

# WPŁYW DODATKU GUMY Z RECYKLINGU OPON SAMOCHODOWYCH NA WŁAŚCIWOŚCI ZAPRAW CEMENTOWYCH

Paulina Bartosiak<sup>1</sup>, Edyta Jastrzębska<sup>2</sup>, Iga Jasińska<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Uniwersytet Radomski im. Kazimierza Pułaskiego, Wydział Mechaniczny, SKN NOWOTECHBUD, Polska, paulina.bartosiak2003@gmail.com

<sup>2</sup>Uniwersytet Radomski im. Kazimierza Pułaskiego, Wydział Mechaniczny, SKN NOWOTECHBUD, Polska, edyta.jastrzebska12@gmail.com

<sup>3</sup>Uniwersytet Radomski im. Kazimierza Pułaskiego, Wydział Mechaniczny, Stasieckiego 54, 26-600 Radom, Polska, i.jasinska@urad.edu.pl

\*Corresponding author

**Streszczenie** – W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań określających wpływ dodatku w postaci gumy z recyklingu opon samochodowych na wybrane właściwości fizyczne i mechaniczne zapraw cementowych. Do badań użyto startego do wielkości 2 mm dodatku jako substytutu kruszywa w ilości 5 i 20 % masy oraz cementu CEM II/B-M(S-V) 42,5R. Próbkę uformowano w prostopadłościenną próbkę o wymiarach 40 × 40 × 160 mm. Wyniki badań zostały odniesione do wartości charakterystycznych dla próbek referencyjnych o składzie zapraw normowych.

**Słowa kluczowe** – recykling, opony samochodowe, wytrzymałość na ściskanie, przewodność cieplna

## WSTĘP

Opona samochodowa stanowi zaawansowany technologicznie element pojazdu, którego konstrukcja i skład materiałowy są wynikiem ponad stuletniego rozwoju inżynierii materiałowej oraz technologii przetwórstwa gumy. Jej podstawowym zadaniem jest zapewnienie kontaktu pojazdu z nawierzchnią drogi przy jednoczesnym zachowaniu odpowiednich właściwości trakcyjnych, amortyzacyjnych i nośnych.

Materiał bazowy opony to złożona mieszanina elastomerów, głównie kauczuku naturalnego oraz kauczuku syntetycznego, którego skład zależy od docelowych parametrów eksploatacyjnych. Do mieszaniny tej dodawane są różnego rodzaju napelniacze (np. sadza techniczna, krzemionka), środki zmiękczające oraz przyspieszacze i siarka – niezbędne do procesu wulkanizacji, który prowadzi do utwardzenia struktury polimerowej i nadania materiałowi odpowiednich właściwości mechanicznych, takich jak elastyczność, odporność na ścieranie czy starzenie cieplne [1, 2]. Problem zagospodarowania zużytych opon samochodowych stanowi istotne wyzwanie środowiskowe. Z roku na rok wzrasta liczba pojazdów, co przekłada się na wzrost ilości odpadów gumowych. Tradycyjne metody ich utylizacji, takie jak składowanie lub spalanie, niosą poważne zagrożenia ekologiczne. Recykling materiałowy, polegający na przetwarzaniu opon na granulaty, może stanowić alternatywne i proekologiczne rozwiązanie.

Jednym z potencjalnych kierunków wykorzystania granulatu gumowego jest modyfikacja zapraw cementowych. Dotychczasowe badania wskazują, że dodatek gumy wpływa na właściwości reologiczne, mechaniczne i cieplne materiału [3, 4]. Celem niniejszych badań było określenie wpływu dodatku gumy z recyklingu

opon samochodowych w ilościach 5% i 20% masy użytego kruszywa drobnego na wybrane właściwości zaprawy cementowej. Badaniom poddano gęstość oraz konsystencję świeżej zaprawy, wytrzymałość na zginanie i ściskanie, nasiąkliwość oraz przewodność cieplną stwardniałej zaprawy.

