in buildings. Waste may be used in bricks [12, 13], paving blocks [14] and – due to their low weight – in production of various tiles [15, 16]. It was also noted that waste material may be used in road construction as partial or complete replacement of aggregate [17-20]. Usability of waste in stabilization and improvement of various soils was noted as well. Experiments with improvement of clayey soils with waste content of up to 4% indicated an increase in CBR [21]. Fibers of various sizes were used in soils; their influence on moisture content and density [22] as well as compressive strength [23] was analyzed. In the work [24], different sizes of plastic waste were analyzed in order to optimize their selection with chosen material properties in mind. In this case the results indicated that use of 3% content of 10-cm fibers produced from plastic waste increased the dynamic modulus of soil by 28.12% and decreased its surface deflection by 21.35% in comparison to natural soil. However, one should bear in mind that the improvement in different soil properties varies greatly depending on the shape, type and preparation of a given waste material; their optimization must be adjusted to local conditions [25-28].

jednak na uwadze, że w zależności od kształtu, typu i sposobu przygotowania danego odpadu poprawa różnych cech gruntu jest mocno zindywidualizowana, a ich optymalizacja musi być dostosowana do warunków lokalnych [25-28]. Szczególnych trudności w tym względzie przysparzają nieposortowane, rozdrobnione odpady plastikowe, które są tematem niniejszej publikacji. Należy także zwrócić uwagę na fakt, że stosowanie różnych odpadów – jakkolwiek powodujących pewne ograniczenia cech fizycznych i wytrzymałości gruntów (w szczególności słabonośnych) – posiada istotny aspekt ekologiczny związany ze zmniejszeniem zanieczyszczenia środowiska.

Głównym celem niniejszego artykułu było zweryfikowanie możliwych zastosowań dla mieszanki rozdrobnionych odpadów plastikowych, cementu oraz kruszywa o uziarnieniu 0/2 mm (będącego z kolei odpadem przy produkcji kruszywa, ze względu na ograniczone zastosowanie w budownictwie drogowym). Efektem badań jest uzyskanie produktu o powtarzalnych, stabilnych właściwościach, spełniającego wymagania techniczne stawiane mieszankom i gruntom związanym cementem, przeznaczonym do warstw konstrukcji nawierzchni i podłoża ulepszonego.

2. MATERIAŁ Z RECYKLINGU ODPADÓW PLASTIKOWYCH

Do badań wykorzystano odpady plastikowe z grupy „19 12 12” (zmieszane substancje i przedmioty, powstałe z mechanicznej obróbki odpadów) [29] pozostałe po przesortowaniu odpadów plastikowych i wyselekcjonowaniu wartościowych materiałów jednorodnych o znanych właściwościach fizyko-chemicznych, z których następnie produkowane są regranulaty do zastosowań w wielu gałęziach przemysłu [10, 11].

Odpady z tej grupy nie mają obecnie zastosowania w przemyśle, nie są poddane dalszemu recyklingowi i zalegają na składowiskach. Autorzy proponują zastosowanie tej właśnie grupy odpadów, po rozdrobnieniu, do wytworzenia mieszanek związanych cementem przeznaczonych do wykonania warstw konstrukcji nawierzchni drogowych i ulepszonego podłoża. Takie zastosowanie materiału z recyklingu odpadów plastikowych nie wymaga pracochłonnej segregacji, która zwykle jest głównym kosztem w procesie recyklingu.

Należy pamiętać, że odpady plastikowe z grupy „19 12 12” charakteryzują się pewną niejednorodnością, która może mieć wpływ na końcowe właściwości fizyko-mechaniczne produktu (mieszanki związanej cementem). Konieczne jest określenie warunków jednorodności takich odpadów i wstępna kontrola, np. przez określenie gęstości rozdrobnionych odpadów. W dalszej części opracowania do wytworzenia mieszanek związanych cementem wykorzystano rozdrobnione zmieszane

Particular difficulties in this aspect are associated with unsorted, fragmented plastic waste, which is the subject of this publication. It is also noteworthy that usage of various waste materials – while resulting in certain limitations in physical properties and strength of soils (especially weak soils) – significantly contributes to reduction in environmental pollution.

The primary aim of this article was to verify the potential applications of a mixture composed of fragmented plastic waste, cement and 0/2 mm aggregate (which may be also treated as waste from aggregate production; it is an excess fraction due to its limited applications in road construction). The research resulted in development of a product with repeatable, stable properties, meeting the technical requirements pertaining to cement-bound mixtures and soils for pavement structures and improved subgrade.

2. MATERIAL FROM PLASTIC WASTE RECYCLING

The tests were performed on plastic waste from the group “19 12 12” (mixed substances and items from mechanical treatment of wastes) [29], remaining after plastic waste had been sorted and valuable uniform materials of known physico-chemical properties had been extracted for production of regranulated plastic, used in many industry sectors [10, 11].

Waste materials from this group do not currently have any known applications, they are not subject to further recycling and are stored in landfills. The authors propose to use this particular group of waste – after fragmentation – in production of cement-bound mixtures for pavement structures and improved subgrade. The intended use of the leftover material from plastic waste recycling will not require laborious segregation, which is usually the main component in recycling costs.

One should bear in mind that plastic waste from the group “19 12 12” is characterized by a certain non-uniformity, which may affect the final physico-mechanical properties of the obtained product (cement-bound mixture). It is necessary to define the requirements regarding uniformity of such waste and perform preliminary verification, e.g. by determining the density of fragmented waste. Cement-bound mixtures discussed in further parts of this article were produced using fragmented mixed plastic waste with the bulk density (of the fragmented mixture) of 1.195 g/cm^3 . Fragmented plastic waste used in the research project is shown in Fig. 1.

odpady plastikowe o gęstości objętościowej (rozdrobnionej mieszanki) $1,195 \text{ g/cm}^3$. Widok rozdrobionych odpadów plastikowych użytych do realizacji programu badawczego przedstawiono na Rys. 1.

3. KRUSZYWO ODPADOWE Z PRODUKCJI KRUSZYW NATURALNYCH

Do wytworzenia mieszanek związanych cementem wykorzystano kruszywo granodiorytowe 0/2 mm, będące odpadem z produkcji kruszywa łamanego. Kruszywa granodiorytowe spełniają wymagania do zastosowania m.in. w produkcji mas bitumicznych oraz betonów. Mogą być stosowane do różnych warstw nawierzchni drogowych. Kruszywo przedstawiono na Rys. 2. Gęstość objętościowa ziaren kruszywa oznaczona metodą piknometryczną wynosiła $2,71 \text{ g/cm}^3$. Skład ziarnowy kruszywa przedstawiono w Tabl. 1.

Table 1. Particle size distribution of the granodiorite aggregate used in the cement-bound mixtures
Tablica 1. Skład ziarnowy kruszywa granodiorytowego do mieszanek związanych cementem

Sieve size Rozmiar sита # [mm]	Retained on sieve Pozostaje na sicie [%]	Passing Przesiew [%]
8	0.0	100
4	0.1	99.9
2	7.0	92.9
1	25.4	67.6
0.5	18.4	49.1
0.25	13.5	35.6
0.125	11.0	24.6
0.063	8.4	16.2
0	16.2	0.0
Total / Suma	100.0	

Widok kruszywa 0/2 mm po wymieszaniu z rozdrobionymi odpadami plastikowymi na mokro i wysuszeniu przedstawiono na Rys. 3. Uzyskano materiał o jednolitej barwie.



Fig. 1. Fragmented plastic waste with the bulk density of 1.195 g/cm^3

Rys. 1. Rozdrobnione odpady plastikowe o gęstości $1,195 \text{ g/cm}^3$



Fig. 2. The used 0/2 mm granodiorite aggregate
Rys. 2. Kruszywo granodiorytowe 0/2 mm

View of the 0/2 mm aggregate after “wet” mixing with fragmented plastic waste and drying is shown in Fig. 3. Uniform coloring of the material was obtained.



