

WPŁYW ODPADÓW MAKULATUROWYCH NA WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNE NISKOKLINKIEROWYCH ZAPRAW CEMENTOWYCH PRZEZNACZONYCH DO DRUKU 3D

europa
student
magazine

ISSN 2956-834X

Numer 2 / 2025

Anastasiia Chernomaz¹, Iga Jasińska^{2*}

¹Uniwersytet Radomski im. Kazimierza Pułaskiego, Wydział Mechaniczny, SKN NOWOTECHBUD, Polska, chernomaz2023@gmail.com

²Uniwersytet Radomski im. Kazimierza Pułaskiego, Wydział Mechaniczny, Stasieckiego 54, 26-600 Radom, Polska, i.jasinska@urad.edu.pl

* Corresponding author

Streszczenie – Technologie w zakresie budownictwa kubaturowego zmuszają do opracowania nowych materiałów, które prócz wysokich właściwości mechanicznych będą wpisywały się w zakres zrównoważonego rozwoju. Celem przeprowadzonych badań była ocena właściwości reologicznych zapraw cementowych zawierających w masie pulpę z odpadów makulaturowych. Przeprowadzono oznaczenie gęstości, konsystencji i czasu wiązania zapraw cementowych wykonanych z użyciem CEM II/B-M(S-V) 42,5R. Badania wykonano na próbkach referencyjnych oraz modyfikowanych 5%-owym udziałem pulpy papierowej w masie zaprawy. Dowiedziono, że celulozowe włókna skutecznie zmniejszają płynność i zwiększają zdolność utrzymywania kształtu, czyniąc ją odpowiednią do wykorzystania w technologii druku 3D.

Słowa kluczowe – zaprawy niskoklinkierowe, druk 3D, cement, reologia

WSTĘP

Obecnie jesteśmy otoczeni najnowszymi technologiami, które często odgrywają kluczową rolę w naszym współczesnym świecie, przenikając do każdej sfery ludzkiego życia. Również branża budowlana nie pozostała objęta nowymi technologiami. W ostatnim czasie można zauważyć dynamiczny rozwój nowoczesnych rozwiązań, które niedawno wydawały się jak daleka przyszłość. Jednym z takich osiągnięć w tej kwestii jest technologia druku 3D, która krok po kroku zaczyna zmieniać procesy budowlane.

Drukowanie pewnych elementów konstrukcyjnych nie tylko przyspiesza realizację inwestycji, ale także możliwość zdobycia większej precyzji, zmniejszenie zużycia materiałów oraz ilości odpadów. Tego typu technologie mogą radykalnie zmienić współczesne budownictwo, tworząc nie tylko wydajniejsze, ale również bardziej zrównoważone metody budowlane. Oprócz potencjału, który niesie druk 3D w budownictwo, istnieją inne bariery utrudniające jego szerokie zastosowanie. Jednym z nich jest brak odpowiednich, niezawodnych i przyjaznych dla środowiska materiałów do druku, na przykład takich, które mogłyby zawierać w swoim składzie zaprawy i betonów odpady lub surowce z recyklingu, z zachowaniem ich właściwości mechanicznych.

W literaturze naukowej w ostatnich latach można znaleźć szereg prac wskazujących na możliwość wykorzystania różnego rodzaju mieszanek betonowych do druku 3D. W większości badania skupiają się na wykorzystaniu kruszywa z odpadów budowlanych i remontowych jako składnika (spoiwa i kruszywa) w produkcji betonów wykorzystywanych do druku 3D [1].

Badane są nie tylko właściwości mechaniczne zapraw, ale przede wszystkim ich zdolności do przenoszenia kolejnych warstw, urabialność i możliwości aplikacyjne [2-5]. Badania są prowadzone z użyciem granulek gumowych [6,7], które dodatkowo korzystanie wpływają na właściwości izolacyjności akustycznej.

Właściwości reologiczne zapraw dobrze korelują z właściwościami mieszanek betonowych. Pozwala to ograniczyć liczbę próbnich mieszanek podczas projektowania betonów, co przekłada się na oszczędność czasu i materiałów [8]. Dodatkowo we współczesnym świecie ekologiczna świadomość ludzi rośnie i dlatego coraz większe znaczenie ma dobór materiałów, które muszą spełniać nie tylko wymagania techniczne, ale także są przyjazne dla środowiska. Przeprowadzone badania miały na celu określenie zależności pomiędzy udziałem odpadów makulaturowych w zaprawach cementowych a ich właściwościami reologicznymi, które odgrywają kluczową rolę w ocenie przydatności materiału do zastosowań w technologii druku 3D. W badaniach szczególną uwagę zwrócono na aspekt zrównoważonego rozwoju, starając się wykorzystać surowce wtórne oraz materiały o obniżonym śladzie węglowym. Z uwagi na powyższe w badaniu wykorzystano przeznaczony do zniszczenia zadrukowany papier. Zamiast prostego wyrzucenia ten odpad otrzymał nowe życie. Zebrany materiał został rozdrobniony ręcznie. Do badań również wykorzystano cement o obniżonej zawartości klinkieru portlandzkiego, który też z kolei został opracowany zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju i dzięki zdekarbonizowanemu surowcom wpływa znacząco na zmniejszenie śladu węglowego.

I. PLAN BADAŃ

W ramach badań, które mają na celu ocenę właściwości reologicznych zaprawy, przygotowano dwie serie próbek – próbki referencyjne oraz modyfikowane pulpą papierową w ilości 5% w stosunku do masy próbki.

Próbka normowa (referencyjna) została przygotowana zgodnie z normą PN-EN 196-1 [9]. Do jej wykonania wykorzystano cement CEM II/B-M(S-V) 42,5R (Cemex), wodę wodociągową oraz piasek o uziarnieniu normowym (kruszywo drobne), w ustalonych proporcjach, tj. 1 : 3 : 0,5; zapewniających właściwe zagęszczenie i konsystencję zaprawy. Zaprawa ta stanowiła punkt odniesienia do porównań z modyfikowaną wersją zaprawy.

Druga seria próbek to próbki modyfikowane – próbki o składzie próbek referencyjnych z dodatkiem pulpy papierowej w ilości 5% masy wszystkich składników. W celu przygotowania pulpy papierowej rozdrobiono zadrukowane i niepotrzebne kartki w prostokąty o wymiarach ok. 3 × 4 cm (rys. 1). Kartki te zostały zalane wodą w taki sposób aby stanowiły 7% masy utworzonej zaprawy. Następnie po 7 dniach utworzona pulpa została zblendowana za pomocą ręcznego blendera. Tak przygotowana pulpa została wykorzystana jako dodatek do zaprawy cementowej. Wszystkie próbki przygotowano w tych samych warunkach laboratoryjnych, z zastosowaniem jednakowych urządzeń do mieszania oraz materiałów, co miało na celu uniknięcie czynników zewnętrznych mogących wpłynąć na wyniki badań. Dzięki temu możliwe było obiektywne porównanie wpływu dodatku makulatury na właściwości zaprawy w stanie świeżym.



Rys. 1. Przygotowanie makulatury do wykonania pulpy papierowej

Każdą z serii próbek poddano badaniom laboratoryjnym, które pozwalają ocenić właściwości reologiczne zaprawy. Obejmowały one:

- gęstość objętościową zgodnie z normą PN-EN 12350-6 [10],
- konsystencję – określoną za pomocą stolika rozpliwowego (zgodnie z metodyką PN-EN 1015-3 [11]),
- początkowy czas wiązania – określany metodą igły Vicata, który pozwala ocenić czas początku i końca wiązania cementu w obecności dodatku makulatury (wg normy PN-EN 196-3 [12]).

Podsumowaniem badania było wykonanie symulacji

prototypowych drobnowymiarowych wydruków w celu określenia możliwości zastosowania wykonanych modyfikowanych zapraw w technologii druku 3D.

II. METODYKA BADAŃ

GĘSTOŚĆ ŚWIEŻEJ ZAPRAWY

Badanie gęstości określa stosunek masy do objętości świeżej zaprawy. Jest to jeden z podstawowych parametrów pozwalających ocenić stopień zagęszczenia zaprawy. Pomiar wykonano poprzez napełnienie odpowiedniego naczynia miarowego zaprawą, staranne jej zagęszczenie i dokładne zważenie [9] (rys. 2).



Rys. 2. Wążenie próbek w celu określenia gęstości świeżej zaprawy

Następnie, na podstawie znanej objętości naczynia i masy, obliczono gęstość zgodnie ze wzorem (1).

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

gdzie:

- m_1 - masa pojemnika [kg],
- m_2 - masa pojemnika wraz z zawartą w nim próbką zaprawy [kg],
- V - objętość pojemnika [m^3]

OZNACZENIE KONSYSTENCJI ZAPRAWY – STOLIK ROZPLIWU

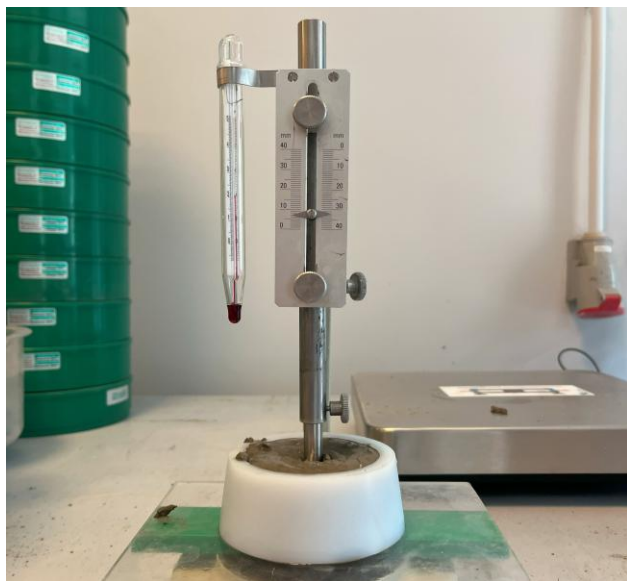
Metoda ta służy do określenia płynności świeżej zaprawy za pomocą stolika rozpliwu [11]. Zaprawę umieszczono w cylindrycznej formie na tarczy stolika, a następnie poddano 15 wstrząsom. Po usunięciu formy zmierzono średnicę rozpliwu zaprawy w dwóch prostopadłych kierunkach (rys. 3). Uśredniony wynik pomiaru wskazuje na klasę konsystencji zaprawy, która jest kluczowa dla jej zastosowania w budownictwie.



Rys. 3. Badanie konsystencji zaprawy

OZNACZENIE CZASU WIĄZANIA – IGŁA VICATA

Aparat Vicata służy do pomiaru czasu początku i końca wiązania zaczynu cementowego [12]. Badanie polega na przygotowaniu zaczynu według ściśle określonych proporcji i procedury mieszania. Zaczyn umieszczono w pierścieniu Vicata (rys. 4), a bolec (później igłę) opuszczono na jego powierzchnię, mierząc głębokość penetracji. Moment, gdy igła nie zagłębiała się już na określoną odległość wyznaczył początek czasu wiązania. Badanie przeprowadza się w kontrolowanych warunkach temperaturowych, a wyniki odczytuje się ze skali aparatu.

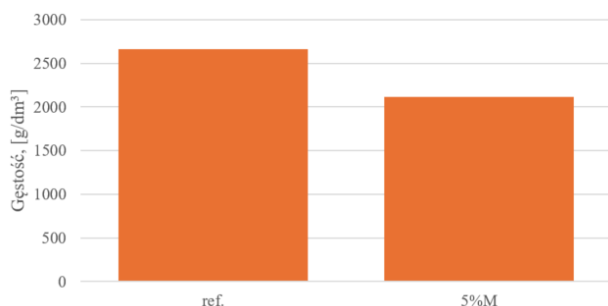


Rys. 4. Badanie czasu wiązania zaprawy

III. WYNIKI BADAŃ

Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych, wymienionych powyżej, otrzymano następujące wyniki:

Gęstość objętościowa próbki referencyjnej (świeżej zaprawy) wynosiła 2661,5 g/dm³. Dodatek 5% pulpy papierowej do masy zaprawy spowodował zmniejszenie gęstości do 2111 g/dm³ (rys. 5).



Rys. 5. Gęstość świeżych zapraw: zaprawy referencyjnej (ref.) i zaprawy z dodatkiem 5% pulpy papierowej (5%M)

Gęstość zaprawy z dodatkiem pulpy papierowej zmniejszyła się o około 20,6% w porównaniu do próbki

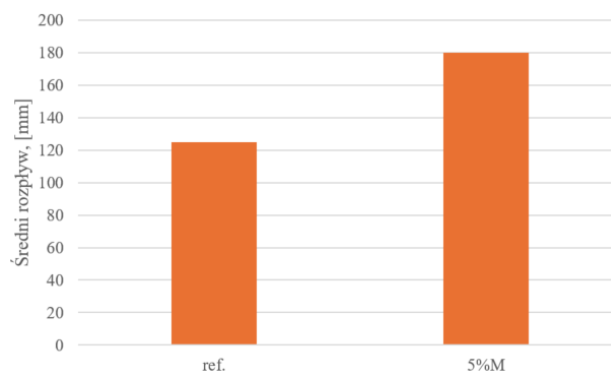
referencyjnej. Dodatek makulatury wpłynął na spadek gęstości w porównaniu z zaprawą referencyjną. Spadek ten może wynikać z faktu, iż włókna papierowe są znacznie lżejsze od kruszywa, przez co gotowa zaprawa staje się lżejsza, co może być korzystne np. w drukowaniu elementów ściennych.

Konsystencję zaprawy określono za pomocą stolika rozptywu. Po usunięciu formy cylindrycznej i zmierzeniu średnic rozptywu zaprawy w dwóch prostopadłych kierunkach wyniosły one średnio 12,5 cm. Rozptyw zaprawy zawierającej makulaturę w postaci pulpy papierowej wynosił 18 cm (rys. 6).

Obie wartości uzyskane w tym badaniu mieszczą się w klasie konsystencji F1 wg PN-EN 1015-3, co oznacza, że zaprawa nadaje się do murowania lub tynkowania ręcznego.

Średni rozptyw zaprawy z dodatkiem makulatury zwiększył się o 5,5 cm w porównaniu do próbki referencyjnej, co stanowi 44% wzrostu.

Taki przyrost wyraźnie wykracza poza granice błędu statystycznego, co oznacza, że udział makulatury w masie próbki, a jeszcze bardziej wody zawartej w pulpie, znacząco wpływa na poprawę urabialności zaprawy.



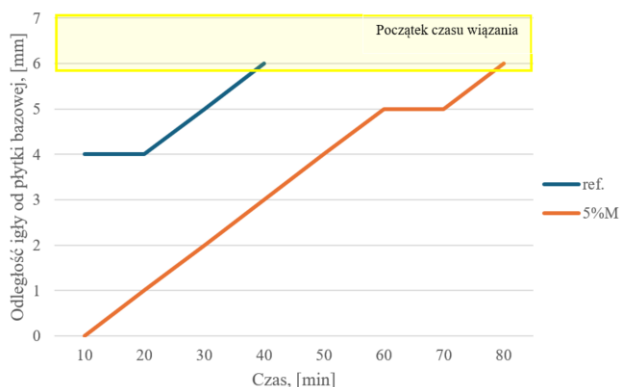
Rys. 6. Wielkość rozptywu świeżych zapraw badana metoda stolika rozptywu: zaprawa referencyjna (ref.) i zaprawa z dodatkiem 5% pulpy papierowej (5%M)

Do określenia początku czasu wiązania zaprawy referencyjnej wykonano próbkę o zawartości 400 g cementu oraz 200 ml wody. Po ustaleniu właściwej dla badania konsystencji rozpoczęto badanie początku czasu wiązania.

W przypadku czasu początku wiązania zaobserwowano bardzo wyraźny wpływ dodatku makulatury. Próbka referencyjna rozpoczęła wiązanie po 40 minutach, natomiast próbka z makulaturą – dopiero po 80 minutach (tabela 1, rys. 7). Oznacza to wydłużenie czasu aż o 100%, czyli dwukrotne opóźnienie. Tak duża różnica świadczy o tym, że makulatura istotnie wpływa na proces czasu początku i końca wiązania cementu, prawdopodobnie poprzez wchłanianie wody i działanie jak naturalny opóźniacz. W kontekście druku 3D może to być korzystne przy pracy z dużymi elementami, ale może również wymagać dodatkowej kontroli, aby uniknąć zbyt wolnego wiązania.

Tabela 1. Wyniki badania początku czasu wiązania

czas [min.]	odległość igły od płytki bazowej [mm]	
	zaprawa referencyjna (ref.)	zaprawa modyfikowana (5%M)
10	4	0
20	4	1
30	5	2
40	6	3
50	-	4
60	-	5
70	-	5
80	-	6


Rys. 6. Porównanie początku czasu wiązania zaprawy referencyjnej (ref.) i zaprawy z dodatkiem 5% makulatury (5%M)

IV. OCENA PRZYDATNOŚCI ZAPRAWY DO DRUKU 3D

Kolejnym etapem przeprowadzonych eksperymentów była praktyczna ocena przydatności zaprawy do druku 3D. W tym badaniu wykorzystano rękaw cukierniczy z otworem o średnicy 2 cm jako uproszczony model dyszy drukarki 3D. Za jego pomocą wykonano próbę wyciskania pasm z dwóch zapraw – normowej oraz z dodatkiem pulpy papierowej. Po ułożeniu zapraw na płaską powierzchnię obserwowano ich zachowanie pod względem stabilności geometrycznej i możliwości tworzenia warstw. W przypadku zaprawy referencyjnej zaobserwowano, że pod czas wyciskania pasmo straciło swój kształt – rozpląnęło się na boki i spłaszczyło, przez co nie nadawało się do budowania kolejnych warstw (rys. 8).


Rys. 6. Próba wyciskania pasma z zaprawy normowej

Tymczasem pasmo z zaprawy zawierającej makulaturę w postaci pulpy papierowej charakteryzowało się ze znacznie większą stabilnością – nie rozpląnęło się, zachowało swój kształt i dobrze utrzymywało nałożone kolejne warstwy. Taki efekt wynika z obecności celulozy,

która poprawia płynność i strukturę zaprawy, zwiększając jej zdolność do utrzymywania formy.


Rys. 6. Próba wyciskania pasma z zaprawy z zawartością pulpy papierowej

Wyniki tej próby potwierdzają, że dodatek pulpy papierowej wpływa korzystnie na właściwości technologiczne zaprawy pod kątem jej wykorzystania w druku 3D. Umożliwia to bardziej precyzyjne formowanie elementów oraz zmniejsza ryzyko deformacji w trakcie druku, co może mieć kluczowe znaczenie w praktycznym zastosowaniu takich materiałów w budownictwie przyszłości.

V. WNIOSKI

Przeprowadzone badania wykazały, że dodatek pulpy papierowej, otrzymanej z makulatury, znacząco wpływa na właściwości reologiczne zaprawy cementowej oraz jej przydatność do zastosowań w technologii druku 3D. Dzięki temu możliwe było sformułowanie następujących wniosków:

1. Zastosowanie makulatury w formie rozdrobnionej na małe kawałki, rozpulchnionej w wodzie w ilości 7% wagowych i zblendowanej do jednolitej masy spowodowało obniżenia gęstości objętościowej zaprawy aż o 20,6% w porównaniu do próbki referencyjnej. Efekt ten może być szczególnie potrzebny w procesach, gdzie istotne jest zmniejszenie masy elementów, takich jak prefabrykaty czy lekkie konstrukcje warstwowe.
2. Pulpa papierowa oraz zawarta ilość w niej wody wpłynęły na urabialność zaprawy – średnica rozpląwu próbki z dodatkiem pulpy wzrosła o 44% w stosunku do próbki normowej. Taki wzrost średnicy jednoznacznie wskazuje na zwiększoną plastyczność zaprawy, co z kolei przekłada się na łatwiejsze formowanie kształtów oraz lepsze dopasowanie do wymagań procesu drukowania warstwowego.
3. Obecność pulpy papierowej wpływa na opóźnienie początku czasu wiązania – próbka z dodatkiem makulatury rozpoczęła wiązanie dopiero po 80 minutach, podczas gdy próbka referencyjna po 40 minutach. Oznacza to aż dwukrotne wydłużenie tego procesu. Ten efekt należy przypisać włóknom celulozowym, które absorbując wodę, działają jako naturalny opóźniacz czasu początku i końca wiązania cementu. W kontekście druku 3D, taka cecha może być zarówno korzystna (więcej czasu na formowanie struktur), jak i wymagająca dodatkowej kontroli parametrów utwardzania.
4. W praktycznym teście stabilności geometrycznej zapraw wyciskanych przez rękaw cukierniczy, zaprawa

z dodatkiem makulatury wykazała zdolność do utrzymywania kształtu i kolejnych warstw. Zaprawa referencyjna uległa rozlewaniu i deformacji. Tym samym udowodniono, że celulozowe włókna skutecznie zmniejszają płynność i zwiększają zdolność utrzymywania kształtu, czyniąc ją bardziej odpowiednią do technologii druku 3D.

THE INFLUENCE OF WASTE PAPER ON THE RHEOLOGICAL PROPERTIES OF LOW-CLINKER CEMENT MORTARS INTENDED FOR 3D PRINTING

Technologies in the field of building construction are driving the development of new materials that, in addition to having high mechanical properties, also align with the principles of sustainable development. The aim of the study was to determine the effect of incorporating waste paper into cement mortars on their basic rheological properties in the context of their applicability in 3D printing technology. Tests were conducted to determine the density, consistency, and initial setting time of cement mortars made with CEM II/B-M(S-V) 42.5R and 5% paper pulp by mass. It was demonstrated that cellulose fibers effectively increase the viscosity of the mix, making it more suitable for 3D printing applications.

Key words: low-clinker mortars, 3D printing, cement, rheology

BIBLIOGRAFIA

- [1] Sikora P., Ludwiczak-Sarzała A. (2024) "Zastosowanie odpadów budowlanych i rozbiórkowych w technologii druku 3D mieszanką betonową – projekt badawczy Recycl3D". *Przegląd budowlany*, Vol. 3, pp 16-17.
- [2] Jedlecki M., Koniecko K., Ziółkowska O., Szulińska A. (2023) "Badanie kompozytów cementowych ze składnikiem pochodzącym z recyklingu łopat turbin wiatrowych". *Builder*, Issue 9, Vol. 314 doi: 10.5604/01.3001.0053.8047
- [3] Huawei L., et al. (2022) "3D printing concrete with recycled coarse aggregates: The influence of pore structure on interlayer adhesion". *Cement and Concrete Composites*. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104742
- [4] Irshidat M., et al. (2024) "Waste materials utilization in 3D printable concrete for sustainable construction applications: a review". *Emergent Materials*. doi: 10.1007/s42247-024-00942-4
- [5] Samrani P., et al. (2024) "Effect of fly ash and ground waste glass as cement replacement in concrete 3D-Printing for sustainable construction". *Frontiers in Built Environment*. doi: 10.3389/fbuil.2024.1430174
- [6] Wang X., et al. (2024) "3D Cementitious composites printing with pretreated recycled crumb rubber: mechanical and acoustic insulation properties". *Virtual and Physical Prototyping*. doi: 10.1080/17452759.2024.2399787
- [7] Sambucci M., Biblioteca I., Valente M. (2023) "Life cycle assessment (LCA) of 3D Concrete Printing and Coasting Processes for cementitious materials incorporating ground waste tire rubber". *Recycling*. doi: 10.3390/recycling8010015
- [8] Gołaszewski J., Kostranowska A., and Cygan G. (2012) "Właściwości reologiczne mieszanki z zaprawy o różnych składach w układzie zmiennych temperatur" *Konferencja Dni Betonu, Materiały Konferencyjne*, pp. 759-768.
- [9] PN-EN 196-1:2016-07 (2016) "Metody badania cementu – Część 1: Oznaczanie wytrzymałości". *Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa*
- [10] PN-EN 12350-6:2019 (2019) "Badania mieszanki betonowej- Część 6: Gęstość". *Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa*
- [11] PN-EN 1015-3:2000 (2000) "Metody badań zapraw do murów- Określenie konsystencji świeżej zaprawy (za pomocą stolika rozplątywu)". *Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa*
- [12] PN-EN 196-3:2016-12 (2016) "Metody badania cementu – Część 3: Oznaczanie czasu wiązania i spęchnienia" *Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa*