

XIII  
KONFERENCJA

# 2025 DNI BETONU

TRADYCJA I NOWOCZESNOŚĆ

13-15 października 2025

## MONOGRAFIE TECHNOLOGII BETONU - REFERATY



[dnibetonu.com](http://dnibetonu.com)

Redakcja: **Jan Deja**  
**Bartosz Głowacz**  
**Paulina Gos-Błaszczyk**  
**Patryk Jóźwiak**  
**Dariusz Konieczny**  
**Grzegorz Krechowicki**  
**Zbigniew Pilch**  
**Bożena Środa**  
**Zespół SPC**

Skład i łamanie tekstu,  
opracowanie graficzne: **AD-LINE.PL**

Projekt: **Artur Darlak**

© Copyright by Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2025

ISBN: 978-83-61331-51-3

Wydawca:  **Stowarzyszenie Producentów Cementu**  
ul. Lubelska 29, 30-003 Kraków  
tel. +48 12 423-33-55  
e-mail: [wydawnictwo@polskicement.pl](mailto:wydawnictwo@polskicement.pl)  
[www.polskicement.pl](http://www.polskicement.pl)

**XIII**  
KONFERENCJA

2025.

# DNI BETONU

T R A D Y C J A I N O W O C Z E S N O Ś Ć

13-15 października 2025

**MONOGRAFIE  
TECHNOLOGII  
BETONU**

**- REFERATY**



[dnibetonu.com](https://dnibetonu.com)

---

# WSPÓŁCZESNE TENDENCJE W BUDOWNICTWIE

ACTUAL TRENDS IN CONSTRUCTION

**inż. Patryk Dziadowicz, dr inż. Izabela Kłapiszewska, dr hab. inż. Agnieszka Śłosarczyk, prof. PP,**  
Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu, Instytut Budownictwa

## **Rola nanotlenku cynku w kształtowaniu wybranych właściwości fizyko-mechanicznych niskoemisyjnych kompozytów cementowych**

The role of zinc nanooxide in shaping selected physical and mechanical properties of low-emission cement composites

### **Streszczenie**

W pracy badano wpływ domieszki nanotlenku cynku na wybrane właściwości fizykomechaniczne niskoemisyjnych kompozytów cementowych. Wykonano cztery rodzaje zapraw cementowych różniących się zastosowanym spoiwem cementowym, a następnie domieszkowano zaprawy tlenkiem cynku w ilości 0,1 % wag. Dla analizowanych kompozytów wykonano badania ciepła hydratacji, plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu i na ściskanie po 3, 28 i 56 dniach dojrzewania próbek. Dodatkowo analizowano czystość mikrobiologiczną i mikrostrukturę kompozytów. Wykazano, że działanie nanotlenku cynku zależy od rodzaju zastosowanego spoiwa cementowego.

### **Abstract**

The study examined the effect of a zinc oxide admixture on the physical and mechanical properties of low-emission cement composites. Four types of cement mortar were prepared using different cement binders, and then zinc oxide was added to the mortars at a concentration of 0.1% by weight. The resulting composites were tested for hydration heat, plasticity, flexural strength and compressive strength at 3, 28 and 56 days of sample curing. Additionally, the microbiological purity and microstructure of the composites were analysed. The results showed that the effect of zinc oxide depends on the type of cement binder used.

## 1. Wprowadzenie

Ochrona betonu przed korozją biologiczną jest bardzo trudna i wiele prac naukowych poświęconych jest opracowaniu metod zapobiegawczych. Sposoby zabezpieczania betonu przed działaniem czynników biologicznych można podzielić na trzy grupy [1]. Pierwsza z nich to zastąpienie zwykłego cementu portlandzkiego (OPC) materiałami odpornymi na korozję. Ostatnie badania skupiają się głównie na zastąpieniu OPC geopolimerami, cementem glinowo-wapniowym i domieszkami mineralnymi, a wyniki wskazują, że zastąpienie to znacznie poprawia właściwości betonu narażonego na działanie mikroorganizmów [2, 3]. Drugi sposób zabezpieczania to zastosowanie ochronnych powłok na powierzchni betonu. Powłoki te obejmują głównie powłoki z zaprawy cementowej i powłoki organiczne, np. PVC, epoksydowe i poliuretanowe, które tworzą fizyczną barierę między betonem a środowiskiem agresywnym i zapobiegają przenikaniu niebezpiecznych jonów [4, 5]. Ostatnim środkiem zapobiegawczym jest dodanie środków biobójczych do powłok lub bezpośrednio do mieszanki betonowej. W rozwiązaniach tych najczęściej stosowane są azotyny, metale ciężkie i tlenki metali [6, 7]. Metody te charakteryzują się istotną skutecznością w przeciwdziałaniu korozji biologicznej na wczesnym etapie, ale mają też kilka wad. Na przykład powłoki mają zazwyczaj słabą przyczepność do podłoża betonowego i wykazują tendencję do odrywania się z powodu skurczu betonu i naprężeń mechanicznych, a naprawa i wymiana powłok wiąże się z wysokimi kosztami. Ponadto niepożądane wymywanie biocydów w trakcie użytkowania osłabia długotrwałe działanie antybakteryjne betonu [8].

Alternatywnym rozwiązaniem, na które w ostatnich latach coraz częściej zwraca się uwagę są inżynierskie kompozyty cementowe modyfikowane nanomateriałami o właściwościach przeciwdrobnoustrojowych [9]. W rozwiązaniach tych nanomateriały, głównie metale i tlenki metali o właściwościach fotokatalitycznych i antybakteryjnych, wprowadzane są w postaci powłoki lub w całej objętości do kompozytu cementowego. Zaletą stosowania nanomateriałów są ich nanometryczne wymiary oraz wysoki stosunek powierzchni właściwej BET do gęstości, dzięki czemu uzyskuje się istotną poprawę parametrów fizykochemicznych i antybakteryjnych matrycy cementowej już przy niewielkich udziałach wagowych, których nie wykazują typowe mikromateriały dodawane do matrycy cementowej. W rozwiązaniach tych najczęściej stosuje się metale Ag, Cu oraz tlenki Ti, Cu, Zn [10]. To co stanowi zaletę nanomateriałów z jednej strony, stanowi również ich wadę. Mianowicie wysoka powierzchnia właściwa BET nanododatków sprawia, że wykazują one tendencję do agregacji i aglomeracji podczas mieszania ze spoiwem cementowym. Dlatego też istotnym aspektem stosowania nanomateriałów w kompozytach jest ich efektywne rozmieszczenie w matrycy cementowej, które uzyskuje się przez stosowanie superplastyfikatorów, wstępne mieszanie mechaniczne na mieszadle magnetycznym czy przy udziale ultradźwięków lub tworzenie układów hybrydowych ułatwiających właściwe rozproszenie dodatków w kompozycie cementowym [11-13]. Problem ten jest tym bardziej istotny, że współczesne cementy charakteryzujące się niskim śladem węglowym, zawierają w swoim składzie duże ilości dodatków mineralnych o wysokiej powierzchni właściwej BET, które zwiększają wodożądność spoiwa cementowego, wpływają na proces wiązania i rozwoju wczesnych parametrów wytrzymałościowych kompozytów cementowych oraz mogą w sposób istotny

wpływać na zmianę zachowania się nanododatków w matrycy cementowej. Przykładowo, w pracy 14 wykazano, że obecność popiołów lotnych krzemionkowych oraz węglanów wapnia w spoiwie cementowym w sposób istotny wpływa na pogorszenie właściwości fotokatalitycznych diotlenku tytanu. Z kolei w pracy 15 i 16 wykazano, że nanostruktury, odpowiednio tlenek grafenu i nanokrzemionka, mogą pozytywnie wpływać na rozwój wczesnych wytrzymałości spoiw cementowych zawierających popioły lotne i wapienie przeciwdziałając spadkom wytrzymałości wywołanych obniżoną zawartością klinkieru cementowego. Wcześniejsze badania nad zastosowaniem tlenku cynku w matrycy cementowej wykazały, że domieszka tlenku cynku już w niewielkich ilościach poniżej 0,5% wag. może w sposób istotny wpływać na czas wiązania, ciepło hydratacji i wczesne wytrzymałości kompozytów cementowych opartych o czyste cementy klinkierowe [17, 18]. Z drugiej strony, potrzeba obniżenia śladu węglowego we współczesnych cementach i betonach sprawia, że miejsce cementów wysokoklinkierowych zajmują cementy wieloskładnikowe o zdecydowanie niższej zawartości klinkieru cementowego, których składniki typu granulowany żużel wielkopiecowy, popioły lotne czy wapienie determinują właściwości fizyko-chemiczne tych spoiw [19].

Dlatego też głównym celem badań w prezentowanym rozdziale było określenie współdziałania tlenku cynku z niskoemisyjnymi cementami różniącymi się rodzajem i ilością dodatków mineralnych oraz określenie podstawowych właściwości fizyko-mechanicznych i antybakteryjnych kompozytów cementowych.

## **2. Część eksperymentalna**

### **2.1. Zastosowane materiały**

W celu określenia roli domieszki tlenku cynku na właściwości kompozytów cementowych sporządzono osiem zapraw cementowych (4 referencyjne różniące się rodzajem cementu oraz cztery z domieszką tlenku cynku) o składzie: 450g cementu, 225 ml wody, 1350 g kruszywa normowego oraz 0,1 % wag. tlenku cynku. Jako spoiwo użyto następujące cementy firmy Holcim: CEM I 42,5 R, CEM II/B-V 42,5 R, CEM II/A-LL 42,5 R oraz CEM V/A (S-V) 42,5 N-LH/HSR/NA. Jako kruszywo zastosowano piasek normowy CEN PN-EN 196-1 firmy KWARCMIX oraz wodę destylowaną. Jako domieszkę antybakteryjną zastosowano tlenek cynku firmy Sigma-Aldrich, Saint Louis, Missouri, Stany Zjednoczone o powierzchni właściwej BET 12,5 m<sup>2</sup>/g oraz rozkładzie wielkości cząstek 142-531 nm. Zaprawy cementowe przygotowano według procedury zawartej w normie PN-EN 106-1, przy czym domieszkę tlenku cynku wstępnie mieszano na mieszadle magnetycznym w wodzie destylowanej, a następnie postępowano zgodnie z procedurą normową. Zastosowano następujące nazwy dla poszczególnych serii badawczych w zależności od rodzaju użytego cementu: CEM I, ZnO+CEM I; CEM II/B-V, ZnO+ CEM II/B-V, CEM II/A-LL, ZnO+ CEM II/A-LL, CEM V/A, ZnO+CEM V/A. Podstawowe właściwości fizyko-chemiczne użytych cementów według kart charakterystyk producenta zestawiono w Tabeli 1.

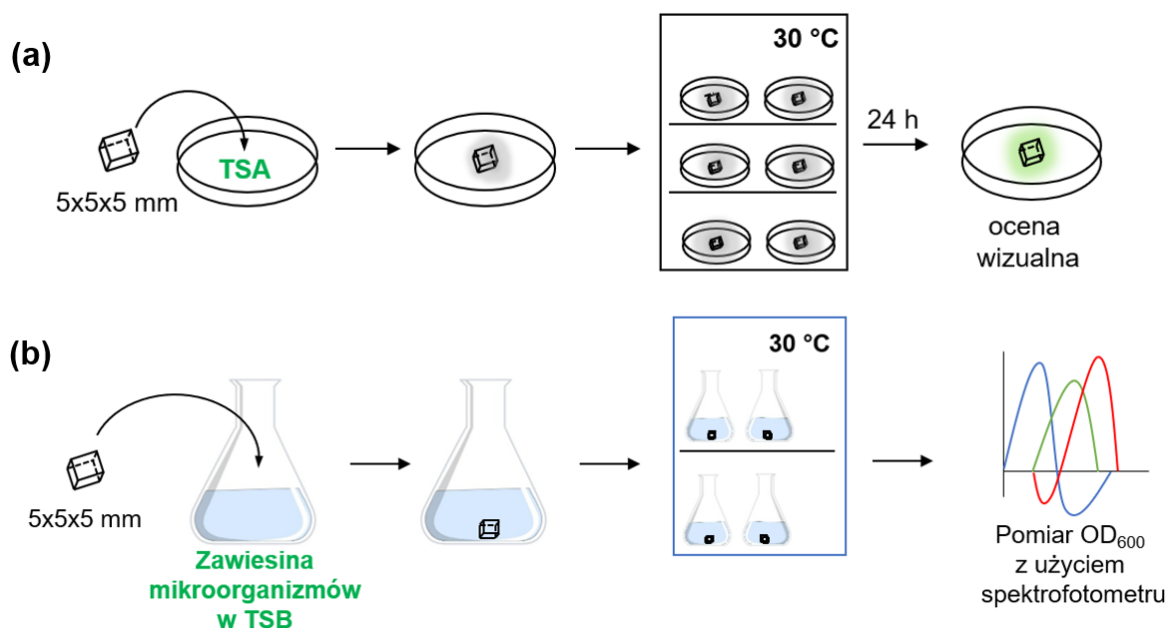
Tab.1. Podstawowe właściwości fizyko-chemiczne użytych cementów.

| <b>Składniki</b>                                        | <b>CEM I 42,5 R</b> | <b>CEM II/A-LL<br/>42,5 R</b> | <b>CEM II/B-V<br/>42,5 R HSR</b> | <b>CEM V/A(S-V)<br/>42,5 N<br/>LH/HSR/NA</b> |
|---------------------------------------------------------|---------------------|-------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------|
| <b>Klinkier cementu portlandzkiego, %</b>               | 95-100              | 80-94                         | 65-70                            | 40-64                                        |
| <b>Kamień wapienny LL, %</b>                            | 0-5                 | 6-20                          | 0-5                              | 0-5                                          |
| <b>Granulowany żużel piecowy S, %</b>                   | -                   | -                             | -                                | 18-30                                        |
| <b>Popiół lotny krzemionkowy V, %</b>                   | -                   | -                             | 28-35                            | 18-30                                        |
| <b>Siarczan(VI) wapnia, %</b>                           | 4-6                 | 0-5                           | 4-6                              | 0-6                                          |
| <b>Pyły z produkcji cementu - portlandzkiego, %</b>     | 0-0,5               | -                             | 0-1                              | 0-1                                          |
| <b>Powierzchnia właściwa Blaine'a, cm<sup>2</sup>/g</b> | 3318                | 4670                          | 4530                             | 4870                                         |
| <b>Początek czasu wiązania, min</b>                     | 160                 | 180                           | 270                              | 244                                          |
| <b>Koniec czasu wiązania, min</b>                       | 230                 | 240                           | 340                              | 363                                          |
| <b>Wytrzymałość na ściskanie po 2 dniach, MPa</b>       | 26,9                | 26,1                          | 25,6                             | 22,2                                         |
| <b>Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach, MPa</b>      | 56,9                | 51,8                          | 56,8                             | 57,6                                         |
| <b>Wodożądność, %</b>                                   | 27,9                | 28,4                          | 31,6                             | 28,9                                         |

## 2.2. Metodyka badań

Dla wytworzonych kompozytów cementowych przeprowadzono następujące badania. Dla świeżych zapraw cementowych wykonano badanie plastyczności zapraw na stoliku wstrząsowym zgodnie z procedurą opisaną w normie PN-EN 1015-

3, oraz ciepło hydratacji metodą semi-adiabatyczną zgodnie z PN-EN 196-9:2010 z wykorzystaniem kalorymetru firmy Testing, Berlin, Niemcy oraz oprogramowania LANGAVANT. Badanie wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu oraz wytrzymałości na ściskanie prowadzono zgodnie z procedurą opisaną w normie PN-EN 196-1 z wykorzystaniem prasy hydraulicznej Servo-Plus Evolution firmy Matest S.p.A., Treviolo BG, Włochy. Badanie mikrostruktury kompozytów cementowych przeprowadzono przy pomocy elektronowego mikroskopu skaningowego TESCAN 3VEGA, Brno, Czechy. Czystość mikrobiologiczną kompozytów cementowych została określona dwiema metodami: (i) metodą kontaktową na płytkach agarowych (Rys. 1a) oraz (ii) poprzez pomiar zmiany gęstości optycznej  $OD_{600}$  nm (Rys. 1b). Ocena czystości mikrobiologicznej metodą kontaktową polegała na umieszczeniu próbki dojrzałego kompozytu cementowego o wymiarach ok. 5 x 5 x 5 mm w sterylnych płytkach Petriego i umieszczeniu w inkubatorze (30 °C) na 24 godziny. Po upływie określonego czasu próbki poddane zostały kontroli wizualnej pod kątem wzrostu drobnoustrojów na styku próbka/agar tryptonowo-sojowy (TSA). Widoczne kolonie lub skupiska biomasy drobnoustrojów świadczyły o niskiej czystości mikrobiologicznej, natomiast ich brak wskazywał na aktywność przeciwdrobnoustrojową próbek.



Rys.1. Schematyczne przedstawienie metod oceny czystości mikrobiologicznej kompozytów cementowych (a) – metoda kontaktowa; (b) – metoda gęstości optycznej OD.

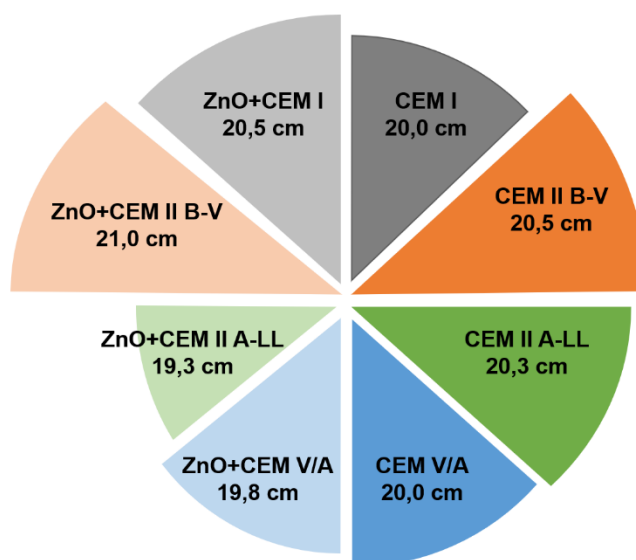
Druga metoda polegała na pomiarze gęstości optycznej (OD), która umożliwia pośrednie oszacowanie liczby komórek. 25 ml sterylnego płynnego podłoża, bulionu trypsyny sojowej (TSB), wprowadzano do sterylnych kolb o pojemności 100 ml, za pomocą sterylnej pęsety wprowadzano próbkę kompozytu cementowego o wymiarach ok. 5 x 5 x 5 mm, a następnie pobierano 250 ml podłoża i zmierzono

gęstość optyczną jako punkt odniesienia dla czasu założenia hodowli. Kolby z próbkami kompozytu zamknięto w celu zabezpieczenia hodowli przed mikroorganizmami z zewnątrz, umieszczono na wstrząsarce, wstrząsano i inkubowano w stałej temperaturze 30°C. Zmierzono gęstość optyczną przy 600 nm. Zmianę gęstości optycznej mierzono po 24 godzinach. Wszystkie próbki przygotowano w trzech powtórzeniach [13, 20].

### 3. Wyniki badań i dyskusja

#### 3.1. Badania świeżych kompozytów cementowych

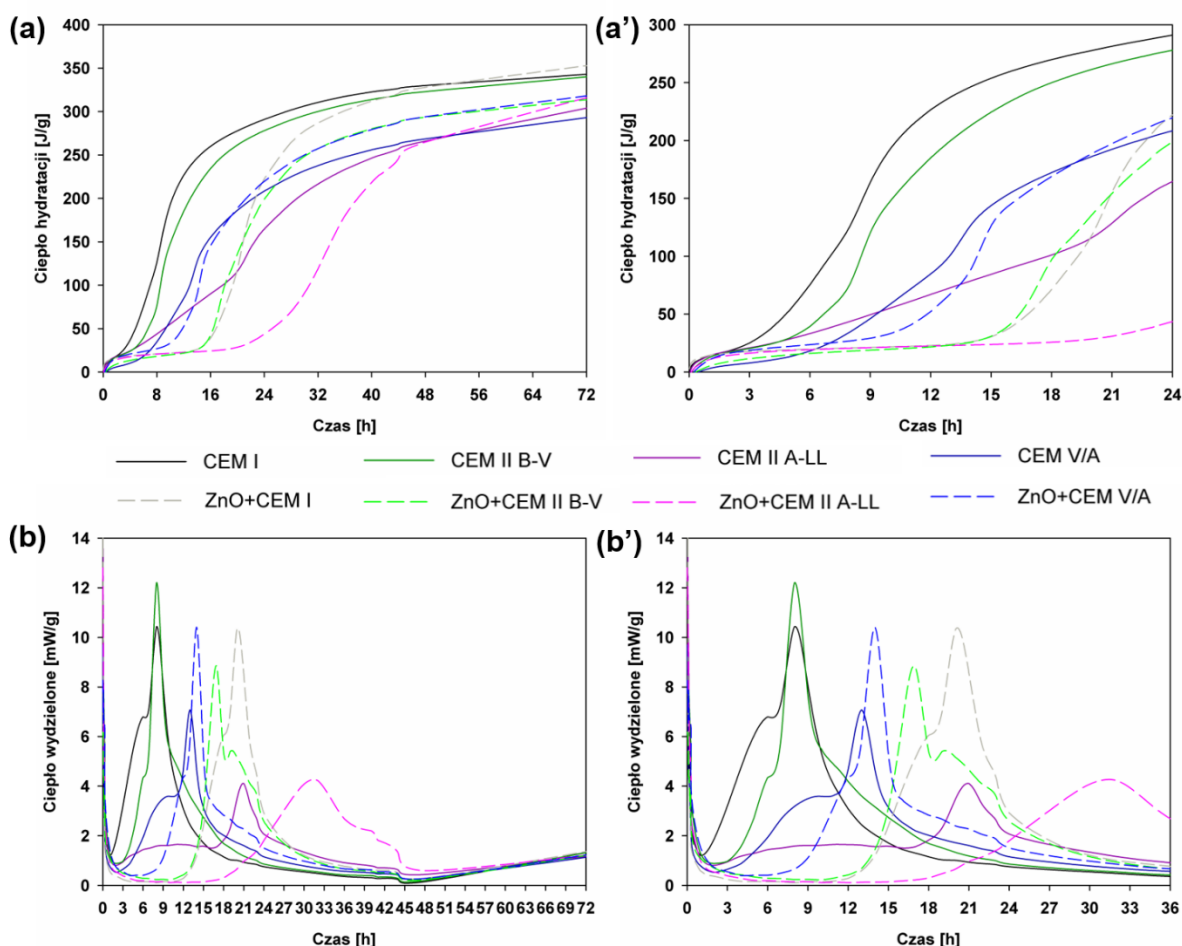
Na rysunku 2 zestawiono wyniki rozpliwów zapraw cementowych w zależności od rodzaju zastosowanego cementu i obecności w tlenku cynku. Na podstawie otrzymanych wyników można zauważyć, że nieznacznie większy rozpliw wykazały zaprawy wykonane na cemencie z dodatkiem popiołów lotnych krzemionkowych i węglanów wapnia, i wynosiły odpowiednio 20,5 i 20,3 cm. W przypadku cementu CEM I i CEM V rozplawy zapraw były porównywalne i wynosiły 20 cm. Obecność tlenku wapnia o powierzchni właściwej BET 12,5 m<sup>2</sup>/g ograniczyła plastyczność zaprawy wykonanej z cementu CEM II/A-LL oraz CEM V/A (S-V), które charakteryzowały się największymi powierzchniami Blaine'a. Natomiast w przypadku zapraw wykonanych z CEM I i CEM II/B-S obserwowano nieznaczną poprawę plastyczności po dodaniu tlenku cynku.



Rys.2. Wyniki rozpliwu kompozytów cementowych modyfikowanych tlenkiem cynku w zależności od rodzaju zastosowanego cementu.

