

dr inż. Paweł Helbrych^{1*)}

ORCID: 0000-0001-6907-0363

dr inż. Robert Zarzycki²⁾

ORCID: 0000-0001-5735-4385

dr hab. inż. Rafał Kobylecki, prof. PCz²⁾

ORCID: 0000-0002-5367-408X

Influence of biochar addition on the mechanical properties and workability of cement mortars

Wpływ dodatku biowęgla na właściwości mechaniczne i plastyczność zapraw cementowych

DOI: 10.15199/33.2025.10.27

Abstract. The aim of the study was to assess the influence of biochar addition on the workability and mechanical properties of cement mortars. A 2.5% addition improved the consistency, while higher contents reduced both flow and strength. Compressive and flexural strength decreased with increasing biochar content. It was found that a safe biochar amount is up to 5% of the cement mass.

Keywords: biochar; cement mortar; rheological properties; mechanical properties; modification of cement mortars.

Streszczenie. Celem pracy była ocena wpływu dodatku biowęgla na właściwości plastyczne i mechaniczne zapraw cementowych. Dodatek ten w ilości 2,5% masy cementu poprawiał konsystencję zaprawy, natomiast większa zawartość prowadziła do zmniejszenia płynności i wytrzymałości. Wytrzymałość na ściskanie i zginanie zmniejszała się wraz ze wzrostem ilości biowęgla. Ustalono, że bezpieczny udział dodatku wynosi do 5% masy cementu.

Słowa kluczowe: biowęgiel; zaprawa cementowa; właściwości reologiczne; właściwości mechaniczne; modyfikacja zapraw cementowych.

Contemporary research in the field of materials engineering increasingly focuses on the implementation of solutions based on organic waste, aligning with the concept of a circular economy and the minimization of the carbon footprint. In this context, biochar, obtained through the pyrolysis of biomass, has attracted attention as a potential additive for modifying the properties of cement mortars [1, 2]. Its porous structure, high carbon content, and the possibility of adjusting physicochemical parameters make it capable of influencing cementitious mixtures' rheology, durability, and mechanical properties [3].

The properties of biochar strongly depend on the type of feedstock and the conditions of the pyrolysis process, including temperature, residence time, and reaction atmosphere. Research indicates that high temperature increases biochar's structural stability while reducing its sorption capacity and the content of active surface groups [4, 5]. Conversely, biochar produced at lower temperatures is characterized by greater chemical activity, which may be significant in the context of interactions with the porous phase of cement [2]. Moreover, the suitability of biochar as an additive to mortars is influenced by its elemental composition and porosity. These parameters determine not only its reactivity but also its water retention capacity, thereby affecting the workability and plasticity of the mixture [6].

Współczesne badania w dziedzinie inżynierii materiałowej coraz częściej koncentrują się na wdrażaniu rozwiązań bazujących na odpadach organicznych, wpisujących się w ideę gospodarki o obiegu zamkniętym oraz minimalizacji śladu węglowego. W tym kontekście biowęgiel, otrzymywany w procesie pirolizy biomasy, wzbudza zainteresowanie jako potencjalny dodatek modyfikujący właściwości zapraw cementowych [1, 2]. Jego porowata struktura, duża zawartość węgla oraz możliwość regulacji parametrów fizykochemicznych sprawiają, że może on wpływać na reologię, trwałość oraz parametry wytrzymałościowe mieszanek cementowych [3].

Właściwości biowęgla są silnie uzależnione od rodzaju surowca oraz warunków procesu pirolizy, w tym temperatury, czasu przebywania i atmosfery reakcyjnej. Badania wskazują, że wysoka temperatura prowadzi do zwiększenia stabilności strukturalnej biowęgla, lecz jednocześnie zmniejsza jego zdolności sorpcyjne oraz zawartość aktywnych grup powierzchniowych [4, 5]. Biowęgiel produkowany w niższej temperaturze cechuje się z kolei większą aktywnością chemiczną, co może mieć znaczenie w kontekście oddziaływania z fazą porowatą cementu [2]. Ponadto na przydatność biowęgla jako dodatku do zapraw wpływa jego skład pierwiastkowy oraz porowatość. Parametry te decydują nie tylko o jego reaktywności, ale również o retencji wody, a tym samym mają wpływ na urabialność i plastyczność mieszanki [6]. Niektóre typy biowęgla mogą również pełnić funkcję mikrozbrojenia, poprawiając odporność zapraw na mikropęknięcia i zmniejszając ich skurcz [7].

¹⁾ Politechnika Częstochowska, Wydział Budownictwa

²⁾ Politechnika Częstochowska, Wydział Infrastruktury i Środowiska

*) Correspondence address: pawel.helbrych@pcz.pl

Certain types of biochar may also serve as micro-reinforcement, improving the resistance of mortars to micro-cracking and reducing their shrinkage [7].

Despite the growing number of studies focusing on applying biochar in soil and water environments [3], its use in building materials technology requires intensified analyses of mechanical and rheological properties. The literature provides examples of attempts to apply biomass ash in concrete [8, 9], yet biochar – a substance of a different nature – requires separate investigations. The literature also includes analyses of mortars modified with organic-based additives, including biochar derived from wood and food waste, which affects cement mortars' rheological and mechanical properties [10, 11]. Adding biochar can improve workability, increase flexural strength, and contribute to reducing CO₂ emissions, making it an attractive component from the perspective of sustainable construction [12].

Materials and research method

Biochar was obtained from biomass, such as wheat bran, through a thermolysis process in a laboratory-scale electrically heated reactor. The process was conducted under anaerobic conditions (without access to external oxygen) at a temperature of 700°C for 3 hours. After completion, the material was cooled to room temperature and subjected to technical and elemental analysis. The results are presented in Table 1.

In the study, the biochar's water absorption was determined per the standard's requirements [13]. After the water saturation process was completed, no increase in mass or volume of the sample was observed compared to the initial value. The lack of water absorption indicates a very low absorbability of the tested biochar. The obtained results confirm the material's high degree of carbonization and the presence of closed pores. The biochar is shown in the photograph. In addition, a sieve analysis of the biochar was carried out per the standard [14] to determine its particle size distribution. The percentage share of the material retained on individual sieves was calculated relative to the total sample mass.

Figure 1 shows that most biochar particles have a diameter of less than 0.25 mm. Due to the predominance of fine fractions, it was decided to use biochar as a filler material in cement mortar. Cement mortar specimens were prepared in accordance with the standard [15]. In addition to biochar, the following materials were used in the study:

- CEM IV/B(V) 32.5N-LH cement compliant with the requirements of [16];
- standardized sand in accordance with [17];
- potable water from the municipal water supply system in Częstochowa, compliant with the requirements of [18].

Pomimo coraz większej liczby badań koncentrujących się na zastosowaniu biowęgla w środowisku glebowym i wodnym [3], jego wykorzystanie w technologii materiałów budowlanych wymaga intensyfikacji analiz właściwości mechanicznych i reologicznych. W literaturze są dostępne przykłady prób zastosowania popiołów z biomasy w betonie [8, 9], ale biowęgiel – jako substancja o odmiennym charakterze – wymaga osobnych badań. W literaturze dostępne są również analizy zapraw modyfikowanych dodatkami pochodzenia organicznego, w tym z wykorzystaniem biowęgla pochodzącego z odpadów drzewnych i spożywczych, który wpływa na właściwości reologiczne oraz mechaniczne zapraw cementowych [10, 11]. Dodatek biowęgla może poprawiać urabialność, zwiększać odporność na zginanie, a także przyczyniać się do redukcji emisji CO₂, co czyni go atrakcyjnym komponentem z punktu widzenia zrównoważonego budownictwa [12].

Materiały i metoda badań

Biowęgiel otrzymywano z biomasy w postaci otrębów pszennych w procesie termolizy przeprowadzonym w laboratoryjnym reaktorze ogrzewanym elektrycznie. Proces ten realizowano w warunkach beztlenowych (bez dostępu tlenu z zewnątrz), w temperaturze 700°C, przez 3 h. Po jego zakończeniu materiał był chłodzony do temperatury pokojowej, a następnie poddany analizie technicznej i elementarnej. Wyniki przedstawiono w tabeli 1.

W badaniach oznaczono nasiąkliwość biowęgla zgodnie z wymaganiami normy [13]. Po zakończeniu procesu nasycania wodą nie stwierdzono zwiększenia masy ani objętości próbki w porównaniu z wartością wyjściową. Brak absorpcji wody wskazuje na bardzo małą nasiąkliwość badanego biowęgla. Uzyskane wyniki świadczą o wysokim stopniu zwęglenia materiału oraz o obecności zamkniętych porów. Biowęgiel przedstawiono na fotografii. Ponadto przeprowadzono analizę sitową biowęgla zgodnie z normą [14] w celu określenia jego składu granulometrycznego. Obliczono procentowy udział materiału na poszczególnych sitach względem całkowitej masy próbki.

Rysunek 1 pokazuje, że większość cząstek biowęgla ma średnicę mniejszą niż 0,25 mm. Ze względu na dominację drobnych frakcji, zdecydowano się wykorzystać biowęgiel jako materiał wypełniający zaprawy cementowej. Próbkę zaprawy cementowej wykonywano zgodnie z normą [15]. W badaniach oprócz biowęgla wykorzystano:

- cement CEM IV/B(V) 32,5N-LH zgodny z wymaganiami [16];
- piasek normalizowany zgodny z [17];
- wodę pitną z ujęcia wodociągowego w Częstochowie zgodną z wymaganiami [18].

Table 1. Technical composition of bran and biochar samples
Tabela 1. Skład techniczny próbek otrębów i biowęgla

Sample/ Próbka	Moisture [%]/ Wilgość [%]	Volatile matter [%]/ Części lotne [%]	Ash [%]/ Popiół [%]	Fixed carbon [%]/Węgiel stały [%]
Raw bran/ Otręby surowe	13,3	76,9	5,1	4,8
Biochar/ Biowęgiel	0,0	6,8	19,1	74,2



Biochar used in the research
Biowęgiel wykorzystany w badaniach

The parameters of the materials were as follows:

- specific density of CEM IV/B(V) 32.5N-LH cement – approx. 3.1 g/cm³;
- specific density of standardized sand – approx. 2.65 g/cm³;
- specific density of water – 1.0 g/cm³;
- specific density of biochar – 0.71 g/cm³.

The basic mix design of the control series (SK) without biochar was as follows:

- cement – 450 g;
- sand – 1350 g;
- water – 225 g.

Based on preliminary tests, adding biochar to the standardized mortar was decided at 2.5%, 5%, and 7.5%. For this purpose, the appropriate quantities of cement, sand, water, and biochar were calculated. A constant cement mass was adopted. Due to biochar's lack of water absorption, it was assumed that its addition would not significantly affect the water balance of the mortar, and the mixing water content remained unchanged across all experimental mix designs. The composition of the cement mortar, depending on the biochar content, is presented in Table 2.

The preparation of the mix designs enabled the production of cement mortars with the addition of biochar while maintaining a constant mixture volume. The mixes were prepared in accordance with [15], following a uniform dosing and mixing procedure for all experimental series. Selected samples were subjected to consistency evaluation using the flow table method in accordance with [19] to determine the workability and plasticity of the mortars. Specimens for strength testing were prepared in metal molds with dimensions of 40 × 40 × 160 mm in accordance with [15]. After 24 hours of initial curing under laboratory conditions (20 ± 1°C, moist fabric and foil), the specimens were transferred to a water bath for 6 and 27 days.

Flexural and compressive strength tests were carried out in accordance with [20] after 7 and 28 days of curing. Flexural tests were performed in a three-point bending configuration, and the halves of the broken specimens were used for compressive strength testing. For each series, mean strength values and standard deviations were calculated.

Results and discussion

To assess the effect of biochar addition on the flow diameter of cement mortar, specimens of series SK (reference) and D1, D2, and D3, containing 2.5%, 5%, and 7.5% biochar, respectively, were prepared. Figure 2 presents the flow diameters of the mortars depending on the additive content.

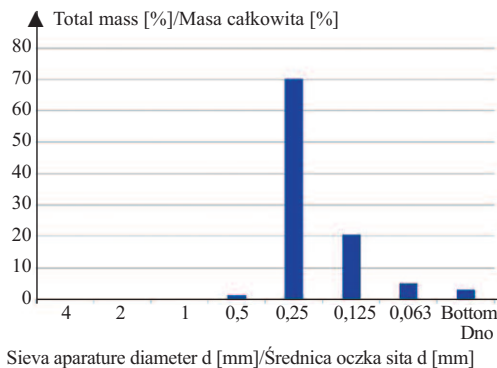


Fig. 1. Sieve analysis results of the biochar

Rys. 1. Wyniki analizy sitowej biowęgla

Parametry materiałów były następujące:

- gęstość właściwa cementu CEM IV/B(V) 32,5N-LH – ok. 3,1 g/cm³;
- gęstość właściwa piasku normowego – ok. 2,65 g/cm³;
- gęstość właściwa wody – 1,0 g/cm³;
- gęstość właściwa biowęgla – 0,71 g/cm³.

Podstawowa receptura serii kontrolnej (SK) bez biowęgla, to:

- cement – 450 g;
- piasek – 1350 g;
- woda: 225 g.

Na podstawie badań wstępnych zdecydowano się na dodatnie do zaprawy normowej biowęgla w ilości: 2,5; 5 oraz 7,5%. W tym celu obliczono odpowiednie ilości cementu, piasku, wody i popiołu. Przyjęto stałą masę cementu. W związku z brakiem absorpcji wody przez biowęgiel uznano, że jego dodatek nie wpływa istotnie na bilans wodny zaprawy, a ilość wody zarobowej pozostała niezmienną we wszystkich recepturach badawczych. Skład zaprawy cementowej w zależności od zawartości biowęgla przedstawiono w tabeli 2.

Sporządzenie receptur umożliwiło przygotowanie zapraw cementowych z dodatkiem biowęgla z zachowaniem stałej objętości mieszanki. Mieszanki wykonywano zgodnie z [15], z zachowaniem jednolitego schematu dozowania i mieszania składników we wszystkich seriach badawczych. Wybrane próbki poddano ocenie konsystencji, metodą stożka stołowego zgodnie z [19], w celu określenia urabialności i plastyczności zapraw. Próbkę do badań wytrzymałości przygotowano w metalowych formach o wymiarach 40 × 40 × 160 mm zgodnie z [15]. Po 24 h wstępnego dojrzewania w warunkach laboratoryjnych (20 ± 1°C, wilgotna tkanina i folia), próbki przenoszono do kąpieli wodnej na okres 6 i 27 dni.

Oznaczenie wytrzymałości na zginanie i ściskanie przeprowadzono zgodnie z [20] po 7 i 28 dniach dojrzewania. Próby zginania realizowano w układzie trójpunktowym, a połowy złamanych próbek wykorzystywano do badań wytrzymałości na ściskanie. W przypadku każdej serii obliczono średnie wartości wytrzymałości oraz odchylenia standardowe.

Wyniki badań i ich omówienie

W celu oceny wpływu dodatku biowęgla na średnicę rozprzężu zaprawy cementowej przygotowano próbki serii SK (referencyjna) oraz D1, D2 i D3 zawierające odpowiednio 2,5%, 5% i 7,5% biowęgla. Na rysunku 2 przedstawiono średnicę rozprzężu zapraw w zależności od zawartości dodatku.

The flow diameter in the SK series (0%) was 12 cm. The addition of 2.5% biochar (D1) increased the diameter, which suggests an improvement in workability; at 5% (D2), a slight decrease occurred, and at 7.5% (D3), the lowest flow diameter value was obtained, indicating a densification of the mixture structure. For all experimental series (SK, D1–D3), the compressive and flexural strength values were calculated after 7 and 28 days, and statistical analysis was carried out (variance), including standard deviation and linear regression.

Variance (1):

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (1)$$

where:

n – number of measurements;
 x_i – each result;
 $\bar{x}$ – arithmetic mean of the results.

The standard deviation (s) was calculated using formula (2):

$$s = \sqrt{s^2} \quad (2)$$

where:

s^2 – previously calculated variance.

The relationship between the additive content (independent variable) and strength (dependent variable) was described using linear regression. The following were calculated:

- mean value of the additive (3):

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (3)$$

where:

(X_i) – percentage value of the additive for each data point;
 (n) – number of observations.

- mean strength value (4):

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i \quad (4)$$

where:

(Y_i) – strength value for each data point.

- regression slope (5):

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (5)$$

where:

$(X_i - \bar{X})$ – difference between the percentage value of the additive and its mean;
 $(Y_i - \bar{Y})$ – difference between the strength value and its mean;

- intercept (6):

$$b = \bar{Y} - m \cdot \bar{X} \quad (6)$$

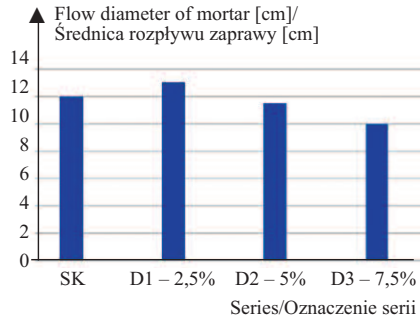


Fig. 2. Mortar consistency test results using the flow table method according to [19]

Rys. 2. Wyniki badania konsystencji zaprawy metodą stożka stołowego wg [19]

W serii SK (0%) średnica rozptywu wyniosła 12 cm. Dodatek 2,5% biowęgla (D1) zwiększył średnicę, co sugeruje poprawę urabialności, przy 5% (D2) nastąpił niewielki spadek, a przy 7,5% (D3) uzyskano najmniejszą wartość średnicy rozptywu, co wskazuje na zacieśnienie struktury mieszanki. W przypadku wszystkich serii badawczych (SK, D1–D3) obliczono wartości wytrzymałości na ściskanie i zginanie po 7 i 28 dniach oraz przeprowadzono analizę statystyczną (wariancję), odchylenie standardowe oraz regresję liniową.

Wariancja (1):

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (1)$$

gdzie:

n – liczba pomiarów;
 x_i – każdy pojedynczy wynik;
 $\bar{x}$ – średnia arytmetyczna wyników.

Odchylenie standardowe (s) obliczano ze wzoru (2):

$$s = \sqrt{s^2} \quad (2)$$

gdzie:

s^2 – wcześniej obliczona wariancja.

Zależność między zawartością dodatku (zmienna niezależna) a wytrzymałością (zmienna zależna) opisano za pomocą regresji liniowej. Obliczono:

- średnią wartość dodatku (3):

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (3)$$

gdzie:

(X_i) – wartość procentowa dodatku w przypadku każdego punktu danych;
 (n) – liczba obserwacji.

- średnią wartość wytrzymałości (4):

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i \quad (4)$$

gdzie:

(Y_i) – wartość wytrzymałości w przypadku każdego punktu danych.

- nachylenie regresji (5):

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (5)$$

gdzie:

$(X_i - \bar{X})$ – różnica między wartością procentową zawartości dodatku a jej średnią;
 $(Y_i - \bar{Y})$ – różnica między wartością wytrzymałości a jej średnią;

- wyraz wolny (6):

$$b = \bar{Y} - m \cdot \bar{X} \quad (6)$$

- regression equation (7):

$$Y = mX + b \quad (7)$$

where:

(Y) – predicted value of compressive or flexural strength;

(X) – percentage content of the additive;

(m) – slope of the regression line;

(b) – intercept.

The compressive strength results of mortars after seven days are presented in Table 3. With an increase in the amount of the additive, a decrease in strength is observed. The lowest scatter of results characterizes D2 (5%). The values of regression parameters are presented in Table 4. Based on these data, it was determined that with the increase in the percentage content of biochar additive, the compressive strength decreases by approximately 0.58 MPa for each additional 1%.

Table 3. Compressive strength of mortars after 7 days

Tabela 3. Wytrzymałość na ściskanie zapraw po 7 dniach

Series/ Seria	Mean compressive strength [MPa]/ Średnia wytrzymałość na ściskanie [MPa]	Variance [MPa ²]/ Wariancja [MPa ²]	Standard deviation [MPa]/ Odchylenie standardowe [MPa]
SK	20,73	1,28	1,13
D1	17,90	0,35	0,59
D2	18,04	0,23	0,48
D3	15,41	0,40	0,63

The flexural strength results after 7 days are presented in Table 5. Adding biochar harms the flexural strength of mortars and the consistency of results, particularly at a content of 7.5%. The values of regression parameters are presented in Table 6.

The regression equation (7) suggests that with the increase in additive content, the flexural strength gradually decreases, which is consistent with the data observed in the study. The compressive strength results after 28 days are presented in Table 7. The highest strength was achieved in the case of SK. Adding biochar reduces compressive strength after 28 days, most notably at 7.5%; therefore, with the increase in additive content, the compressive strength after 28 days decreases. The values of regression parameters are presented in Table 8.

Table 5. Flexural strength results of mortars after 7 days

Tabela 5. Wytrzymałość na zginanie zapraw po 7 dniach

Series/ Seria	Mean flexural strength [MPa]/Średnia wy- trzymałość na zginanie [MPa]	Variance [MPa ²]/ Wariancja [MPa ²]	Standard deviation [MPa]/ Odchylenie stan- dardowe [MPa]
SK	4,27	0,03	0,18
D1	3,83	0,02	0,14
D2	3,80	0,01	0,11
D3	3,32	0,14	0,38

- równanie regresji (7):

$$Y = mX + b \quad (7)$$

gdzie:

(Y) – przewidywana wartość wytrzymałości na ściskanie lub zginanie;

(X) – procentowa zawartość dodatku;

(m) – nachylenie linii regresji;

(b) – wyraz wolny.

Wyniki wytrzymałości na ściskanie zapraw po siedmiu dniach przedstawiono w tabeli 3. Wraz ze zwiększeniem ilości dodatku obserwuje się zmniejszenie wytrzymałości. D2 (5%) cechuje się najmniejszym rozproszeniem wyników. Wartości parametrów regresji przedstawiono w tabeli 4. Na podstawie tych danych stwierdzono, że wraz ze wzrostem procentowej zawartości dodatku biowęgla wytrzymałość na ściskanie zmniejsza się o ok. 0,58 MPa na każdy dodatkowy 1%.

Table 4. Regression parameters – compressive strength after 7 days

Tabela 4. Parametry regresji – wytrzymałość na ściskanie po 7 dniach

Parameter/Parametr	Value/Wartość
Mean additive content ($\bar{X}$)/ Średnia zawartość dodatku ($\bar{X}$)	5,0 %
Mean strength ($\bar{Y}$)/Średnia wytrzymałość ($\bar{Y}$)	17,78 MPa
Slope (m)/Nachylenie (m)	-0,5832
Intercept (b)/Wyraz wolny (b)	20,696
Regression equation/Równanie regresji	$Y = -0,5832X + 20,696$

Wyniki wytrzymałości na zginanie po 7 dniach przedstawiono w tabeli 5. Dodatek biowęgla wpływa negatywnie na wytrzymałość zapraw na zginanie i spójność wyników, szczególnie przy zawartości 7,5%. Wartości parametrów regresji przedstawiono w tabeli 6.

Równanie regresji (7) sugeruje, że wraz ze wzrostem zawartości dodatku wytrzymałość na zginanie stopniowo maleje, co jest zgodne z danymi obserwowanymi w badaniach. Wyniki wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach przedstawiono w tabeli 7. Największą wytrzymałość osiągnięto w przypadku SK. Dodatek biowęgla powoduje zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach, najbardziej w przypadku 7,5%, a więc wraz ze wzrostem zawartości dodatku zmniejsza się wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach. Wartości parametrów regresji przedstawiono w tabeli 8.

Table 6. Regression parameters – flexural strength after 7 days

Tabela 6. Parametry regresji – wytrzymałość na zginanie po 7 dniach

Parameter/Parametr	Value/Wartość
Mean additive content ($\bar{X}$)/ Średnia zawartość dodatku ($\bar{X}$)	5,0 %
Mean strength ($\bar{Y}$)/Średnia wytrzymałość ($\bar{Y}$)	3,65 MPa
Slope (m)/Nachylenie (m)	-0,102
Intercept (b)/Wyraz wolny (b)	4,16
Regression equation/Równanie regresji	$Y = -0,1020X + 4,1600$

Table 7. Compressive strength of mortars after 28 days

Tabela 7. Wytrzymałość na ściskanie zapraw po 28 dniach

Series/ Seria	Mean compressive strength [MPa]/ Średnia wytrzymałość na ściskanie [MPa]	Variance [MPa ²]/ Wariancja [MPa ²]	Standard deviation [MPa]/ Odchylenie standardowe [MPa]
SK	40,96	8,31	2,88
D1	34,22	0,87	0,93
D2	32,75	1,78	1,33
D3	30,82	2,20	1,48

The flexural strength results after 28 days are presented in Table 9. The SK series exhibits the highest strength and the lowest variation in its values. In contrast, the D3 series shows the lowest value, and the D2 series shows the most significant variability of results. The values of regression parameters are presented in Table 10.

Table 9. Flexural strength of mortars after 28 days

Tabela 9. Wytrzymałość na zginanie zapraw po 28 dniach

Series/ Seria	Mean flexural strength [MPa]/ Średnia wytrzymałość na zginanie [MPa]	Variance [MPa ²]/ Wariancja [MPa ²]	Standard deviation [MPa]/ Odchylenie standardowe [MPa]
SK	7,05	0,02	0,13
D1	5,90	0,06	0,23
D2	5,57	0,32	0,57
D3	5,14	0,03	0,18

Conclusions

The analysis demonstrated that biochar with a particle size smaller than 0.25 mm can act as a fine filler in cement mortars. An addition of 2.5% improved the workability of the mixture, while higher contents (5% and 7.5%) led to reduced flowability, indicating a non-linear effect of the additive on rheological properties. All mortars met the requirements of class M20, but a systematic decrease in compressive and flexural strength was observed with the increase in biochar content. The series with the highest additive content (7.5%) did not achieve the minimum characteristic strength for cement class 32.5 MPa after 28 days, which limits its application. Based on the test results, **it was concluded that the safe share of biochar in cement mortar should not exceed 5% of the cement mass** to maintain an optimal balance between the mechanical and rheological properties of the mortar.

The obtained results confirm the trends in the literature, where adding biochar improves mortar workability at low dosages and reduces strength at higher contents [10 ÷ 12]. However, differences in the intensity of these effects, including limited water absorption and the visible structural impact on consistency and the scatter of strength

Table 8. Regression parameters – compressive strength after 28 days

Tabela 8. Parametry regresji – wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach

Parameter/Parametr	Value/Wartość
Mean additive content ($\bar{X}$)/ Średnia zawartość dodatku ($\bar{X}$)	5,0 %
Mean strength ($\bar{Y}$)/Średnia wytrzymałość ($\bar{Y}$)	32,63 MPa
Slope (m)/Nachylenie (m)	-0,70
Intercept (b)/Wyraz wolny (b)	36,12
Regression equation/Równanie regresji	$Y = -0,70X + 36,12$

Wyniki wytrzymałości na zginanie po 28 dniach przedstawiono w tabeli 9. Największą wytrzymałość oraz najmniejsze zróżnicowanie jej wartości wykazuje seria SK, natomiast seria D3 osiąga najmniejszą wartość, a D2 – największą zmienność wyników. Wartości parametrów regresji zestawiono w tabeli 10.

Table 10. Regression parameters – flexural strength after 28 days

Tabela 10. Parametry regresji – wytrzymałość na zginanie po 28 dniach

Parameter/Parametr	Value/Wartość
Mean additive content ($\bar{X}$)/ Średnia zawartość dodatku ($\bar{X}$)	5,0 %
Mean strength ($\bar{Y}$)/Średnia wytrzymałość ($\bar{Y}$)	5,54 MPa
Slope (m)/Nachylenie (m)	-0,154
Intercept (b)/Wyraz wolny (b)	6,31
Regression equation/Równanie regresji	$Y = -0,154X + 6,31$

Wnioski

Przeprowadzona analiza wykazała, że biowęgiel o granulacji mniejszej niż 0,25 mm może pełnić funkcję drobnego wypełniacza w zaprawach cementowych. Dodatek na poziomie 2,5% poprawiał urabialność mieszanki, natomiast większa zawartość (5 i 7,5%) prowadziła do zmniejszenia płynności, co świadczy o nieliniowym wpływie dodatku na właściwości reologiczne. Wszystkie zaprawy spełniały wymagania klasy M20, ale wraz ze wzrostem zawartości biowęgla obserwowano systematyczne zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie i zginanie. Seria z największym udziałem dodatku (7,5%) nie osiągnęła minimalnej wytrzymałości charakterystycznej dla cementu klasy 32,5 MPa po 28 dniach, co ogranicza jej zastosowanie. Na podstawie wyników badań stwierdzono, że **bezpieczny udział biowęgla w zaprawie cementowej nie powinien przekraczać 5% masy cementu**, aby zachować optymalny balans między właściwościami mechanicznymi i reologicznymi zaprawy.

Uzyskane wyniki potwierdzają kierunki zmian opisywane w literaturze, gdzie dodatek biowęgla poprawia urabialność zaprawy przy małej jego ilości i powoduje zmniejszenie wytrzymałości przy większej zawartości [10 ÷ 12]. Różnice w intensywności tych efektów, w tym

results, indicate the significant role of the characteristics of the biochar itself as well as the conditions of its incorporation into the mixture.

Received: 23.06.2025

Revised: 08.08.2025

Published: 23.10.2025

ograniczona absorpcja wody oraz widoczny wpływ struktury dodatku na konsystencję i rozrzut wyników wytrzymałościowych wskazują jednak na istotną rolę charakterystyki samego biowęgla oraz warunków jego wprowadzenia do mieszanki.

Artykuł wpłynął do redakcji: 23.06.2025 r.

Otrzymało poprawiony po recenzjach: 08.08.2025 r.

Opublikowano: 23.10.2025 r.

Literature

- [1] P. Cely, G. Gascó, Paz-Ferreiro J, Méndez A. Agronomic properties of biochars from different manure wastes. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2015; <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2014.11.014>.
- [2] Choudhary TK, Khan KS, Hussain Q, Ahmad M, Ashfaq M. Feedstock-induced changes in composition and stability of biochar derived from different agricultural wastes. *Arabian Journal of Geosciences*. 2019; <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4735-z>.
- [3] Islam T, Li Y, Cheng H. Biochars and Engineered Biochars for Water and Soil Remediation: A Review, Sustainability. 2021; <https://doi.org/10.3390/su13179932>.
- [4] Chen W.-H, Wang C.-W, Ong HC, Show PL, Hsieh T.-H. Torrefaction, pyrolysis and two-stage thermodegradation of hemicellulose, cellulose and lignin. *Fuel*. 2019; <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116168>.
- [5] Tomczyk A, Sokołowska Z, Boguta P. Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. 2020; <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3>.
- [6] Marcińczyk M, Oleszczuk P. Biochar and engineered biochar as slow- and controlled-release fertilizers, *Journal of Cleaner Production*. 2022; <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130685>.
- [7] Jafri N, Wong WY, Doshi V, oon LW, Cheah KH. A review on production and characterization of biochars for application in direct carbon fuel cells, *Process Safety and Environmental Protection*. 2018; <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.06.036>.
- [8] Pietrzak A. Wpływ popiołów powstałych ze spalania osadów ściekowych na podstawowe właściwości mechaniczne betonu, *Budownictwo o Zoptimalizowanym Potencjale Energetycznym*. 2019; <https://doi.org/10.17512/bozpe.2019.1.03>.
- [9] Langier B, Pietrzak A. Innowacyjne cementy stosowane w technologii betonu, *Budownictwo o Zoptimalizowanym Potencjale Energetycznym*. 2016; <https://doi.org/10.17512/bozpe.2016.1.06>.

- [10] Gupta S, Kua HW, Koh HJ. Application of biochar from food and wood waste as green admixture for cement mortar, *Science of the Total Environment*. 2018; <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.044>.
- [11] Gupta S, Kua HW, Pang SD. Effect of biochar on mechanical and permeability properties of concrete exposed to elevated temperature, *Construction and Building Materials*. 2020; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117338>.
- [12] Suarez-Riera D, Restuccia L, Ferro GA. The use of Biochar to reduce the carbon footprint of cement-based materials. *Procedia Structural Integrity*. 2020; <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.06.023>.
- [13] PN-EN 1097-6:2013 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – Część 6: Oznaczanie gęstości ziarn i nasiąkliwości.
- [14] PN-EN 933-1:2012 Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Część 1: Oznaczanie składu ziarnowego – Metoda przesiewania z użyciem sit o otworach kwadratowych.
- [15] PN-EN 196-1:2016-07 Metody badania cementu – Część 1: Oznaczanie wytrzymałości.
- [16] PN-EN 197-1:2012 Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
- [17] PN-EN 13139:2003 Kruszywa do zaprawy.
- [18] PN-EN 1008:2004 Woda zarobowa do betonu – Specyfikacja pobierania próbek, badania i ocena przydatności wody zarobowej do betonu, w tym wody odzyskanej z procesów produkcji betonu.
- [19] PN-EN 1015-3:2000 Metody badań zapraw do murów – Część 3: Oznaczanie konsystencji metodą opadu stożka.
- [20] PN-EN 1015-11:2001 Metody badań zapraw do murów – Część 11: Oznaczanie wytrzymałości na zginanie i ściskanie zapraw stwardniałych.