Fig. 3. Mixture of the 0/2 mm aggregate and the fragmented plastic waste
Rys. 3. Mieszanka kruszywa 0/2 mm i rozdrobionych odpadów plastikowych

4. WYMAGANIA TECHNICZNE

Możliwość wykorzystania rozdrobnionych odpadów plastikowych do mieszanek związanych cementem przeanalizowano w odniesieniu do wytycznych Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad WT-5 [30] oraz katalogów typowych konstrukcji nawierzchni [31, 32]. Najistotniejsze wymagania techniczne zestawiono w Tabl. 2 i 3. Pozostałe wymagania znaleźć można w [33-37].

Table 2. Requirements pertaining to compressive strength class of cement-stabilized mixtures depending on the pavement layer

Tablica 2. Wymagania dotyczące klasy wytrzymałości na ściskanie mieszanek stabilizowanych cementem w zależności od przeznaczenia warstwy

Pavement layer type Rodzaj warstwy w konstrukcji nawierzchni	Traffic categories and the respective required compressive strength classes Kategorie ruchu i odpowiadające im klasy wytrzymałości na ściskanie		
	KR1-KR2	KR3-KR4	KR5-KR7
Improved subgrade / Podłoże ulepszone	C1.5/2.0 ^{*)} C0.4/0.5 ^{**)}	C1.5/2.0	C1.5/2.0
Subbase / Podbudowa pomocnicza	C1.5/2.0	C3/4	C5/6
Base course / Podbudowa zasadnicza	C3/4 (no greater than 6 MPa / nie więcej niż 6 MPa)	C5/6 (no greater than 10 MPa / nie więcej niż 10 MPa)	C8/10 (no greater than 20 MPa / nie więcej niż 20 MPa)

^{*)} acc. / wg [30], ^{**) acc. / wg [31, 32]}

5. BADANIA MIESZANEK ZWIĄZANYCH CEMENTEM

W zakresie niniejszego projektu badawczego przebadano 15 zarobów o różnej zawartości cementu, kruszywa 0/2 i rozdrobnionych odpadów plastikowych w mieszance. Dla każdego zarobu wykonano próbki do badania wytrzymałości wczesnej (7-dniowej), wytrzymałości docelowej (28-dniowej) i mrozoodporności. Sumarycznie przebadano około 150 próbek. Wytworzono mieszanki o zawartości cementu od 6% do 10% (w stosunku do masy kruszywa) i zawartości rozdrobnionych odpadów plastikowych od 0 do 300 kg, dozowanych do 1 m³ mieszanki referencyjnej kruszywa, cementu i wody (mieszanki mineralno-cementowej – MMC). Do badań użyto cementu klasy 32,5. Wyniki badań zagęszczalności (wilgotności optymalnej i gęstości objętościowej szkieletu gruntowego) mieszanki referencyjnej kruszywa z cementem, bez dodatku rozdrobnionych odpadów plastikowych, przedstawiono na Rys. 4 i 5. Porównanie przykładowej próbki o dużej zawartości rozdrobnionych odpadów plastikowych oraz próbki referencyjnej (bez rozdrobnionych odpadów plastikowych) po rozformowaniu przedstawiono na Rys. 6.

4. TECHNICAL REQUIREMENTS

Possibility of use of fragmented plastic waste in cement-bound mixtures was analyzed in the light of the WT-5 requirements of the General Directorate for National Roads and Motorways [30] and the current Polish catalogs of typical pavement structures [31, 32]. A compilation of the most significant technical requirements is presented in Tables 2 and 3. The remaining requirements may be found in [33-37].

Table 3. Requirements pertaining to frost resistance of cement-stabilized mixtures depending on the pavement layer

Tablica 3. Wymagania dotyczące mrozoodporności mieszanek stabilizowanych cementem w zależności od przeznaczenia warstwy

Pavement layer type Rodzaj warstwy w konstrukcji nawierzchni	Frost resistance Mrozoodporność
	KR1 - KR7
Subbase Podbudowa pomocnicza	≥ 0.6
Base course Podbudowa zasadnicza	≥ 0.7

5. TESTING OF CEMENT-BOUND MIXTURES

Within the discussed research project, 15 trial mixtures were prepared with varying content of cement, 0/2 aggregate and fragmented plastic waste. Specimens for testing of early (7-day) strength, final (28-day) strength and frost resistance were prepared for every mixture. 150 specimens were tested in total. Cement content in the produced mixtures ranged from 6% to 10% (relative to aggregate, by mass); added quantity of fragmented plastic waste ranged

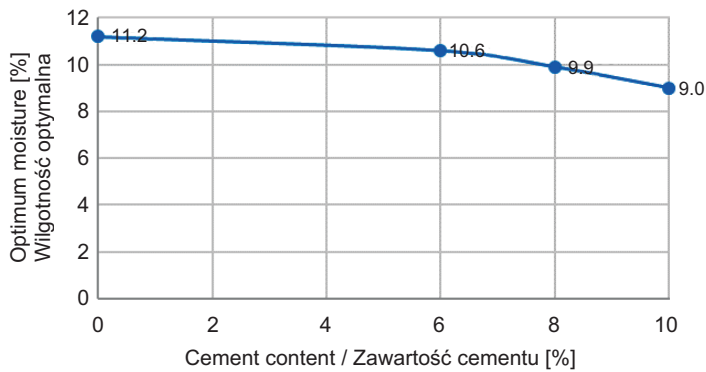


Fig. 4. Optimum moisture of the reference mixture (CBM) depending on cement content

Rys. 4. Wilgotność optymalna MMC w zależności od zawartości cementu w mieszance

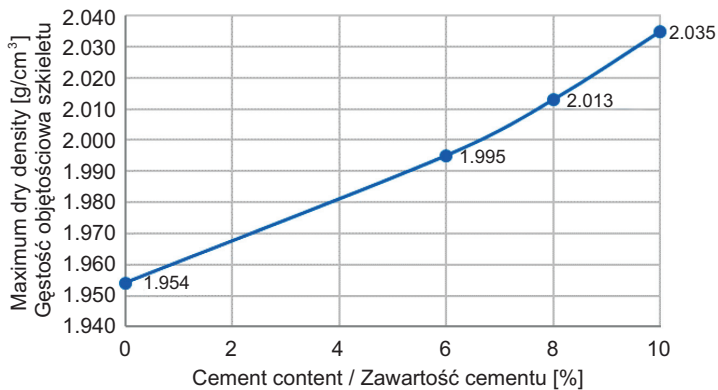


Fig. 5. Maximum dry density of the reference mixture (CBM) depending on cement content

Rys. 5. Gęstość objętościowa szkieletu MMC w zależności od zawartości cementu w mieszance

Zawartość rozdrobnionych odpadów plastikowych zawierała się w przedziale od 80 kg w 1 m³ zagęszczonej mieszanki (przy 100 kg dozowanych dodatkowo do masy mieszanki potrzebnej do przygotowania 1 m³ mieszanki referencyjnej) do 169 kg w 1 m³ zagęszczonej mieszanki (przy 300 kg dozowanych dodatkowo do masy mieszanki potrzebnej do przygotowania 1 m³ mieszanki referencyjnej), przy czym zawartość odpadów plastikowych nie zależy od zawartości cementu w mieszance. Ilość rozdrobnionych odpadów plastikowych w sposób zdecydowany wpływała natomiast na gęstość objętościową mieszanki. Należy sobie zdawać sprawę, że przykładowo dodanie 300 kg rozdrobnionych odpadów plastikowych dodatkowo do masy mieszanki potrzebnej do przygotowania 1 m³ mieszanki referencyjnej o zawartości cementu 6% zwiększa jej masę o 13%, przy jednoczesnym wzroście objętości o prawie 60% (spadek gęstości objętościowej szkieletu o około 35%). Analogicznie kruszywo potrzebne do wytworzenia 1 m³ mieszanki referencyjnej (bez rozdrobnionych odpadów plastikowych) wystarcza do wytworzenia prawie

from 0 to 300 kg, added to 1 m³ of the reference mixture of aggregate, cement and water (the reference cement-bound mixture – CBM). A 32.5 class cement was used in the research. Results of the performed compaction tests (optimum moisture and maximum dry density) for the reference cement-bound mixture without plastic waste are shown in Figs 4 and 5. Fig. 6 presents a comparison between an example specimen with considerable content of fragmented plastic waste and a reference specimen (without plastic waste) after demolding.