## I. MATERIAŁY I PLAN BADAŃ

Do przeprowadzenia badań użyto cementu portlandzkiego wieloskładnikowego CEM II/B-M(S-V) 42,5R, kruszywa drobnego o frakcji 0–2 mm (piasek normowy) oraz startych gumowych odpadów pochodzących z recyklingu opon samochodowych, które zastosowano jako częściowy zamiennik kruszywa drobnego oraz wody wodociągowej.

Składniki mieszanki zaprawy cementowej dozowano metodą wagową zgodnie z wymaganiami normowymi. Proporcje poszczególnych komponentów w mieszance wynosiły 1 : 3 : 0,55 (cement : kruszywo drobne : woda). Proces mieszania przeprowadzono mechanicznie, co umożliwiło uzyskanie jednolitej konsystencji świeżej zaprawy.

W ramach eksperymentu przygotowano trzy serie próbek (tabela 1):

- próbkę referencyjną, pozbawioną dodatku gumy,
- próbkę z 5% objętościowym dodatkiem startego materiału gumowego w masie kruszywa,
- próbkę z 20% objętościowym dodatkiem startego materiału gumowego w masie kruszywa.

Startą gumę pozyskano ze zużytych opon samochodowych, które poddano mechanicznemu rozdrobnieniu poprzez tarcie mechaniczne za pomocą szlifierki kątowej wraz z tarczą ścierną frakcji 62 mm. Uzyskany materiał gumowy został przesiany przez zestaw

sit o wielkości oczek: 2,0 mm; 1,0 mm; 0,5 mm; 0,25 mm; 0,125 mm oraz 0,063 mm, celem uzyskania jednorodnej frakcji drobnej (tabela 2).

**Tabela 1. Plan eksperymentu**

|                     | Cement           | Kruszywo drobne |        | Woda             |
|---------------------|------------------|-----------------|--------|------------------|
|                     |                  | piasek          | kaučuk |                  |
| Stosunek wagowy     | 1                | 3               |        | 0,55             |
| Próbka referencyjna | CEM II/B-M (S-V) | 100%            | 0%     | Woda wodociągowa |
| Guma 5%             | 42,5R            | 95%             | 5%     |                  |
| Guma 20%            |                  | 80%             | 20%    |                  |

**Tabela 2. Wyniki przesiewu 100g gumy z opon samochodowych**

| Wielkość oczka sita [mm] | Masa gumy [g] |
|--------------------------|---------------|
| φ 2,00                   | 1,5           |
| φ 1,00                   | 36,5          |
| φ 0,500                  | 42,5          |
| φ 0,250                  | 13,5          |
| φ 0,125                  | 4,5           |
| φ 0,063                  | 1,5           |
| poniżej φ 0,063          | 0,0           |

## II. METODYKA BADAŃ

W ramach eksperymentu przeprowadzono badania zarówno na świeżej zaprawie (gęstość, konsystencja) jak i na próbkach stwardniałych zapraw (wytrzymałość na zginanie, ściskanie, nasiąkliwość oraz przewodność cieplna).

Po przygotowaniu zaprawy przeprowadzono oznaczenie gęstości zgodnie z normą PN-EN 12350-6 [5]. Pomiar polegał na określeniu masy próbki [kg] zaprawy po jej zagęszczeniu w cylindrze o objętości 1 dm<sup>3</sup> (z dokładnością do 0,1%). Gęstość (D) obliczano według wzoru (1).

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (1)$$

gdzie:

- m<sub>1</sub> - masa pojemnika [kg],
- m<sub>2</sub> - masa pojemnika wraz z zawartą w nim próbką mieszanki [kg],
- V - objętość pojemnika [m<sup>3</sup>]

W dalszej części badań oznaczono konsystencję świeżej zaprawy z wykorzystaniem stolika rozpliwu zgodnie z normą PN-EN 1015-3 [6]. Pomiar polegał na określeniu średnicy rozpliwu próbki zaprawy po jej umieszczeniu na tarczy stolika, który następnie poddawano wstrząsom (mechaniczne podnoszenie i swobodne opadanie z ustalonej wysokości). Średnia wielkość rozpliwu zaprawy stanowi miarę jej płynności (tabela 3).

