

# Badanie właściwości betonów transparentnych

## Testing the properties of transparent concretes

mgr inż. Abel A. Belay, dr inż. Julita Krassowska (ORCID: 0000-0001-9209-1285) – promotor,  
Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku, Politechnika Białostocka

**Streszczenie:** Zastosowanie światłowodów do betonu znacznie zmniejszyłoby zużycie energii na oświetlenie w budynkach i przyczyniłoby się do poprawy efektywności energetycznej. Celem pracy jest zbadanie właściwości betonu ze światłowodem oraz określenie granicy zawartości światłowodu dla zachowania jego wytrzymałości i zdolności przepuszczania światła. W badaniu wykorzystano cztery serie i oceniono wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na zginanie i przepuszczalność światła. Serie próbek zawierały włókna światłowodowe o zawartości 0, 3, 5 i 6% objętościowo. Badania pokazują, że transmisja światła poprawia się wraz z koncentracją włókien światłowodowych. Jednak wytrzymałość mechaniczna spadła powyżej 3% zawartości włókien optycznych.

**Słowa kluczowe:** włókna optyczne, światłowody, beton transparentny.

**Abstract:** The use of optical fibers in concrete would significantly reduce the energy consumption for lighting in buildings and would contribute to the improvement of energy efficiency. The aim of the work is to examine the properties of concrete with optical fiber and to determine the limit of optical fiber content to maintain its strength and light transmission. Four series were used in the study and compressive strength, flexural strength and light transmission were evaluated. The sample series contained optical fibers with 0, 3, 5 and 6% by volume. Studies show that light transmission improves with the concentration of optical fibers. However, the mechanical strength dropped above 3% of the optical fiber content.

**Keywords:** optical fibers, optical fibers, transparent concrete.

## 1. Wprowadzenie

Wprowadzenie światłowodów do betonu ma istotny wpływ na obniżenie ilości energii świetlnej zużywanej przez budynki oraz poprawę ich wyglądu, a jednocześnie może mieć negatywny wpływ na właściwości mechaniczne konstrukcji. Jak wynika z badań, zwiększenie ilości światłowodu ma odwrotną zależność na wytrzymałość na ściskanie betonu [1–3]. Jednak niektóre badania poddają w wątpliwość tę teorię, pokazując, że zwiększenie ilości włókien zwiększa zarówno wytrzymałość betonu na ściskanie, jak i na rozciąganie przy zginaniu [4, 5]. Niniejsza praca ma na celu wskazanie optymalnej ilości wykorzystania włókien optycznych (światłowodowych), co zapewni przepuszczalność światła przy zapewnieniu dobrych parametrów wytrzymałościowych konstrukcji.

## 2. Właściwości mechaniczne betonu transparentnego

Liczne prace eksperymentalne wskazują, że większa liczba włókien optycznych w betonie prowadzi do obniżenia najważniejszej właściwości mechanicznej betonu, jaką jest wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie. Według [1] beton o zawartości włókien optycznych 4,91% miał niższą wytrzymałość na ściskanie niż beton referencyjny o 19,5%. Podobnie [2] porównując beton zawierający 6% światłowodu z betonem referencyjnym, wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu

zmniejszyła się o 21,8% [2]. Z drugiej strony w [3] wykazano, że beton z 2% zawartością włókien optycznych wykazuje 14,09% poprawę wytrzymałości na ściskanie, a także wzrost wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu o 37,70% w porównaniu do zwykłego betonu. Podobne badania w [4] wykazywały zmniejszenie wytrzymałości. Chociaż badania w [5] ujawniają wyraźną korelację między światłowodem a wytrzymałością mechaniczną, nie wskazują maksymalnej ilości światłowodu, którą można wykorzystać w konstrukcji. Ponadto eksperyment przeprowadzony przez [6] pokazuje, że obecność 5% światłowodu w betonie powoduje 25,5% spadek wytrzymałości na zginanie i 20% redukcję w wytrzymałości na ściskanie. Jednak według [7] badania betonów z włóknami optycznymi w ilości 5% wykazują wzrost wytrzymałości na ściskanie o 2,7% i wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu o 70,1%. W tym badaniu włókna były ułożone wzdłuż próbki, zwiększając znacznie wytrzymałość betonu. Słabe wiązanie pomiędzy strukturą betonu, które jest generowane przez obecność włókien, jest sugerowanym wyjaśnieniem zaobserwowanego spadku wytrzymałości betonów transparentnych. Zgadza się z tym stwierdzeniem autorzy w swoich badaniach w pracy [8]. W wyniku tego eksperymentu można wykazać, że wytrzymałość na ściskanie zaczyna spadać od 3% zawartości włókien optycznych, natomiast wytrzymałość na zginanie zaczyna spadać od 5% zawartości światłowodu w stosunku do betonu referencyjnego.

### 3. Cel i zakres badań doświadczalnych

Celem badań było określenie parametrów mechanicznych betonu transparentnego. Przeprowadzono badania wytrzymałości betonu na ściskanie, wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu oraz przepuszczalności światła po 7, 14 oraz 28 dniach od wykonania zarobów. Przeprowadzono badania świeżej mieszanki betonowej, takie jak: urabialności oraz zawartości powietrza. Eksperyment skupiał się głównie na 4 różnych seriach, z których każda miała inną wagowo liczbę włókien światłowodowych. Próbka I, II, III, IV miała 0; 25; 33,33 i 45 gramów, co stanowiło odpowiednio 0, 3, 5 i 6% zawartości włókien optycznych.

Włókna światłowodowe (optyczne) zostały wyprodukowane metodą pręt-tuba, zmodyfikowaną na potrzeby badań. Preforma została wykonana w postaci pręta szklanego shott F2 o średnicy 30 mm. Do produkcji światłowodów wykorzystano wyciągarkę światłowodową z kompletnym systemem sterowania w Laboratorium Katedry Fotoniki, Elektroniki i Techniki Oświetlenia Politechniki Białostockiej. Światłowody ciągnięto przy następujących parametrach: temperatura pieca 800–860°C, prędkość podawania preformy 3–5 mm/min, prędkość bębna 15–30 obr./min w zależności od średnicy światłowodu. Powierzchnia pojedynczego światłowodu ma średnicę 1 mm.

Skład mieszanek betonowych przedstawiono w tabeli 1.

**Tabela 1.** Skład badanych betonów na 1m<sup>3</sup>

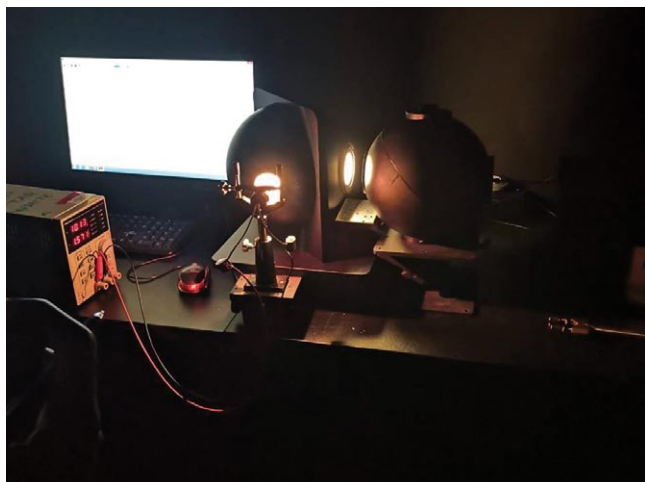
Składniki	Ilość
Cement 42.5R, (kg/m <sup>3</sup> )	320
Woda (kg/m <sup>3</sup> )	160
Piasek 0.125 – 4 mm (kg/m <sup>3</sup> )	732
Żwir (kg/m <sup>3</sup> )	1203
Domieszka (% masy cementu)	3,2
W/C	0,5

Mieszankę betonową wykonano w betoniarni planetarnej. Dozowanie składników polegało na wstępnym wymieszaniu mieszaniny piaskowo-żwirowej, a następnie dodaniu wody z domieszką uplastyczniającą. Czas mieszania wynosił ok. 5 minut. Po wymieszaniu badano konsystencję metodą stolika rozplwowego zgodnie z PN-EN 12350-5:2019-08 [9] oraz zawartość powietrza w betonie metodą ciśnieniową zgodnie z PN-EN 12350-7:2019 [10]. Po wykonaniu ułożono ją w formach. Układanie mieszanki odbywało się w trzech warstwach, tak aby zachować równomierne i przestrzenne ukierunkowanie włókien w betonie. Po ułożeniu każdej warstwy mieszanka była zagęszczana. Próbkę zabezpieczono przed odparowywaniem wody, a po 24 h od wykonania – rozformowano. Elementy próbne pielęgnowano według wymagań PN-EN 13670:2011 [11].

Plan eksperymentu obejmował badania:

- wytrzymałości betonu na ściskanie po 7, 14 i 28 dniach,
- wytrzymałości betonu na rozciąganie po 7, 14 i 28 dniach,
- przepuszczalności światła po 28 dniach.

Badanie wytrzymałości betonu na ściskanie wykonano zgodnie z PN-EN 12390-3:2011 [12], wykorzystując próbki sześciennie. Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu określono na próbkach o wymiarach 40×40×160 mm, zgodnie z PN-EN 12390-5:2011 [13]. Beleczki obciążono siłą skupioną P w środku ich rozpiętości. Pomiary siły niszczącej przeprowadzono za pomocą maszyny wytrzymałościowej CONTROLS C86Z00 o maksymalnej sile niszczącej 100 kN. Badanie przepuszczalności światła w betonie transparentnym wykonano metodą kasetonu świetlnego „light box” (rys. 1). W tej metodzie przygotowuje się kaseton świetlny, w którym na jednym otworze kuli umieszcza się próbkę, a na drugim otworze kuli umieszcza się źródło światła, którym jest bryła o mocy 20 W. Przyrząd do pomiaru transmisji spektralnej ilości światła przechodzi przez przezroczysty beton, który znajduje się pośrodku źródła światła i narzędzia pomiarowego.



**Rys. 1.** Aparatura do badania przepuszczalności światła

### 4. Wyniki badań i ich analiza

Wyniki badań świeżej mieszanki betonowej przedstawiono w tabeli 2.

**Tabela 2.** Charakterystyka świeżej mieszanki betonowej

Seria	Zawartość powietrza (%)	Średnia średnica rozplwywu (cm)	Rozplwy procentowy (%)
I	13	17,05	70,5
II	12	17,3	73
III	12,5	17,2	72

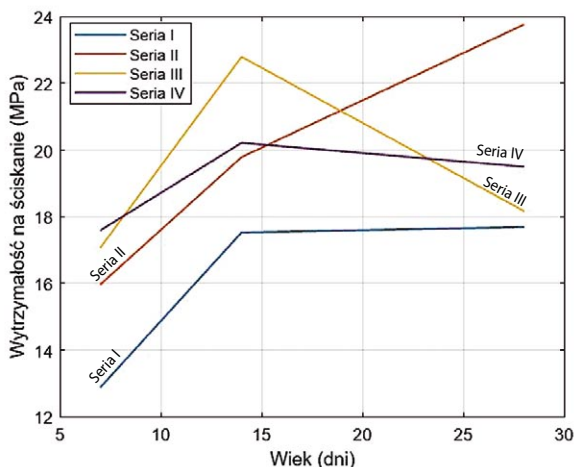
Zgodnie z [14] jeżeli wielkość rozplwywu określana w procentach wynosi w zakresie  $0 < 71,8\% < 150\%$ , mieszanka betonowa nadaje się do dalszych badań.

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie  $f_{ck}$  oraz wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu  $f_{ctm}$  po 7, 14 i 28 dniach przedstawiono w tabeli 3. Każdy wynik jest średnią arytmetyczną wyciągniętą z wyników cząstkowych 5 próbek dla każdej serii.

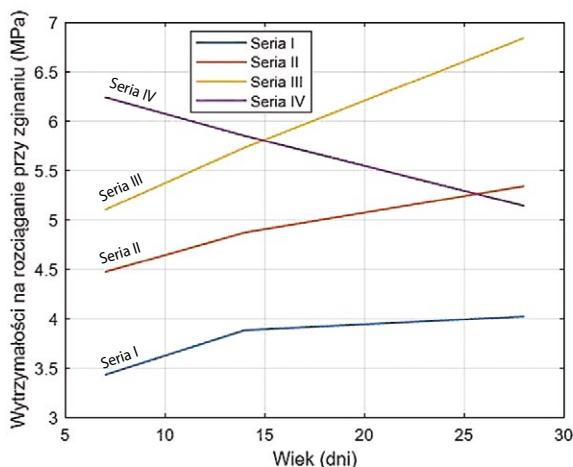
**Tabela 3.** Parametry mechaniczne betonu transparentnego

Seria	Wiek [dni]	Wytrzymałość na ściskanie $f_{ck}$ [MPa]	Wytrzymałość na rozciąganie $f_{ctm}$ [MPa]
I (0 g)	7	12,88	3,43
	14	17,53	3,88
	28	17,69	4,02
II (25 g)	7	15,97	4,47
	14	19,79	4,87
	28	23,77	5,34
III (33,3 g)	7	17,07	5,10
	14	22,80	5,73
	28	18,17	6,84
IV (45 g)	7	17,59	6,24
	14	20,22	5,85
	28	19,50	5,14

Zależność wzrostu wytrzymałości na ściskanie w czasie badanych betonów transparentnych przedstawiono na rysunku 2. Wytrzymałość na ściskanie w serii II, gdzie zastosowano 25 g włókien optycznych w czasie, wykazała powolny przyrost wytrzymałości. W pozostałych seriach można zauważyć spadek wytrzymałości na ściskanie po 14 dniach. Przyrost wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach w serii I wyniósł 34%. Pomimo tego, że ostatnie dwie serie wykazały zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie, jej wartość po 28 dniach w porównaniu do betonów referencyjnych jest wyższa odpowiednio o 23 i 10%.



**Rys. 2.** Zależność wytrzymałości na ściskanie do wieku betonu transparentnego

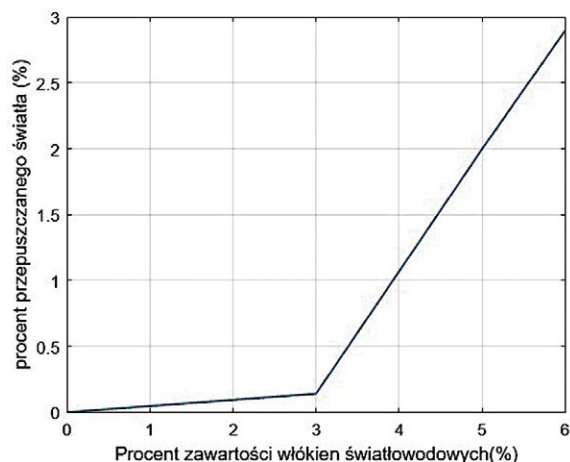


**Rys. 3.** Zależność wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu do wieku betonu transparentnego

Zależność wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu betonu transparentnego do jego wieku przedstawia rysunek 3. Wyniki pokazują, że wzrost liczby włókien optycznych w betonie ma bezpośredni związek z wytrzymałością na rozciąganie przy zginaniu. Wszystkie serie betonu transparentnego wykazują wyniki wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu wyższe niż beton referencyjny. Przy czym wytrzymałość próbek wzrasta wraz ze wzrostem zawartości włókien podczas pierwszej fazy twardnienia. Podczas drugiej fazy po 14 dniach od wykonania zarobu pierwsze trzy serie z zawartością włókien światłowodowych odpowiednio 0, 25 i 33,33 g wykazały wzrost wytrzymałości, natomiast w ostatniej serii IV z największą ilością światłowodu zanotowano spadek wytrzymałości. Największy wzrost wytrzymałości  $f_{ctm}$  po 28 dniach zanotowano w serii III o 70%, a w serii II o 32%. Wyniki badań przepuszczalności światła betonu transparentnego przedstawiono w tabeli 4 i na rysunku 4. Wyniki podano jako procent światła przechodzącego przez materiał. Wyniki pomiaru transmisji spektralnej pokazują, że przepuszczalność światła betonu transparentnego wzrasta wraz ze wzrostem ilości włókien optycznych w betonie (rys. 5). Próbką betonu z największą zawartością włókien optycznych, tj. 6%, ma maksymalną przepuszczalność światła w porównaniu z innymi próbkami. Podczas testu zauważono problemy technologiczne przy układaniu warstw włókien światłowodowych. W związku

**Tabela 4.** Wyniki testu przepuszczalności światła betonu

Seria	Waga światłowodów (g)	Procent światłowodów o łącznej powierzchni (%)	Procent światła przepuszczonego przez próbkę (%)
I	0	0	0
II	25	3	1,4
III	33,33	5	2
IV	45	6	2,9



Rys. 4. Zależność między przepuszczalnością światła a zawartością włókien światłowodowych

z powyższym technologią układania oraz przygotowania próbek wymaga niezwyklej ostrożności, ponieważ włókna optyczne są kruchym materiałem i się łamią.

## 5. Podsumowanie

W pracy przeanalizowano, jaki wpływ ma ilość włókien optycznych na właściwości mechaniczne i przepuszczalność światła betonów transparentnych. W badaniu zwrócono głównie uwagę na wytrzymałość betonu na ściskanie i rozciąganie przy zginaniu oraz test transmisji spektralnej po 7, 14, i 28 dniach od wykonania zarobów. Analiza wyników wykazuje, że beton transparentny w młodym wieku (7, 14 dni) w serii IV charakteryzuje się najwyższą wytrzymałością na ściskanie i rozciąganie przy zginaniu oraz przepuszczalnością światła. Po 28 dniach dojrzewania betonu następuje spadek parametrów mechanicznych betonu w serii IV, natomiast najwyższe właściwości wytrzymałościowe zanotowano w serii II. Wzrost ten wynosił odpowiednio dla wytrzymałości na ściskanie  $f_{ck}$  o 34% oraz wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu  $f_{ctm}$  o 32% więcej w porównaniu do betonów referencyjnych. Przepuszczalność światła w serii II wynosiła 1,4%, jest to dwukrotnie mniej niż w serii IV. Biorąc pod uwagę obie zmienne, zawartość włókien optycznych w ilości 25 gram (3%) jest dobrą techniką uzyskania pożądanej zdolności przepuszczania światła przez beton i utrzymania właściwości mechanicznych betonu. Dodanie włókien optycznych do betonu w ilościach powyżej 3% objętościowych poprawia jego zdolność do przepuszczania światła, lecz może to pogorszyć wytrzymałość materiału na rozciąganie przy zginaniu i ściskanie, czyniąc go nieprzydatnym do stosowania w konstrukcji.

Rys. 5. Widok betonu transparentnego



Wykorzystanie w budownictwie lekkich betonów transparentnych w odpowiedniej ilości może zapewnić znaczną korzyść w zakresie redukcji energii i poprawy estetyki konstrukcji.

**Artykuł powstał na podstawie pracy dyplomowej magisterskiej „Effect of optical fibers on selected characteristics of concrete” Abel A. Belay pod kierunkiem dr inż. Julity Krassowskiej. Praca dyplomowa uzyskała wyróżnienie Dziekana Wydziału Budownictwa i Nauk o Środowisku Politechniki Białostockiej w 2022 roku.**

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Mahto S., Kujure J., Light Weight Translucent Concrete. International Journal of Advances in Mechanical and Civil Engineering (IJAMCE), 8/2017, tom 4, str. 112–115
- [2] Mohan R., Tyagi P., Sharma R., Rajan H., Experimental studies on POF and epoxy-resin based translucent concrete, International Journal of Latest Technology in Engineering Management Applied Science (IJLTEMAS) 3/2018, tom 7, wydanie 3, str. 130–134
- [3] Kankriya S., Translucent concrete by using optical fibers and glass rods, International Journal of Scientific and Research Publications 10/2016, tom 6, wydanie 10, str. 625–627
- [4] Shanmugavadivu P. M., Scinduja V., Sarathivelan T., Shudesamithronn C. V., An experimental study on light transmitting concrete, International Journal of Engineering and Technology, 2014, tom 3, wydanie 11, str. 160–163
- [5] Naik R. R., Prakash K. B., An experimental investigation on fibre reinforced transparent concrete, International Research Journal of Engineering and Technology 8/2016, tom 3, wydanie 8, str. 1038–1044
- [6] Li Y., Li J., Guo H., Preparation and study of light transmitting properties of sulfoaluminate cement-based materials, Materials & Design 10/2015, tom 83, str. 185–192
- [7] Thiago Dos H. S., Denise C., Molin D., Masuero A. B., Study of the influence of sorted polymeric optical fibers (POFs) in samples of a light-transmitting cement-based material (LTCM), Construction and Building Materials 161, 2018, str. 305–315
- [8] Altomate A., Alatshan F., Mashiri F., Jadan M., Experimental study of light-transmitting concrete, International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development, tom 7, 3–4/2016, str. 133–139
- [9] PN-EN 12350-5-2019: Badania mieszanki betonowej – Część 5: Badanie konsystencji metodą stolika rozplwowego
- [10] PN-EN 12350-7-2019: Badania mieszanki betonowej – Część 7: Badanie zawartości powietrza – Metodą ciśnieniową
- [11] PN-EN 13670:2011: Wykonywanie konstrukcji z betonu
- [12] PN-EN 12390-3:2011: Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań
- [13] PN-EN 12390-5:2011: Badania betonu – Część 5: Wytrzymałość na zginanie próbek do badań
- [14] Flow table test – Workability of concrete. Vin Civilworld. Viewed 20 December 2021 < <https://vincivilworld.com/2021/05/15/flow-table-test-workability-concrete/>>