Fig. 6. Specimen with considerable content of fragmented plastic waste and a reference specimen

Rys. 6. Widok próbki o dużej zawartości rozdrobnionych odpadów plastikowych oraz próbki referencyjnej

The content of fragmented plastic waste in the compacted mixture ranged from 80 kg per 1 m³ (when 100 kg of waste was added to 1 m³ of the reference CBM before compaction) to 169 kg per 1 m³ (when 300 kg of waste was added to 1 m³ of the reference CBM before compaction). The content of plastic waste does not depend on the content of cement in the mixture. However, the quantity of fragmented plastic waste added to the mixture significantly affected its density. One should bear in mind that – for example – addition of 300 kg of fragmented plastic waste to 1 m³ of the reference CBM with 6% cement content increases its mass by 13%, with a simultaneous increase in its volume by nearly 60% (decrease in maximum dry density by approx. 35%). Similarly, the quantity of aggregate needed for production of 1 m³ of the reference mixture (without waste) is sufficient for production of

1,8 m³ mieszanki o wspomnianej w powyższym przykładzie zawartości rozdrobnionych odpadów plastikowych (300 kg odpadów dozowanych dodatkowo do masy mieszanki potrzebnej do przygotowania 1 m³ mieszanki referencyjnej).

Skład przykładowych mieszanek (procentowy oraz w przeliczeniu na kg/m³), przy ilości cementu 6% w stosunku do masy kruszywa 0/2, przedstawiono na Rys. 7. Wyniki badań zagęszczalności mieszanek z dodatkiem rozdrobnionych odpadów plastikowych przedstawiono na Rys. 8 i 9.

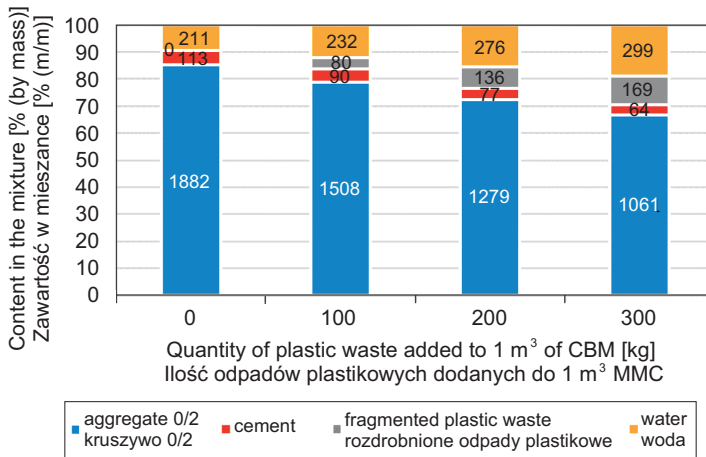


Fig. 7. Compositions of mixtures with 6% of cement (relative to the 0/2 aggregate, by mass); the vertical axis represents percentage in the mixture (by mass); the numbers shown on bars represent the resultant quantities in kg/m³

Rys. 7. Skład mieszanki przy ilości cementu 6% w stosunku do masy kruszywa 0/2; na osi pionowej przedstawiono skład procentowy (m/m); liczby widoczne na słupkach odzwierciedlają skład w przeliczeniu na kg/m³

Wilgotność optymalna badanych mieszanek zmieniała się w sposób bardzo istotny w zależności od zawartości odpadów plastikowych w mieszance – od 12,4% po dodaniu 100 kg rozdrobnionych odpadów plastikowych do 1 m³ mieszanki referencyjnej do 23,1% po dodaniu 300 kg (tymczasem wilgotność optymalna mieszanki referencyjnej wynosiła 9-11%, w zależności od ilości cementu). W sposób bardzo istotny zmieniała się również gęstość objętościowa szkieletu mieszanki – od około 1,7 g/cm³ po dodaniu 100 kg rozdrobnionych odpadów plastikowych do 1 m³ mieszanki referencyjnej do 1,3 g/cm³, po dodaniu 300 kg (gęstość objętościowa szkieletu mieszanki referencyjnej wynosiła około 2 g/cm³). Stwierdzono także, że zawartość cementu w mieszankach z dodatkiem rozdrobnionych odpadów plastikowych nie miała istotnego wpływu na wilgotność optymalną i gęstość objętościową szkieletu.

almost 1.8 m³ of the aforementioned example mixture with plastic waste (addition of 300 kg of fragmented plastic waste to 1 m³ of the reference CBM before compaction).

Compositions (percentages and the resultant quantities in kg/m³) of example mixtures with 6% of cement (relative to the 0/2 aggregate, by mass) are presented in Fig. 7. Results of the compaction tests performed on the mixtures with added fragmented plastic waste are shown in Figs 8 and 9.

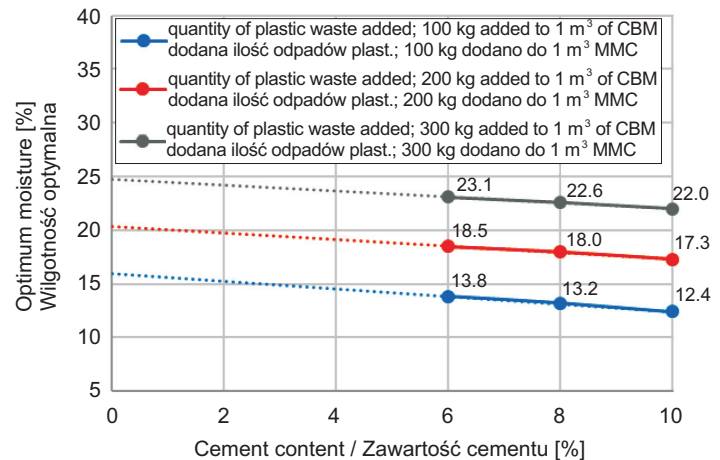


Fig. 8. Optimum moisture depending on cement content
Rys. 8. Wilgotność optymalna w zależności od zawartości cementu w mieszance

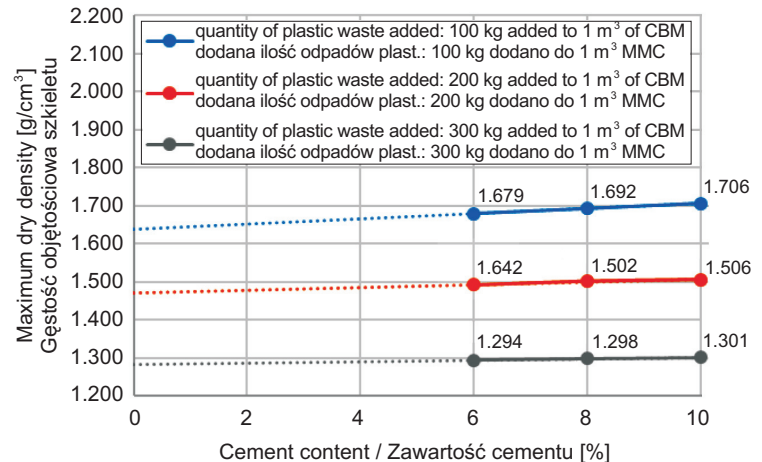


Fig. 9. Maximum dry density depending on cement content
Rys. 9. Gęstość objętościowa szkieletu w zależności od zawartości cementu w mieszance

Optimum moisture of the tested mixtures changed very significantly depending on the content of plastic waste – from 12.4% after addition of 100 kg of fragmented waste to 1 m³ of the reference mixture to 23.1% after addition of

Na próbkach uformowanych z mieszanek o zbadanej zagęszczalności przeprowadzono badania wytrzymałości na ściskanie i mrozoodporności. Widok stanowiska badawczego do badań wytrzymałości na ściskanie przedstawiono na Rys. 10. Wyniki badań wytrzymałości wczesnej (po 7 dniach) przedstawiono na Rys. 11 i 12. Wyniki badań wytrzymałości docelowej (po 28 dniach) przedstawiono na Rys. 13 i 14. Przedstawione wyniki badań wytrzymałości są średnią z trzech uzyskanych wartości.