W celu przeprowadzenia zaplanowanych badań wykonano próbki zaprawy cementowej o wymiarach 40 × 40 × 160 mm. Proces formowania próbek polegał na dwukrotnym warstwowym układaniu zaprawy, z których każdą warstwę poddano 60 wstrząsom wibracyjnym w celu odpowiedniego zagęszczenia. Po stwardnieniu próbki zostały rozformowane, a następnie poddane sezonowaniu w warunkach laboratoryjnych przez 28 dni. Po zakończeniu okresu dojrzewania przeprowadzono badania właściwości mechanicznych i fizycznych, obejmujące wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na zginanie, przewodność cieplną oraz nasiąkliwość.

**Tabela 3. Zestawienie klas konsystencji dla metody stolika rozpliwowego [4]**

| Klasa | Średnica rozpliwu [mm] |
|-------|------------------------|
| F1    | ≤ 340                  |
| F2    | 350 do 410             |
| F3    | 420 do 480             |
| F4    | 490 do 550             |
| F5    | 560 do 620             |
| F6    | ≥ 630                  |

Badanie wytrzymałości na zginanie przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 12390-5 [7]. Prostopadłościennie próbki poddane zostały działaniu momentu zginającego w trakcie próby trójpunktowego zginania. Obciążenie przekazywane było za pośrednictwem dwóch podpór (dolnych wałków) oraz jednego wałka obciążającego. Próba ta umożliwia określenie wytrzymałości zaprawy cementowej na zginanie na podstawie wartości maksymalnej siły powodującej zniszczenie próbki.

Wytrzymałość na ściskanie została oznaczona zgodnie z normą PN-EN 12390-3 [8]. Prostopadłościennie próbki poddano osiowemu obciążeniu ściskającemu, przyłożonemu za pomocą płytek ściskających w maszynie wytrzymałościowej. Podczas badania rejestrowano maksymalną siłę niszczącą (F<sub>c</sub>), a wytrzymałość na ściskanie (R<sub>c</sub>) obliczono ze wzoru (2).

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \text{ [MPa]} \quad (2)$$

gdzie:

- R<sub>c</sub> - wytrzymałość na ściskanie [MPa],
- F<sub>c</sub> - siła niszcząca [N],
- 1600 - powierzchnia płytek ściskających (40 × 40 mm).

Nasiąkliwość zapraw została oznaczona zgodnie z normą PN-B-06250 [9]. W tym celu przygotowane próbki zostały wysuszone do osiągnięcia stałej masy, zważone, a następnie umieszczone w odpowiednim naczyniu i całkowicie zanurzone w wodzie. Po osiągnięciu stałej masy próbki zostały wyjęte z wody, a ich powierzchnia osuszona do usunięcia nadmiaru wody. Następnie dokonano ważenia w celu określenia masy próbek nasyconych wodą. Nasiąkliwość (n<sub>w</sub>) obliczono według wzoru (3).

$$n_w = \frac{G_2 - G_1}{G_1} \cdot 100 [\%] \quad (3)$$

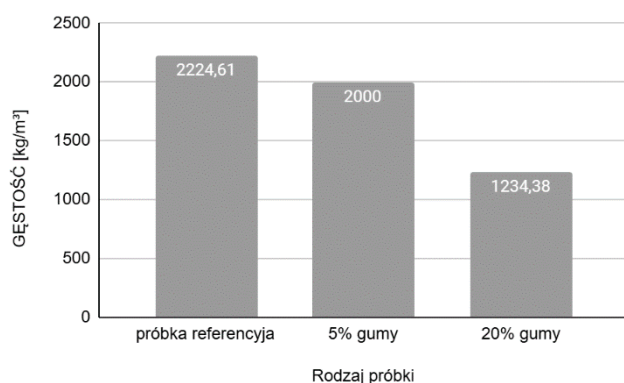
gdzie:  $G_1$  - średnia masa próbek suchych,  $G_2$  - średnia masa próbek nasączonych wodą.