Wyniki ciepła hydratacji wydzielonego w ciągu pierwszych 72h wiązania zapraw cementowych w zależności od rodzaju zastosowanego cementu i zawartości tlenku cynku w zaprawach przedstawiono na rysunku 3. Na podstawie

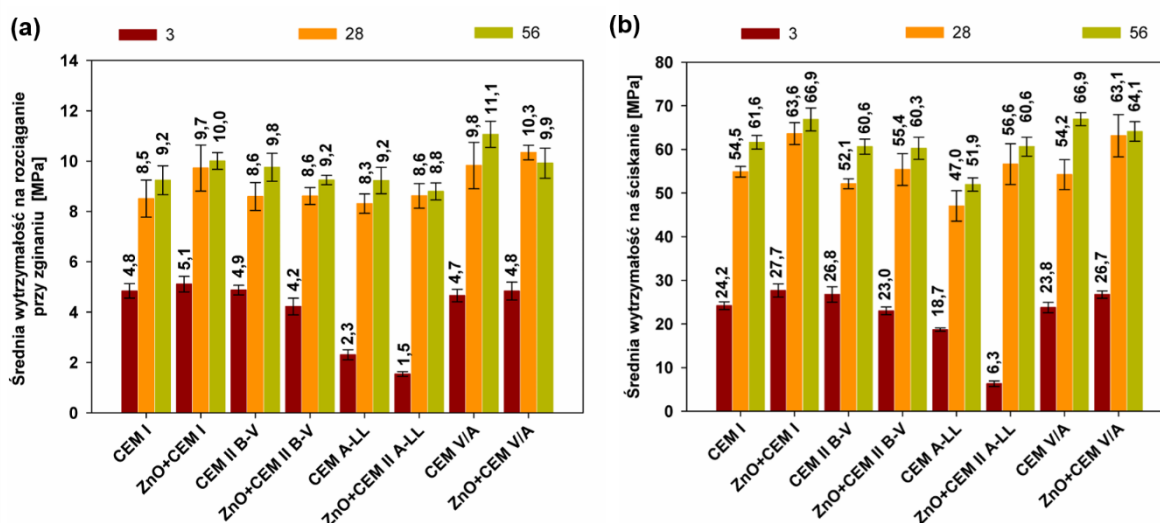
zamieszczonych krzywych można zauważyć, że dla wszystkich zastosowanych cementów, niezależnie od poszczególnych składników cementu domieszka 0,1% wag. tlenku cynku skutkowała obniżeniem wydzielonego ciepła hydratacji, a tym samym opóźnieniem hydratacji spoiwa cementowego w ciągu pierwszych 24 godzin wiązania. Największe opóźnienie wiązania odnotowano dla cementu z dodatkiem popiołów lotnych krzemionkowych CEM II/B-V i dodatkiem węglanów wapnia CEM II/A-LL. Dla cementu modyfikowanego węglanem wapnia całkowite ciepło hydratacji wydzielone po 72h było niższe niż 300 J/g, natomiast dla cementu CEM II/B-V było porównywalne z cementem czystym klinkierowym CEM I i wynosiło ponad 300 J/g. Jedynie dla cementu CEM V/A (S-V) tlenek cynku nie wpływał w sposób istotny na opóźnienie procesu hydratacji w ciągu 72 godzin wiązania, przebieg obu krzywych wydzielanego ciepła hydratacji był zbieżny, przy czym całkowite ciepło wydzielone podczas hydratacji cementu CEM V było niższe niż dla CEM I i wynosiło około 300 J/g.



Rys.3. Wyniki badania ciepła hydratacji kompozytów cementowych modyfikowanych tlenkiem cynku w zależności od zastosowanego cementu.

### 3.2. Badania stwardniałych kompozytów cementowych

Badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu oraz wytrzymałości na ściskanie dla wytworzonych kompozytów cementowych po 3, 28 i 56 dniach dojrzewania w zależności od rodzaju cementu i zawartości tlenku cynku przedstawiono na rysunku 4. Obecność tlenku cynku w zaprawie cementowej wykonanej z cementu CEM I i CEM V/A (S- V) w początkowym okresie wiązania, po 3 dniach, skutkowała nieznacznym wzrostem zarówno wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu, jak i wytrzymałości na ściskanie. Wyniki te są zbieżne z wynikami ciepła hydratacji, gdzie mimo początkowego opóźnienia procesu hydratacji po 72 h wydzielone ciepło było najwyższe spośród badanych cementów. W późniejszym czasie dojrzewania, po 28 i 56 dniach obserwowano dalsze przyrosty parametrów wytrzymałościowych, przy czym najwyższe parametry po 56 dniach dojrzewania uzyskano dla zaprawy cementowej wykonanej z CEM I i domieszkowanej 0,1 % wag. tlenku cynku. Wzrost parametrów wytrzymałościowych związane jest z obecnością w matrycy cementowej tlenku cynku, który stanowi dodatkowe centra aktywne, od których rozpoczyna się wzrost fazy C-S-H w przypadku klinkieru cementowego i fazy C-S-A-H w przypadku żużla wielkopiecowego. Efekt ten zwany jest „zarodkowaniem”, a rezultatem jest zwiększenie zagęszczenia struktury matrycy cementowej, wyższa przyczepność do kruszywa i wzrosty wytrzymałości na ściskanie kompozytu [21, 22].

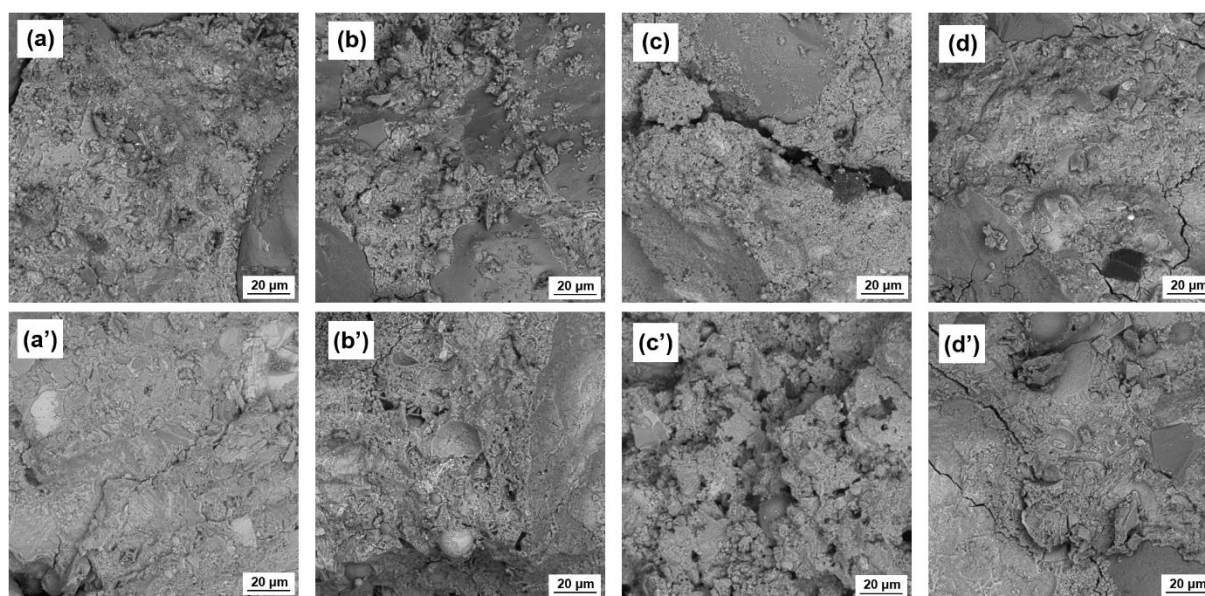


Rys.4. Wyniki wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu oraz na ściskanie kompozytów cementowych modyfikowanych tlenkiem cynku w zależności od rodzaju zastosowanego cementu.

Dla pozostałych dwóch cementów CEM II/A-LL oraz CEM II/B-V obecność tlenku cynku w pierwszych dniach wiązania opóźniała proces hydratacji spoiwa cementowego, szczególnie było to widoczne w przypadku cementu z dodatkiem węglanów wapnia. To skutkowało niższymi wartościami wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu i wytrzymałością na ściskanie po 3 dniach dojrzewania. Efekt spadku wytrzymałości jest związany z tzw. efektem rozcieńczenia, czyli mniejszą zawartością klinkieru cementowego w stosunku do cementu CEM I [22]. W przypadku CEM II/A-LL zawartość klinkieru zgodnie z danymi producenta wynosiła 80-94%, a w

przypadku CEM II/B-V 65-70%. Niemniej jednak po 28 i 56 dniach dojrzewania dla obu zapraw, niezależnie od obecności tlenku cynku, obserwowano znaczne przyrosty wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu i na ściskanie. Szczególną uwagę należy zwrócić na cement CEM II/A-LL, gdzie obecność tlenku cynku skutkowała znacznie wyższymi parametrami mechanicznymi niż w przypadku zaprawy bez domieszki. Mimo, że węglany wapnia nie wykazują właściwości wiążących ich mikrocząstki stanowią, podobnie jak cząstki tlenku cynku, dodatkowe centra aktywne od których rozpoczyna się wzrost fazy C-S-H i zagęszczenie struktury kompozytu cementowego wraz ze wzrostem wytrzymałości na ściskanie [23].

Mikrostruktury wykonane przy użyciu elektronowej mikroskopii skaningowej SEM wytworzonych kompozytów cementowych w zależności od zastosowanego cementu i obecności ZnO przedstawiono na rysunku 5. Zarówno dla zapraw wykonanych z CEM I, jak i cementów z dodatkami CEM II i CEM V po 28 dniach dojrzewania zaobserwować można zwartą i jednolitą fazę C-S-H i C-S-A-H bez istotnych mikrospękań i obecności porów czy pustek powietrznych. Najmniej zwartą strukturę wykazuje układ z dodatkiem węglanów wapnia i tlenku cynku przedstawiony na rysunku 4c', widać na nim ziarnistą budowę faz krzemianowych wynikającą z obecności w strukturze tlenku cynku. Z kolei w zaprawach oznaczonych jako 4b' i 4d' widoczne są nieprzereagowane ziarna popiołów lotnych.



Rys.5. Ocena mikrostruktury kompozytów cementowych modyfikowanych tlenkiem cynku w zależności od zastosowanego cementu (a-a') – CEM I; (b-b') – CEM II/B-V; (c-c') – CEM II/A-LL; (d-d') – CEM V/A (S-V).

### 3.3. Badania czystości mikrobiologicznej kompozytów cementowych w zależności od zastosowanego cementu

Badania czystości mikrobiologicznej próbek kompozytów cementowych domieszkowanych tlenkiem cynku i referencyjnych wykonano 2 metodami: metodą kontaktową na podłożu agarowym po 24 h inkubacji oraz metodą pomiaru zmiany gęstości optycznej. Wyniki zestawiono odpowiednio w Tabeli 2 i 3. Analiza czystości

mikrobiologicznej kompozytów cementowych domieszkowanych ZnO i referencyjnych wykazała, że obecność tlenku cynku w kompozytach cementowych oraz rodzaj spoiwa cementowego wpływają w sposób istotny na rozwój kolonii mikroorganizmów. Mały wzrost mikroorganizmów lub ich brak zarejestrowano dla układu CEM I+ZnO i CEM II/A-LL.

W pozostałych przypadkach obserwowano średni lub intensywny wzrost mikroorganizmów, niezależnie od obecności w kompozytach cementowych tlenku cynku. Badanie ilościowe wykonane metodą pomiaru gęstości optycznej wykazało, że wszystkie cementy wieloskładnikowe oraz układy domieszkowane tlenkiem cynku charakteryzowały się znacznie mniejszą tendencją do zasiedlania mikroorganizmów na powierzchni materiału. Szczególną zdolność do inhibitowania wzrostu mikroorganizmów przez cementy niskoemisyjne można tłumaczyć składem tlenkowym popiołów lotnych i żużla wielkopiecowego. Dodatki te zawierają istotne ilości tlenków Mg, Ti, Ca, Zn, Cu, czy Ag, które wykazują właściwości antybakteryjne [14]. Najkorzystniejsze układy o właściwościach antybakteryjnych to CEM II/A-LL +ZnO, CEM II/A-LL i CEM V/A (S-V).

Tab.2. Wyniki czystości mikrobiologicznej uzyskane metodą kontaktową po 24h inkubacji.

| CEM I<br>+ZnO | CE<br>M I | CEMII A-<br>LL+ZnO | CEM II<br>A-LL | CEMII B-<br>V+ZnO | CEMII<br>B-V | CEMV/A<br>+ZnO | CEM<br>V/A |
|---------------|-----------|--------------------|----------------|-------------------|--------------|----------------|------------|
| ± -           | + ±       | ± ±                | ± -            | ± ±               | ± ±          | ± +            | ± ±        |

+ intensywny wzrost mikroorganizmów; ± mały wzrost mikroorganizmów; - brak wzrostu mikroorganizmów

Tab.3. Wyniki czystości mikrobiologicznej uzyskane metodą pomiaru gęstości optycznej (po 24h inkubacji)

| CEMI<br>+ZnO                                         | CEM I                                                | CEMII A-<br>L +ZnO                                   | CEMII A-<br>LL                                       | CEMII B-<br>V +ZnO                                   | CEMII<br>B-V                                        | CEMV/A<br>+ZnO                                       | CEM<br>V/A                                          |
|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| <b>Metoda pomiaru OD600</b>                          |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |                                                     |                                                      |                                                     |
| 0.177 ±<br>0.09                                      | 0.898 ±<br>0.03                                      | 0.133 ±<br>0.03                                      | 0.140 ±<br>0.01                                      | 0.286 ±<br>0.02                                      | 0.288 ±<br>0.07                                     | 0.235 ±<br>0.010                                     | 0.120 ±<br>0.02                                     |
| <b>Liczba komórek bakterii (cel/mL)*</b>             |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |                                                     |                                                      |                                                     |
| 1.42 x<br>10 <sup>8</sup> ± 7.2<br>x 10 <sup>7</sup> | 7.18 x<br>10 <sup>8</sup> ± 2.4<br>x 10 <sup>7</sup> | 1.06 x<br>10 <sup>8</sup> ± 2.4<br>x 10 <sup>7</sup> | 1.12 x<br>10 <sup>8</sup> ± 8.0<br>x 10 <sup>6</sup> | 2.29 x<br>10 <sup>8</sup> ± 1.6<br>x 10 <sup>7</sup> | 2.3 x 10 <sup>8</sup><br>± 5.6 x<br>10 <sup>7</sup> | 1.88 x<br>10 <sup>8</sup> ± 8.0<br>x 10 <sup>6</sup> | 9.6 x 10 <sup>7</sup><br>± 1.6 x<br>10 <sup>7</sup> |

\* Uzyskane wartości gęstości optycznej zostały przeliczone na liczbę komórek mikroorganizmów za pomocą kalkulatora „E. coli Cell Culture Concentration from OD600 Calculator” (Kalkulator stężenia hodowli komórek E. coli na podstawie OD600).

## 4. Wnioski

W rozdziale przeanalizowano podstawowe właściwości fizyko-mechaniczne zapraw cementowych wykonanych z cementów charakteryzujących się niskim śladem węglowym i domieszkowanych tlenkiem cynku. Na podstawie przeprowadzonych badań można wyciągnąć następujące wnioski:

- Tlenek cynku wprowadzony do zapraw cementowych niezależnie od zastosowanego spoiwa cementowego wpływał nieznacznie na ich plastyczność, natomiast we wszystkich przypadkach opóźniał proces hydratacji spoiw w ciągu pierwszych 24 h. Największe opóźnienie hydratacji odnotowano w przypadku cementu z dodatkiem popiołów lotnych krzemionkowych i węglanów wapnia.
- Opóźnienie wiązania spoiw cementowych nie wpłynęło na wczesne wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu oraz na ściskanie dla CEM I i CEM V/A (S-V), natomiast w przypadku cementu CEM II/B-V i CEM II/A-LL pogarszało uzyskane parametry mechaniczne. Istotny spadek wytrzymałości na ściskanie odnotowano dla cementu z węglanami wapnia, spadek ten był jeszcze większy w obecności tlenku cynku.
- Po 28 i 56 dniach dojrzewania wszystkie zaprawy osiągnęły wysokie wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu i na ściskanie. Największy przyrost parametrów mechanicznych odnotowano dla zaprawy z cementu CEM II/A-LL. Dodatkowo obecność w strukturze tlenku cynku skutkowała dodatkowymi przyrostami wytrzymałości, co jest efektem zarodkowania cząstek tlenku cynku, od których rozpoczyna się wzrost uwodnionych krzemianów wapnia i glino-krzemianów wapnia.
- Wszystkie cementy z dodatkami charakteryzowały się większą czystością mikrobiologiczną niż CEM I, przy czym najlepszy efekt domieszkowania tlenkiem cynku w przeciwdziałaniu rozwojowi drobnoustrojów odnotowano w przypadku zaprawy CEM I + ZnO. Wysoką czystość mikrobiologiczną odnotowano w przypadku zapraw wykonanych z następujących cementów: CEM II/A-LL i CEM II/A-LL + ZnO oraz CEM V/A (S-V). Niestety nie we wszystkich układach obecność tlenku cynku skutkowała poprawą odporności na działanie mikroorganizmów. Mechanizm inhibitowania rozwoju mikroorganizmów w zależności od zastosowanego spoiwa i domieszki tlenku cynku wymaga dodatkowych badań, szczególnie w zakresie wpływu porowatości matrycy cementowej i jej składu tlenkowego na rozwój drobnoustrojów.

## 5. Podziękowania

Praca została zrealizowana w ramach subwencji badawczej MNiSW nr 0412/SBAD/0080.

## 6. Literatura

- [1] Noeiaghahi, T., Dhami, N., Mukherjee, A. Nanoparticles surface treatment on cemented materials for inhibition of bacterial growth. *Constr. Build. Mater.* 150 (2017) 880–891.
- [2] Grengg, C. Microbiologically induced concrete corrosion: a case study from a combined sewer network. *Cem. Concr. Res.* 77 (2015) 16–25.
- [3] Provis, J.L., Palomo, A., Shi, C., Advances in understanding alkali-activated materials. *Cement Concr. Res.* 78 (2015) 110–125.
- [4] Berndt, M., Evaluation of coatings, mortars and mix design for protection of concrete against sulphur oxidising bacteria. *Constr. Build. Mater.* 25 (2011) 3893–3902.
- [5] Almusallam, A., Khan, F., Dulaijan, S., Al-Amoudi, O., Effectiveness of surface coatings in improving concrete durability. *Cem. Concr. Compos.* 25 (2003) 473–481.
- [6] Jia, R., Unsal, T., Xu, D., Lebach, Y., Gu, T., Microbiologically influenced corrosion and current mitigation strategies: a state of the art review. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 137 (2019) 42–58.
- [7] Nemati, M., Mazutinec, T., Jenneman, G., Voordouw, G., Control of biogenic H<sub>2</sub>S production with nitrite and molybdate. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.* 26 (2001) 350–355.
- [8] Roghanian, N., Banthia, N., Development of a sustainable coating and repair material to prevent bio-corrosion in concrete sewer and waste-water pipes. *Cem. Concr. Compos.* 100 (2019) 99–107.
- [9] Noeiaghahi, T., Mukherjee, A., Dhami, N., Chae, S.-R., Biogenic deterioration of concrete and its mitigation technologies. *Construct. Build. Mater.* 149 (2017) 575–586.
- [10] Ślosarczyk A., Kłapiszewska I., Skowrońska D., Janczarek M., Jesionowski T., Kłapiszewski Ł. A comprehensive review of building materials modified with metal and metal oxide nanoparticles against microbial multiplication and growth, *Chem. Eng. J.* 466 (2023) 143276
- [11] Kłapiszewska I., Ławniczak Ł., Balicki S., Gapiński B., Wieczorowski M., Wilk K.A., Jesionowski T., Kłapiszewski Ł., Ślosarczyk A., Influence of zinc oxide particles dispersion on the functional and antimicrobial properties of cementitious composites, *J. Mater. Res. Technol.* 24 (2023) 2239–2264.
- [12] Horszczaruk E., Łukowski P., Seul C. Influence of dispersing method on the quality of nano-admixtures homogenization in cement matrix, *Materials* 13 (2020) 4865.
- [13] Kłapiszewska I., Parus A., Ławniczak Ł., Jesionowski T., Kłapiszewski Ł., Ślosarczyk A., Production of antibacterial cement composites containing ZnO/lignin and ZnO–SiO<sub>2</sub>/lignin hybrid admixtures, *Cem Concr. Compos.* 124 (2021) 104250.
- [14] Ślosarczyk A., Kłapiszewska I., Jędrzejczak P., Thomas M., Gapiński B., Janczarek M., Kłapiszewski Ł. The role of titanium dioxide in enhancing low-emission properties of cementitious materials, *Sci. Rep.* 15 (2025) 22675.
- [15] Surehali S., Gustafson C., Srikanth Volaity S., Divigalpitiya R., Kumar A., Neithalath N. Rheology and early-age structure development in binary and ternary blends modified with novel graphene types. *Cem. Concr. Comp.* 156 (2025) 105869.

- [16] Gayathiri K., Praveenkumar S. Quaternary blended eco high performance concrete utilizing high volumes of siliceous additives, *Constr. Build. Mat.* 430 (2024) 136389.
- [17] Dyshlyuk L., Babich O., Ivanova S., Vasilchenko N., Atuchin V., Korolkov I., Russakov D., Prosekov A., Antimicrobial potential of ZnO, TiO<sub>2</sub> and SiO<sub>2</sub> nanoparticles in protecting building materials from biodegradation, *Int Biodeterior Biodegrad* 146 (2020) 104821.
- [18] Liu J., Jin H., Gu C., Yang Y., Effects of zinc oxide nanoparticles on early-age hydration and the mechanical properties of cement paste, *Constr Build Mater* 217 (2019) 352-362.
- [19] Knight K.A., Cunningham P.R., Miller S.A. Optimizing supplementary cementitious material replacement to minimize the environmental impacts of concrete, *Cem. Concr. Comp.* 139 (2023) 105049.
- [20] Kłapiszewska I., Kubiak A., Parus A., Janczarek M., Ślosarczyk A., The in situ hydrothermal and microwave syntheses of zinc oxides for functional cement composites, *Materials* 15 (2022) 1069.
- [21] Scrivener K.L., Nonat A., Hydration of cementitious materials, present and future, *Cem Concr Res* 41 (2011) 651-665.
- [22] Scrivener K., Ouzia A., Juilland P., Mohamed A.K., Advances in understanding cement hydration mechanisms, *Cem Concr Res* 124 (2019) 105823.
- [23] Matschei T., Lothenbach B., Glasser F.P., The role of calcium carbonate in cement hydration, *Cem. Concr. Res.* 37 (2007) 551-558

**mgr inż Mateusz Job**  
Product Manager RMX  
Holcim Polska SA

## **Hydromedia – połączenie szarej, błękitnej i zielonej infrastruktury dla lepszej przyszłości miast.**

Hydromedia – combining gray, blue and green infrastructure for a better future for cities.

### **Streszczenie**

Hydromedia to beton wodoprzepuszczalny, który znacząco zwiększa retencję wody w miastach i pomaga w walce z miejskimi wyspami ciepła. Jego zastosowanie pozwala skutecznie zarządzać wodą opadową, zmniejszając ryzyko podtopień i poprawiając mikroklimat miejskich przestrzeni.

W ramach badań nad wpływem Hydromedii na zieleni miejską, na terenie SGGW powstał poligon badawczy. Wspólnie przeprowadziliśmy tam testy na nawierzchniach parkingowych wykonanych z betonu przepuszczalnego oraz warstw podbudowy z kruszyw przepuszczalnych, przy których posadziliśmy drzewa. Rośliny są i będą dalej monitorowane, aby dokładnie ocenić wpływ zastosowanych rozwiązań na ich rozwój. Dotychczasowe wyniki potwierdzają, że odpowiednie podbudowy z kruszyw w połączeniu z Hydromedia tworzą optymalne warunki dla systemów korzeniowych, zapewniając im stały dostęp do wody i składników odżywczych. Takie rozwiązanie wpisuje się w koncepcję Nature-Based Solutions (NBS), łącząc elementy szarej, błękitnej i zielonej infrastruktury.

Dodatkowym atutem Hydromedia jest jego trwałość – produkt spełnia wymagania klasy ekspozycji XF3. Dzięki temu nawierzchnie zachowują swoje właściwości przez lata, łącząc funkcjonalność z troską o środowisko.

Badania prowadzone na SGGW potwierdzają, że innowacyjne nawierzchnie przepuszczalne to skuteczne rozwiązanie wspierające zarówno gospodarkę wodną w miastach, jak i rozwój zieleni, co ma kluczowe znaczenie w kontekście zmian klimatycznych.

### **Abstract**

Hydromedia is a permeable concrete that significantly increases water retention in cities and helps combat urban heat islands. Its use allows for effective rainwater management, reducing the risk of flooding and improving the microclimate of urban spaces.

As part of research into the impact of Hydromedia on urban greenery, a testing ground was created at the Warsaw University of Life Sciences. Together, we conducted research on parking surfaces made of permeable concrete and a base of permeable aggregates, next to which we planted trees.

The plants are and will be monitored to accurately assess the impact of the solutions used on their development. The results so far confirm that appropriate aggregate bases in combination with Hydromedia create optimal conditions for the root

system, ensuring constant access to water and nutrients. This solution is in line with the concept of Nature-Based Solutions (NBS), combining elements of gray, blue, and green infrastructure.

An additional advantage of Hydromedia is its durability—the product meets the requirements of exposure class XF3. This allows surfaces to retain their properties for years, combining functionality with environmental care.

Research conducted at the Warsaw University of Life Sciences confirms that innovative permeable pavements are an effective solution supporting both urban water management and the development of greenery, which is crucial in the context of climate change.

## 1. Wstęp

W obliczu rosnących wyzwań klimatycznych, takich jak wzrost temperatur, susze, miejskie wyspy ciepła i ekstremalne opady, miasta muszą sięgać po rozwiązania, które łączą infrastrukturę techniczną z troską o środowisko. Nowoczesna urbanistyka to już nie tylko stal, beton i asfalt, ale także zieleń, retencja i bioróżnorodność. Kluczowym wyzwaniem staje się zatem integracja szarej, błękitnej i zielonej infrastruktury w sposób, który wspiera zarówno funkcjonalność miejskich przestrzeni, jak i lokalne ekosystemy. Jednym z takich rozwiązań jest Hydromedia – beton wodoprzepuszczalny opracowany przez Holcim Polska.

## 2. Charakterystyka i zastosowanie

### 2.1. Charakterystyka produktu

Hydromedia to beton o porowatej strukturze, który pozwala na szybkie wnikanie wody opadowej w głąb podłoża, nawet do 1000 litrów na minutę na metr kwadratowy. Dla porównania, średni roczny opad w Polsce wynosi około 550 litrów na metr kwadratowy. Materiał dzięki swoim właściwościom znacząco ogranicza powierzchniowy spływ wód, który jest głównym czynnikiem prowadzącym do podtopień i degradacji ekosystemów miejskich. Ponadto, nawierzchnie wykonane z Hydromedii wspierają lokalną retencję wody, co jest szczególnie istotne w kontekście walki z miejskimi wyspami ciepła.

W praktyce Hydromedia znajduje zastosowanie w różnorodnych przestrzeniach miejskich — od ścieżek rowerowych, chodników i placów, po parkingi i tereny rekreacyjne. Dzięki przepuszczalności zapewniając dostęp ekosystemom do wody, sprzyja rozwojowi systemów korzeniowych roślin przy zastosowaniu podbudowy przepuszczalnej oraz poprawia kondycję zieleni miejskiej.

### 2.2. Przykład zastosowania - Ścieżka rowerowa nad Rudawą.

W Krakowie wzdłuż rzeki Rudawy powstał odcinek ścieżki rowerowej, na którym ponad 85% nawierzchni wykonano z Hydromedii. Projekt ten, choć stanowi ważny przykład wdrożenia nowoczesnych rozwiązań wodoprzepuszczalnych w przestrzeni publicznej, pokazuje przede wszystkim, jak można skutecznie łączyć funkcjonalność z poprawą warunków hydrologicznych i mikroklimatu.

### 2.3. Rola zrównoważonego rozwoju w działaniach na rzecz klimatu

Współczesne strategie przeciwdziałania zmianom klimatycznym skupiają się przede wszystkim na redukcji emisji dwutlenku węgla i ograniczaniu śladu węglowego,

co jest bezsprzecznie kluczowe. Jednak skuteczne podejście do ochrony środowiska musi uwzględniać również aspekt zrównoważonego rozwoju, który obejmuje ochronę ekosystemów oraz poprawę warunków życia mieszkańców miast. Innowacyjne materiały, takie jak beton wodoprzepuszczalny, wykazują dodatkową funkcjonalność – badania<sup>1</sup> potwierdzają, że pyły zawieszone PM<sub>2,5</sub> i PM<sub>10</sub> osiadające na takich nawierzchniach podczas deszczu są skutecznie wypłukiwane i zatrzymywane w warstwach podbudowy. To zjawisko przyczynia się do ograniczenia ponownego unoszenia zanieczyszczeń do atmosfery i pozytywnie wpływa na jakość powietrza w przestrzeni miejskiej. Tym samym, zrównoważony rozwój łączy się tu nie tylko z redukcją emisji, ale także z praktyczną poprawą warunków środowiskowych i zdrowotnych.

### 3. Projekt badawczy

W ramach współpracy pomiędzy firmą Holcim Polska SA a Szkołą Główną Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie zrealizowano projekt demonstracyjny, którego przedmiotem było wykonanie nawierzchni z betonu przepuszczalnego Hydromedia, ułożonej na warstwach specjalnie zaprojektowanej podbudowy antykompresyjnej. Głównym założeniem tego przedsięwzięcia było zweryfikowanie efektywności technologii w warunkach rzeczywistych, z uwzględnieniem zarówno aspektów inżynierskich (nośność, przepuszczalność, odporność na deformacje), jak i środowiskowych (retencja, wpływ na zielen, mikroklimat miejski).

Zastosowana konstrukcja umożliwiała skuteczne zatrzymywanie i infiltrację wód opadowych, ograniczając ich spływ powierzchniowy. Układ został zaprojektowany tak, aby pełnił funkcję lokalnej mikroretencji – woda była akumulowana w strukturze warstwy nośnej, a następnie oddawana do gruntu w sposób kontrolowany. Tym samym system wspierał równowagę wodną terenu, redukował ryzyko przeciążeń kanalizacji deszczowej i wzmacniał zdolność terenu do samoregulacji hydrologicznej.

Jednocześnie nawierzchnia wykazywała pozytywny wpływ na parametry termiczne otoczenia. Dzięki zdolności do magazynowania wody oraz sprzyjaniu jej parowaniu, powierzchnia nie ulegała przegrzaniu w stopniu typowym dla konwencjonalnych rozwiązań nieprzepuszczalnych. Efekt ten przekładał się na zmniejszenie zjawiska miejskiej wyspy ciepła, co ma szczególne znaczenie w gęsto zabudowanych strefach miejskich.

---

<sup>1</sup> Holcim Francja (2025). Hydromedia New Air

### Typ 1

NAWIERZCHNIA I PODBUDOWA PRZEZNACZONA DO RUCHU PIESZO-ROWEROWEGO



### Typ 2

NAWIERZCHNIA I PODBUDOWA DO RUCHU <3,5T



### Typ 3

NAWIERZCHNIA I PODBUDOWA PRZEZNACZONA DO RUCHU <3,5 t  
ZE ZWIĘKSZONĄ MOŻLIWOŚCIĄ RETENCJI



### Typ 4

TRADYCYJNIE WYKONANA NAWIERZCHNIA BEZ WARSTWY PRZEPUSZCZALNEJ



\* Dokładny skład mieszanki w patencie SGGW.

Rys.1 Przekroje testowanych pól roboczych

Z perspektywy biologicznej, projekt umożliwił również ocenę wpływu nawierzchni na warunki siedliskowe dla zieleni. W bezpośrednim sąsiedztwie nawierzchni dokonano nasadzeń drzew, które są objęte monitoringiem pod kątem dostępności wody i tlenu w strefie korzeniowej.

Istotne jest, że rozwiązanie to wpisuje się w unijną koncepcję Nature-Based Solutions (NBS) – czyli rozwiązań inżynieryjnych opartych na naturalnych procesach, które wspierają adaptację do zmian klimatu oraz wspomagają lokalne ekosystemy. Nawierzchnie wykonane z Hydromedia, działając w synergii z zielenią i strukturami retencyjnymi, pełnią funkcję technologiczną i biologiczną zarazem – stając się narzędziem wspierania usług ekosystemowych w mieście.

Jak podkreśla prof. Marzena Suchocka, „adaptacja infrastruktury miejskiej do zmian klimatu wymaga od nas zintegrowanego podejścia, w którym elementy techniczne wspierają funkcje ekologiczne i zdrowotne przestrzeni<sup>2</sup>. Projekt realizowany wspólnie z SGGW stanowi praktyczny przykład takiego podejścia – integrując elementy inżynierii materiałowej z celami środowiskowymi oraz zdrowiem publicznym.

Wnioski płynące z realizacji projektu potwierdzają, że nawierzchnie przepuszczalne, takie jak Hydromedia Holcim, mogą skutecznie wspierać lokalną retencję, ograniczać efekty betonozy, poprawiać komfort cieplny i jakościowy środowiska miejskiego oraz realnie zwiększać powierzchnię funkcjonalnie biologicznie aktywną – nawet tam, gdzie tradycyjna zieleń jest trudna do utrzymania<sup>3</sup>.

## 4. Problemy normatywne i potrzeba nowych badań

### 4.1. Badania mrozoodporności

Choć Hydromedia spełnia wymagania klasy ekspozycji XF3 ( ilość spoiwa, w/c) dotyczącej mrozoodporności w środowisku wodnym, istnieją wątpliwości, czy aktualna metoda badania mrozoodporności w wodzie wg PN-B-06265: 2022:08<sup>4</sup> jest adekwatna do charakterystyki tego materiału. Szczególnie problematyczne jest kryterium spadku wytrzymałości. Tego typu materiały charakteryzują się dużym rozrzutem wytrzymałości na ściskanie dlatego wprowadzenie kryterium opartego na ocenie spadku wytrzymałości może dawać wyniki niemiarodajne, fałszywie negatywne po cyklach zamrażania.

Dlatego kluczowe staje się prowadzenie ukierunkowanych badań w celu dostosowania metod normatywnych do specyfiki materiału.

### 4.2. Powierzchnie biologicznie czynne

Coraz częściej dostrzega się potrzebę aktualizacji przepisów dotyczących powierzchni biologicznie czynnych, które obecnie nie w pełni odzwierciedlają specyfikę materiałów przepuszczalnych, takich jak Hydromedia. Materiały te mają istotny wpływ na retencję wody oraz wspierają rozwój zieleni miejskiej. Powierzchnie biologicznie czynne oparte na takich rozwiązaniach odgrywają kluczową rolę w poprawie mikroklimatu i gospodarce wodnej w przestrzeniach miejskich. Dlatego ważne jest, aby normy i wytyczne były dostosowane do tych technologii, co pozwoli na ich

<sup>2</sup> Suchocka, M. (2021). Zieleń w miastach jako narzędzie adaptacji do zmian klimatu. Wydawnictwo SGGW.

<sup>3</sup> Holcim Polska (2025). Katalog rozwiązań nawierzchni wodoprzepuszczalnych.

<sup>4</sup> PN-B-06265:2022-08 Beton – Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność.

skuteczne i bezpieczne wdrażanie oraz pełne wykorzystanie ich potencjału w tworzeniu bardziej funkcjonalnych i przyjaznych środowisku miast.

#### **4.3. Eksploatacja nawierzchni**

Istotnym aspektem eksploatacji nawierzchni przepuszczalnych jest sposób ich konserwacji i czyszczenia. Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, że w przypadku obniżenia przepuszczalności o około 25% w stosunku do wartości początkowej, konieczne staje się podjęcie działań konserwacyjnych, obejmujących odpowiednie metody czyszczenia. Pozytywny wpływ na utrzymanie przepuszczalności mają naturalne opady deszczu oraz okresowe mycie przy użyciu myjki ciśnieniowej. Systematyczne i właściwie przeprowadzone czyszczenie jest kluczowe dla zachowania optymalnych parametrów materiału oraz jego trwałości użytkowej. W związku z tym opracowanie precyzyjnych procedur utrzymania nawierzchni stanowi istotny element efektywnego i długoterminowego stosowania innowacyjnych rozwiązań takich jak Hydromedia.

### **5. Zakończenie**

Podsumowując, innowacyjne rozwiązania takie jak Hydromedia stanowią istotny krok w kierunku zrównoważonego i funkcjonalnego kształtowania przestrzeni miejskich. Integracja szarej, błękitnej i zielonej infrastruktury nie tylko wspiera efektywną gospodarkę wodną, ale również przyczynia się do poprawy jakości życia w miastach. Aby w pełni wykorzystać potencjał tych nowoczesnych materiałów, niezbędne jest dalsze rozwijanie norm oraz praktyk eksploatacyjnych, dostosowanych do ich specyfiki. Tylko w ten sposób możemy budować przyszłość miast odpornych na wyzwania współczesności, jednocześnie dbając o środowisko i komfort mieszkańców.

#### **Literatura**

- [1] Holcim Francja (2025). Hydromedia New Air
- [2] Suchocka, M. (2021). Zieleń w miastach jako narzędzie adaptacji do zmian klimatu. Wydawnictwo SGGW.
- [3] Holcim Polska (2025). Katalog rozwiązań nawierzchni wodoprzepuszczalnych.
- [4] PN-B-06265:2022-08 Beton – Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność.

**dr inż. Agnieszka Wiater**

Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza

**prof. dr hab. inż. Tomasz Siwowski**

Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza

**mgr inż. Juliusz Żach**

Renitens

**mgr inż. Paweł Studziński**

Renitens

## **Badania belek betonowych sprężonych prętami CFRP**

Research on concrete beams prestressed with CFRP bars

### **Streszczenie**

Korozja stali zbrojeniowej jest powszechnym zagrożeniem dla konstrukcji żelbetonowych, szczególnie narażonych na działanie środowiska morskiego, agresywnego i wysoce korozyjnego. Opracowanie nowych technik i materiałów w celu przeciwdziałania problemom związanym z korozją zbrojenia jest konieczne. W ciągu ostatnich 20 lat zastosowanie prętów kompozytowych z włóknami węglowymi (CFRP – *Carbon Fiber Reinforced Polymer*) jako zbrojenia głównego stało się obiecującą alternatywą. Powszechnie wiadomo, że pręty CFRP zdobyły ogromną popularność ze względu na swoje właściwości materiałowe, takie jak doskonała wytrzymałość na rozciąganie, wysoki stosunek wytrzymałości do masy, odporność na korozję, niemagnetyczność i wysoką wytrzymałość zmęczeniową. Pręty CFRP zdobyły ogromną popularność dzięki swoim właściwościom, takim jak odporność na korozję, niemagnetyczność, doskonała wytrzymałość na rozciąganie, wysoki stosunek wytrzymałości do masy oraz wysoka wytrzymałość zmęczeniowa.

W literaturze technicznej dostępnych jest niewiele badań dotyczących skuteczności sprężonych prętów CFRP jako zbrojenia betonowych elementów zginanych. W związku z tym wiedza na temat zachowania takich elementów pozostaje niewystarczająca. Niniejszy referat przedstawia wyniki badań przeprowadzonych na belkach betonowych zbrojonych sprężonymi prętami CFRP. Badania koncentrowały się na analizie belek poddanych zginaniu, ze szczególnym uwzględnieniem zależności siła-przemieszczenia, mechanizmów zniszczenia, nośności oraz schematów zarysowania. Uzyskane wyniki pozwoliły również zweryfikować przyjętą metodę projektowania belek betonowych ze sprężonymi prętami CFRP w zakresie stanów granicznych nośności i użytkowości.

## Abstract

Corrosion of reinforcing steel is a common threat to reinforced concrete structures, particularly those exposed to marine environments, which are aggressive and highly corrosive. The development of new techniques and materials to address issues related to reinforcement corrosion is essential. Over the past 20 years, the use of Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) bars as primary reinforcement has become a promising alternative. It is well known that CFRP bars have gained significant popularity due to their material properties, such as excellent tensile strength, high strength-to-weight ratio, corrosion resistance, non-magnetic nature, and high fatigue strength.

There is limited research available in the technical literature concerning the effectiveness of prestressed CFRP bars as reinforcement in concrete flexural members. Consequently, knowledge about the behavior of such elements remains insufficient. This paper presents the results of tests conducted on concrete beams reinforced with prestressed CFRP bars. The research focused on the analysis of beams subjected to bending, with particular attention paid to force-displacement relationships, failure mechanisms, load-bearing capacity, and cracking patterns. The obtained results also allowed for the verification of the adopted design approach for concrete beams with prestressed CFRP bars in terms of ultimate and serviceability limit states.

## 1. Wprowadzenie

Konwencjonalne cięgna stalowe w konstrukcjach sprężonych są podatne na korozję, która prowadzi do obniżenia sztywności, wytrzymałości i trwałości konstrukcji. Najlepszym rozwiązaniem problemu korozji jest zastosowanie niemetalicznych materiałów, takich jak kompozyty włókniste (FRP – *Fiber Reinforced Polymer*), które cechują się wysoką wytrzymałością na rozciąganie, a ponadto są odporne na korozję, niemagnetyczne i lekkie. Kompozyty FRP mogą stanowić alternatywę dla stalowych cięgien w konstrukcjach sprężonych [1], [2]. W ostatnich latach opracowano cięgna i pręty z kompozytu CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) do stosowania jako zbrojenia w betonie. Pręty CFRP oferują lepszą odporność na korozję i zmęczenie materiału w porównaniu do konwencjonalnej stali. Zbrojenie CFRP umożliwia budowę konstrukcji zbrojonych i sprężonych o znacznie wydłużonej trwałości w środowiskach korozyjnych w porównaniu do tradycyjnych konstrukcji żelbetowych. Jednakże zarówno pręty/cięgna CFRP, jak i beton są materiałami kruchymi. Dlatego elementy betonowe sprężone prętami lub cięgnami CFRP mają tendencję do gwałtownego zniszczenia. Brak ciągliwości stanowi jedno z największych wyzwań w zastosowaniach materiałów CFRP jako zbrojenia sprężającego.

W ciągu ostatnich trzech dekad przeprowadzono wiele badań mających na celu ocenę przydatności CFRP do sprężania konstrukcji betonowych. Większość prac badawczych koncentrowała się na zachowaniu konstrukcji sprężonych CFRP i wykazała ich zadowalające parametry użytkowe [3], [4]. Jednak dla powszechnej akceptacji i szerokiego zastosowania prętów CFRP w inżynierii lądowej konieczne jest zbadanie długoterminowego zachowania i trwałości konstrukcji sprężonych.

W Polsce kompozyty CFRP są szeroko stosowane od połowy lat 90. XX wieku do wzmacniania konstrukcji budowlanych, w tym mostów [5]. Początkowo CFRP stosowano jedynie w formie pasywnych taśm, jednak od połowy lat 2000 wdrażano również technologie sprężania taśm CFRP [6], [7]. Prowadzono także badania nad zastosowaniem prętów CFRP metodą NSM (*Near Surface Mounted*) do wzmacniania konstrukcji [8]. Z kolei do zbrojenia nowych elementów betonowych wykorzystywano jedynie pręty z kompozytu GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*) [9], [10]. Głównym powodem braku zainteresowania prętami/cięgnami CFRP do zbrojenia betonu w Polsce była ich wysoka cena. Obecnie cena prętów CFRP jest znacznie niższa, na rynku pojawili się krajowi producenci tych elementów, a w inwestycjach publicznych coraz częściej uwzględnia się koszty cyklu życia (czyli trwałość). W takiej sytuacji zastosowanie prętów/cięgien CFRP, z uwagi na ich zalety (głównie odporność na korozję), staje się realną alternatywą przy budowie nowych konstrukcji.

Większość nowych mostów w Polsce powstaje z typowych prefabrykowanych belek betonowych sprężonych stalowymi cięgnami. Głównym celem badań autorów było zatem wstępne sprawdzenie możliwości zastosowania prętów CFRP jako zamiennika stali w prefabrykowanych belkach mostowych. Celem uzupełniającym było opracowanie i eksperymentalna weryfikacja procedury projektowania belek betonowych sprężonych prętami CFRP oraz sprawdzenie nowej metody sprężania. W ramach obecnych badań zaprojektowano, wykonano i przebadano trzy belki z betonu wysokiej wytrzymałości, sprężone prętami CFRP, w skali naturalnej. Wyniki badań pozwoliły ocenić zachowanie konstrukcji pod obciążeniem oraz porównać ugięcia i nośność uzyskane eksperymentalnie z wartościami obliczonymi zgodnie z obowiązującymi procedurami projektowymi. W ten sposób dokonano częściowej oceny metody projektowania belek betonowych zbrojonych sprężonymi prętami CFRP w stanach granicznych.

## 2. Materiały

### 2.1. Beton

W badanych belkach zastosowano beton wysokiej wytrzymałości o następujących parametrach materiałowych:

- a) klasa betonu: C60/75 zgodnie z normą EN 1992-1-1 [11]:
  - wytrzymałość na ściskanie  $f_c = 60$  MPa;
  - moduł sprężystości  $E_{cm} = 36.4$  GPa,
  - graniczne odkształcenie przy ściskaniu  $\epsilon_{cu} = 0.003$ .
- b) klasa ekspozycji: XC4, XF4 zgodnie z EN 1992-1-1 [11];
- c) zawartość chlorków: Cl 0,20;
- d) rodzaj i zawartość cementu: CEM II/A-M (S-LL) 52.5N, 415 kg/m<sup>3</sup>;
- e) kruszywo: dolomitowe; maksymalna średnica ziarna  $D_{max} = 16$  mm,
- f) wskaźnik  $W_{eff}/C$ : 0,38;
- g) klasa konsystencji: S4 zgodnie z EN 1992-1-1 [11].

### 2.2. Pręty CFRP

Pręty kompozytowe CFRP użyte w badaniach zostały dostarczone przez firmę Solidian z Niemiec. Pręty o nominalnej średnicy 6 mm mają okrągły przekrój z żebrowaniem spiralnym i są wykonane z włókien węglowych oraz żywicy epoksydowej (Fot. 1).



Fot. 1. Pręty CFRP zastosowane w badaniach.

Zgodnie z danymi producenta przyjęto następujące minimalne charakterystyki materiałowe:

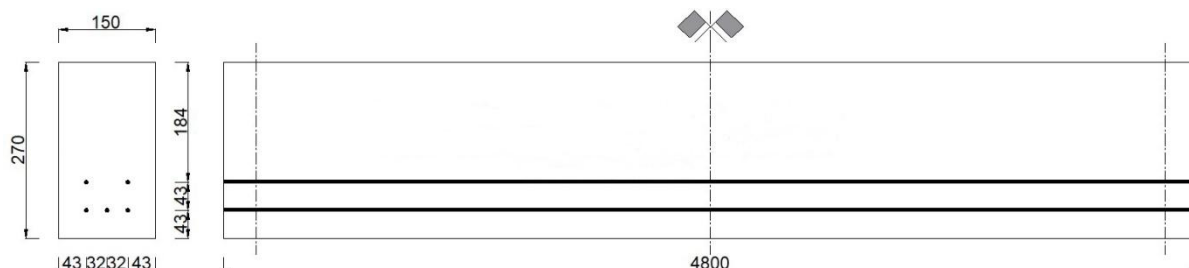
- zawartość włókien w prętach CFRP:  $\geq 60\%$ ,
- charakterystyczna krótkotrwała wytrzymałość na rozciąganie w odniesieniu do nominalnego pola przekroju:  $\geq 2100 \text{ MPa}$ ,
- średnia krótkotrwała wytrzymałość na rozciąganie w odniesieniu do nominalnego pola przekroju:  $\geq 2500 \text{ MPa}$ ,
- średni moduł sprężystości w odniesieniu do nominalnego pola przekroju:  $\geq 155 \text{ GPa}$ .

### 2.3. Modele badawcze

Do badań przewidziano trzy belki z betonu wysokiej wytrzymałości sprężone prętami CFRP. Belki zostały zaprojektowane głównie zgodnie z amerykańską normą ACI 440.4R-04 [12], a także w oparciu o normy uzupełniające: ACI 440.1R-15 [13], ACI 318-19 [14], CAN/CSA S6-19 [15], CAN/CSA S806-12 [16] oraz EN 1992-1-1 [11].

Przyjęto do obliczeń prostokątny przekrój poprzeczny belek został z uwzględnieniem następujących zaleceń:

- zalecana wysokość belki  $h$  dla belek swobodnie podpartych wg EN 1992-1-1 [11], Tabela 7.4N, powinna mieścić się w zakresie:  $h \leq l/14$ ,  $h \geq l/20$ ;
- zalecana wysokość belki  $h$  wg ACI 318-19 [14] powinna wynosić:  $h = l/16$ ;
- zalecany stosunek wysokości do szerokości ( $h/w$ ) wg ACI 318-19 [14] powinien mieścić się w przedziale od 1,5 do 2,0.



Rys.1. Geometria badanych belek.

Długość belek została dobrana z uwzględnieniem zgodności z praktyką inżynierską i standardami laboratoryjnymi, reprezentatywności zachowania rzeczywistej konstrukcji w skali możliwej do odwzorowania w warunkach laboratoryjnych oraz osiągnięcia wysokiego momentu zginającego przy stosunkowo niewielkich siłach tnących. Ostatecznie zaprojektowano belki o wysokości 27 cm, szerokości 15 cm i długości 480 cm, spełniające powyższe zalecenia. Rozpiętość teoretyczna belki wynosi 450 cm (z 15-centymetrowym przewieszeniem przy każdym podporze).

Ze względu na ograniczenia techniczne, maksymalną liczbę sprężonych prętów w jednym rzędzie ograniczono do trzech. Przewidziano pięć prętów sprężających w dwóch rzędach jako zbrojenie główne na zginanie. Pionowy odstęp między rzędami wynosił 43 mm i wynikał z ograniczeń technicznych mechanizmu sprężającego. W dolnym rzędzie zastosowano trzy a w górnym rzędzie dwa pręty GFRP o średnicy 12 mm na całej długości belki. Zastosowano również strzemiona GFRP w celu zminimalizowania wpływu sił tnących na zginanie. Strzemiona miały średnicę 4 mm i były rozmieszczone co 5 cm. Otulina betonowa górna i dolna belki sprężonej wynosiła 40 mm, uwzględniając wpływ rozszerzalności cieplnej oraz efektu Hoyera, zgodnie z normą CAN/CSA S806 [16].

#### 2.4. Proces sprężania

Z uwagi na to, że na końcach prętów nie przewidziano stałych zakotwień, jak ma to miejsce w konstrukcjach sprężanych metodą naciągu wtórnego, zakotwienie pręta sprężanego wykonano metodą naciągu wstępnego, który uzyskuje się poprzez przyczepność na styku pręt–beton. Naprężenia przyczepności, aktywowane po zwolnieniu pręta, maleją od wartości maksymalnej na samym końcu belki do zera na pewnej odległości. Ze względu na kruche zachowanie prętów CFRP konieczne było zastosowanie specjalnej procedury sprężania. Użyto specjalnie zaprojektowanych zacisków, które pozwalały zaciskać pręty węglowe bez ich uszkodzenia lub zgniecenia. Opracowano również specjalne deskowanie belek, dostosowane do sił sprężających i ułatwiające cały proces sprężania. Każdy pręt był indywidualnie naciągany, a jego zachowanie monitorowano za pomocą tensometru, wykonując odczyty co minutę.

Na dzień przed betonowaniem pręty zostały wstępnie sprężone siłą 30 kN w celu sprawdzenia poprawności działania zacisków i wykrycia ewentualnych wadliwych prętów. Po zabetonowaniu, pręty były sprężane do projektowanej siły sprężającej, a mieszanka betonowa została dokładnie zagęszczona.

Zdecydowano się sprężyć pręty CFRP siłą odpowiadającą 60% charakterystycznej krótkotrwałej wytrzymałości na rozciąganie. Wartość ta odpowiada maksymalnemu dopuszczalnemu naprężeniu przy sprężaniu (ang. *jacking stress*) dla CFRP, zgodnie z normą ACI 440.4R-04 [12], Tabela 3.3. Siła sprężająca została ustalona na poziomie 35,6 kN na pręt, co daje łączną siłę początkową równą 178,1 kN. Obliczenia projektowe wskazywały na całkowite straty sprężania rzędu 18,78%, co skutkowało końcową siłą sprężającą równą 144,7 kN. Ostateczne siły sprężające, zmierzone za pomocą tensometrów podczas monitorowania procesu wytwarzania belek, zostały zestawione w Tabeli 1, gdzie pokazano również niewielkie różnice w wartości siły sprężającej dla każdej z belek.

Tabela 1. Siły sprężające w poszczególnych prętach belek

| Nr belki | Nr pręta (wg Rys.1) | Siła sprężająca [kN]                  |                        |                       |
|----------|---------------------|---------------------------------------|------------------------|-----------------------|
|          |                     | Odczyty początkowe (po zabetonowaniu) | 1 dzień po betonowaniu | 14 dni po betonowaniu |
| 1        | 1                   | 35.76                                 | 35.57                  | 35.33                 |
|          | 2                   | 35.42                                 | 35.17                  | 34.79                 |
|          | 3                   | 35.36                                 | 34.73                  | 34.51                 |
|          | 4                   | 35.64                                 | 35.56                  | 35.53                 |
|          | 5                   | 35.85                                 | 35.69                  | 35.50                 |
| 2        | 1                   | 36.77                                 | 36.58                  | 36.55                 |
|          | 2                   | 36.90                                 | 36.31                  | 36.48                 |
|          | 3                   | 36.85                                 | 36.41                  | 36.62                 |
|          | 4                   | 36.77                                 | 36.52                  | 36.75                 |
|          | 5                   | 36.72                                 | 36.36                  | 36.85                 |
| 3        | 1                   | 36.94                                 | n/a                    | 37.70                 |
|          | 2                   | 37.01                                 | n/a                    | 37.64                 |
|          | 3                   | 37.00                                 | n/a                    | 37.72                 |
|          | 4                   | 37.04                                 | n/a                    | 37.84                 |
|          | 5                   | 36.92                                 | n/a                    | 37.81                 |

### 3. Procedura badawcza

Belki zostały poddane badaniom w schemacie trójpunktowego zginania, podparte na dwóch stalowych rolkach w rozstawie 4,5 m (Fot. 2). Obciążenie przykładano za pomocą siłownika hydraulicznego o maksymalnym zakresie siły 630 kN. Obciążenie było przyłożone w sposób kontrolowany przez przemieszczenie, ze stałą prędkością przyrostu wynoszącą 1,0 lub 0,5 mm/min. Belki były obciążane statycznie w siedmiu rosnących poziomach obciążenia aż do zniszczenia. Poziomy obciążenia zostały ustalone na podstawie obliczeń projektowych przedstawionych w tabeli 2.



Fot. 2. Belka na stanowisku badawczym

Tabela 2. Program obciążania belek

| Lp. | Obciążenie | Prędkość | Przewidywane ugięcie | % momentu rysującego | % projektowanej nośności | Uwagi                                       |
|-----|------------|----------|----------------------|----------------------|--------------------------|---------------------------------------------|
|     | [kN]       | [mm/min] | [mm]                 | [%]                  | [%]                      |                                             |
| 1.  | 11.6       | 1        | 2.62                 | 60.0                 | 54.9                     | 60% momentu rysującego                      |
| 2.  | 12.0       | 0.5      | 2.72                 | 62.2                 | 56.5                     |                                             |
| 3.  | 17.9       |          | 4.05                 | 92.7                 | 80.6                     | $0.5 \cdot \sqrt{f'_c}$ wg [11], Tabela 3.2 |
| 4.  | 19.3       |          | 5.10                 | 100.0                | 86.3                     | Moment rysujący                             |
| 5.  | 22.7       |          | 9.01                 | 115.6                | 100                      | Nośność obliczeniowa                        |
| 6.  | 52.4       |          | 66.46                | 222.0                | 221.6                    | Nośność nominalna                           |
| 7.  |            |          | Zniszczenie          |                      |                          |                                             |

Belki zostały zaprojektowane w taki sposób, aby ich nośność była zdeterminowana przez wyczerpanie wytrzymałości prętów na rozciąganie, co klasyfikuje przekrój jako kontrolowany przez rozciąganie (ang. *tension controlled*). W takim przypadku odkształcenie betonu w momencie zniszczenia belki nie osiągnie wartości 0,003. Nośność nominalna przedstawiona w tabeli 2 została obliczona jako moment zginający zgodnie z normą ACI 318-19 [14], bez uwzględnienia współczynnika redukcyjnego nośności ( $\phi$ ). Graniczna wytrzymałość na rozciąganie

prętów CFRP ( $f_{pu}$ ) odpowiada średniej krótkotrwałej wytrzymałości na rozciąganie materiału. Nośność projektowa w tabeli 2 to wartość z uwzględnieniem współczynnika redukcyjnego, obliczona jako nominalna nośność na zginanie pomnożona przez współczynnik redukcyjny ( $\phi$ ).

Przemieszczenia belek pod obciążeniem były mierzone za pomocą zestawu czujników (fot. 2). Dwanaście czujników przemieszczeń LVDT zostało umieszczonych na spodniej powierzchni belek w celu pomiaru pionowych przemieszczeń (ugięć): w środku rozpiętości (15 cm od osi obciążenia po każdej stronie) oraz w punktach  $\frac{1}{4}$  przęsła. W tych przekrojach zastosowano po dwa czujniki z każdej strony belki. Dwa dodatkowe zestawy czujników LVDT zostały umieszczone na osi podparcia w celu kontroli ewentualnych przemieszczeń podpór.

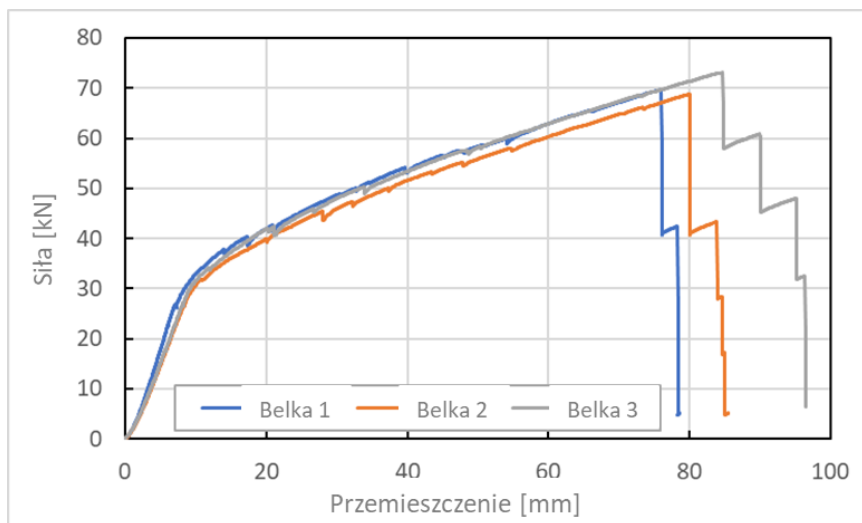
Aby uniknąć uszkodzenia czujników w momencie zniszczenia belki, czujniki te były zazwyczaj demontowane przy poziomie obciążenia wynoszącym 22,7 kN (nośność projektowa) dla wszystkich belek. W celu uzupełnienia odczytów z LVDT uwzględniano również zależność siła–przemieszczenie tłka siłownika.

#### 4. Wyniki badań

W niniejszym tekście przedstawiono jedynie ograniczone wyniki badań ze względu na jego ograniczony zakres. Poniżej omówiono zależności siła–ugięcie, nośności graniczne oraz mechanizmy zniszczenia dla każdej belki. Rysunek 2 przedstawia krzywe zależności siła–ugięcie dla trzech belek podczas obciążania statycznego i pokazuje, że sztywność belek sprężonych prętami CFRP przed pojawieniem się rys jest niezależna od wartości siły sprężającej podanej w tabeli 1. Krzywe siła–ugięcie dla trzech badanych belek są do siebie bardzo podobne do około 30 kN. Początkowe (przed pojawieniem się rys) nachylenia krzywych siła–ugięcie wynosiły odpowiednio 3,73; 3,20 i 3,30 kN/mm dla belek 1, 2 i 3, w zakresie obciążenia  $27,05 \pm 0,04$  kN. Wszystkie trzy belki odbiegły od liniowej odpowiedzi przy około 35 kN.

Po pojawieniu się rys obserwuje się niewielką różnicę w nachyleniu krzywej siła–ugięcie. Porównując wyniki dla wszystkich badanych belek można zauważyć wartość obciążenia rysującego jest niemal identyczna. Utrata sztywności na zginanie związana z powstaniem rys nastąpiła około 35 kN we wszystkich trzech belkach. Nachylenie krzywej siła–ugięcie po powstaniu rys dla belki 3 jest nieco większe niż dla belek 1 i 2, co sugeruje wyższą sztywność po zarysowaniu tej belki. Ta wyższa sztywność może wynikać z różnic między próbkami (np. nieco inny przebieg rys, wytrzymałość betonu na ściskanie i rozciąganie). Z krzywych siła–ugięcie przedstawionych na rysunku 2 wynika, że belka 2 sprężona prętami CFRP wykazuje największe ugięcie (5,25 mm), natomiast belka 1 – najmniejsze (4,10 mm). Przyczyny tej rozbieżności są obecnie przedmiotem dalszych badań. Ogólnie ugięcie belek sprężonych CFRP zależy od poziomu siły sprężającej.

Należy zauważyć, że choć materiał prętów CFRP cechuje się kruchym uszkodzeniem na rozciąganie, to belki sprężone tymi prętami wykazywały stopniowe zniszczenie przy dużych ugięciach, co jest pożądaną formą zniszczenia w konstrukcjach betonowych.



Rys.2. Zależności siła-przemieszczenia dla badanych belek.

Przemieszczenia w środku rozpiętości zmierzone za pomocą czujników indukcyjnych dla każdej z belek dla różnych poziomów obciążenia przedstawiono w tabeli 3. Podano również wartość średnią dla serii trzech belek, która została porównana z wynikami obliczeń teoretycznych. Można zaobserwować dobrą zgodność między wynikami teoretycznymi a eksperymentalnymi, szczególnie na początkowych etapach badania. Jednakże różnica na poziomie nośności projektowej ( $P = 22,7 \text{ kN}$ ) jest dość duża (około 50%), co wskazuje na konieczność weryfikacji i ponownego opracowania procedury obliczeniowej

Tabela 3. Ugięcia w środku rozpiętości: wartości doświadczalne i teoretyczne

| Lp. | Siła [kN] | Ugięcie [mm] |         |         |                 |                     | AVG / CAL |
|-----|-----------|--------------|---------|---------|-----------------|---------------------|-----------|
|     |           | Belka 1      | Belka 2 | Belka 3 | Średnia ("AVG") | Teoretyczne ("CAL") |           |
| 1.  | 11.6      | 2.11         | 2.68    | 2.50    | 2.43            | 2.62                | 93%       |
| 2.  | 12.0      | 2.19         | 2.78    | 2.58    | 2.52            | 2.72                | 93%       |
| 3.  | 17.9      | 3.22         | 4.12    | 3.86    | 3.73            | 4.05                | 92%       |
| 4.  | 19.3      | 3.50         | 4.47    | 4.13    | 4.03            | 5.10                | 79%       |
| 5.  | 22.7      | 4.10         | 5.25    | 4.91    | 4.75            | 9.01                | 53%       |

Fotografia 3 przedstawia typową postać zniszczenia belek sprężonych prętami CFRP. Wszystkie trzy belki uległy uszkodzeniu na skutek zerwania prętów CFRP w strefie największego momentu zginającego pod punktem obciążenia. Poza pojawieniem się rys w belce, słyszalnymi sygnałami zerwania prętów oraz widocznym trwałym ugięciem, nie zaobserwowano innych widocznych form zniszczenia belki. Ponadto, na poziomie dolnych prętów CFRP zauważono poziome rysy. Jednakowy sposób zniszczenia we wszystkich trzech przypadkach potwierdza powtarzalność procedury sprężania belek oraz poprawność opracowanej metody sprężania.

Belki uległy zniszczeniu przy poziomach obciążenia odpowiednio: 69,67 kN, 68,82 kN i 73,14 kN dla belek 1, 2 i 3. Średnia wartość nośności granicznej wyniosła 70,54 kN i jest o 35% wyższa od teoretycznej nośności nominalnej belek. Przyczyną tej różnicy mogą być: wyższa rzeczywista wytrzymałość na ściskanie betonu w badanych belkach niż założona klasa betonu w obliczeniach oraz/lub wyższa wytrzymałość na rozciąganie prętów CFRP niż nominalna deklarowana przez producenta. Bardziej prawdopodobne jest to drugie wyjaśnienie. Rzeczywista wytrzymałość na rozciąganie prętów Solidian CFRP wydaje się być znacząco wyższa niż zalecana przez producenta wartość 2500 MPa.



Fot. 3. Postać zniszczenia badanych belek.

## 5. Podsumowanie

Wykonano trzy pełnowymiarowe belki wykonane z betonu wysokowytrzymałego oraz prętów FRP do sprężania i zbrojenia. Belki poddano próbie trójpunktowego zginania aż do zniszczenia. Kluczowe wnioski i obserwacje można podsumować następująco:

- Zachowanie wszystkich trzech belek pod obciążeniem statycznym było niemal identyczne przed pojawieniem się rys i jedynie nieznacznie różniło się po ich powstaniu; dowodzi to wysokiej powtarzalności belek, a w szczególności procesu ich sprężania;
- Jednolity sposób zniszczenia we wszystkich trzech przypadkach jest również dowodem na powtarzalność procedury sprężania belek oraz poprawność opracowanej metody sprężania;
- Do momentu zarysowania się belek uzyskano wysoką zgodność wyników obliczeń i procedur eksperymentalnych; jednak po zarysowaniu różnice są znacznie większe zarówno pod względem przewidywanego ugięcia (48%), jak i nośności granicznej belek (35%); jedną z przyczyn tych rozbieżności mogą być inne niż rzeczywiste parametry materiałowe CFRP i betonu przyjęte w obliczeniach;
- Opracowana metoda projektowa, mimo że jest bezpieczna (mniejsze ugięcia i wyższa nośność belek w obliczeniach), jest również zbyt konserwatywna i wymaga dalszych prac nad jej wiarygodnością w projektowaniu.

## 6. Literatura

- [1] Stoll, F., Saliba, J. E., & Casper, L. E. (2000). Experimental study of CFRP-prestressed high-strength concrete bridge beams. *Composite Structures*, 49(2), 191-200.
- [2] Mertol, H. C., Rizkalla, S., Scott, P., Lees, J. M., & El-Hacha, R. (2006). Durability and fatigue behavior of high-strength concrete beams prestressed with CFRP bars. In *Case Histories and Use of FRP for Prestressing Applications*, ACI Special Publication, SP245-1, Detroit, USA, 1-20.
- [3] Wu, T., Sun, Y., Liu, X., & Cao, Y. (2021). Comparative study of the flexural behavior of steel fiber-reinforced lightweight aggregate concrete beams reinforced and prestressed with CFRP tendons. *Engineering Structures*, 233, 111901.
- [4] Wang, H. T., Tang, C., Chen, M. S., Shi, J., & Cao, X. Y. (2024). Experimental study on the flexural performance of prestressed RC beams with post-tensioned CFRP strands. *Engineering Structures*, 309, 118118.
- [5] Siwowski, T., & Radomski, W. (1998). Pierwsze krajowe zastosowanie taśm kompozytowych do wzmocnienia mostu. *Inżynieria i Budownictwo*, 54(7), 382–388.
- [6] Siwowski, T., Piątek, B., Siwowska, P., & Wiater, A. (2020). Development and implementation of CFRP post-tensioning system for bridge strengthening. *Engineering Structures*, 207, 110266.
- [7] Piątek, B., Siwowski, T., Michałowski, J., & Błazewicz, S. (2020). Flexural strengthening of RC beams with prestressed CFRP strips: Development of novel anchor and tensioning system. *Journal of Composites for Construction*, 24(3), 04020015.
- [8] Rezazadeh, M., Cholostiakow, S., Kotynia, R., & Barros, J. (2016). Exploring new NSM reinforcements for the flexural strengthening of RC beams: Experimental and numerical research. *Composite Structures*, 141, 132-145.

- [9] Wiater A., & Siwowski T. (2020). Comparison of Tensile Properties of Glass Fibre Reinforced Polymer Rebars by Testing According to Various Standards. *Materials* 13(18), 4110.
- [10] Wiater, A., & Siwowski, T. (2020). Serviceability and ultimate behaviour of GFRP-reinforced lightweight concrete slabs: Experimental test versus code prediction. *Composite Structures*, 239, 112020
- [11] PN-EN 1992-1-1:2008. (2008). Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków. Polski Komitet Normalizacyjny.
- [12] ACI 440.4R-04: Prestressing concrete structures with FRP tendons. American Concrete Institute.
- [13] ACI 440.1R-15: Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fiber-reinforced polymer (FRP) bars. American Concrete Institute.
- [14] ACI 318-19: Building code requirements for structural concrete and commentary. American Concrete Institute.
- [15] CAN/CSA S6-19: Canadian highway bridge design code. Canadian Standards Association.
- [16] CAN/CSA S806-12: Design and construction of building structures with fiber-reinforced polymers. Canadian Standards Association.

**dr hab. Elżbieta Janowska-Renkas, Profesor Uczelni**

Katedra Inżynierii Materiałów Budowlanych, Wydział Budownictwa i Architektury,  
Politechnika Opolska

**dr inż. Przemysław Jakiel**

Katedra Mostów, Geotechniki i Procesów Budowlanych, Wydział Budownictwa i  
Architektury, Politechnika Opolska

**mgr inż. Krzysztof Seewald**

Katedra Inżynierii Materiałów Budowlanych, Wydział Budownictwa i Architektury,  
Politechnika Opolska

## **Analiza właściwości mechanicznych oraz przegląd wybranych kompozytów naturalnych i syntetycznych**

Analysis of mechanical properties and review of some natural and synthetic  
composites

### **Streszczenie**

Kompozyty należą do materiałów składających się z co najmniej dwóch składników, a ich połączenie prowadzi do uzyskania materiału o korzystniejszych właściwościach w porównaniu z poszczególnymi składowymi. Z tego względu znajdują one coraz większe zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu, w tym w budownictwie. W referacie przedstawiono przegląd materiałów kompozytowych pochodzenia naturalnego i syntetycznego, uwzględniając właściwości mechaniczne, a w szczególności moduł odkształcalności podłużnej. Przedstawiono pochodzenie kompozytów wraz z historycznymi i perspektywicznymi możliwościami zastosowań. Zestawienie modułów Younga umożliwiło porównanie ze sobą wybranych materiałów kompozytowych lub ich poszczególnych składników.

### **Abstract**

Composites belong to the materials based on a combination of at least two components, which leads to obtaining a material with more advantageous properties compared to the individual constituents. For this reason, they are finding increasing application in many branches of industry, including construction. This paper presents an overview of composite materials of natural and synthetic origin, considering their mechanical properties, and in particular, the modulus of longitudinal elasticity (Young's modulus). The origin of composites is discussed, along with their historical and prospective application possibilities. A compilation of Young's moduli allowed for the comparison of selected composite materials or their individual components.

## 1. Wprowadzenie

Współczesne technologie w coraz większym stopniu opierają się na materiałach kompozytowych, które znajdują zastosowanie nie tylko w zaawansowanych rozwiązaniach inżynieryjnych, ale również w produktach codziennego użytku. Przykłady te obejmują powszechnie dostępne urządzenia AGD, sprzęt sportowy, środki transportu, a także aplikacje o charakterze militarnym. Pomimo, że użytkownicy często nie są tego świadomi, wiele z wymienionych przedmiotów w dużej mierze wykonanych jest z kompozytów. Ich charakterystyczna struktura jest zazwyczaj ukryta pod warstwami wierzchnimi, przez co dopiero dokładna analiza materiałowa pozwala zidentyfikować złożony skład i właściwości.

Kompozyty otrzymywane są w wyniku połączenia co najmniej dwóch składników o odmiennych właściwościach, których synergiczne działanie umożliwia uzyskanie materiału o cechach przewyższających właściwości poszczególnych komponentów. Obecnie najczęściej z tą nazwą kojarzone są nowoczesne materiały na bazie żywic polimerowych i włókien, określane jako polimery wzmacniane włóknami (FRP – *Fiber Reinforced Polymer*), które dzięki swojej wysokiej wytrzymałości, małej ciężarze i możliwości kształtowania dowolnych form znajdują zastosowania w wielu gałęziach przemysłu, np. w lotnictwie, branży samochodowej i budownictwie. Parametry mechaniczne tego typu materiałów uzależnione są, m.in. od zorientowania włókien względem kierunków obciążenia. Do kompozytów zaliczyć można również materiały pochodzenia naturalnego, stanowiące nierzadko pierwowzór kompozytów syntetycznych. Jednym z przykładów powiązanych ściśle z kompozytami naturalnymi jest papier [1], czy ogólnodostępny dziś jedwab, który tysiące lat temu należał do „tkanin luksusowych” [2].

Rozważając tematykę kompozytów nie sposób pominąć jednego z najbardziej popularnych materiałów, jakim jest beton. W 1824 r. J. Aspdin opatentował cement portlandzki, który w połączeniu z kruszywem i wodą pozwolił na wytworzenie betonu. Z czasem zastosowano w nim wzmocnienie stalą uzyskując żelbet, co przyczyniło się do dynamicznego rozwoju i popularyzacji tego materiału w wielu gałęziach gospodarki. Wprowadzenie cięgien sprężających do elementów żelbetowych stanowi kolejny etap ich optymalizacji, umożliwiający zwiększenie rozpiętości konstrukcji, redukcję zarysowań oraz poprawę nośności i trwałości elementów.

W przypadku kompozytów kluczowe znaczenie ma odpowiednio dobrany skład fazowy, determinujący wytrzymałość i właściwości użytkowe, co jest rezultatem synergicznego oddziaływania wszystkich składników. Podobnie, jak w przypadku elementów żelbetowych, odpowiedni dobór składników oraz zbrojenia ma duże znaczenie dla ich nośności i trwałości, tak w kompozytach włóknistych istotne jest właściwe zaprojektowanie udziału objętościowego włókien w osnowie polimerowej. Matryca ta pełni równocześnie funkcję medium przenoszącego naprężenia na włókna oraz chroniącego je przed czynnikami środowiskowymi [3]. W związku z rosnącym znaczeniem kompozytów w różnych gałęziach przemysłu, bardzo ważny jest odpowiedni dobór ich parametrów użytkowych. Wpływa to na uzyskanie coraz bardziej zaawansowanych materiałów.

Mając na uwadze powyższe, w referacie przedstawiono rys historyczny związany z pojawieniem się i doskonaleniem kompozytów naturalnych i syntetycznych, analizę porównawczą ich właściwości mechanicznych i użytkowych oraz wybrane przykłady praktycznych zastosowań tych materiałów.

## 2. Rys historyczny

Analiza pochodzenia kompozytów naturalnych i syntetycznych wskazuje, że znacznie łatwiej jest prześledzić historię materiałów syntetycznych, których powstanie i doskonalenie są dobrze udokumentowane. W przypadku kompozytów naturalnych określenie momentu ich pierwszego zastosowania, ze zrozumiałych względów jest znacznie trudniejsze, ponieważ ich początki sięgają czasów starożytnych, a nawet prehistorycznych. Co istotne, wiele z tych materiałów wykorzystywano powszechnie ze względu na ich właściwości użytkowe, choć nie były one wówczas klasyfikowane jako kompozyty.

Jednym z pierwszych udokumentowanych zastosowań naturalnych kompozytów były cegły formowane z gliny i wzmacniane włóknami organicznymi, np. suszone na słońcu, z dodatkiem słomy lub trawy. Włókna roślinne zwiększały ich wytrzymałość i ograniczały ryzyko pęknięcia w trakcie suszenia [1]. Spośród naturalnych materiałów kompozytowych szczególne miejsce zajmuje drewno, powszechnie stosowane od czasów starożytnych aż po dzień dzisiejszy. W starożytnej Grecji wykorzystywano różne gatunki drewna do budowy kadłubów łodzi, często łącząc je z naturalnymi żywicami pełniącymi funkcję uszczelniaczy. Drewno było również szeroko stosowane w budownictwie – samodzielnie lub w połączeniu z elementami murowanym [4]. Również w starożytnym Egipcie stosowano materiały kompozytowe – m.in. klejone drewno do wyrobu sarkofagów oraz papirus, który ze względu na strukturę warstwową uznaje się za formę laminatu, powszechnie stosowaną dziś metodę wytwarzania kompozytów [5].

W Imperium Rzymskim dokonano jednego z najważniejszych odkryć w dziedzinie materiałów kompozytowych – opracowano beton oparty na naturalnej pucolanie, czyli reaktywnych popiołach wulkanicznych. Ten innowacyjny materiał cechował się wyjątkową trwałością i odpornością na działanie czynników atmosferycznych oraz wody morskiej. Beton „pucolanowy” był wykorzystywany w wielu monumentalnych konstrukcjach inżynierskich, z których liczne zachowały się do dziś. Przykłady obejmują, m.in. Panteon w Rzymie – z największą na świecie niebrojoną kopułą betonową o średnicy ponad 43 m, istniejącą nieprzerwanie od ok. 125 r. n.e., Akwedukt Aqua Claudia – zasilający starożytny Rzym w wodę, częściowo zachowany i nadal imponujący pod względem inżynierskim i inne (Rys. 1) [6].



**Rys. 1.** Widok na Panteon (Rzym) i akwedukt Klaudiusza (Aqua Claudia) [7]

W Chinach natomiast rozwinięto metody wytwarzania papieru z włókien roślinnych, m.in. z konopi i kory drzew, oraz opracowano produkcję jedwabiu – wspomnianego już materiału o charakterze kompozytowym. Z jedwabnych nici pozyskiwanych z kokonów jedwabników powstawały następnie tkaniny o unikalnych właściwościach

mechanicznych i estetycznych. Zarówno technologia produkcji papieru, jak i jedwabiu była przez wiele stuleci pilnie strzeżona [8].

Początek rozwoju współczesnych kompozytów syntetycznych datuje się na koniec lat 40. XX w., kiedy to technologie wykorzystywane wcześniej w przemyśle lotniczym (np. włókna szklane w żywicach poliestrowych) zaczęto adaptować do zastosowań cywilnych, m.in. w przemyśle motoryzacyjnym. Okres zimnej wojny przyniósł intensywne inwestycje w sektor kosmiczny i obronny, co przyczyniło się do dynamicznego rozwoju technologii kompozytowych. Powstały wówczas nowe techniki wytwarzania, takie jak pultruzja czy formowanie próżniowe. Przełomowym momentem było opracowanie w latach 60. XX w. włókien węglowych. Mimo znacznie wyższych kosztów w porównaniu z włóknami szklanymi, włókna węglowe cechowały się bardzo dobrymi właściwościami mechanicznymi, co uczyniło je idealnym materiałem dla przemysłu lotniczego [9].

W latach 70. XX w. trwały intensywne prace nad udoskonaleniem metod wytwarzania i poprawą właściwości mechanicznych kompozytów. Pod koniec tej dekady rozpoczęto badania nad zastosowaniem kompozytowych prętów zbrojeniowych w konstrukcjach morskich i mostowych, narażonych na działanie agresywnego środowiska, w którym stalowe zbrojenie ulega degradacji [10].

W kolejnych dekadach intensywny rozwój technologii kompozytowych umożliwił ich szerokie zastosowanie w realizacjach komercyjnych, obejmujących, m.in. sprzęt sportowy, przemysł motoryzacyjny, budownictwo oraz infrastrukturę techniczną [11]. Nowoczesne włókna i żywice wykorzystywane są, np. do wzmacniania i naprawy konstrukcji budowlanych, umożliwiając szybką interwencję i wydłużenie ich okresu eksploatacji. Obecnie elementy kompozytowe, takie jak profile konstrukcyjne, fragmenty kadłubów samolotów, czy pręty z kompozytów włóknistych znajdują szerokie zastosowanie w wielu sektorach gospodarki – od przemysłu lotniczego i transportowego po nowoczesne budownictwo inżynieryjne.

Dobrym przykładem skutecznego wdrażania kompozytów w budownictwie może być powstanie w 1982 r. w Pekinie Miyun Bridge - pierwszego mostu drogowego, wykonanego całkowicie z FRP. Posiada on przęsło o rozpiętości 20,7 m i 6 dźwigarów warstwowych z włókien szklanych i poliestru. W tym samym czasie zbudowano Gintsi Highway Bridge (Bułgaria), pierwszy most hybrydowy, z wykorzystaniem FRP. W obydwu obiektach zastosowano pracochłonną metodę ręcznego laminowania dźwigarów.



**Rys. 2.** Mostowe obiekty kompozytowe: a) kładka Aberfeldy Footbridge w Wielkiej Brytanii oraz b) most kompozytowy w Nowej Wsi k/Rzeszowa [12, 13]

Na początku lat 90. XX w. nastąpił intensywny rozwój mostów wykonanych z kompozytów FRP, które powstały w Wielkiej Brytanii (kładka Aberfeldy Footbridge, 1992 (Rys. 2a), most Bonds Mill Lift Bridge, 1994), czy w USA (most No-Name Creek

Bridge, 1996). Materiały te zaczęto także stosować do wzmacniania istniejących konstrukcji mostów. [14]. W Polsce pierwszym obiektem wykonanym z laminatów szklanych i rdzenia z pianki PET jest przenośna kładka pieszo-rowerowa, która powstała na terenie kampusu Politechniki Gdańskiej w 2015 r. Rok później, w Błazowej i Nowej Wsi k/Rzeszowa (Rys. 2b) wykonano pierwsze drogowe mosty kompozytowe [12].

Klasyfikacja kompozytów obejmuje takie aspekty, jak pochodzenie, przeznaczenie, rodzaj osnowy i składnik zbrojący (Rys. 3). Szczególnie istotne ze względu na możliwość pozyskania jest naturalne i syntetyczne pochodzenie kompozytów.

| Podział kompozytów ze względu na: |                               |               |                       |
|-----------------------------------|-------------------------------|---------------|-----------------------|
| Pochodzenie                       | Przeznaczenie                 | Rodzaj osnowy | Składnik zbrojący     |
| Naturalne                         | Konstrukcyjne                 | Metaliczna    | Umacniane dyspersyjne |
| Wytworzone w sposób sztuczny      | O szczególnych właściwościach | Polimerowa    | Zbrojone cząstkami    |
|                                   |                               | Ceramiczna    | Zbrojone włóknami     |
|                                   |                               |               | Strukturalne          |

**Rys. 3.** Ogólna klasyfikacja kompozytów

### 3. Charakterystyka ogólna i właściwości mechaniczne wybranych materiałów kompozytowych

#### 3.1 Kompozyty naturalne

Naturalne materiały od zawsze stanowiły przedmiot zainteresowania naukowców, ponieważ często inspirują do opracowywania materiałów syntetycznych o zbliżonych właściwościach. Wśród kompozytów naturalnych można wyróżnić przynajmniej kilka, które towarzyszą ludzkości. Jednym z nich jest skóra ludzka, która izoluje ciało. Ze względu na złożoną budowę warstwową, skóra wykazuje anizotropię mechaniczną, a jej model materiałowy można scharakteryzować jako trójfazowy układ obejmujący naskórek, skórę właściwą oraz tkankę podskórną. Oznacza to, że w początkowym etapie obciążenia, skóra jest bardzo podatna na odkształcenia, w drugiej fazie następuje wzrost sztywności wraz z ułożeniem włókien w kierunku obciążenia; ostatnia, trzecia faza charakteryzuje się liniowością, gdzie następuje bardzo szybki wzrost sztywności [15]. Przykładem zwierząt zdolnych do tworzenia materiałów kompozytowych bazujących na białkowych włóknach jedwabiu są stawonogi. Jednym z nich są jedwabniki morwowe tworzące kokony z włókien jedwabiu. W podobny sposób sieci tkają pająki wytwarzając je z różnych włókien kompozytowych jedwabiu. Część włókien jedwabiu charakteryzuje się dużą wytrzymałością na rozciąganie, porównywalną z włóknami aramidowymi lub stalą. Takie właściwości pozwoliły na wykorzystanie ich jako cięciwy łuków lub sieci rybackich, papieru, tekstyliów czy materiałów opatrunkowych [2, 16].

Kolejnym przykładem naturalnych kompozytów są kości ludzkie. Rozróżnia się w nich trzy elementy: okostna, tkanka kostna i szpik kostny. Stanowią one przykład

naturalnego materiału kompozytowego, zbudowanego z okostnej, tkanki kostnej i szpiku. Struktura ta łączy elementy o różnych właściwościach – od gęstej i odpornej mechanicznie tkanki zbitej po elastyczną i porowatą istotę gąbczastą – zapewniając jednocześnie wytrzymałość, elastyczność oraz zdolność regeneracji [17].

Do najbardziej znanych i rozpowszechnionych, naturalnych materiałów kompozytowych w różnych gałęziach przemysłu należy drewno. Liczący sobie wiele milionów lat materiał powstał z różnych składników, co pozwoliło na uzyskanie kompozytu o bardzo korzystnych właściwościach. Składa się ono głównie z włókien celulozy w osnowie ligniny. Rozważając strukturę drewna na poziomie mikroskopowym, jego właściwości fizyko-mechaniczne wynikają z układu komórek i właściwości mechanicznych ich ścianek [1]. Drewno jest surowcem odnawialnym i biodegradowalnym, a więc bardzo przyjazny dla środowiska, a wszechstronność jego zastosowań sprawia, że należy do jednych z najczęściej wykorzystywanych materiałów na konstrukcje.

### 3.2 Kompozyty syntetyczne

Jak już wspomniano, do najbardziej rozpowszechnionych materiałów kompozytowych stosowanych w budownictwie należy beton, powstający z połączenia osnowy w postaci zaczynu cementowego z wypełniającym go kruszywem. Wynalezienie cementu portlandzkiego, a następnie żelbetu pozwoliło na szerokie zastosowanie betonu jako materiału budowlanego i zrewolucjonizowanie budownictwa XX wieku. Przez wiele lat skład betonu pozostawał niezmienny, opierając się głównie na odpowiednich proporcjach cementu, wody i kruszywa. Obecnie technologia betonu jest nadal udoskonalana i np. dzięki aplikacji dodatków mineralnych (pyły krzemionkowe, popioły lotne, żużle wielkopieczowe) oraz syntezie domieszek chemicznych (superplastyfikatorów), które są nieustannie modyfikowane pod względem składu, a tym samym efektywności działania, uzyskuje się beton wysokiej wytrzymałości, powyżej 60 MPa i trwałości znacznie przekraczającej wytrzymałość tradycyjnych trójskładnikowych betonów [18, 19].

Wśród ogólnodostępnych prętów kompozytowych stosowanych do zbrojenia konstrukcji budowlanych wyróżnić można pręty z włókien szklanych, węglowych, aramidowych i bazaltowych, tzw. zbrojenie niemetaliczne (Rys. 4). Pręty wykonywane są z włókien ciągłych w osnowie żywicy termoutwardzalnej, z wykorzystaniem metody pultruzji. Stały się one popularne pod koniec XX w., natomiast pierwsze zastosowania w konstrukcjach budowlanych miały miejsce w latach 70. XX w. Pręty z kompozytów włóknistych wyróżniają się wysoką wytrzymałością na rozciąganie i całkowitą odpornością na korozję, co pozwala na stosowanie ich w elementach narażonych na działanie agresywnego środowiska, w którym pręty stalowe wymagałyby otuliny betonu o większej grubości [20].



**Rys. 4.** Przykład prętów GFRP (a) i CFRP (b) [21]

Kolejną grupę stanowią kompozyty z metaliczną osnową, obejmujące układy typu metal–metal, metal–ceramika oraz metal–polimer, łączące wysoką przewodność cieplną i wytrzymałość mechaniczną osnowy z właściwościami funkcjonalnymi fazy rozproszonej, co czyni je materiałami o dużym potencjale w zastosowaniach inżynierskich, zwłaszcza w warunkach podwyższonych obciążeń termicznych i mechanicznych [22]. W porównaniu do kompozytów z osnową polimerową mają one zasadniczą wadę - wymagają znacznie wyższych temperatur w procesie produkcji, jak i skomplikowanej metody aplikacji zastosowanych włókien. Wytwarzane są w uprzednio przygotowanych formach, wyposażonych we włókna lub siatki, do których wtryskuje się pod ciśnieniem płynny metal. Osnowa najczęściej wykonywana jest z glinu, który posiada małą gęstość i niską temperaturę topnienia. Kompozyty uzyskane w ten sposób posiadają niewielki współczynnik rozszerzalności cieplnej i jednocześnie większą wytrzymałość oraz moduł odkształcalności podłużnej. Pomimo wysokich kosztów produkcji i korozji galwanicznej, uzyskane właściwości pozwoliły na szerokie zastosowanie takich kompozytów w lekkich konstrukcjach oraz obudowach urządzeń elektronicznych. Kompozyty z osnową metaliczną, zwłaszcza aluminiową, charakteryzują się wysoką wytrzymałością mechaniczną, podwyższonym modułem Younga i małym współczynnikiem rozszerzalności cieplnej, co czyni je odpornymi na deformacje pod wpływem obciążeń termicznych. Zastosowanie procesu infiltracji ciekłego metalu pod ciśnieniem umożliwia uzyskanie dobrej adhezji między włóknami a osnową, co przekłada się na skuteczniejsze przenoszenie naprężeń i zwiększoną odporność zmęczeniową [3].

Kompozyty drewna należą do rodzaju materiałów powstających z mieszanki mączki, włókien drzewnych lub materiałów pochodzących z recyklingu i odpadów przemysłowych oraz tworzywa sztucznego, np. płyty wiórowe lub OSB. Jako osnowę wykorzystuje się najczęściej HDPE – polietylen dużej gęstości, PVC – polichlorek winylu i PP – polipropylen. Są one wykonywane w formie odlewów lub tłoczenia, a ich zaletą jest duża odporność na absorpcję wody i na warunki atmosferyczne, co stwarza możliwość wyeliminowania impregnacji. Kompozyty drewna z osnową polimerową (WPC) charakteryzują się dobrą sztywnością, stabilnością wymiarową i odpornością na pękanie i działanie czynników atmosferycznych. Struktura włókno-polimerowa i proces tłoczenia lub odlewania zapewniają równomierne rozłożenie naprężeń, co wpływa na dużą wytrzymałość i małą podatność na odkształcenia pod wpływem wilgoci i temperatury [23]. Elementy wykonane z kompozytów drewna znalazły zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym, a także w budownictwie, w zastosowaniach wewnątrz i na zewnątrz [24]. Kolejnym materiałem o innowacyjnych właściwościach jest drewno klejone warstwowo typu PSL (Parallel Strand Lumber) oraz LVL (Laminated Veneer Lumber). Te wysokowytrzymałe materiały inżynierskie powstają w wyniku klejenia pasm i fornirów drzewnych o równoległym układzie włókien. Charakteryzują się one dużą jednorodnością cech mechanicznych, np. w zakresie odkształceń i korzystnym stosunkiem wytrzymałości do masy, dzięki czemu stosowane są na elementy nośne w konstrukcjach budowlanych [25].

### 3.3 Właściwości mechaniczne

Materiały kompozytowe stosowane na konstrukcje powinny posiadać odpowiednie właściwości mechaniczne, ponieważ mają bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo, np. budowli. W związku z rosnącym zainteresowaniem wykorzystania kompozytów, np. w przemyśle kosmicznym lub chemicznym (wytwarzanie zbiorników ciśnieniowych)

stawiane są im wysokie wymagania wytrzymałościowe, odporności termicznej oraz jak najmniejszej gęstości.

Wytwarzanie kompozytów z materiałów o różnych właściwościach wpływa na uzyskiwanie znacznie korzystniejszych parametrów mechanicznych (np. wytrzymałości na ściskanie) w porównaniu z materiałami jednorodnymi, dlatego w wielu zastosowaniach są one niezastąpione. Właściwości kompozytów FRP można określić eksperymentalnie na jednym z czterech poziomów: (1) poziom włókien, np. pojedyncze włókno w warstwie pasa kształtownika szerokostopowego, (2) poziom laminy, np. jedna warstwa lub warstwy pasa takiego profilu, (3) poziom laminatu, np. pas tego profilu oraz (4) poziom pełnego przekroju. Do podstawowych parametrów mechanicznych decydujących o zastosowaniu takiego materiału należą wytrzymałość na rozciąganie i moduł sprężystości podłużnej [3]. Pierwszy z nich określa zdolność materiału do przenoszenia obciążeń, a drugi odpowiedzialny jest za sztywność. Z tego względu, na podstawie danych literaturowych porównano właściwości mechaniczne wybranych, naturalnych i syntetycznych materiałów kompozytowych oraz ich składników. Wartości modułów Younga i wytrzymałości na rozciąganie zestawiono w tablicy 1 [2, 3, 9, 15, 20, 26, 27]. Jednocześnie pominięto wpływ kierunku ułożenia włókien w prętach na parametry mechaniczne takiego kompozytu jako nieistotny dla elementów pracujących jednoosiowo.

Na rysunku 5 przedstawiono porównanie wytrzymałości na rozciąganie i modułu Younga materiałów kompozytowych zestawionych w tablicy 1, natomiast zależność naprężeń od odkształceń żywic i prętów kompozytowych znajdują się na rysunku 6. Wyniki analizy wskazują jednoznacznie, że najwyższe wartości wytrzymałości na rozciąganie osiągają włókna bazaltowe (ok. 4840 MPa), włókna aramidowe (ok. 4200 MPa) oraz włókna węglowe (ok. 3700-4800 MPa), co czyni je materiałami szczególnie predysponowanymi do zastosowań w kompozytach o wysokiej odporności mechanicznej. Również pręty kompozytowe z tych włókien wykazują znaczną wytrzymałość, choć nieco mniejszą niż same włókna, co wynika z udziału matrycy i struktury kompozytu. Najmniejszą wytrzymałość posiada włókno szklane (średnio 2970 MPa). Największe odkształcenia zarejestrowano dla żywic (średnio 7%), a najmniejsze dla prętów kompozytowych, ponadto, włókna zbrojone charakteryzują się różnymi wytrzymałościami na rozciąganie oraz liniową zależnością  $\sigma - \epsilon$  (Rys. 6).

Można zauważyć, że w przypadku włókien węglowych, największą wartością modułu sprężystości podłużnej charakteryzują się włókna o najniższej wytrzymałości na rozciąganie. Tego rodzaju prawidłowość nie występuje w przypadku włókien aramidowych i szklanych. Reasumując, kompozyty stosowane na zbrojenie w porównaniu z rozpowszechnioną stalą charakteryzują się ok. 2 razy większą wytrzymałością na rozciąganie, ale mniejszym, średnio o 50% w przypadku CFRP, modułem Younga (Tablica 1).

Z kolei w grupie materiałów naturalnych jedwab wyróżnia się wyjątkowo dużą wytrzymałością na rozciąganie (ok. 500 MPa), porównywalną z niektórymi włóknami szklanymi i kompozytami konstrukcyjnymi. Kość ludzka (ok. 130 MPa) oraz drewno sosnowe (12–131 MPa) osiągają umiarkowane wartości, uzależnione m.in. od kierunku obciążenia (anizotropia) i zawartości wody. Skóra, mimo niskiej wytrzymałości, cechuje się wyjątkowo dużą zdolnością do odkształceń, co jest korzystne w kontekście jej funkcji biologicznych.

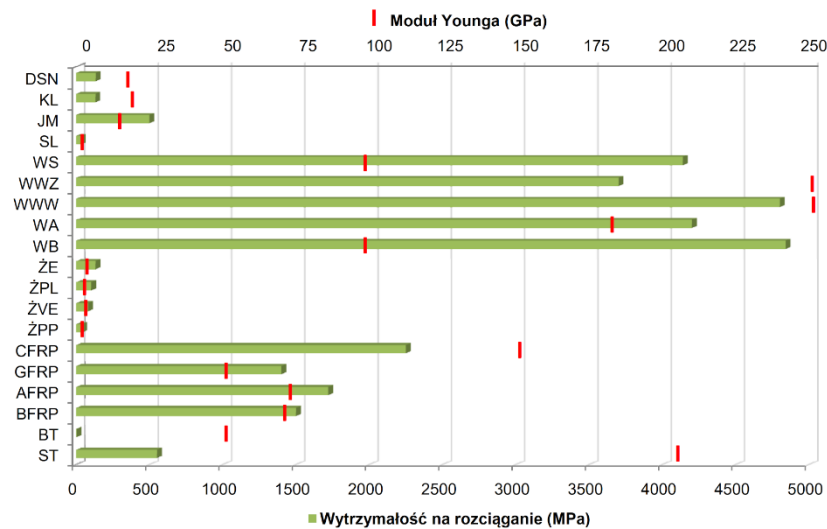
W kontekście budownictwa i inżynierii materiałowej właściwości, takie jak wytrzymałość na rozciąganie, moduł sprężystości oraz odporność na propagację

pęknięć mają fundamentalne znaczenie w procesie projektowania elementu. Beton, będący szeroko stosowanym materiałem konstrukcyjnym wykazuje jedną z najmniejszych wytrzymałości na rozciąganie (ok. 2–3,5 MPa), co uzasadnia konieczność jego zbrojenia w elementach narażonych na rozciąganie. Tak niska wytrzymałość wynika z jego kruchej, ziarnistej mikrostruktury i braku ciągłości materiałowej na poziomie mikroskopowym. Wada ta rekompensowana jest jednak dużą trwałością i odpornością na czynniki atmosferyczne, a także izolacyjnością cieplną oraz odpornością na ogień.

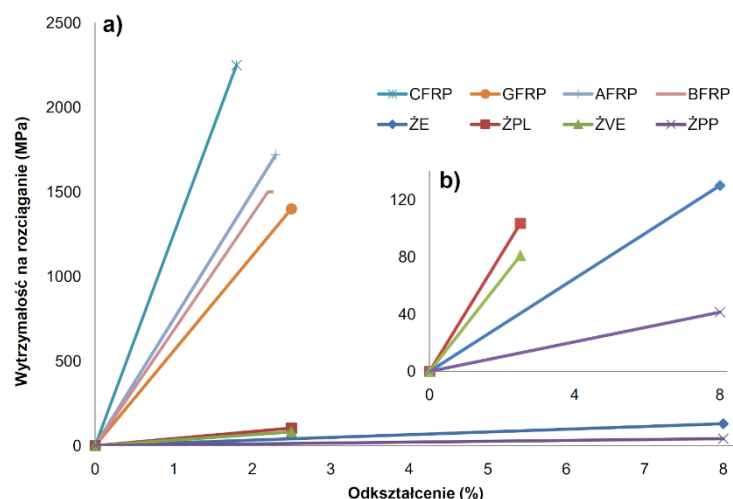
**Tablica 1.** Właściwości mechaniczne wybranych materiałów kompozytowych oraz ich składników [2, 3, 9, 15, 20, 26, 27]

| Rodzaj kompozytu                        |                                      | Moduł Younga | Wytrzymałość na rozciąganie | Odkształcenie | Gęstość              |
|-----------------------------------------|--------------------------------------|--------------|-----------------------------|---------------|----------------------|
|                                         |                                      | [GPa]        | [MPa]                       | [%]           | [g/cm <sup>3</sup> ] |
| <b>Materiały naturalne</b>              |                                      |              |                             |               |                      |
| Drewno sosnowe (DSN)                    |                                      | 2,6-15,5     | 12-131                      |               | 0,45                 |
| Kość ludzka (KL)                        |                                      | 14-18        | 130                         | 3             | 1,60                 |
| Jedwab morwowy (JM)                     |                                      | 5-12         | 500                         | 19            | 1,3                  |
| Skóra ludzka (SL)                       |                                      | 0,01-0,15    | 5-32                        | 2,5           |                      |
| <b>Materiały syntetyczne (sztuczne)</b> |                                      |              |                             |               |                      |
| Włókna                                  | Włókna szklane (WS)                  | 69-90        | 1800-4140                   | 2,5           | 1,2-2,1              |
|                                         | Włókna węglowe zwykłe (WWZ)          | 250          | 3700                        | 1,2           | 1,70                 |
|                                         | Węglowe wysokiej wytrzymałości (WWW) | 250          | 4800                        | 1,4           | 1,80                 |
|                                         | Aramidowe (WA)                       | 83-179       | 2800-4200                   | 2,4           | 1,44                 |
|                                         | Bazaltowe (WB)                       | 79,3-91,3    | 3000-4840                   |               | 2,7                  |
| Żywice                                  | Epoksydowa (ŻE)                      | 2,75-4,1     | 55-130                      | 8,0           | 1,2-1,4              |
|                                         | Poliestrowa (ŻPL)                    | 2,10-3,45    | 34,50-103,50                | 2,5           | 1,1-1,4              |
|                                         | Winyloestrowa (ŻVE)                  | 3,00-3,35    | 73-81                       | 6,0           | 1,15-1,35            |
|                                         | Polipropylenowa (ŻPP)                | 0,995-1,78   | 26-41,4                     | 8,0           | 0,89-0,92            |
| Pręty komp.                             | Włókna węglowe (PWW) CFRP            | 100-147      | 1200-2250                   | 1,8           | 1,7                  |
|                                         | Włókna szklane (PWS)                 | 30-46        | 520-1400                    | 2,5           | 2,2                  |
|                                         | Włókna aramidowe (PWA)               | 7-68         | 700-1720                    | 2,3           | 2,0                  |
|                                         | Włókna bazaltowi (PWB) BFRP          | 50-65        | 600-1500                    | 2,2           | 2,0                  |
| Beton (BT)                              |                                      | 25-45        | 3,0                         | -             | 2,4                  |
| Stal konstrukcyjna (ST)                 |                                      | 210          | 340-700                     | -             | 7,85                 |

Przedstawione w Tablicy 1 różnice w wytrzymałościach kompozytów syntetycznych wynikają zarówno ze struktury molekularnej (np. uporządkowaniem włókien w kewlarze, czy grafitowych warstwach węglowych), jak i z rodzaju wiązań międzycząsteczkowych oraz obecnością faz rozpraszających naprężenia.



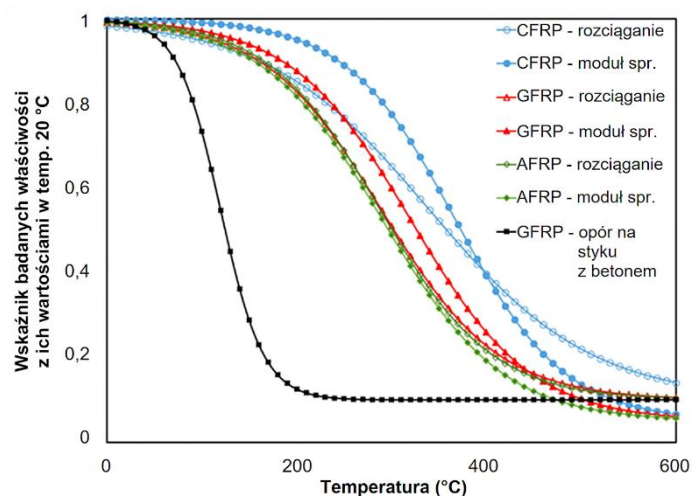
**Rys. 5.** Porównanie wytrzymałości na rozciąganie i modułu Younga wybranych materiałów jednorodnych i kompozytowych i stali (oznaczenia wg Tablicy 1)



**Rys. 6.** Zależność wytrzymałości na rozciąganie od odkształceń dla: a) żywicy i prętów kompozytowych oraz b) żywicy w układzie przeskalowanym (oznaczenia wg Tablicy 1)

Ważnym parametrem warunkującym stosowanie włókien jest ich podatność na temperaturę. Na rysunku 7 przedstawiono wykres zależności wytrzymałości na rozciąganie i modułu Younga od temperatury dla prętów z włókien węglowych, aramidowych i szklanych oraz betonu wzmocnionego taśmą CFRP. Materiały te wykazują podobne, quasi liniowe charakterystyki i znaczne obniżenie ww. parametrów, do ok. 10% ich pierwotnych wartości w zakresie temperatur 20-500C. Wyjątkiem jest krzywa odpowiadająca próbce betonu wzmocnionego taśmą CFRP, dla której obniżenie ww. parametrów nastąpiło w zakresie ponad 2-krotnie niższej temperatury (20-200C).

Kompozyty w porównaniu z betonem i stalą charakteryzują się stosunkowo niewielką gęstością, co stanowi ich dużą zaletę w zastosowaniach konstrukcyjnych. Najmniejszą gęstość o wartości  $1,44 \text{ g/cm}^3$  posiadają włókna aramidowe, a największą -  $1,8 \text{ g/cm}^3$  włókna węglowe.



**Rys. 7.** Zależności wytrzymałości na rozciąganie i modułu Younga od temperatury dla prętów CFRP, AFRP i GFRP oraz betonu wzmocnionego taśmą CFRP [28]

#### 4. Kompozyty dziś i jutro - przykłady zastosowań

Obecnie trudno znaleźć dziedzinę, w której nie mają zastosowania materiały kompozytowe. W lotnictwie i kosmonautyce wykorzystuje się je do budowy lekkich i wytrzymałych konstrukcji, takich jak kadłuby i skrzydła samolotów. W motoryzacji służą do produkcji elementów karoserii i wnętrza pojazdów, co pozwala obniżyć ich masę i zużycie paliwa. W przemyśle energetycznym są stosowane w turbinach wiatrowych oraz jako izolatory i obudowy urządzeń. Kompozyty znajdują także zastosowanie w medycynie, sporcie i przemyśle morskim, dzięki czemu są uznawane za materiały przyszłości.

W obszarze energii odnawialnej coraz większe znaczenie ma wykorzystanie syntetycznych materiałów kompozytowych. Efektywność turbin wiatrowych jest w wysokim stopniu zależna od budowy poszczególnych elementów. Dzięki zastosowaniu włókien węglowych w łopatach wirnika zwiększono ich długość co ma bezpośrednie przełożenie na generowaną moc i efektywność pracy.

Dzięki całkowitej odporności antykorozyjnej, pręty z FRP znajdują coraz szersze zastosowania w konstrukcjach narażonych na agresywne działanie środowiska, gdzie zastosowanie tradycyjnej stali może mieć znaczny wpływ na trwałość konstrukcji. Wykorzystanie prętów kompozytowych w murach oporowych, będących w ciągłym kontakcie z wodą morską, znacznie wydłuża czas eksploatacji konstrukcji i redukuje koszty utrzymania.

Nowoczesne materiały kompozytowe stosowane w budownictwie, łączące jednocześnie funkcje konstrukcyjne i tzw. samoregeneracji, są obecnie przedmiotem ciągłego rozwoju. Właściwości typu "smart", polegające, np. na automonitoringu konstrukcji, zintegrowane z podstawowymi właściwościami mechanicznymi kompozytów pozwalają na rozszerzenie zakresu zastosowań nie tylko w budownictwie, ale i w pozostałych gałęziach przemysłu. Umożliwia to zastosowanie, m.in. grafenu, nanorurek węglowych, czy elektroprowadzących kompozytów cementowych. Interesującym kierunkiem badań jest ich zdolność do wykrywania uszkodzeń. Umożliwia to "wbudowany" w materiał pomiar rezystancji między cząsteczkami kompozytu, zmieniającymi swoje położenie pod obciążeniem.

Możliwość uzyskania tego rodzaju właściwości pozwala na szeroki wachlarz aplikacji nanomateriałów [29].

Prowadzone są również prace nad udoskonalaniem technologii wdrażania kompozytów w mostownictwie, z dodatkowym wykorzystaniem tworzyw pochodzących z recyklingu. Doskonałym tego przykładem może być wybudowany w 2011 r. 3-przęsłowy most Easter Dawyck Bridge w Peeblesshire (Szkocja), o długości 27,4 m, którego przęsła wykonano z 50 ton tworzyw sztucznych, pochodzących ze zużytych opakowań PET. W 2015 r. wykonano jak dotąd najdłuższą kładkę dla pieszych w technologii druku 3D. W podobny sposób powstała w 2015 r. kładka w Chengdu (Chiny) o rozpiętości 20 m. Obecnie kompozyty stosowane są do budowy kompletnych przęseł (głównie kładek dla pieszych) oraz elementów składowych, jak dźwigary, pomost, ciągną, w sporadycznych przypadkach pylony. Wykorzystywane są one również do wytwarzania elementów wyposażenia, niemniej nie ma jak dotąd mostów autostradowych oraz mostów kolejowych z zastosowaniem kompozytów. Bariere nadal stanowią ograniczenia technologiczne oraz brak zaufania zarządców do nowych materiałów, których skuteczność powinna być gruntownie zbadana.

Pomimo, że koszty kompozytów stosowanych na konstrukcje są 2-4 razy większe w porównaniu do tradycyjnych materiałów (beton, stal), należy zauważyć, że relacja ta nie uwzględnia kosztów cyklu ich życia [30]. Oczekuje się, że wskaźniki kosztu wytworzenia konstrukcji i kosztu cyklu jej życia w połączeniu z potencjalną szybkością montażu i trwałością zapewnią wystarczający impuls do przyjęcia w nadchodzących latach materiałów kompozytowych, jako normy w odniesieniu do budownictwa. Dużym wyzwaniem dla inżynierów są także działania mające na celu eliminację sporadycznie występujących awarii konstrukcji wykonanych z kompozytów.

## 5. Podsumowanie

Zastosowanie materiałów kompozytowych w budownictwie dynamicznie wzrasta, odpowiadając na rosnące wymagania dotyczące trwałości, lekkości, odporności na korozję oraz efektywności energetycznej konstrukcji. Jak zauważono powyżej, istnieje wiele przykładów znaczących konstrukcji, w których za konieczne uznano wdrożenie kompozytów, zwłaszcza w trudnych warunkach, a trend ten będzie w przyszłości narastał. W najbliższych latach przewiduje się intensywny rozwój kompozytów o właściwościach funkcjonalnych, takich jak zdolność do samonaprawy, inteligentne monitorowanie stanu technicznego (tzw. smart composites), czy odporność na ekstremalne warunki środowiskowe.

Szczególnie obiecujące są kompozyty włókniste (np. z włóknami bazaltowymi, szklanymi i węglowymi), które dzięki wysokiej wytrzymałości przy niskiej masie stanowią realną alternatywę dla tradycyjnych materiałów zbrojeniowych. Analiza wartości modułu Younga i wytrzymałości na rozciąganie włókien wykazała, że najwyższe wartości wytrzymałości na rozciąganie mają włókna bazaltowe, aramidowe i węglowe. Dlatego są one stosowane do wytwarzania wysokowytrzymałych kompozytów przeznaczonych dla konstrukcji poddanych wysokim naprężeniom. Włókna aramidowe, w porównaniu z węglowymi posiadają także duży moduł Younga, przy ponad 2-krotnie mniejszej wytrzymałości na rozciąganie. Równocześnie rośnie znaczenie kompozytów ekologicznych, tworzonych z materiałów pochodzenia roślinnego oraz surowców wtórnych, wspierających ideę zrównoważonego budownictwa i gospodarki cyrkularnej. Nowe możliwości oferuje także druk 3D z

wykorzystaniem kompozytów budowlanych, umożliwiającą tworzenie zoptymalizowanych, lekkich struktur o złożonej geometrii.

Współczesna technologia betonu również podąża w kierunku innowacyjnych kompozytów. Wyznacznikiem jest matryca cementowa zintegrowana z włóknami (stalowymi, szklanymi, polimerowymi, bazaltowymi) w celu poprawy cech fizyko-mechanicznych, np. wytrzymałości, odporności na pękanie, trwałości eksploatacyjnej.

W chwili obecnej prowadzone są na Wydziale Budownictwa i Architektury Politechniki Opolskiej prace nad nową generacją prętów z kompozytów włóknistych z przeznaczeniem do zbrojenia betonu. Celem autorów jest uzyskanie modelu materiałowego zbliżonego do prezentowanego przez tradycyjne pręty zbrojeniowe wykonane ze stali.

Przyszłość betonu jako kompozytu wiąże się z wdrażaniem inteligentnych, samonaprawiających się i przyjaznych środowisku rozwiązań, opartych na zrównoważonych surowcach i technologiach ograniczających ślad węglowy. Przedstawione kierunki rozwoju prowadzą do wniosku, że materiały kompozytowe – w tym zaawansowane formy betonu – będą odgrywać kluczową rolę w budownictwie XXI wieku, zarówno w konstrukcjach inżynierskich, jak i w obiektach mieszkalnych, czy specjalistycznych. Należy również mieć na uwadze korzyści, jakie może przynieść w tworzeniu innowacyjnych materiałów wzorowanie się na doskonałych rozwiązaniach, jakie przynosi naturalne otoczenie człowieka.

## Literatura

- [1] Gibson R. F., Principles of composite material mechanics. Taylor & Francis Group, LLC, 2016.
- [2] Altman G. H. et. al., Silk-based biomaterials. Biomaterials 24, 2003, 401-416.
- [3] Chung D. D. L., Composite Materials - Science and Applications. Springer-Verlag London Limited, 2010.
- [4] Woods S., A History of Wood from the Stone Age to the 21st Century. EcoBuilding, The American Institute of Architects, 2016.
- [5] Shaw I., The Oxford history of ancient Egypt. Oxford University Press, 2003.
- [6] MacDonald W. L., The Architecture of the Roman Empire. An Introductory Study. Yale Publications in the History of Art, 1982.
- [7] <https://en.wikipedia.org>
- [8] Tsien, T.H., Needham J., Science and Civilisation in China: Volume 5, Chemistry and Chemical Technology; Part 1, Paper and Printing. Cambridge University Press, 1985.
- [9] Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars. American Concrete Institute, ACI 440.1R-15, 2015.
- [10] Eamon Ch. D. et al., Design and Construction Guidelines for Strengthening Bridges using Fiber Reinforced Polymers (FRP). Michigan Department of Transportation. Final Report, 2014.
- [11] [www.addcomposites.com](http://www.addcomposites.com)
- [12] Siwowski T., Pierwsze polskie obiekty mostowe z kompozytów FRP. Drogownictwo 11, 2017.

- [13] Stratford, T., The Condition of the Aberfeldy Footbridge after 20 Years in Service. Paper presented at Structural Faults and Repair 2012, Edinburgh, United Kingdom, 3/07/12 - 5/07/12.
- [14] Qureshi J., A Review of Fibre Reinforced Polymer Bridges. *Fibers*, 2023, 11, 40.
- [15] Annaidh A. N. et al., Characterization of the anisotropic mechanical properties of excised human skin. *J. of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 5 (2012) 139-148.
- [16] Hardy, J. G., Scheibel, T. R. Composite materials based on silk proteins. *Progress in polymer science*, 35(9), 1093-1115, 2010.
- [17] Sanchez-Molinaa D. et al., Fractal dimension and mechanical properties of human cortical bone. *Medical Engineering & Physics* 35, 2013, 576-582.
- [18] Janowska-Renkas E., Jakiel P., Fabianowski D., Optimal Selection of High-Performance Concrete for Post-Tensioned Girder Bridge Using Advanced Hybrid MCDA Method. *Materials*, 2021, vol. 14, no. 21, art. 6553.
- [19] Camões A., Ferreira R.M., Technological evolution of concrete: from ancient times to ultra high-performance concrete. *Engineering, Materials Science, History*, 2010.
- [20] Helbrych P., Jura J., Niemetaliczne zbrojenie FRP w kompozytach betonowych jako alternatywa dla prętów stalowych. *Przegląd budowlany* 11-12/2022.
- [21] [www.indurotech.com](http://www.indurotech.com)
- [22] Konieczny M., Kształtowanie właściwości mechanicznych kompozytów warstwowych o osnowie metalowej z udziałem faz międzymetalicznych. Monografie, studia, rozprawy nr M41. Politechnika Świętokrzyska, 2013.
- [23] Murayama, K. et al., Mechanical properties of wood/plastic composites formed using wood flour produced by wet ball-milling under various milling times and drying methods. *J. of Wood Science*, 65, 1-9, 2019.
- [24] Martinez Lopez Y. et al., Comparative study of different technological processes on the physical-mechanical properties and flammability of wood plastic composite. *J. of Building Engineering* 52 (2022) 104391.
- [25] Larsen H.J., Thelandersson S., *Timber Engineering*. John Wiley & Sons, 2003
- [26] Newhook J. P., Svecova D., *Reinforcing Concrete Structures with Fibre-Reinforced Polymers*. ISIS Canada Corporation, Design Manual No. 3, 2007.
- [27] Kaw A. K., *Mechanics of Composite Materials*, Second edition. CRC Press, 2006.
- [28] Chataigner S. et al., Use of FRP rebars in reinforced concrete structures: an overview of the 2021 French guideline from AFGC. 11th Int. Conf. on FRP Composites in Civil Engineering, Jul 2023, Rio de Janeiro, Brazil.
- [29] Rolemberg Prudentea I.N. et al., Graphene family (GFMs), carbon nanotubes (CNTs) and carbon black (CB) on smart materials for civil construction: Self-cleaning, self-sensing and self-heating. *J. of Building Engineering* 95 (2024) 110175.
- [30] Karbhari V.M., Zhao L., Use of composites for 21st century civil infrastructure. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 185, 2000, p. 433-454.

dr inż. Bartłomiej Sawicki  
Institute of Structural Design (ITE), Technische Universität Braunschweig  
Polskie Stowarzyszenie Druku 3D w Budownictwie (PL-3DPC)

dr hab. inż. Paweł Sikora, prof. ZUT  
Katedra Budownictwa Ogólnego, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska,  
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie  
Polskie Stowarzyszenie Druku 3D w Budownictwie (PL-3DPC)

## Druk Betonu 3D w praktyce i normach

Concrete 3D Printing in practice and standards

### Streszczenie

Druk betonu 3D to technologia przyszłości, jednak to już dziś kształtują się pierwsze praktyki oraz normy dotyczące jego stosowania.

Poniższy artykuł w zwięzły i przeglądowy sposób opisuje podstawy klasyfikacji metod zaliczanych do grupy technologii druku betonu 3D, ich zastosowanie w praktyce, oraz pierwsze próby ujęć normatywnych. Szczególny nacisk położony jest na projektowanie i certyfikację konstrukcji, rozumianą jako ich jakość, wytrzymałość, oraz trwałość. W artykule rozważone są zwłaszcza przykłady niemieckie, holenderskie i amerykańskie, ponieważ będą one miały zapewne największy wpływ na przyszłe uwarunkowania dla zastosowania metod addytywnych w Polsce i w Europie.

Jak udowadniają przedstawione tu przykłady, podczas gdy na świecie wprowadzane są rekomendacje nakierunkowane głównie na elementy i budowle powstające przy użyciu techniki ekstruzji oraz o bardzo ograniczonym zakresie, przy odpowiednim nastawieniu inwestora oraz urzędów certyfikujących już obecnie obowiązujące normy pozwalają na zapewnienie bezpieczeństwa i użyteczności konstrukcji powstałych w technologii wytwarzania przyrostowego. Co ciekawe, nawet obecnie powstające normy osadzone są w dobrze znanych, „analogowych” standardach budowlanych i nie wykorzystują pełni możliwości zapewnionych przez digitalizację procesu wytwarzania, takich jak zautomatyzowana kontrola materiału, procesu produkcji, czy ostatecznej jakości produktu.

## Abstract

3D concrete printing is a technology of the future. However, the first practical applications and regulatory frameworks are already taking their shape today. This article provides a concise and comprehensive overview of the classification of concrete 3D printing technologies, their practical applications, and initial attempts at standardization. Particular emphasis is placed on the design and certification of structures in terms of their quality, resistance, and durability. The study focuses primarily on examples from Germany, the Netherlands, and the United States, as these are expected to have the greatest influence on the future regulatory landscape for additive manufacturing of concrete in Poland and Europe.

As demonstrated by the cases presented here, while global recommendations primarily address structures and elements produced using extrusion-based techniques and are very limited in their scope, existing standards—when appropriately interpreted by investors and certification bodies—can already ensure the safety and serviceability of additively manufactured structures. Interestingly, even the emerging standards remain embedded within conventional, "analogue" construction norms and do not yet fully leverage the potential offered by the digitalization of structural design, such as automated control of the materials, manufacturing processes, and quality of the final product.

## 1 Wstęp

Druk 3D betonu (lub mieszanką betonową), jak potocznie nazywa się wytwarzanie przyrostowe elementów z kompozytów cementowych, jest stosunkowo nową i niszową metodą. Rozwija się ona jednak w niesamowitym tempie, z jednej strony poprzez badania nad procesami i materiałami, a z drugiej poprzez działania wdrożeniowe. Główną przeszkodą dla szerszego zastosowania tej metody produkcji w budownictwie wydaje się być brak stosownych rozwiązań normatywnych, co utrudnia komunikację i współpracę, oraz wydłuża czas i zwiększa koszt realizacji inwestycji. Dlatego w kilku krajach, w tym w Polsce, trwają obecnie intensywne działania które mają na celu stworzenie warunków dla szerokiego zastosowania druku 3D betonu w praktyce.

Ten artykuł przybliży tematykę druku betonu 3D ze szczególnym uwzględnieniem powstających rozwiązań normowych oraz standaryzacyjnych, a także przedstawia strategie wykorzystywane obecnie przy realizacji konstrukcji budowlanych wykorzystujących metody przyrostowe.

## 2 Klasyfikacje procesów wytwarzania

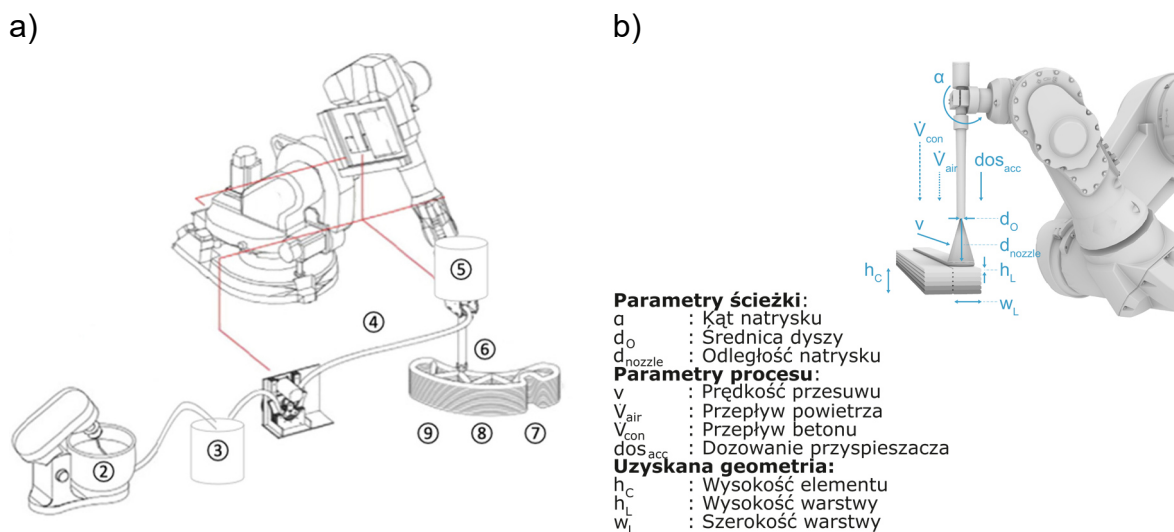
Wytwarzanie cyfrowe elementów betonowych (Digital Fabrication with Concrete, DFC) to bogata rodzina sterowanych cyfrowo procesów pozwalających na formowanie betonu [1]. Obejmuje ona wytwarzanie: 1) przyrostowe, tzw. druk 3D; 2) subtraktywne, głównie przy pomocy obróbki ubytkowej zarówno betonu świeżego jak i stwardniałego; oraz 3) formatywne, takie jak druk 3D szalunków czy slip-forming. W tym ujęciu druk betonu 3D, rozumiany jako przyrostowe wytwarzanie elementów betonowych, obejmuje trzy typy procesów: 1) metodę ekstruzji materiału (material extrusion), 2) metodę wiązania złoża cząstek (particle bed binding), i 3) metodę

natryskiwania materiału (material jetting). Ponadto wyróżnia się bardzo wiele procesów pozwalających na integrację zbrojenia.

## 2.1 Metoda ekstruzji

Metoda ekstruzji jest obecnie najszerzej stosowaną metodą druku 3D betonu. Polega na warstwowym nakładaniu kompozytu cementowego podawanego przez pompę poprzez dyszę drukującą. Pompa tłocząca może być zamontowana w głowicy wraz z dyszą lub zewnętrznie, podając mieszankę poprzez wąż. Wyróżnia się dwie metody: 1K oraz 2K, charakteryzowane przez odpowiednio jedno- lub dwukomponentową mieszankę (Rysunek 1 a)). W procesie druku 3D metodą ekstruzji kluczową rolę odgrywa dostosowanie parametrów reologicznych materiału [2], który zapewnia podstawę stabilności drukowanego elementu. Dlatego też większość wysiłku badawczego skierowane jest na badania materiałowe oraz cyfrową kontrolę właściwości materiałowych.

Metoda ekstruzji charakteryzuje się stosunkowo łatwym do kontrolowania procesem oraz względnie niskim kosztem – do badań materiałowych i druku w małej skali wystarczą stosunkowo proste urządzenia z tłokiem lub pompą ślimakową. Wyzwaniem jest jednak dobranie materiału, jego stabilność i zdolność do przenoszenia ciężaru kolejnych warstw, a także szczepność międzywarstwowa [3]. Elementy drukowane metodą ekstruzji charakteryzują się wysoce ortotropowymi właściwościami materiałowymi spowodowanymi ich warstwowością. W efekcie, ma to negatywny wpływ na ich trwałość [4].



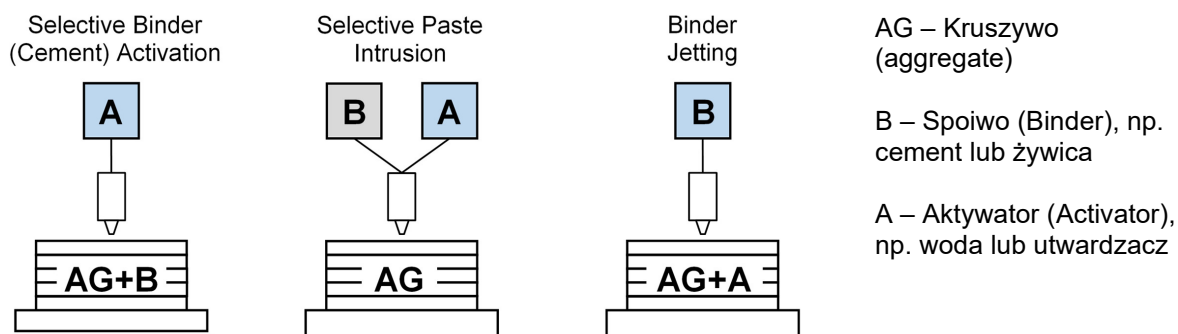
Rysunek 1. a) Schemat systemu wytwarzania przyrostowego metodą ekstruzji: 2. Przygotowanie kompozytu, 3. Tymczasowe przechowanie, 4. Transport mieszanki, 5. Dodanie domieszki przyspieszającej wiązanie (aktywatora) w przypadku systemu 2K, 6. Wytłaczanie przez dyszę; Na podstawie [2]; b) najważniejsze parametry procesu druku 3D betonem natryskowym

## 2.2 Metoda wiązania złoza cząstek

Metoda ta oparta jest na odpowiednim wiązaniu luźnych cząstek w kolejnych warstwach [5]. Luźne cząstki deponowane są warstwami, a następnie głowica dostarcza materiał w odpowiednich miejscach, pozwalający na wiązanie cząstek w odpowiednich strefach danej warstwy. Następnie kolejna warstwa luźnych cząstek jest deponowana i cały proces powtarzany aż do osiągnięcia końcowej objętości elementu. Po czasie pozwalającym na związanie spoiw, luźny materiał jest usuwany,

odslaniając gotowy element. Wyróżnia się trzy rodzaje procesów, jak schematycznie przedstawiono na Rysunek 2.

Metoda ta wyróżnia się bardzo wysoką rozdzielczością otrzymanego elementu oraz różnorodnym kształtem i rozmiarem otworów, które jednak muszą być połączone z powierzchniami zewnętrznymi, aby umożliwić usunięcie luźnego materiału. Ponadto właściwości mechaniczne stwardniałego materiału są zależne od penetracji aktywatora lub spoiwa w każdej warstwie, oraz pomiędzy warstwami. Rozmiary elementów ograniczone są kubaturą złoża cząstek, co bezpośrednio wiąże się z kosztem maszyn.



Rysunek 2. Schemat obrazujący trzy rodzaje procesu w metodzie wiązania złoża cząstek, odpowiednio od lewej 1) Selektowna aktywacja spoiwa (cementu), 2) Selektowna intruzja zaczynu, 3) Natryskiwanie spoiwa; na podstawie [5]

### 2.3 Metoda natryskiwania

Metoda ta oparta jest na technologii betonu natryskowego, tzw. shotcretu lub torkretu. Druk 3D betonu natryskowego (Shotcrete 3D Printing, SC3DP) umożliwiony jest poprzez cyfrową kontrolę procesu natryskiwania betonu, pozwalając na aktywną kontrolę geometrii uzyskiwanej w dynamicznym procesie wytwarzania [6]. Zwykle używa się tzw. metody mokrej natryskiwania betonu, tj. płynna mieszanka betonowa pompowana jest do dyszy, w której następuje jej przyspieszenie przy pomocy sprężonego powietrza. Pozwala ona na aplikację materiału liniami, warstwami oraz na powierzchniach pod każdym kątem. Dzięki skalowalnemu procesowi dostosowanemu do charakterystyki betonu, SC3DP pozwala na konstrukcję pełnowymiarowych elementów [7] przy użyciu spektrum materiałów [8], pozwalając na uzyskanie niemal anizotropowego materiału o właściwościach przewyższających te osiągnięte przez beton zwykły układany tradycyjnie o tej samej kompozycji [9].

### 2.4 Integracja zbrojenia

Jak każdy beton, także ten drukowany najczęściej współpracuje ze zbrojeniem. Beton zwykły tworzy wolumetryczną masę uwięzioną w szalunku, a zatem integracja zbrojenia następuje albo poprzez jego ułożenie przed ułożeniem betonu, albo po związaniu betonu i zdjęciu szalunku, np. poprzez sprężenie. Jednakże w przypadku betonu drukowanego szalunek nie jest potrzebny. Otwiera to nowe możliwości relacji zbrojenia, procesu wytwarzania i uzyskanej strukturalnej formy, otwierając przestrzeń nowych możliwości produkcji i projektowania. Dla ułatwienia dyskusji, zaproponowany został niedawno model ramowy współzależności zbrojenia, procesu i formy (Reinforcement – Process – Form Interaction framework) [10]. Pierwszą cechą charakterystyczną jest zależność procesu integracji zbrojenia względem procesu kształtowania betonu. Sklasyfikowano je następująco:

a) wprowadzenie zbrojenia jako składnika materiału (np. włókien); b) integracja synchroniczna z procesem aplikacji betonu – odpowiednio: w obrębie warstwy, pomiędzy warstwami lub przez kolejne warstwy, przy zastosowaniu mechanizmu otulenia bądź przebicia; c) umieszczenie zbrojenia przed uformowaniem betonu, przy czym może ono pełnić lub nie pełnić funkcji podparcia; oraz d) dodanie zbrojenia po uformowaniu elementu – odpowiednio: przed lub po stwardnieniu betonu, na jego powierzchni, wewnątrz materiału bądź w charakterze elementu montażowego. Drugą cechą charakterystyczną jest zależność zbrojenia i uzyskanej formy konstrukcyjnej, gdzie odpowiednio beton lub zbrojenie może być materiałem kształtującym formę. Zbrojenie może być rozproszone, ułożone zgodnie z warstwami lub na wskroś, czy też niezależnie od warstw betonu, tworząc odpowiednio, liniową, płaską, lub przestrzenną geometrię zbrojenia w gotowym elemencie. Naturalnie, wszelkie procesy hybrydowe także są możliwe, dodając do swobody formy elementów. Skutkuje to potrzebą dopasowania procesu i materiału do formy, którą projektant chce uzyskać. Ta różnorodność procesów sprawia, że wysiłki normatywne są niezwykle trudne, a normy albo są zbyt ogólne, albo możliwe do zastosowania tylko dla wąskiej grupy materiałów i procesów.

### 3 Praktyka

Pomimo iż druk betonu jest technologią relatywnie nową, istnieją już przykłady jego zastosowania. W praktyce wykorzystuje się głównie cztery strategie walidacji konstrukcji drukowanych w 3D dla uzyskania pozwolenia na budowę i użytkowanie: 1) zastosowanie betonu 3D dla elementów niekonstrukcyjnych, 2) walidacja przy pomocy istniejących norm, 3) walidacja przy pomocy prototypów, oraz 4) stosowanie norm skrojonych dla betonu w druku 3D [11]. Trzy pierwsze strategie pokrótce omówione są poniżej na wybranych przykładach, podczas gdy normy dla betonu 3D omówione są w następnej sekcji.

#### 3.1 Beton 3D jako element niekonstrukcyjny

Jest to chyba najprostsza ścieżka walidacji konstrukcji zawierającej elementy betonowe produkowane w technologii druku 3D. Elementy te sprawują zwykle funkcję ściany nienośnej lub szalunku traconego dla tradycyjnego żelbetu.

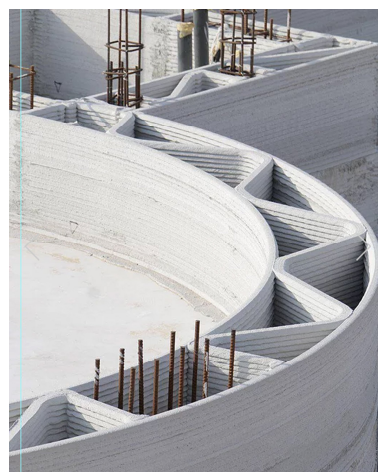
W ten sposób zalegalizowany został pierwszy obiekt wydrukowany w Polsce, budynek techniczny w Wyszku wybudowany przez firmę REbuild. Jego ściany zostały wydrukowane na miejscu przy użyciu wielkoskalowej autorskiej ramy portalowej oraz głowicy, w technologii ekstruzji. Po osiągnięciu pełnej wysokości ścian tj. około 3 m, w pozostawionych pustkach zainstalowana została prefabrykowana konstrukcja stalowa złożona ze słupów oraz konstrukcji dachu, formalnie stanowiąca konstrukcję nośną.

Podobna filozofia przyświecała konstrukcji większości istniejących obiektów na całym świecie wykonanych w technologii ekstruzji, gdzie dzięki odpowiedniemu zaplanowaniu ścieżki druku pozostawione są zamknięte pionowe kieszenie. Po ukończeniu druku ścian, w kieszenie te wsuwane jest tradycyjne zbrojenie oraz układany jest beton zwykły. W ten sposób uzyskiwana jest wewnętrzna słupowa żelbetowa konstrukcja nośna, na podstawie projektu której uzyskiwane są pozwolenia na budowę i użytkowanie pod względem bezpieczeństwa konstrukcji. Przykładem takiego rozwiązania jest dwupiętrowy budynek w Dubaju o powierzchni 640 m<sup>2</sup> i wysokości 9.5 m (Rysunek 4), który w momencie ukończenia w 2019 był

największą budowlą powstałą w technologii druku 3D. Na przygotowanej płycie żelbetowej wydrukowany został obrys ścian, pozostawiając pionowe przestrzenie na żelbetowe słupy wylewane na miejscu. Po ukończeniu danego piętra wykonywane były żelbetowe wieńce, na których opierano prefabrykowane żelbetowe stropy. W ten sposób utworzono tradycyjną konstrukcję nośną w „wydrukowanym” budynku.



Rysunek 3. Pierwszy obiekt budowlany wykonany w technologii druku betonu 3D w Polsce, w trakcie wytwarzania in-situ (po lewej) oraz po ukończeniu (po prawej), © Rebuild sp. z o.o.



Rysunek 4. Dwupiętrowy budynek biurowy w Dubaju wydrukowany przez Apis Cor w 2019; z lewej widoczne kosze zbrojeniowe kolumn wsunięte w kieszenie i gotowe do zalania betonem; © Apis Cor

### 3.2 Na podstawie istniejących norm

Część projektantów wykorzystuje podobieństwa betonu drukowanego do tradycyjnych materiałów budowlanych, posilając się tradycyjnymi normami materiałowymi i budowlanymi.

Na przykład firma Mobbob w latach 2021/22 na podstawie badań wytrzymałościowych oraz parametrów trwałości oznaczonych na próbkach pobranych z gotowych elementów, uzyskała atest zgodności z normami dla odpowiednich klas betonu, zależnych od kompozycji materiału [8]. Na tej podstawie przy realizacjach używano norm Europejskich (Eurokodów) do projektowania konstrukcji.

Podobna strategia została przyjęta przez projektantów pierwszego domu w Niemczech wydrukowanego w 2020 roku metodą ekstruzji [12]. Aby uzyskać indywidualne pozwolenie na budowę, przeprowadzono badania ścian. Na poziomie materiałowym zostało wykorzystane podobieństwo do betonu (EC2 i normy

towarzyszące), zaś na poziomie konstrukcyjnym podobieństwo do elementów murowanych (EC6). Dom w Beckum wykorzystał metodę zespoloną, gdzie drukowane ściany nośne wypełnione są częściowo klasycznym betonem, pozwalając na optymalizację kosztów materiału. Oba materiały współpracują, przenosząc część obciążeń; ponadto materiał drukowany służy jako otulina niezbędna dla zapewnienia trwałości. Dlatego oba materiały, drukowany i układany, zostały przetestowane w stanie świeżym (rozpływ, czas początku i końca wiązania) oraz stwardniałym (wytrzymałość na ściskanie i zginanie, moduł sprężystości, szczepność między warstwami, odporność na cykle zamrażania i odmrażania, testy pull-out i push-out kotew). Na poziomie elementów pełnowymiarowych przetestowano stabilność drukowanego konturu ściany pod ciśnieniem hydrostatycznym układanego betonu, a także wytrzymałość zespolonego elementu na ściskanie, zginanie oraz udarność.

### 3.3 Na podstawie prototypu

Kolejną ścieżką walidacji konstrukcji, zapewniającą dużą swobodę działania jednak wiążącą się ze zwiększonymi nakładami czasowymi i finansowymi [12], jest ta na podstawie prototypu.

Interesującym przykładem jest 29 metrowy, pięcioprzęsłowy most w Nijmegen (Holandia) [13]. Do celów badań pełnoskalowych zidentyfikowano dwa kluczowe, powtarzalne elementy: przęsło i podporę. Ponadto wykonano zestaw badań na próbkach materiałowych pobranych z drukowanych elementów. Podczas druku kontrolowano także geometrię warstw oraz całych elementów.

Wybrany element przęsłowy o długości i szerokości około 6.5 m na 3.5 m składał się z sześciu elementów wykonanych jedynie w druku 3D, oraz dwóch bloków kotwiących wykonanych w druku 3D i wypełnionych żelbetem. Dodatkowo wypełnienie żelbetem pozwoliło na transfer naprężeń z części przęsłowej do podpory. Elementy połączono poprzez sprzężenie. Wykonano dwa identyczne prototypy przęseł, a następnie przetestowano w teście czteropunktowego zginania o dwóch różnych odstępach pomiędzy punktami przyłożenia sił wyznaczając odpowiedni balans pomiędzy zginaniem i ścinaniem. Wyniki wykazały dobrą zgodność z modelami numerycznymi (FEM), oraz bardzo duży zapas nośności sięgający trzykrotności stanu granicznego (SGN).

Po pozytywnej weryfikacji przystąpiono do produkcji docelowych elementów oraz instalacji na budowie, po czym wykonano obciążenia próbne. W związku z dużym zapasem nośności, most obciążono do stanu granicznego nośności, przy którym konstrukcja pozostała w zakresie odkształcenia sprężystego i nie zidentyfikowano żadnych uszkodzeń. Po tej próbie wydano pozwolenie na użytkowanie.

Jak widać na tym przykładzie, metoda walidacji na podstawie prototypu wiąże się z wysokimi kosztami. W tym przypadku nie tylko należało wyprodukować siedem przęseł zamiast docelowych pięciu, ale też cały most jest około trzykrotnie przeprojektowany biorąc pod uwagę wymagany stan graniczny nośności. Dlatego też rozwiązania normowe są niezwykle wyczekiwane przez środowisko.

## 4 Normy

Poniżej pokrótce opisane są najważniejsze normy i standardy dotyczące druku betonu 3D. Co istotne, większość z nich opracowana jest pod kątem dostosowania do procesu ekstruzji, który jest znacznie bardziej popularny od procesów natryskiwania materiału oraz wiązania złoza cząstek.

#### 4.1 ISO/ASTM 52939

Celem normy PN-EN ISO/ASTM 52939 „Wytwarzanie przyrostowe w budownictwie — Zasady kwalifikacji — Elementy konstrukcyjne i infrastrukturalne”, która w roku 2024 uzyskała status normy polskiej, jest wprowadzenie jednolitego słownictwa oraz ustrukturyzowanie proces projektowania i konstrukcji obiektów wykonanych w druku 3D jak zaprezentowano na Rysunek 5. Jest to norma jakościowa, która wspomaga proces konstrukcji przyrostowej wykorzystującej dowolny typ procesu.

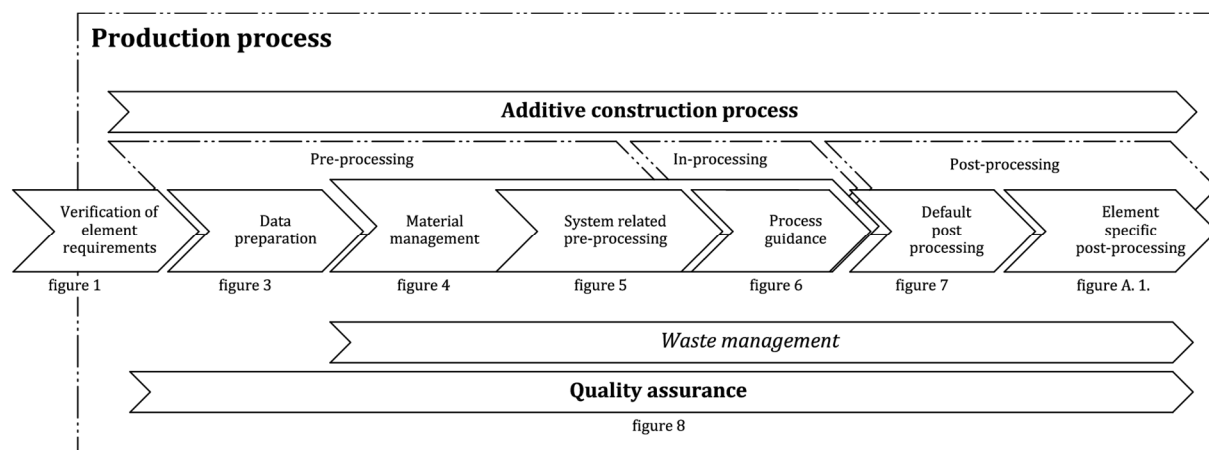
Zgodnie z normą, proces konstrukcji przyrostowej poprzedzony jest weryfikacją wymagań produkowanego elementu odnośnie możliwości wytworzenia, uzyskanej dokładności i wymiarów, a także spodziewanych właściwości materiałowych.

Po pozytywnej weryfikacji, rozpoczyna się właściwy proces wytwarzania. Odbywa się to w sześciu krokach: 1) Przygotowanie danych wejściowych oraz symulacja procesu wydruku w środowisku wirtualnym, a jeśli to konieczne produkcja małoskalowych prototypów; 2) Zarządzanie materiałem ze szczególnym naciskiem na fakt, że jakość i właściwości materiału wbudowanego zależne są zarówno od materiału dostarczonego, jak i od procesowania materiału; 3) Przygotowanie właściwe dla systemu, obejmujące zarówno przygotowanie i inspekcję systemu, jak i próbę wydruku „na sucho” celem weryfikacji danych, kolizji, itp. 4) Prowadzenie procesu, czyli produkcję, kontrolę jakości, oraz rejestrowanie parametrów procesu; 5) Domyślne zabiegi po procesie, czyli np. archiwizacja danych czy przygotowanie systemu do następnego etapu produkcji; oraz 6) Zabiegi po procesie właściwe dla elementu, np. instalacja elementów czy pakowanie.

Ponadto, norma opisuje wybrane metody zarządzania jakością produkcji i gotowego elementu, czy wymaganą dokumentację na każdym etapie. Schemat działania opisany w normie wskazuje, że proces musi być dynamiczny i interdyscyplinarny.

Chociaż został podzielony na poszczególne kroki, jasnym jest, że kontrola projektu, proces wytwarzania, właściwości materiału i wszystkie inne kroki są ze sobą ściśle powiązane i prowadzą do wielu iteracji lub negocjacji w czasie rzeczywistym.

Ciekawym jest, że przygotowanie ścieżki wydruku pojawia się dopiero jako pierwszy krok procesu budowlanego, podczas gdy doświadczenia wskazują, że ważnym jest, aby ograniczenia produkcyjne i sam proces wytwarzania były brane pod uwagę już na etapie projektowania. Norma ta wyraźnie pokazuje, że proces konstrukcji metodą przyrostową będzie wymagał znacznie bliższej współpracy branż, i przeddefiniuje proces budowlany i wynikającą z niego strukturę całego sektora budowlanego.



Rysunek 5. Kontrola jakości procesu konstrukcji przyrostowej wg. ISO/ASTM 52939.

Harcourt Technologies Ltd (HTL.tech), firma aktywnie zaangażowana w rozwój technologii druku 3D w budownictwie w Irlandii i Wielkiej Brytanii, osiągnęła kamień milowy jakim jest pierwsza w Europie realizacja zgodna z normą ISO/ASTM 52939:2023 [14]. Korzystając z drukarki BOD2 3D firmy COBOD, firma ta pokazała w jaki sposób druk 3D w budownictwie może sprostać wymaganiom mieszkaniowym, jednocześnie przestrzegając rygorystycznych norm bezpieczeństwa i wydajności.

#### 4.2 ICC-ES AC509 oraz ICC 1150

Jednym z dokumentów które znacznie przyspieszyły proces walidacji elementów, zwłaszcza w Ameryce Północnej oraz na Bliskim Wschodzie, są Kryteria Akceptacji dla zautomatyzowanej technologii budownictwa 3D w zakresie betonowych ścian 3D (ICC-ES AC509 Acceptance Criteria for 3D automated construction technology for 3D concrete walls) wydane przez International Code Council. Dotyczą one dopuszczenia określonego procesu wytwarzania wraz z określonym materiałem oraz finalną formą produkowanego elementu, ale ogranicza się jedynie do pionowych ścian. Dokument ten określa podstawowe badania i warunki które muszą być spełnione, a także definiuje zawartość i strukturę raportu, który stanowi swoisty certyfikat zgodności. Jest on osadzony w normach International Building Code (IBC) oraz International Residential Code (IRC) i bazuje na pkt. 104.11 IBC stwierdzającym: „(standard ten) nie ma na celu uniemożliwienie stosowania jakichkolwiek materiałów ani zakazania jakiegokolwiek projektu lub metody budowy (...) jeżeli urzędnik nadzoru budowlanego uzna, że proponowane rozwiązanie jest satysfakcjonujące i zgodne z intencją przepisów”. Taką podstawę zapewnia AC509. Dokument został opublikowany w 2019 roku i od tego czasu wielokrotnie modyfikowany, głównie celem zwiększenia jego zakresu odnośnie możliwych rozwiązań konstrukcyjnych. Zasadniczo jednak ogranicza się do ścian z betonowym rdzeniem wylewanym pomiędzy drukowanymi powierzchniami zewnętrznymi, tworząc układ warstwowy tzw. sandwich. W takim ujęciu elementy zewnętrzne wykonane w procesie ekstruzji są traktowane głównie jako warstwa osłonowa z betonu zapewniająca trwałość i częściowe przenoszenie obciążeń.

Co ciekawe, certyfikaty wydane na podstawie AC509 są niezwykle wąskie w swym zakresie. Odnoszą się one do konkretnego modelu maszyny (drukarki), mieszanki materiałowej, ale też konfiguracji ściany wyrażonej poprzez jej grubość, geometrię warstw, układ zbrojenia czy opóźnienia pomiędzy deponowaniem kolejnych warstw. Zmiana każdego z tych parametrów wymaga wydania kolejnego świadectwa akceptacji na podstawie osobnych badań zarówno w skali materiałowej, jak i elementu. Demonstruje to znowu niezwykle powiązanie materiału, procesu i formy konstrukcyjnej w wytwarzaniu przyrostowym.

Dokument ten odzwierciedla postęp wiedzy i praktyki w zakresie druku betonu 3D. Podczas gdy w pierwszej wersji ograniczono się do konstrukcji parterowych, obecnie dopuszcza się zastosowanie w konstrukcjach wielopiętrowych. Co więcej, pierwszej wersji przyjęto arbitralny współczynnik bezpieczeństwa w zakresie nośności elementu wyrażonej jako siła przyłożona na danej długości ściany równy 3, bez jakiegokolwiek analizy naprężeń. Nowsze edycje wprowadziły już możliwość stosowania częściowych współczynników bezpieczeństwa, czy dopuściły uwzględnienie zmniejszonego współczynnika zmienności właściwości materiału na podstawie badań. Jednakże AC509 wciąż nie pozwala na uwzględnienie np. zwiększonej precyzji geometrii elementów produkowanych w procesie

kontrolowanym cyfrowo celem dalszego zmniejszenia współczynnika bezpieczeństwa. A zatem, poniekąd, filozofia kryteriów oparta jest na badaniu prototypu ściany, który później może być wielokrotnie powtarzany w wielu budynkach. Szczegółowe informacje znaleźć można w pracy Sikora i inni [15]. W związku ze złożonością procesu kryteriów akceptacji, w lipcu 2023 r. powołano zespół mający na celu opracowanie normy ICC 1150 umożliwiające wypracowanie konsensu i wprowadzenie normy łączącej założenie ICC-ES AC509 oraz UFC-3-301-01, które omówione zostaną w kolejnej sekcji. Obecne normy znajdują się w drugiej turze recenzji i jej publikacja planowana jest na koniec roku 2025.

#### 4.3 UFC 3-301-01

W ramach Unified Facilities Criteria (UFC, Zunifikowane Kryteria Obiektowe), będących zestawem wytycznych stosowanych przez Departament Obrony Stanów Zjednoczonych przy projektowaniu, eksploatacji i utrzymaniu infrastruktury wojskowej i rządowej, dopuszczono stosowanie druku 3D do budowy ścian nośnych. Warunki te są w większości analogiczne do AC509, opierają się na podejściu warstwowym (sandwich method) i bazują na zestawie tych samych metod laboratoryjnych. Jednakże, w przeciwieństwie do AC509, wytyczne te dopuszczają tworzenie sieciowatej struktury wytworzonej przez druk betonu 3D (filament webbing) jako wypełnienia ściany, zamiast wymaganego pierwotnie przez AC509 rdzenia z wylewanego betonu [16]. Wytyczne przedstawiły kilka możliwości geometrii tej sieciowatej struktury. Zwiększa to znacznie możliwość dostosowania formy elementu, a co za tym idzie zużycia materiału, w zależności od obciążeń.

Co ważne, obecnie rozwiązanie to może być obecnie akceptowane również dla ścian nośnych zgodnie z AC509, ponieważ w zakresie zastosowania dodano sformułowanie „lecz nie ograniczając się do” (*but not limited to*) ścian z dwiema drukowanymi zewnętrznymi powłokami wypełnionymi betonem wylewanym by stworzyć monolityczną ścianę. Otworzyło to możliwość zatwierdzania również alternatywnych rozwiązań konstrukcyjnych.

#### 4.4 CROW-CUR 5:2023

Holenderskie centrum regulacji i badań w dziedzinie inżynierii lądowej, wodnej i transportu CROW zainicjowało powstanie dokumentu podsumowującego dotychczasowe lokalne doświadczenia z drukiem 3D betonu. Wytyczne, powstałe przy współpracy badaczy, projektantów, wykonawców i innych osób i jednostek biorących udział w rozwoju i implementacji tej technologii w Holandii. W efekcie w przystępny sposób przedstawiają podstawową wiedzę i doświadczenia w szerokim zakresie: od zarysu konstrukcji drukarek, poprzez podstawowe informacje dotyczące materiału w stanie świeżym i stwardniałym, zbrojenia, badań, aż po próby obciążeniowe i analizę śladu węglowego. Dokument ten, pomyślany jako żyjący i zmieniający się wraz z rozwojem kompendium wiedzy, służy jako krótkie wprowadzenie dla wszystkich członków procesu budowlanego, i nie jest normą lub wiążącymi wytycznymi.

W związku z ograniczeniem do doświadczeń Holenderskich, które są mimo wszystko jednymi z pionierskich zwłaszcza w dziedzinie budownictwa mostowego, dokument ten omawia jedynie proces ekstruzji betonu, oraz wybrane metody integracji zbrojenia.

#### 4.5 . Obecny stan prac normalizacyjnych w Stanach Zjednoczonych

Stany Zjednoczone wiodą prym w działaniach związanych ze standaryzacją aspektów związanych z technologią wytwarzania przyrostowego poprzez silną interakcję i współpracę wielu organów. Ze względu na aktywny rozwój opracowywanych aktów zdecydowano się w tej sekcji stosować oryginalne nazwy dokumentów, co może umożliwić czytelnikom śledzenie aktualnych postępów prac. Z inicjatywy Narodowego Instytutu Standaryzacji i Technologii (NIST), w roku 2023 powołane do życia zostało „Additive Construction by Extrusion (ACE) Consortium”. Powstało ono we współpracy z Centrum Badawczo-Rozwojowym Inżynierii Armii Stanów Zjednoczonych (ERDC) aby umożliwić współpracę w celu zidentyfikowania i rozwiązania luk w obecnych normach dotyczących materiałów, metod, optymalizacji procesów i projektowania, a finalnie zaproponowanie nowych norm.

Jednocześnie Amerykańskie Stowarzyszenie Badań i Materiałów (ASTM) powołało do życia „Additive Manufacturing Center of Excellence (AM CoE)” łączące przedstawicieli rządu, nauki i przemysłu, mające na celu prowadzenie strategicznych prac badawczo-rozwojowych wspierających proces standaryzacji we wszystkich aspektach wytwarzania przyrostowego. Natomiast ramach samego ASTM komitet F42 odpowiedzialny jest za wszelkie aspekty wytwarzania przyrostowego. Istotnym dokumentem będącym rezultatem prac AM CoE jest Mapa Drogowa [17] zawierająca szereg informacji związanych z aktualnym stanem technologii, planem prac, zdefiniowaniem potrzeb a także oceny wyzwań i kierunków rozwoju konsorcjum. Materiał ten stanowić może cenną podstawę i inspirację do prac na krajowym odpowiednikiem mapy drogowej rozwoju technologii przyrostowej w Polsce.

W ramach prac podkomitetu ASTM F42.07.07 (Construction)) opracowywane są obecnie 4 normy typowo związane z aspektami materiałowymi: 1) WK90347 Additive Manufacturing - Curing and Extraction of Sample from Additively Constructed Concrete and Mortar Components; 2) WK89706 Additive Manufacturing - Fresh and Very Early Age properties of concretes used for Additively Constructed Concrete by Means of Extrusion; 3) WK89707 Additive Manufacturing - Construction and Documentation of Additively Constructed Concrete and Mortar Components; 4) WK90348 Additive Manufacturing- Determination of Hardened Mechanical Properties of Additively Constructed Concrete and Mortar.

Natomiast w ramach komitetu F42.07 wspólnie z ISO realizowane są zadania związane z opracowaniem dwóch norm: 1) WK81114 - New Practice for Additive Manufacturing - General Principles - Design Process of Additively Manufactured Building Elements, oraz 2) WK84415 - New Practice for - Additive Construction – General Principles – Standard Practice for the Evaluation of Structural Printed Elements. Ponadto, realizowane są prace nad aktualizacją wydanej i omówionej powyżej normy ISO/ASTM 52962.

Aktywną działalność normalizacyjną podejmuje także komitet Amerykańskiego Instytutu Betonu (ACI) nr 564 - 3-D Printing with Cementitious Materials, w ramach którego powołanych zostało 5 podkomitetów: 1) 564-0A Emerging Technology Report; 2) 564-0B Structural Design and Testing; 3) 564-0C Material Testing and Formulation; 4) 564-0D Modeling and Performance Prediction; oraz 5) 564-0E Codes and Standard Review.

#### 4.6 Obecny stan prac normalizacyjnych w Chinach

Już w roku 2020 wydana została przez Chińskie Stowarzyszenie Standaryzacji Inżynierii i Budownictwa (CECS) pierwsza norma krajowa (T/CECS 786-2020) poświęcona procesowi projektowania mieszanek betonowych stosowanych w technologii 3D. Znaleźć można w niej wymagania oraz rekomendacje dotyczące składów mieszanek, zawartości dodatków mineralnych, wymaganej konsystencji oraz minimalnych wymagań mechanicznych. Istotną rolę odgrywają w normie wymagania związane z wytrzymałością mechaniczną, a w szczególności minimalne wymagania dotyczące szczepności międzywarstwowej. Ze względu na gwałtowny rozwój technologii druku 3D i znaczącego poszerzenia stanu wiedzy i rozwoju technologii niektóre aspekty, w szczególności związane z metodyką projektowania mieszanek, wydają się być częściowo zdezaktualizowane.

W efekcie, w roku 2022 Chińska Federacja Materiałów Budowlanych (CBMF) wydała dwie normy poświęcone metodom badań świeżego oraz stwardniałego betonu. Znacząco rozbudowują one metody badawcze przedstawione w normie z roku 2020. W obydwu przypadkach normy nie określają minimalnych wymagań stawianych elementom, lecz opisują techniki badawcze w oparciu, o które należy wykonać badania celem raportowania rezultatów badań. Norma T/CBMF 184-2022 zawiera metodyki badawcze pozwalające na określenie wybranych parametrów mieszanek tj.: 1) stabilność geometryczna drukowanych elementów, 2) konsystencja i urabialność mieszanki, 3) czas wiązania i czas odpowiedniej urabialności (przydatności mieszanki, 4) wytrzymałość na ściskanie niestwardniałej mieszanki oraz moduł odkształcalności podłużnej oraz 5) oznaczenie parametrów związanych z wytłaczalnością i drukowalnością materiału. Szczegółowe informacje nt. zakresu normy i metod badawczych znaleźć można w pracy Sikora i inni [18].

W przypadku normy T/CBMF 183-2022 określone zostały metody badawcze związane z odpowiednią preparatyką próbek badawczych (w tym: minimalne wymiary próbek, sposób preparatyki próbek w zależności od kierunku badania, kondycjonowanie próbek) oraz oznaczeniem parametrów mechanicznych. Istotnym wnioskiem płynącym z normy jest fakt, że badania na próbkach drukowanych (wycinanych z większego wydrukowanego elementu) wykonuje się tylko na kierunku, zgodnie z projektowanym rozkładem naprężeń w konstrukcji.

Według informacji dostępnych w doniesieniach medialnych w ramach prac CECS, CCPA lub Ministerstwa Przemysłu i Technologii Informacyjnych opracowywanych jest ok. 20 norm związanych ze standaryzacją mieszanek, opracowaniu metod badawczych (np. pomiaru skurczu lub mrozoodporności), projektowaniem konstrukcji (np. prefabrykowanych lub technologii szalunków traconych), projektowaniem konstrukcji oporowych, obiektów mostowych oraz elementów architektonicznych. Wydaje się rozsądnym, aby śledzić poczynania normalizacyjne na rynku chińskim, które ze względu na barierę językową wydają się być marginalizowane. Doniesienia medialne wskazują na znakomitą ilość firm oraz obiektów realizowanych w tej technologii. Przykładem może być realizacja wielokondygnacyjnego budynku w którym zastosowano beton wykonany w technologii ekstruzji zawierający kruszywo recyklingowe jako m.in. szalunek tracony [19].

## 5 Dyskusja i wnioski

Jak widać na przedstawionych przykładach, prace normalizacyjne i wdrożeniowe dotyczące metod przyrostowych w budownictwie betonowym nabrały znacznego przyspieszenia w ostatnich latach. Obrazuje to doskonale jak szerokie jest zainteresowanie rynku nowymi technologiami. Działania te skupione są jednak w większości na metodzie ekstruzji.

Ponadto istnienie ogólnie pojęty brak koncepcji w jaki sposób wykorzystać cyfrowość metod przyrostowych. Jak pokazują badania, możliwa jest obecnie kontrola i rejestracja parametrów wytwarzania elementów [6], [20], co w przyszłości pozwoli na zastosowanie metod niezawodności przy projektowaniu i weryfikacji konstrukcji w miejsce deterministycznych i często arbitralnych współczynników bezpieczeństwa. Dziś jednak wszystkie normy osadzone są w technologii analogowej i ich filozofia nie różni się znacznie od tej znanej z klasycznego budownictwa.

Można się jednak spodziewać, że wraz z rozwojem badań oraz poprzez działalność wdrożeniową metody druku betonu 3D doprowadzą do zmiany paradygmatów projektowania [21], co wymusi również zmiany w jaki działa cały sektor budownictwa, demonstrując potrzebę aktywności mających na celu intensyfikację świata nauki i biznesu.

## 6 Literatura

- [1] R. A. Buswell *et al.*, 'A process classification framework for defining and describing Digital Fabrication with Concrete', *Cem. Concr. Res.*, vol. 134, p. 106068, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.cemconres.2020.106068.
- [2] T. Wangler, R. Pileggi, S. Gürel, and R. J. Flatt, 'A chemical process engineering look at digital concrete processes: critical step design, inline mixing, and scaleup', *Cem. Concr. Res.*, vol. 155, p. 106782, May 2022, doi: 10.1016/j.cemconres.2022.106782.
- [3] S. Skibicki *et al.*, 'The effect of interlayer adhesion on stress distribution in 3D printed beam elements', *J. Build. Eng.*, vol. 87, p. 109093, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.jobbe.2024.109093.
- [4] P. Sikora *et al.*, 'Insight into the microstructural and durability characteristics of 3D printed concrete: Cast versus printed specimens', *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 17, p. e01320, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01320.
- [5] D. Lowke, E. Dini, A. Perrot, D. Weger, C. Gehlen, and B. Dillenburger, 'Particle-bed 3D printing in concrete construction – Possibilities and challenges', *Cem. Concr. Res.*, vol. 112, pp. 50–65, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.cemconres.2018.05.018.
- [6] L. Lachmayer *et al.*, 'A Spatial Multi-layer Control Concept for Strand Geometry Control in Robot-Based Additive Manufacturing Processes', in *Fourth RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*, D. Lowke, N. Freund, D. Böhler, and F. Herding, Eds., Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 119–126. doi: 10.1007/978-3-031-70031-6\_14.
- [7] N. Hack and H. Kloft, 'Shotcrete 3D Printing Technology for the Fabrication of Slender Fully Reinforced Freeform Concrete Elements with High Surface Quality: A Real-Scale Demonstrator', in *Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*, F. P. Bos, S. S. Lucas, R. J. M. Wolfs, and T. A. M. Salet, Eds., in RILEM Bookseries. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 1128–1137. doi: 10.1007/978-3-030-49916-7\_107.

- [8] A. Favier and A. Petit, 'Strategies for Reducing the Environmental Footprint of Additive Manufacturing via Sprayed Concrete', in *Third RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*, R. Buswell, A. Blanco, S. Cavalaro, and P. Kinnell, Eds., in RILEM Bookseries. Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 105–110. doi: 10.1007/978-3-031-06116-5\_16.
- [9] H. Kloft *et al.*, 'Influence of process parameters on the interlayer bond strength of concrete elements additive manufactured by Shotcrete 3D Printing (SC3DP)', *Cem. Concr. Res.*, vol. 134, p. 106078, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.cemconres.2020.106078.
- [10] H. Kloft *et al.*, 'Interaction of reinforcement, process, and form in Digital Fabrication with Concrete', *Cem. Concr. Res.*, vol. 186, p. 107640, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.cemconres.2024.107640.
- [11] F. P. Bos *et al.*, 'The realities of additively manufactured concrete structures in practice', *Cem. Concr. Res.*, vol. 156, p. 106746, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.cemconres.2022.106746.
- [12] V. Mechtcherine *et al.*, 'Additive Fertigung mit Beton – Leitfaden für die Planung und die Durchführung von Projekten', *Beton- Stahlbetonbau*, vol. 119, no. 4, pp. 290–310, 2024, doi: 10.1002/best.202400005.
- [13] Z. Ahmed, R. Wolfs, F. Bos, and T. Salet, 'A Framework for Large-Scale Structural Applications of 3D Printed Concrete: the Case of a 29 m Bridge in the Netherlands', *Open Conf. Proc.*, vol. 1, pp. 5–19, Feb. 2022, doi: 10.52825/ocp.v1i.74.
- [14] Qualified AM GmbH, 'Certificate of conformity no. 20241015'. Oct. 15, 2024. Accessed: Jun. 13, 2025. [Online]. Available: [https://static1.squarespace.com/static/615e077e74d72b4d244bbd2c/t/67915647403a424a44212381/1737578056598/Copy+of+QualifiedAM\\_AC-CERTIFICATE\\_HTML.pdf](https://static1.squarespace.com/static/615e077e74d72b4d244bbd2c/t/67915647403a424a44212381/1737578056598/Copy+of+QualifiedAM_AC-CERTIFICATE_HTML.pdf)
- [15] P. Sikora *et al.*, 'Pierwszy krok w kierunku normalizacji konstrukcji betonowych wykonywanych w technologii druku 3D', *Przegląd Bud.*, vol. R. 95, nr 5, 2024, doi: 10.5604/01.3001.0054.7216.
- [16] M. Kreiger *et al.*, 'Additive construction in practice – Realities of acceptance criteria', *Cem. Concr. Res.*, vol. 186, p. 107652, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.cemconres.2024.107652.
- [17] S. Mansour and M. Seifi, 'Advanced Technologies for Digitalization of Construction Industry Roadmap', ASTM International, Oct. 2023. doi: 10.1520/amcoe-roadmap-construction.
- [18] P. Sikora, S. Skibicki, and G. Lin, 'Metody badania mieszanek betonowych stosowanych w technologii druku 3D w świetle chińskich norm', *Inż. Budownictwa*, vol. 7/8, no. (W trakcie procesu wydawniczego), 2025.
- [19] H. Zhang *et al.*, 'Comparative eco-efficiency assessment of 3D-printed recycled aggregate concrete structure for mid-rise residential buildings', *J. Build. Eng.*, vol. 95, p. 110349, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.job.2024.110349.
- [20] R. Wolfs *et al.*, 'On-line and in-line quality assessment across all scale levels of 3D concrete printing', *Cem. Concr. Res.*, vol. 185, p. 107646, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.cemconres.2024.107646.
- [21] R. Dörrie *et al.*, 'From Digital to Real: Optimised and Functionally Integrated Shotcrete 3D Printing Elements for Multi-Storey Structures', *Buildings*, vol. 15, no. 9, p. 1461, Jan. 2025, doi: 10.3390/buildings15091461.

XIII  
KONFERENCJA

# DNI BETONU 2025

13-15 października 2025



## PARTNERZY PROGRAMOWI



## SPONSORZY / FIRMY



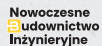
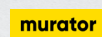
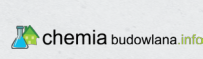
## PATRONAT MEDIALNY



www.bta-czasopismo.pl



## WSPÓŁPRACA MEDIALNA



## ORGANIZATOR



Stowarzyszenie Producentów Cementu

30-003 Kraków • ul. Lubelska 29 • tel.: +48-12-423-33-55

biuro@polskicement.pl • dnibetonu@polskicement.pl

www.polskicement.pl

Bądź z nami w kontakcie:

www.facebook.com/PolskiCement

www.facebook.com/ArchitekturaBetonowa

x.com/polskicement

www.instagram.com/architektura\_betonowa



ISBN: 978-83-61331-51-3