Fig. 10. Compressive strength testing
Rys. 10. Badanie wytrzymałości na ściskanie

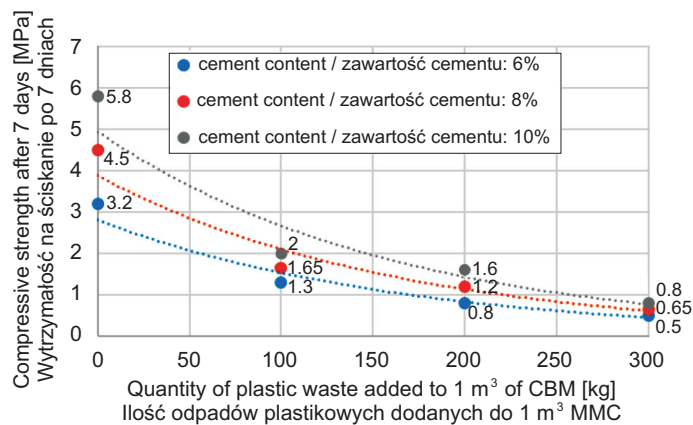


Fig. 11. Compressive strength after 7 days depending on the quantity of plastic waste added to the mixture
Rys. 11. Wytrzymałość na ściskanie po 7 dniach w zależności od zawartości odpadów plastikowych w mieszance

Wyniki wytrzymałości na ściskanie po 7 dniach zależały w sposób istotny od zawartości rozdrobnionych odpadów plastikowych w mieszance oraz od zawartości cementu, przy czym wytrzymałość próbek wykonanych z mieszanki referencyjnej (bez rozdrobnionych odpadów plastikowych) była zdecydowanie wyższa – od 3,2 MPa do 5,8 MPa. Niemniej jednak wyniki wytrzymałości na ściskanie próbek z mieszanek z dodatkiem rozdrobnionych odpadów plastikowych uznać można

300 kg (while the optimum moisture of the reference mixture itself ranged from 9 to 11%, depending on the cement content). The maximum dry density also changed very significantly – from approx. 1.7 g/cm^3 after addition of 100 kg of fragmented waste to 1 m^3 of the reference mixture to 1.3 g/cm^3 after addition of 300 kg (maximum dry density of the reference mixture was around 2 g/cm^3). It was also noted that cement content in the mixtures containing fragmented plastic waste had no significant effect on the values of optimum moisture and maximum dry density.

Specimens formed from mixtures of known compaction properties were subjected to testing of compressive strength and frost resistance. Laboratory station for compressive strength testing is shown in Fig. 10. The obtained results of early (7-day) strength are shown in Figs 11 and 12. The results of final (28-day) strength are presented in Figs 13 and 14. The given strength results are the average values from three measurements.

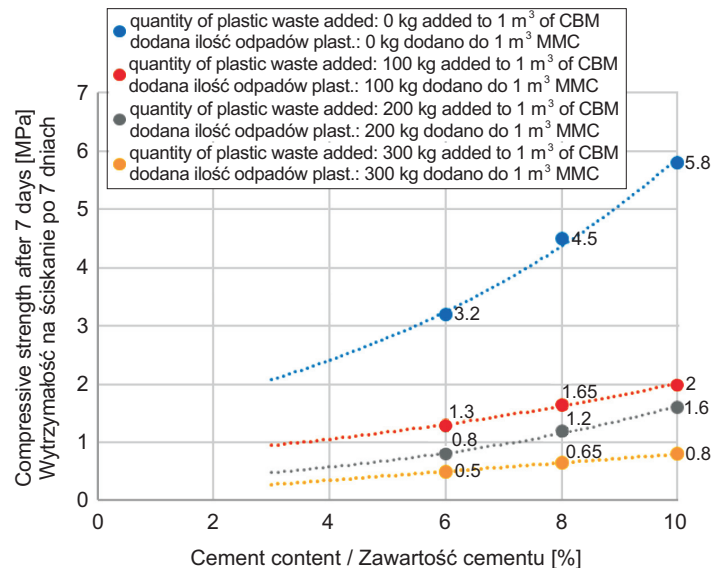


Fig. 12. Compressive strength after 7 days depending on cement content
Rys. 12. Wytrzymałość na ściskanie po 7 dniach w zależności od zawartości cementu w mieszance

The 7-day compressive strength depended significantly both on the content of fragmented plastic waste and the content of cement in the mixture. Strength of specimens of the reference mixture (without fragmented waste) was considerably greater – ranging from 3.2 MPa to 5.8 MPa.

za zadowalające w odniesieniu do aktualnych wymagań technicznych. Uwzględniając różne zawartości cementu, wyniki zawierały się w przedziale od 0,5 MPa (w przypadku mieszank o zawartości 300 kg rozdrobnionych odpadów plastikowych dodanych do 1 m³ MMC), do 2,0 MPa (w przypadku mieszank o zawartości 100 kg rozdrobnionych odpadów plastikowych dodanych do 1 m³ MMC).

Wyniki wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach również zależały w sposób istotny od zawartości rozdrobnionych odpadów plastikowych w mieszance oraz od zawartości cementu. Tak jak w przypadku wyników 7-dniowych, wytrzymałość próbek wykonanych z mieszanki referencyjnej (bez rozdrobnionych odpadów plastikowych) była zdecydowanie wyższa – wynosiła od 4,4 MPa do 8,5 MPa. Wyniki wytrzymałości na ściskanie próbek z mieszank z dodatkiem rozdrobnionych odpadów plastikowych spełniały jednak warunki stawiane mieszankom związanym cementem w świetle aktualnych wymagań technicznych (Tabl. 2). Uwzględniając różne zawartości cementu, zawierały się one w przedziale od 0,7 MPa (w przypadku mieszank o zawartości 300 kg rozdrobnionych odpadów plastikowych dodanych do 1 m³ MMC), do 3,1 MPa (w przypadku mieszank o zawartości 100 kg rozdrobnionych odpadów plastikowych dodanych do 1 m³ MMC).

However, the results of compressive strength obtained for specimens containing fragmented plastic waste may be considered satisfactory in the light of the current technical requirements. Taking into account various cement contents, the results ranged from 0.5 MPa (in the case of mixtures with 300 kg of fragmented plastic waste added to 1 m³ of CBM) to 2.0 MPa (in the case of mixtures with 100 kg of fragmented plastic waste added to 1 m³ of CBM).

The 28-day compressive strength also depended significantly both on the content of fragmented plastic waste and the content of cement in the mixture. Like in the case of results obtained after 7 days, strength of specimens of the reference mixture (without fragmented waste) was considerably greater – it ranged from 4.4 MPa to 8.5 MPa. The results of compressive strength obtained for specimens containing fragmented plastic waste were still satisfactory in the light of the current technical requirements (Table 2). Taking into account various cement contents, the results ranged from 0.7 MPa (in the case of mixtures with 300 kg of fragmented plastic waste added to 1 m³ of CBM) to 3.1 MPa (in the case of mixtures with 100 kg of fragmented plastic waste added to 1 m³ of CBM).

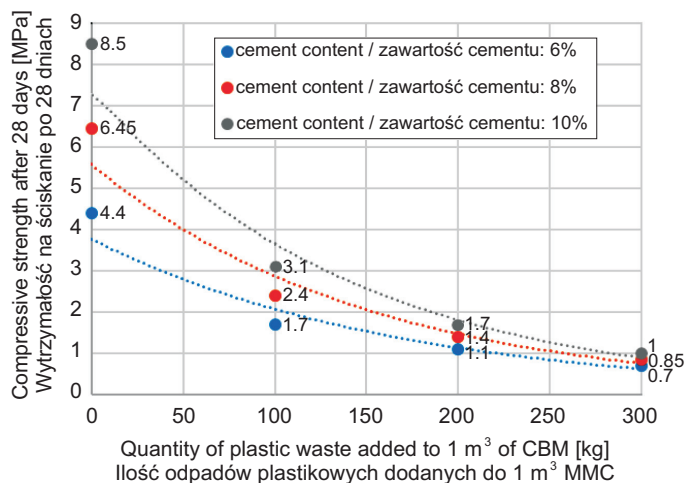


Fig. 13. Compressive strength after 28 days depending on the quantity of plastic waste added to the mixture

Rys. 13. Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach w zależności od zawartości odpadów plastikowych w mieszance

Widok próbek o różnej zawartości rozdrobnionych odpadów plastikowych po badaniu wytrzymałości na ściskanie przedstawiono na Rys. 15-18. Wyraźnie widoczna jest zmiana mechanizmu zniszczenia próbki, zachodząca wraz ze wzrostem zawartości rozdrobnionych odpadów plastikowych w mieszance. Próbką referencyjną w procesie zniszczenia wykazywała charakter pęknięcia kruchego, natomiast wraz ze wzrostem

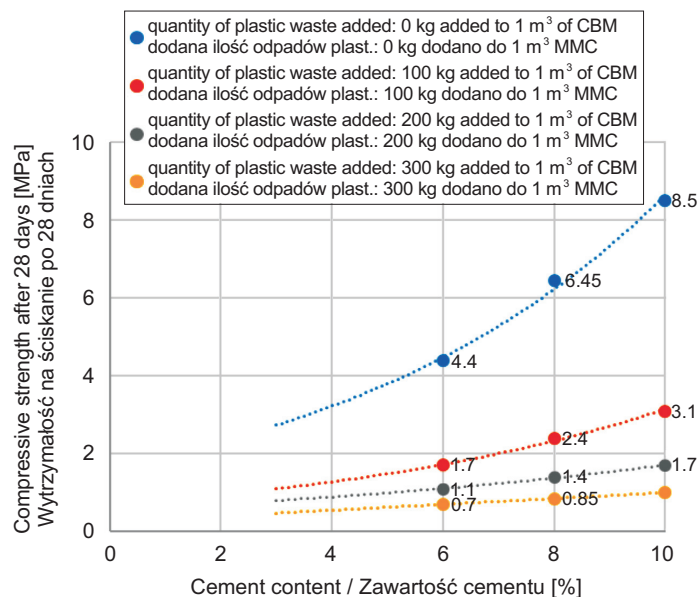


Fig. 14. Compressive strength after 28 days depending on cement content

Rys. 14. Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach w zależności od zawartości cementu w mieszance

Specimens with different content of fragmented plastic waste after compressive strength testing are shown in Figs 15-18. A change in the failure mechanism with an increase in the waste content is clearly visible. While the reference

zawartości rozdrobnionych odpadów plastikowych próbki zaczynały wykazywać dodatkowo cechy lepkoplastyczne – obserwowano wolniejsze pękanie. Zmiany strukturalne, mechanizmy zniszczenia i kryteria zmęczeniowe dla tej grupy materiałów będą przedmiotem badań autorów w dalszym etapie prac.

specimen displayed brittle failure, the specimens with increasing waste content exhibited gradually increasing viscoplastic characteristics – the cracking progressed more slowly. Structural changes, failure mechanisms and fatigue criteria for this group of materials will be the subject of the authors' future research.



Fig. 15. Reference specimen (without fragmented plastic waste) after failure

Rys. 15. Widok po zniszczeniu próbki referencyjnej (bez rozdrobnionych odpadów plastikowych)



Fig. 16. Specimen after failure – mixture obtained by adding 100 kg of fragmented plastic waste to 1 m³ of CBM

Rys. 16. Widok po zniszczeniu próbki z mieszanki uzyskanej przez dodanie 100 kg rozdrobnionych odpadów plastikowych do 1 m³ MMC



Fig. 17. Specimen after failure – mixture obtained by adding 200 kg of fragmented plastic waste to 1 m³ of CBM

Rys. 17. Widok po zniszczeniu próbki z mieszanki uzyskanej przez dodanie 200 kg rozdrobnionych odpadów plastikowych do 1 m³ MMC



Fig. 18. Specimen after failure – mixture obtained by adding 300 kg of fragmented plastic waste to 1 m³ of CBM

Rys. 18. Widok po zniszczeniu próbki z mieszanki uzyskanej przez dodanie 300 kg rozdrobnionych odpadów plastikowych do 1 m³ MMC

Próbki poddano 14 cyklom zamrażania i odmrażania w celu określenia mrozoodporności mieszank. Widok przykładowej partii próbek w komorze klimatycznej przedstawiono na Rys. 19. Widok przykładowej partii próbek zamrażanych przed badaniem wytrzymałości na ściskanie oraz odpowiadających im próbek, które nie były poddane zamrażaniu, przedstawiono na Rys. 20. Wyniki badań wytrzymałości po zamrażaniu przedstawiono na Rys. 21 i 22, zaś współczynniki mrozoodporności – na Rys. 24 i 25.

In order to determine their frost resistance, specimens were subjected to 14 freeze-thaw cycles. View of an example batch of specimens in the climatic chamber is shown in Fig. 19. A comparison of four specimens after freeze-thaw cycles and their respective counterparts that were not subjected to freezing-thawing is shown in Fig. 20. Strength of specimens subjected to freeze-thaw cycles is shown in Figs 21 and 22, while the frost resistance ratios are given in Figs 24 and 25.



Fig. 19. Specimens in the climatic chamber
Rys. 19. Widok próbek w komorze klimatycznej



Fig. 20. An example batch of specimens before frost resistance testing – specimens after freeze-thaw cycles and specimens that were not subjected to freezing-thawing
Rys. 20. Widok przykładowych partii próbek przed badaniem mrozoodporności – próbki poddane cyklowi zamrażania oraz próbki niepoddane zamrażaniu

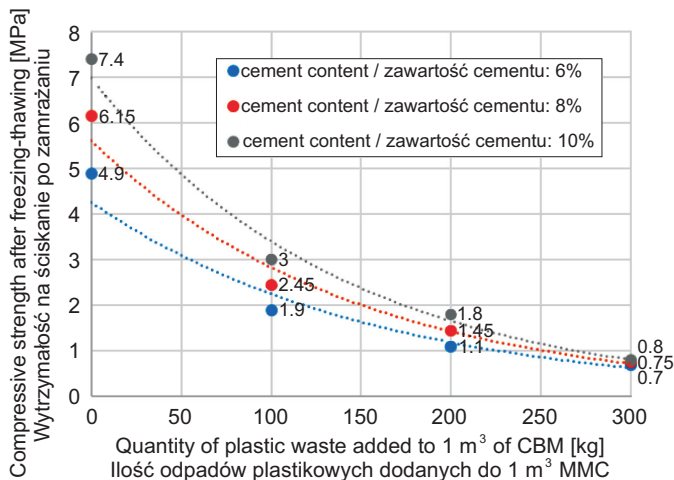


Fig. 21. Compressive strength after freezing-thawing depending on the quantity of plastic waste added to the mixture
Rys. 21. Wytrzymałość na ściskanie po zamrażaniu w zależności od zawartości odpadów plastikowych w mieszance

Wyniki wytrzymałości na ściskanie po zamrażaniu są podobne do wyników 28-dniowych – również zależały w sposób istotny od zawartości rozdrobnionych odpadów plastikowych w mieszance oraz od zawartości cementu. Wytrzymałość próbek wykonanych z mieszanki referencyjnej (bez rozdrobnionych odpadów plastikowych) zawierała się w przedziale od 4,9 MPa

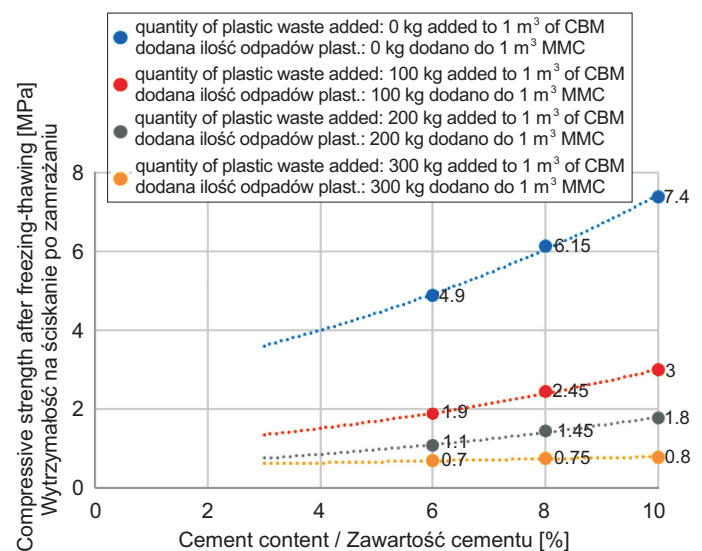


Fig. 22. Compressive strength after freezing-thawing depending on cement content
Rys. 22. Wytrzymałość na ściskanie po zamrażaniu w zależności od zawartości cementu w mieszance

do 7,4 MPa, w zależności od zawartości cementu. Wyniki wytrzymałości na ściskanie próbek z mieszanek z dodatkiem rozdrobnionych odpadów plastikowych, uwzględniając różne zawartości cementu, zawierały się w przedziale od 0,7 MPa (w przypadku mieszanek o zawartości 300 kg rozdrobnionych odpadów plastikowych dodanych do 1 m³ MMC) do 3,0 MPa (w przypadku mieszanek o zawartości 100 kg rozdrobnionych odpadów plastikowych dodanych do 1 m³ MMC). Nie stwierdzono istotnego wpływu zawartości rozdrobnionych odpadów plastikowych w mieszance na spadek jej mrozoodporności. Część wyników wytrzymałości na ściskanie po zamrażaniu była nawet wyższa niż wytrzymałość próbek niepoddanych zamrażaniu (współczynnik mrozoodporności > 1). Wszystkie próbki z dodatkiem rozdrobnionych odpadów plastikowych spełniały warunki mrozoodporności stawiane w aktualnie obowiązujących wymaganiach technicznych. W przypadku próbek referencyjnych (bez dodatku rozdrobnionych odpadów plastikowych) o dużej zawartości cementu można było natomiast zaobserwować „samoczynne” pęknięcia na skutek zamrażania (Rys. 23).



Fig. 23. Spontaneous cracking of a reference specimen with 10% cement content (without plastic waste) subjected to freezing Rys. 23. Samoczynne pęknięcie poddanej zamrażaniu próbki referencyjnej o zawartości cementu 10% (bez zawartości rozdrobnionych odpadów plastikowych)

Dodatkowo dla próbek o dużej zawartości rozdrobnionych odpadów plastikowych (300 kg dodane do 1 m³ MMC) – z uwagi na ich odmienny mechanizm zniszczenia w badaniach ściskania (Rys. 17) – przeprowadzono badania kalifornijskiego wskaźnika nośności CBR. Badanie to wykonuje się także w przypadku określania właściwości fizyko-mechanicznych mieszanek związanych żużlem [30]. Wyniki badań przedstawiono na Rys. 26. Widok próbek do badania CBR pokazano na Rys. 27. Badanie przeprowadzono po 4 dniach nasączenia

The results of compressive strength after freezing-thawing are similar to those of 28-day strength – they also depended significantly on the content of fragmented plastic waste and the content of cement in the mixture. Strength of specimens of the reference mixture (without fragmented waste) ranged from 4.9 MPa to 7.4 MPa, depending on cement content. Taking into account various cement contents, the results ranged from 0.7 MPa (in the case of mixtures with 300 kg of fragmented plastic waste added to 1 m³ of CBM) to 3.0 MPa (in the case of mixtures with 100 kg of fragmented plastic waste added to 1 m³ of CBM). No significant impact of plastic waste content in the mixture on its frost resistance was observed. Some values of compressive strength after freezing-thawing proved even greater than the respective values obtained for specimens that had not been subjected to freezing-thawing (frost resistance ratio > 1). All the specimens containing fragmented plastic waste met the frost resistance criteria given in the current technical requirements. Moreover, in the case of reference specimens (without fragmented waste) with high cement content, “spontaneous” cracking due to freezing was observable (Fig. 23).

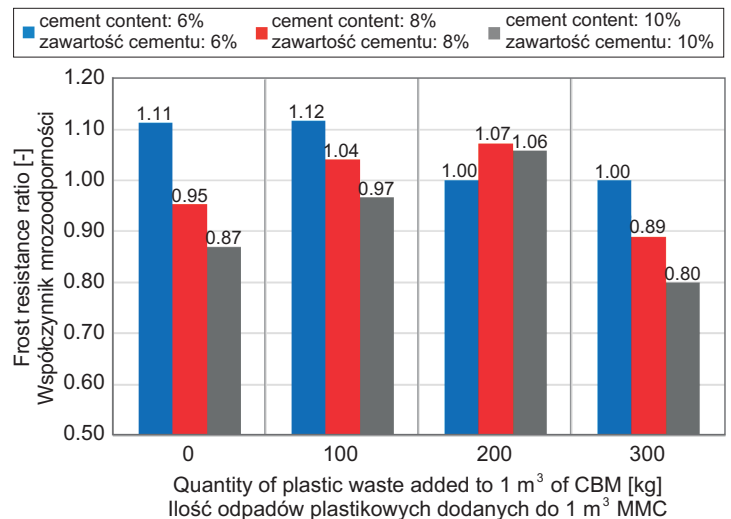


Fig. 24. Frost resistance ratio depending on the quantity of plastic waste added to the mixture

Rys. 24. Współczynnik mrozoodporności w zależności od zawartości odpadów plastikowych w mieszance

Additionally, due to their different failure mechanism in compressive strength tests (Fig. 17), specimens containing considerable quantities of fragmented plastic waste (300 kg added to 1 m³ of CBM) were subjected to California Bearing Ratio (CBR) testing. This test is also performed when physico-mechanical properties of slag-bound materials are determined [30]. CBR results are shown in Fig. 26. Specimens during preparation for CBR testing are shown

w wodzie. Otrzymane wyniki dla mieszanek o zawartości cementu 8-10% odpowiadają wymaganiom stawianym warstwom podłoża ulepszanego i warstwom mrozochronnym dla wszystkich kategorii ruchu wg [31, 32].

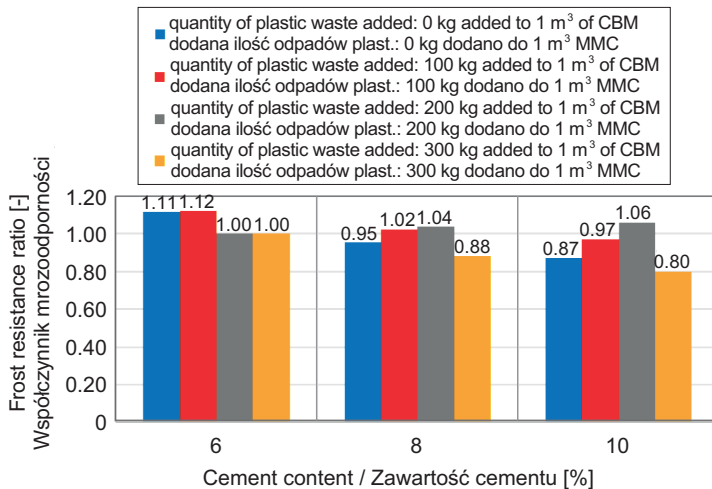


Fig. 25. Frost resistance ratio depending on cement content
Rys. 25. Współczynnik mrozoodporności w zależności od zawartości cementu w mieszance

6. WNIOSKI

W artykule przedstawione zostało rozwiązanie technologiczne zastosowania materiałów z recyklingu odpadów plastikowych w warstwach konstrukcji nawierzchni drogowych oraz ulepszanego podłoża. Wykazano możliwość wytworzenia pełnowartościowych materiałów do warstw związanych cementem, zawierających rozdrobnione odpady plastikowe z grupy „19 12 12” oraz kruszywo 0/2, będące produktem ubocznym przy produkcji kruszywa łamanych. Przydatność tego typu materiałów zweryfikowano w badaniach laboratoryjnych, a wyniki badań odniesiono do obowiązujących wymagań technicznych. Przedstawiona została propozycja rozwiązania bardzo aktualnego i istotnego problemu środowiskowego – zagospodarowania składowanych odpadów plastikowych z grupy „19 12 12”, pozostających po segregacji innych odpadów plastikowych. Efektem zrealizowanego programu badawczego jest m.in. zgłoszenie patentowe [38]. Dodatkowe ważne korzyści środowiskowo-ekonomiczne przy stosowaniu badanych mieszanek wynikać będą z ograniczenia wydobycia surowców naturalnych oraz ograniczenia emisji spalin w związku z mniejszą ilością transportów i mniejszym ciężarem materiałów w porównaniu do klasycznych mieszanek związanych cementem.

Bardzo istotne jest, że stosowanie materiałów z recyklingu w składzie warstw mrozochronnych i warstw podłoża ulepszanego w konstrukcji nawierzchni drogowych dopuszczone

in Fig. 27. The tests were performed after 4 days of immersion in water. The results obtained for mixtures with cement content of 8-10% meet the requirements for improved subgrade and capping layers across all traffic categories according to [31, 32].



Fig. 26. Specimen conditioning before CBR testing
Rys. 26. Widok próbek kondycjonowanych przed badaniem nośności CBR

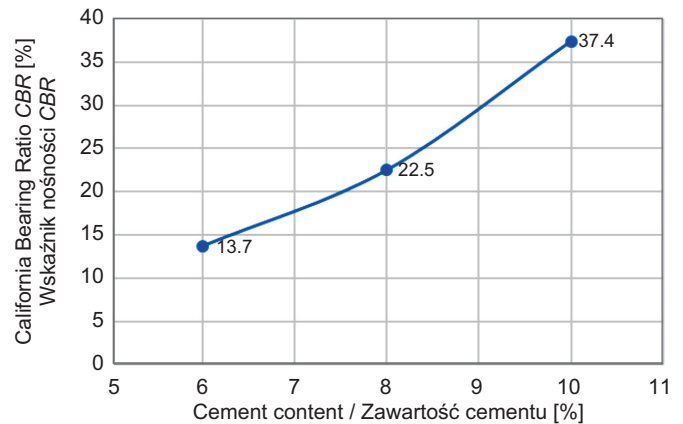


Fig. 27. California Bearing Ratio depending on cement content
Rys. 27. Wskaźnik nośności CBR w zależności od zawartości cementu w mieszance

6. CONCLUSIONS

The article presents a technological solution for use of materials obtained from plastic waste recycling in road pavement structures and improved subgrade. It was demonstrated that it is possible to produce fully usable materials for cement-bound layers containing plastic waste from the group “19 12 12” and 0/2 mm aggregate, which is a by-product from crushed aggregate production. Usability of such material was verified in laboratory tests, and the obtained results were evaluated in the light of the current technical requirements. The proposed solution addresses

jest już w obowiązujących katalogach typowych konstrukcji nawierzchni [31, 32]. Pamiętać jednak należy o tym, że na właściwości mieszanek znaczny wpływ ma rodzaj użytego kruszywa i rodzaj rozdrobnionych odpadów plastikowych (stopień rozdrobnienia, gęstość, zawartość zanieczyszczeń). Jakkolwiek zmiana składu mieszanki wymaga weryfikacji jej właściwości w badaniach laboratoryjnych przed wbudowaniem.

INFORMACJE DODATKOWE

Autorzy pragną skierować specjalne podziękowania do firmy PRO-TRA Building sp. z o.o. i pana Zbigniewa Ziajki za wsparcie procesu badawczego i dostarczenie materiałów do badań.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Alenowicz J., Dołżycki B., Jaskuła P.*: Wytyczne projektów RID GDDKIA: Załącznik nr 9.2.1. Wytyczne pozyskania i oceny przydatności destruktu i granulatu asfaltowego do recyklingu na gorąco w otaczarkach, 2019
- [2] *Alenowicz J., Dołżycki B., Jaskuła P.*: Wytyczne projektów RID GDDKIA: Załącznik nr 9.2.2. Zalecenia w zakresie produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych z granulatem asfaltowym w otaczarkach o działaniu cyklicznym, 2019
- [3] *Alenowicz J., Dołżycki B., Jaskuła P.*: Wytyczne projektów RID GDDKIA: Załącznik nr 9.2.3. Wytyczne cząstkowe w zakresie wymagań i projektowania mieszanek mineralno-asfaltowych z granulatem asfaltowym produkowanym na gorąco, 2019
- [4] *Dołżycki B.*: Wytyczne projektów RID GDDKIA: Załącznik nr 9.4.1. Wytyczne stosowania technologii recyklingu głębokiego na zimno z wykorzystaniem emulsji i cementu wraz zasadami projektowania nawierzchni z wykorzystaniem warstw z mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej (MCE), 2019
- [5] *Dołżycki B.*: Wytyczne projektów RID GDDKIA: Załącznik nr 9.4.2. Instrukcja projektowania i wbudowania mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE), 2019
- [6] *Mirski K., Bańkowski W., Horodecka R.*: Wytyczne projektów RID GDDKIA: Załącznik nr 9.4.3. Zalecenia bezpiecznego stosowania destruktu asfaltowego ze smołą w warstwach wykonanych w technologii mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych MCE, 2019
- [7] *Szydło A., Stilger-Szydło E., Krawczyk B., Mackiewicz P., Skotnicki Ł., Kuźniewski J., Dobruc D.*: Wytyczne projektów RID GDDKIA: Załącznik nr 9.6. Wytyczne wykorzystania materiałów pochodzących z recyklingu nawierzchni betonowych, 2018
- [8] *Krawczyk B., Szydło A., Mackiewicz P., Dobrucki D.*: Suitability of aggregate recycled from concrete pavements for layers made of unbound and cement bound mixtures. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **17**, 1, 2018, 39-53, DOI: 10.7409/rabdim.018.003
- a very current and significant environmental problem – re-use of the landfilled plastic waste from the group “19 12 12”, i.e. remains from segregation of other plastic wastes. The effects of the performed research project included, among others, a patent application [38]. Additional important environmental and economic benefits associated with the usage of the tested mixtures will result from reduced demand for natural resources as well as reduced emissions due to limited number of transports and lower weight of the material in comparison with typical cement-bound mixtures.
- Importantly, the possibility of usage of recycled materials in road pavement capping layers and improved subgrade has already been accepted in the current catalogs of typical pavement structures [31, 32]. However, one should bear in mind that the properties of the obtained mixtures are considerably affected by the type of the aggregate and the fragmented plastic waste used (degree of fragmentation, density, content of contaminants). Any changes in the composition of the mixture require laboratory verification of its properties before placement.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to thank the PRO-TRA Building sp. z o.o. company and Mr. Zbigniew Ziajka for their support of the research process and providing materials for the tests.

- [9] *Krawczyk B., Szydło A., Mackiewicz P., Dobrucki D.*: Assessment criteria of the recycled aggregate cement bound bases. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **18**, 2, 2019, 109-126, DOI: 10.7409/rabdim.019.007
- [10] Plastic – the Facts 2021. An analysis of European plastics production, demand and waste data. PlasticEurope Association of Plastics Manufacturers, 2021
- [11] *Krawczyk B., Szydło A., Mackiewicz P., Dobrucki D.*: Use of plastic waste in materials for road pavement construction and improved subgrade. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **21**, 3, 2022, 203-216, DOI: 10.7409/rabdim.022.012
- [12] *Aneke F.I., Shabangu C.*: Green-efficient masonry bricks produced from scrap plastic waste and foundry sand. *Case Studies in Construction Materials*, **14**, 2021, ID article: e00515, DOI: 10.1016/j.cscm.2021.e00515
- [13] *Limami H., Manssouri I., Cherkaoui K., Saadaoui M., Khaldoun A.*: Thermal performance of unfired lightweight clay bricks with HDPE & PET waste plastics additives. *Journal of Building Engineering*, **30**, 2020, ID article: 101251, DOI: 10.1016/j.job.2020.101251

- [14] *Hemalatha D.*: Reuse of waste plastics and demolition waste in the development of plastic paver block. *Journal of Scientific & Industrial Research*, **78**, 2019, 248-250
- [15] *Seghiri M., Boutoutaou D., Kriker A., Hachani M.I.*: The possibility of making a composite material from waste plastic. *Energy Procedia*, **119**, 2017, 163-169, DOI: 10.1016/j.egypro.2017.07.065
- [16] *Behera D.*: Experimental investigation on recycling of plastic wastes and broken glass in to construction material. *International Journal of Creative Research Thoughts*, **6**, 1, 2018, 1658-1667
- [17] *Hameed A.M., Fatah Ahmed B.A.*: Employment the plastic waste to produce the light weight concrete. *Energy Procedia*, **157**, 2019, 30-38, DOI: 10.1016/j.egypro.2018.11.160
- [18] *Gavhane A., Sutar D., Soni S., Patil P.*: Utilisation of E-plastic waste in concrete. *International Journal of Engineering Research & Technology*, **5**, 2, 2016, 594-601
- [19] *Yang S., Yue X., Liu X., Tong Y.*: Properties of self-compacting lightweight concrete containing recycled plastic particles. *Construction and Building Materials*, **84**, 2015, 444-453, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.038
- [20] *Sadrmomtazi A., Dolati-Milehsara S., Lotfi-Omran O., Sadeghi-Nik A.*: The Combined Effects of Waste Polyethylene Terephthalate (PET) Particles and Pozzolanic Materials on the Properties of Self-Compacting Concrete. *Journal of Cleaner Production*, **112**, 4, 2016, 2363-2373, DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.09.107
- [21] *Salim N.M., AL-Soudany K.Y., Ahmed A.A.*: The Impact of Using Recycled Plastic Fibres on the Geotechnical Properties of Soft Iraqi Soils. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **433**, 2018, ID article: 012017, DOI: 10.1088/1757-899X/433/1/012017
- [22] *Al-Neami M.A., Rahil F.H., Al-Ani Y.H.*: Behavior of Cohesive Soil Reinforced by Polypropylene Fiber. *Engineering and Technology Journal*, **38**, 6A, 2020, 801-812, DOI: 10.30684/etj.v38i6A.109
- [23] *Fadhil S.H., Al-Soud M.S., Kudadad R.M.*: Enhancing the Strength of Clay-Sand Mixture by Discrete Waste Plastic Strips. *Journal of Applied Science and Engineering*, **24**, 2021, 381-391, DOI: 10.6180/jase.202106_24(3).0013
- [24] *Hameed A., Shaban A.M., Almuhanna R.R.*: Performance of Lime-Treated Sandy Soils after Sustainable Reinforcement Using Waste Plastic Fibre. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **1067**, 2021, ID article: 012047, DOI: 10.1088/1757-899X/1067/1/012047
- [25] *Cavey J.K., Krizek R.J., Sobhan K., Baker W.H.*: Waste Fibers in Cement-Stabilized Recycled Aggregate Base Course Material. *Transportation Research Record*, **1486**, 1995, 97-106
- [26] *Kumar P., Shukla S.*: Flexible pavement construction using different waste materials: A review. *Materials Today: Proceedings*, **65**, 2, 2022, 1697-1702, DOI: 10.1016/j.matpr.2022.04.713
- [27] *Sobhan K., Mashnad M.*: Fatigue Durability of Stabilized Recycled Aggregate Base Course Containing Fly Ash and Waste-Plastic Strip Reinforcement. Department of Civil and Geological Engineering, New Mexico State University, 2000, <https://rmrc.wisc.edu/wp-content/uploads/2012/10/P18final.pdf> (19.04.2023)
- [28] *Kumar A., Topdar P., Datta A.K.*: Structural Performance of Cement-treated Base Layer by Incorporating Reclaimed Asphalt Material and Plastic Waste. *Jordan Journal of Civil Engineering*, **17**, 2, 2023, 259-271, DOI: 10.14525/JJCE.v17i2.08
- [29] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 grudnia 2014 r. w sprawie katalogu odpadów. Dz.U. 2014, poz. 1923
- [30] WT-5 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym do dróg krajowych. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Warszawa, 2010
- [31] *Judycki J., Jaskuła P., Pszczola M., Alenowicz J., Dołżycki B., Jaczewski M., Rys D., Stienss M.*: Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych. Załącznik do zarządzenia Nr 31 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 16.06.2014 r.
- [32] *Szydło A., Mackiewicz P., Wardega R., Krawczyk B.*: Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Sztywnych. Załącznik do zarządzenia Nr 30 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 16.06.2014 r.
- [33] PN-EN 14227-1:2013-10 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym – Wymagania – Część 1: Mieszanki związane cementem
- [34] PN-EN 14227-1:2007 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym – Wymagania – Część 1: Mieszanki związane cementem
- [35] PN-EN 14227-15:2015-12 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym – Część 15: Grunty stabilizowane hydraulicznie
- [36] PN-EN 14227-10:2006 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym – Część 10: Grunty stabilizowane cementem
- [37] PN-S-96012:1997 Drogi samochodowe – podbudowa i ulepszone podłoże z gruntu stabilizowanego cementem
- [38] Zgłoszenie patentowe nr P.438162 z 15.06.2021 r. Materiał wypełniający do mieszanek związanych z cementem, sposób wytwarzania materiału wypełniającego oraz mieszanka związana cementem z materiałem wypełniającym