Pomiar przewodności cieplnej przeprowadzono z wykorzystaniem platformy pomiarowej. W próbkach o wymiarach  $40 \times 40 \times 160$  mm wykonano otwór, w którym umieszczono czujnik temperatury stanowiący element zestawu pomiarowego. Przed instalacją czujnika jego powierzchnię pokryto pastą przewodzącą ciepło. Uzyskane wartości przewodności cieplnej odczytywano bezpośrednio z wyświetlacza urządzenia pomiarowego.

### III. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Analiza uzyskanych wyników wykazała na wyraźny spadek gęstości świeżej zaprawy wraz z rosnącą zawartością dodatku gumy (rys. 1). Próbką referencyjną, niezawierającą granulatu gumowego stosowanego jako substytut kruszywa, charakteryzowała się gęstością  $2925 \text{ kg/m}^3$ . Dodatek 5% gumy skutkował obniżeniem gęstości do  $1746 \text{ kg/m}^3$ , co oznacza spadek o 40,31% w stosunku do próbki referencyjnej. Przy zawartości 20% gumy gęstość osiągnęła wartość  $1132 \text{ kg/m}^3$ , co stanowi redukcję o około 61,25% w stosunku do próbki referencyjnej.

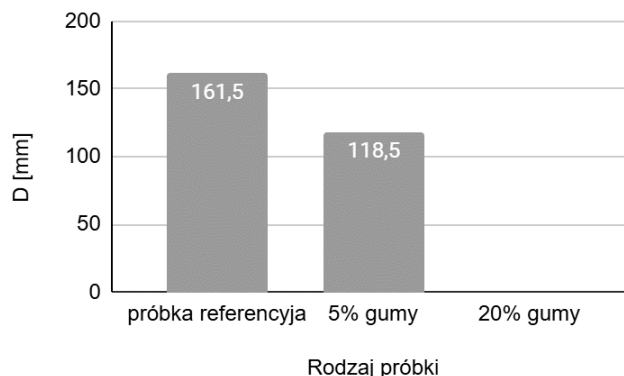
Zaobserwowane zmiany jednoznacznie wskazują, że wzrost ilości dodatku gumy prowadzi do istotnego zmniejszenia gęstości pozornej zaprawy. Tak wpływ dodatku na gęstość zaprawy może być związany z mniejszą gęstością gumy w porównaniu do składników tradycyjnej zaprawy (piasku kwarcowego) oraz zwiększonym udziałem porów powietrznych w strukturze materiału.



Rys. 1. Gęstość badanych próbek

Konsystencję zaprawy oceniono za pomocą stolika rozpląwu. Średnia wartość rozpląwu dla próbek referencyjnych wynosiła 161,6 mm (klasa konsystencji F1). Dodatek 5% gumy spowodował zmniejszenie rozpląwu do 118,5 mm. Oznacza to, że wielkość rozpląwu zmniejszyła się o 26,63% (rys. 2). Oba wyniki badań wskazują na klasę

konsystencji F1. Dla próbki zawierającej 20% gumy w masie kruszywa, z uwagi na słabe związanie składników (zaprawa zbyt sucha do przeprowadzenia badania zastosowaną metodą), nie możliwe było określenie klasy konsystencji. Przy próbie przeprowadzenia oznaczenia próbka wyraźnie rozsypała się (rys. 3).



Rys. 2. Uśredniona wartość średnicy rozpląwu próbek oceniana metodą stolika rozpląwu

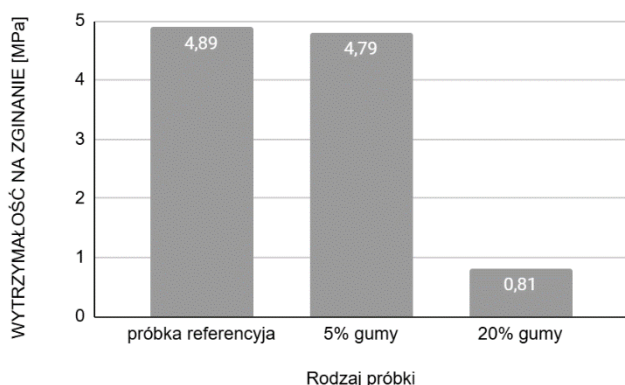


Rys. 3. Rozsypanie próbki z dodatkiem 20% gumy podczas badania konsystencji za pomocą stolika rozpląwu, ilustrujące brak możliwości wykonania oznaczenia z powodu braku spójności zaprawy

Oceniając właściwości próbek stwardniałej zaprawy, zauważono, że wytrzymałość na zginanie próbki referencyjnej wyniosła 4,89 MPa. Dodatek 5% gumy spowodował niewielki spadek tej wartości do 4,79 MPa, co odpowiada zmniejszeniu o około 2% w stosunku do próbki referencyjnej. Natomiast przy 20% zawartości gumy wytrzymałość na zginanie znacznie zmalała do 0,81 MPa, co stanowi aż około 83% spadek względem próbki referencyjnej (rys. 4). Wyniki te wskazują, że niewielkie ilości gumy mają nieznaczny wpływ na zmianę wytrzymałości na zginanie, natomiast jej większe udziały gummy znacząco wpływają na tą właściwość mechaniczną.

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie pokazują

wyraźny spadek wartości wytrzymałości wraz ze wzrostem zawartości dodatku gumy w masie zaprawy. Próbką referencyjną osiągnęła wartość 36,92 MPa. Już niewielki udział gumy w masie kruszywa (5%) spowodował obniżenie wytrzymałości na ściskanie do 25,23 MPa (spadek o około 31,6%). Przy 20% zawartości gumy wytrzymałość znacząco zmalała do 1,23 MPa, czyli o około 96,7% w porównaniu do próbki referencyjnej. Wyniki te wskazują, że zwiększenie ilości gumy znacząco obniża



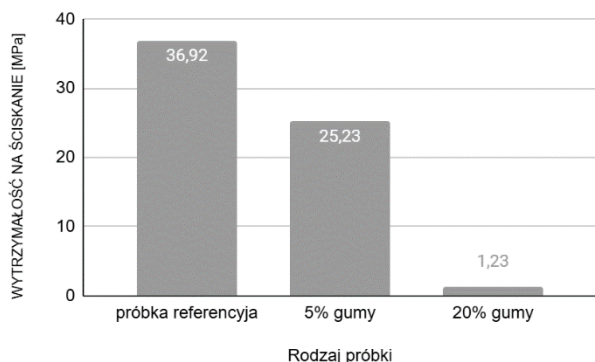
nośność zaprawy (rys. 5).

**Rys. 4 Wytrzymałość na zginanie badanych próbek**

**Rys. 5. Wytrzymałość na ściskanie badanych próbek**

Badania własne wykazały, że zwiększenie zawartości gumy z recyklingu w zaprawach cementowych prowadzi do pogorszenia ich właściwości mechanicznych, przy jednoczesnej poprawie izolacyjności cieplnej. Efekty te są zgodne z doniesieniami literaturowymi. Siddique i Naik (2004) [3] zauważyli, że przy zawartości gumy w zakresie 10–20% następuje istotny spadek wytrzymałości betonu, co potwierdziły wyniki uzyskane dla próbek z 20% dodatkiem gumy. Thomas i Gupta (2016) [4] podkreślili z kolei, że utrzymanie zawartości tego komponentu poniżej 15% pozwala zachować odpowiedni poziom nośności materiału.

Wprowadzenie 5% gumy w masie kruszywa do składu

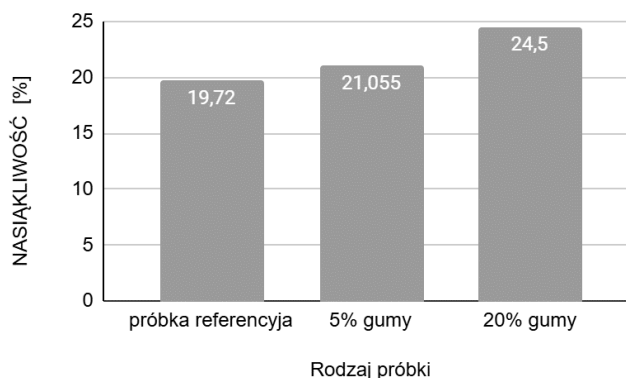


zaprawy skutkuje jedynie nieznacznym obniżeniem

wytrzymałości na ściskanie i zginanie, co nadal pozwala na jej wykorzystanie w zastosowaniach niekonstrukcyjnych. Dopiero przy wyższym procentowym udziale granulatu gumowego obserwuje się znaczne pogorszenie parametrów wytrzymałościowych, co ogranicza możliwości praktycznego zastosowania materiału w budownictwie nośnym.

W badaniu nasiąkliwości zaobserwowano stopniowy wzrost tego parametru wraz ze zwiększającą się zawartością dodatku gumy w zaprawie. Próbką referencyjną charakteryzowała się nasiąkliwością na poziomie 19,72%. Wprowadzenie 5% gumy skutkowało nieznacznym zwiększeniem wartości do 21,06%, natomiast przy 20% udziale dodatku nasiąkliwość wzrosła do 24,5% (rys. 6).

Uzyskane wyniki sugerują, że obecność gumy w zaprawie wpływa na zwiększenie jej chłonności, co można wiązać z rosnącą porowatością materiału. Dodatek gumy, będąc materiałem o innej strukturze niż tradycyjne kruszywo, może prowadzić do powstawania większej liczby pustek powietrznych, a tym samym do zwiększenia zdolności zaprawy do pochłaniania wody.



**Rys. 6. Nasiąkliwość badanych próbek**

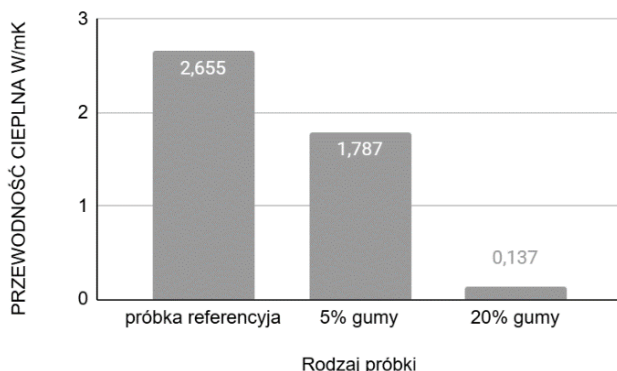
Przeprowadzone badania wskazały, że wraz ze wzrostem ilości gumy w masie zaprawy, wartość współczynnika przenikania ciepła korzystnie maleje. Próbką referencyjną osiągnęła średni współczynnik przewodzenia ciepła ( $\lambda$ ) równy 2,655 W/mK. Wprowadzenie 5% granulatu gumowego spowodowało znaczący spadek tej wartości do 1,787 W/mK. Oznacza to poprawę właściwości izolacyjnych zaprawy o około 49%.

Najlepsze parametry termoizolacyjne osiągnęła próbka z 20% dodatkiem gumy – współczynnik  $\lambda$  wyniósł zaledwie 0,137 W/mK, co stanowi jedynie 5% wartości charakterystycznej dla próbki referencyjnej (rys. 7). Tak znaczna redukcja współczynnika  $\lambda$  świadczy o dużym potencjale mieszanek z wysokim udziałem gumy jako materiałów termoizolacyjnych, szczególnie w kontekście zastosowań w budownictwie pasywnym i energooszczędnym.

Podobne obserwacje przedstawili Thomas i Gupta

(2016) [4], wskazując, że już 15% dodatek gumy pozwala znacząco poprawić właściwości termiczne zaprawy cementowej. Wyniki uzyskane w niniejszym badaniu potwierdzają ich wnioski – nawet przy 5% udziale zauważalna jest wyraźna poprawa izolacyjności, co czyni zaprawę atrakcyjną z punktu widzenia efektywności energetycznej.

Zaobserwowane zmiany jednoznacznie wskazują, że zastosowanie gumy z recyklingu w mieszankach cementowych przyczynia się do zwiększenia oporu cieplnego materiału, umożliwiając wykorzystanie takich zapraw jako warstw izolacyjnych lub wypełniających, nawet mimo ograniczonej wytrzymałości mechanicznej.



Rys. 7. Średnia przewodność cieplna badanych próbek

Wszystkie przywołane badania potwierdzają, że dodatek gumy może korzystnie wpływać na wybrane właściwości fizyczne zapraw cementowych, pod warunkiem zachowania jego optymalnej zawartości. Zarówno kierunek, jak i skala zaobserwowanych zmian pozostają zgodne z wynikami dostępnych opracowań literaturowych, co potwierdza zasadność kontynuowania badań w tym obszarze.

#### IV. WNIOSKI

Na podstawie otrzymanych wyników badań sformułowano następujące wnioski:

1. Gęstość świeżej zaprawy maleje wraz z rosnącym udziałem gumy, co może być związane z różnicą pomiędzy gęstością dodatku a zastosowanym kruszywem kwarcowym (piaskiem).
2. Wraz z rosnącym udziałem granulatu gumowego maleje płynność próbki. Zjawisko to może być związane m.in. z absorpcją wody w strukturze zaprawy oraz zwiększoną chropowatością cząstek gumowych, co wymaga dalszych badań.
3. Udział gumy nieznacznie wpływa na właściwości mechaniczne zaprawy przy 5% udziale gumy, natomiast 20% udział przyczynia się do znacznego spadku wytrzymałości na zginanie i ściskanie.
4. Już niewielki udział gumy przyczynia się do znacznego korzystnego zmniejszenia się wartości współczynnika przewodności cieplnej.

#### THE INFLUENCE OF RECYCLED CAR TIRE RUBBER ADDITIVE ON THE PROPERTIES OF CEMENT MORTARS

This article presents the results of a study investigating the effect of adding recycled rubber from car tires on selected physical and mechanical properties of cement mortars. A rubber additive ground to a particle size of 2 mm was used as a substitute for aggregate in amounts of 5 % and 20 % by weight. The cement used was CEM II/B-M(S-V) 42,5R. The samples were formed into prismatic specimens with dimensions of 40 × 40 × 160 mm. The test results were compared with the characteristic values obtained for reference samples made with standard mortar compositions.

**Key words:** recycling, car tires, compressive strength, thermal conductivity

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Stelescu M. D., et al. (2024) "Study on the Composition of Vulcanized Rubber Mixtures from Waste Tire," The 10th International Conference on Advanced Materials and Systems (ICAMS 2024), doi: 10.2478/9788367405805-035
- [2] Sadjiep Tchuigwa B.S., Krmela J., Pokorny J. (2021) "A literature review on tire component requirements. Perner's Contacts". doi: 10.46585/pc.2021.2.1740
- [3] Siddique R., Naik T. R. (2004) "Properties of concrete containing scrap-tire rubber – an overview". Waste Management, doi: 10.1016/j.wasman.2004.01.006
- [4] Thomas B. S., Gupta R. C. (2016) "A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete". Renewable and Sustainable Energy Reviews, doi: 10.1016/j.rser.2015.10.092
- [5] PN-EN 12350-6:2019. (2019) "Badania mieszanki betonowej- Część 6: Gęstość". Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa
- [6] PN-EN 1015-3:2000 "Metody badań zapraw do murów- Określenie konsystencji świeżej zaprawy (za pomocą stolika rozplwywu)". Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa
- [7] PN-EN 12390-5:2019-08 (2019) "Badania betonu- Część 5: Wytrzymałość na zginanie próbek do badań". Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa
- [8] PN-EN 12390-3:2019 (2019) "Badania betonu -- Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań". Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa
- [9] PN-B-06250:1988 (1988). "Beton zwykły". Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa