

Politechnika Śląska

Wydział Budownictwa

Katedra Procesów Budowlanych i Fizyki Budowli

Praca Doktorska - Streszczenie rozszerzone

**Analiza wpływu wybranych naturalnych włókien
i popiołów odpadowych na właściwości zapraw**

Autor: **Mgr inż. Jyoti Rashmi Nayak**

Promotor: dr hab. inż. Jerzy Bochen prof. PŚ,

Promotor pomocniczy: dr inż. Małgorzata Gołaszewska

Dyscyplina: Inżynieria lądowa, Geodezja i Transport

Gliwice, 2023

Rozdział 1. Wprowadzenie

Wysiłki nauki koncentrują się ostatnio na globalnym ociepleniu, ze względu na postępującą degradację środowiska. Projektowanie materiałów budowlanych koncentruje się na zapobieganiu szkodom dla środowiska, obniżeniu emisji CO₂ i wykorzystaniu surowców odpadowych. Celem badań było sprawdzenie możliwości zastosowania wybranych materiałów odpadowych w zaprawach. Aby zmniejszyć wpływ materiałów budowlanych na środowisko, zwykle stosuje się dodatkowe materiały cementowe lub naturalnie występujące lokalne surowce, takie jak odpady z biomasy. Intrygujące jest również zastąpienie tradycyjnego stalowego zbrojenia włóknami naturalnymi w materiałach kompozytowych. Naturalne odpady stają się coraz bardziej popularne jako dodatek lub częściowy zamiennik w materiałach budowlanych. Drewno, odpady rolnicze i włókna roślinne są coraz częściej wykorzystywane w przemyśle i badaniach ze względu na ich odnawialność, powszechną dostępność, mniejszą gęstość, przystępną cenę i odpowiednie właściwości mechaniczne.

Celem przedstawionych badań jest rozpoznanie właściwości fizyko-mechanicznych materiałów kompozytowych jako zapraw modyfikowanych naturalnymi dodatkami. Badania przeprowadzono dla zapraw budowlanych cementowych o niskiej zawartości cementu, cementowo-wapiennych i cementowych z domieszką uplastyczniająco-napowietrzającą (APA) zastępującą dodatek wapna. Zaprawy modyfikowano następnie dodatkami odpadów naturalnych pochodzących z przeróbki roślin, takich jak włókna jutowe i sisalowe oraz popioły z łusek ryżowych (RHA) oraz z wyłtoków trzciny cukrowej (SCBA). Porównawczo jako dodatki zastosowano także syntetyczne włókna polipropylenowe oraz mączkę wapienną. Badania składają się z dwóch części. W części pierwszej zostały przygotowane i wykonane zaprawy z włóknami, w części drugiej badań zostały zastosowane w zaprawach nie klinkierowe uzupełniające zamienniki cementu (SCM). Następnie dla przygotowanych próbek zbadano właściwości fizyczne i mechaniczne, zarówno świeżej jak i stwardniałej zaprawy, w tym cechy mikrostruktury.

Rozdział 2. Cele i zakres rozprawy

Celem niniejszych badań jest wniesienie wkładu do dyscypliny Inżynierii lądowej i materiałowej poprzez opracowanie składów i zbadanie zmodyfikowanych, przyjaznych dla środowiska i budownictwa zrównoważonego materiałów budowlanych o właściwościach porównywalnych do właściwości powszechnie stosowanych materiałów. Włączenie włókien naturalnych i zamienników SCM z odpadów z biomasy stanowi znaczący potencjał dla rozwoju materiałów budowlanych, które można wykorzystać w sektorze budowlanym. Cele długoterminowe dotyczą zastosowania odpadów naturalnych jako produktów ubocznych przeróbki roślin do produkcji materiałów przyjaznych dla środowiska oraz promocję ekonomii społecznej.

Generalnie cały zakres prac badawczych składa się z dwóch części:

1. Przegląd literatury:

Z przeglądu literatury można wywnioskować, że budownictwo w znacznym stopniu przyczynia się do wyczerpywania zasobów nieodnawialnych i emisji CO₂. W ostatnim czasie naukowcy badali wykorzystanie naturalnych odpadów w materiałach budowlanych na bazie cementu.

2. Przeprowadzone badania:

Po pierwsze, z powodzeniem zastosowano włókna naturalne jako wzmocnienie w celu poprawy właściwości zaprawy, a po drugie z powodzeniem zastosowano naturalny SCM jako zamiennik cementu w zaprawie.

Zbadano:

- zawartość powietrza i konsystencję świeżych zapraw budowlanych z włóknami naturalnymi i SCM z bioodpadów;
- właściwości mechaniczne: wytrzymałość na ściskanie i zginanie stwardniałych zapraw budowlanych z włóknami naturalnymi i SCM z bioodpadów;
- skurcz wysychania zapraw z włóknami i SCM z bioodpadów;
- wpływ włókien i SCM z bioodpadów na właściwości strukturalne zaprawy, przeprowadzając analizę MIP i SEM.

Rozdział 3. Metodyka badań

W tym rozdziale opisano zastosowane metody eksperymentalne wykorzystane do osiągnięcia celów badawczych. Obejmują one eksperymentalne testy laboratoryjne. Do analizy wyników testów wytrzymałościowych wykorzystano program Statistica, zaawansowany pakiet oprogramowania. W szczególności wykorzystano analizę ANOVA do analizy wytrzymałości.

Zostały wybrane następujące właściwości fizyczne do testów w celu zaobserwowania charakterystyki rozważanych zapraw budowlanych: konsystencja i zawartość powietrza w świeżej zaprawie, wytrzymałość na ściskanie przy zginaniu i skurcz stwardniałej zaprawy. Zastosowano także techniki analizy mikrostrukturalnej, takich jak analiza skaningowa (SEM) i analiza porozymetrii rtęciowej (MIP).

- 1) Do badania konsystencji przyjęto metodę badania stolikiem rozptywu, zgodnie z normą EN 1015-3:2000, oraz za pomocą stożka Novikowa zgodnie z normą PN-85/B-04500;
- 2) Zawartość powietrza w zaprawie zmierzono zgodnie z normą EN 1015-7:2000 metodą ciśnieniową;
- 3) Wytrzymałość na ściskanie i zginanie próbek pryzmatycznych o wymiarach 40 × 40 × 160 mm oceniono zgodnie z normą EN 1015-11:2001.

Dodatki zostały dodane do zaprawy cementowej, zaprawy cementowo-wapiennej i zaprawy cementowej z domieszką uplastyczniająco-napowietrzającą (APA). Ocenę każdej właściwości przeprowadzono na co najmniej trzech próbkach. Zgodnie z normą EN 1015-11:2001 do badań wytrzymałości na ściskanie wykorzystano próbki pryzmatyczne o wymiarach 40 × 40 × 160 mm. Wytrzymałość na ściskanie określono dla sześciu próbek półpryzmatycznych, a wytrzymałość na zginanie dla trzech próbek pryzmatycznych.

Rozdział 4. Materiały i przygotowanie próbek

4.1. Materiały

Przygotowane zostały trzy rodzaje zapraw, które modyfikowano dodatkami włókien (jutowe, sizalowe) oraz zamiennikami cementu z biomasy (SCM). Przyjęte zaprawy wykonano na bazie cementu (C), cementu i wapna (CL) i cementu z domieszką uplastyczniająco-napowietrzającą APA (CA). Spoiwa użyte w kompozycji składały się z konwencjonalnego cementu portlandzkiego (OPC) odmiany CEM I 42,5 i wapna. Do zaprawy cementowej dodano także dostępną na rynku domieszkę uplastyczniająco-napowietrzającą (APA) w celu zapewnienia niezbędnej jednorodności zaprawy.

W przypadku dodatków SCM, zastosowano: popiół z wyłoków trzciny cukrowej (SCBA) pozyskiwany z regionu Gujrat w Indiach, popiół z łusek ryżowych (RHA) pozyskiwany z regionu Chhattisgarh w Indiach, oraz mączkę wapienną (LP) ze złoża w Polsce.

Zastosowane włókno jutowe pochodzi z rodzaju *Corchorus* z rodziny *Tiliaceae*, szał jest naturalnym włóknem pozyskiwanym z liści rośliny agawa *Sisalana* z Indii, a jako włókno porównawcze syntetyczne uwzględniono polipropylen z jednej z lokalnych firm w Polsce.

Składy i właściwości podstawowych materiałów zastosowanych w badaniach przedstawiono w Tab. 1-4.

Tabela 1. Skład chemiczny CEM I 42.5

Składniki (%)									
SiO ₂	Al ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Strata prażenia	Pozostałości nierozpuszczalne
18,9	3,8	3,9	63,3	1,2	2,9	0,15	1,05	3,17	1,89

Table 2. Skład chemiczny wapna

Składniki (%)						
SiO ₂	Al ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O
0,7	-	-	90,2	1	0,7	0,15

Table 3. Skład chemiczny i właściwości fizyczne popiołów odpadowych

Składnik	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Węgiel (%)	Ciężar właściwy (gm/cc)	pH
SCBA	63,1	1,3	0,8	42	2,43	6,2
RHA	65,3	0,74	0,58	14	2,43	6,2

Table 4. Fizyczne właściwości włókien

Właściwość	Sisal fiber	Jute fiber	Polypropylene fiber
Gęstość (g/cm ³)	1,58	1,3	0,91
Długość (mm)	0,8 - 12	17	12
Moduł Younga (GPa)	9 - 22	-	3,5
Wytrzymałość na rozciąganie (MPa)	385 - 728	230	0,56 - 0,77

4.2. Przygotowanie próbek

W projekcie mieszanek zapraw uwzględniono trzy próbki referencyjne: jedną z cementem portlandzkim (OPC) w proporcji 1:6, cementowo-wapienną w proporcji 1:1:6 i cementową z domieszką APA o stosunku spoiwa 1:6 i 0,50% APA do masy cementu. Ilość wody w zaprawie ustalono tak, aby uzyskać tę samą konsystencję, mierzoną metodą stożka Novikowa. Wszystkie składy mieszanek pozwoliły określić i porównać właściwości zapraw, takie jak: konsystencja, zawartość powietrza w świeżej zaprawie, wytrzymałość na ściskanie i zginanie oraz skurcz wysychania. Przygotowano trzy rodzaje próbek zapraw z dodatkiem 1% i 2% masy włókien z juty, szalu i polipropylenu jako zbrojenia rozproszonego. W przypadku popiołów z biomasy tj. popiołu z łusek ryżowych, popiołu z wyłoków z trzciny cukrowej i mączki wapiennej, zastosowano zastąpienie 5, 10 i 15% masy cementu. Poniższe tabele 5 i 6 przedstawiają proporcje mieszanki zaprawy z różnymi dodatkami.

Tabela 5. Proporcje mieszanki wszystkich próbek zapraw z i bez SCM

Zaprawa	Składniki (w gramach)								
	CEM I 42.5R	Wapno	Woda	w/s	Piasek	APA	SMC		
							RHA	SCBA	LS
CM	450		440	0.98	2308				
CL	350	253	410	0.68	1795				
CA	450		310	0.44	2308	2.25			
CM-RHA5	427.5		440	0.97	2308		22.5		
CM-RHA10	405		440	0.92	2308		45		
CM-RHA15	382.5		440	0.87	2308		67.5		
CM-SCBA5	427.5		440	0.97	2308			22.5	
CM-SCBA10	405		440	0.92	2308			45	
CM-SCBA15	382.5		440	0.87	2308			67.5	
CM-LS5	427.5		440	0.97	2308				22.5
CM-LS10	405		440	0.92	2308				45
CM-LS15	382.5		440	0.87	2308				67.5
CL-RHA5	332.5	253	410	0.7	1795		17.5		
CL-RHA10	315	253	410	0.72	1795		35		
CL-RHA15	297.5	253	410	0.8	1795		52.5		
CL-SCBA5	332.5	253	410	0.7	1795			17.5	
CL-SCBA10	315	253	410	0.72	1795			35	
CL-SCBA15	297.5	253	410	0.8	1795			52.5	
CA-RHA5	427.5		310	0.73	2308	2.25	22.5		
CA-RHA10	405		310	0.76	2308	2.25	45		
CA-RHA15	382.5		310	0.81	2308	2.25	67.5		
CA-SCBA5	427.5		310	0.73	2308	2.25		22.5	
CA-SCBA10	405		310	0.76	2308	2.25		45	
CA-SCBA15	382.5		310	0.81	2308	2.25		67.5	
CA-LS5	427.5		310	0.73	2308	2.25			22.5
CA-LS10	405		310	0.76	2308	2.25			45
CA-LS15	382.5		310	0.81	2308	2.25			67.5

Tabela 6. Proporcje mieszanki wszystkich próbek zapraw z i bez włókien

Zaprawa	Składniki (w gramach)							Włókna		
	CEM I 42.5R	Wapno	Woda	w/s	Piasek	APA	Włókna			
							Jutowe	Sizal	Polipropylen	
CM	450		440	0.98	2308					
CL	350	253	410	0.68	1795					
CA	450		310	0.44	2308	2.25				
C-P1	450		440	0.98	2308				4.5	
C-P2	450		440	0.98	2308				9	
C-J1	450		440	0.98	2308		4.5			
C-J2	450		440	0.98	2308		9			
C-S1	450		440	0.98	2308			4.5		

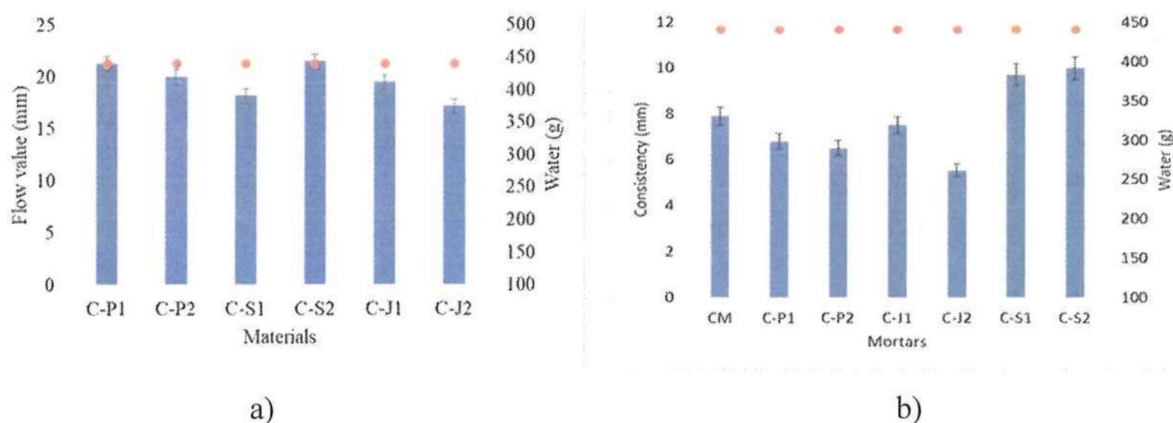
C-S2	450		440	0.98	2308		9
CL-J1	350	253	410	0.72	1795	4.5	
CL-J2	350	253	410	0.72	1795	9	
CL-S1	350	253	410	0.72	1795		4.5
CL-S2	350	253	410	0.72	1795		9
CA-J1	450		310	0.69	2308	2.25	4.5
CA-J2	450		310	0.69	2308	2.25	9
CA-S1	450		310	0.69	2308	2.25	4.5
CA-S2	450		310	0.69	2308	2.25	9

Rozdział 5. Wyniki i dyskusja

Część 1. Wpływ włókien na właściwości zapraw

5.1. Wpływ włókien na konsystencję zapraw.

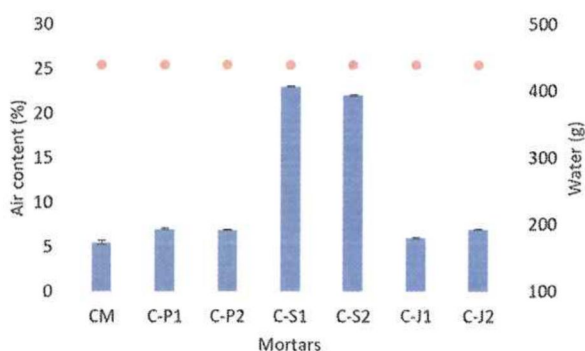
W analizie konsystencji zastosowano zarówno metodę stożkową Novikova, jak i metodę stolika rozplwowego. Wyniki badania konsystencji zapraw cementowych przedstawiono na Rys. 1. Włókna jutowe i plastikowe obniżają konsystencję zaprawy cementowej o 5%. Próbką zaprawy cementowej zawierającą 2% włókien polipropylenowych (C-P2) ma najwyższą wartość rozplwu, prawdopodobnie ze względu na największą objętość i najkrótsze włókna. Dodanie 2% włókien szalowych zwiększa płynność ze względu na zdolność włókien naturalnych do absorpcji wody dzięki obecności celulozy i ligniny. Różnica w ilości wody wynosi od 6,8% dla zaprawy cementowo-wapiennej do 29,5% dla zaprawy cementowej APA w porównaniu do zaprawy cementowej. Zgodnie z zagłębieniem stożka Novikova zaprawa cementowa z włóknami szalowymi ma wyższą konsystencję niż próbka referencyjna. Konsystencja zapraw przygotowanych z APA i 2% włókien szalowych wykazuje wyższą konsystencję. Na podstawie wyników można stwierdzić, że dodatek szalu zwiększa absorpcję wody, a przy ich większej ilości (2%) konsystencja dla zapraw z tym rodzajem włókien jest największa zarówno w przypadku badania stolikiem rozplwu, jak i w wartościach penetracji stożka.



Rys.1. Konsystencja zapraw cementowych z badanymi włóknami, zbadana: a) stolikiem rozplwu, b) stożkiem Novikova.

5.2. Wpływ włókien na zawartość powietrza w zaprawach

Poniższy rysunek Rys. 2 przedstawia wyniki badań zawartości powietrza. Oczywiście jest, że zawartość powietrza w zaprawach cementowych i cementowo-wapiennych była znacznie niższa w porównaniu do zapraw APA, co wynika z wpływu domieszki. Należy zauważyć, że zaprawy cementowo-wapienne wykazywały niższą zawartość powietrza w porównaniu do zapraw cementowych. Włączenie włókien szalowych miało znaczący wpływ na zawartość powietrza w zaprawach cementowych i cementowo-wapiennych, powodując czterokrotny wzrost.

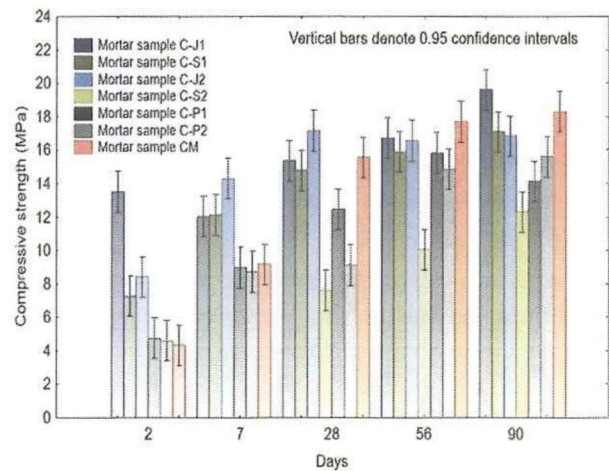
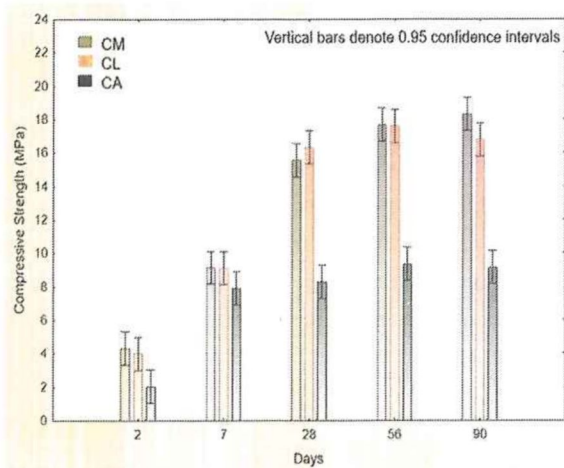


Rys. 2. Zawartość powietrza w zaprawach cementowych z włóknami.

5.3. Wpływ włókien na wytrzymałości na ściskanie zapraw

Poniżej przedstawiono wytrzymałość na ściskanie próbek referencyjnych cementu po dodaniu 1% i 2% włókien (Rys.3). Wszystkie mieszanki zostały przebadane pod kątem wytrzymałości na ściskanie po 7, 28, 56 i 90 dniach od zaformowania. Zaprawa cementowa i wapienna mają porównywalną wytrzymałość na ściskanie, z wyjątkiem niewielkiej redukcji wytrzymałości w próbce cementowo-wapiennej związanej z obecnością niewielkich pustek powietrznych. Zastosowanie APA drastycznie zmniejsza wytrzymałość na ściskanie poprzez generowanie dużej liczby pustek powietrznych. Dodanie 1% włókna szalowego do zaprawy cementowej zmniejsza wytrzymałość o 6% w badanych terminach. Celuloza i lignina, które absorbują wodę, zmniejszają wytrzymałość zaprawy na ściskanie z włóknem szalowym. Dodanie 1% włókien jutowych do zaprawy cementowej zwiększa jej wytrzymałość na ściskanie. Włókno jutowe zwiększa wytrzymałość na ściskanie o 11% w zaprawie cementowej w porównaniu do referencyjnej zaprawy cementowej. Po 28 dniach twardnienia włókna jutowe w ilości do 2% (C-J2) w matrycy cementowej zwiększają wytrzymałość o 15%. W przypadku zaprawy cementowo-wapiennej włókna jutowe zwiększają wytrzymałość na ściskanie o 15% w zaprawie CL-J1 po 28, 56 i 90 dniach. Dodanie 2% włókien jutowych do zaprawy zwiększa wytrzymałość o 15% przez pierwsze siedem dni i zmniejsza ją o 18% po 28 dniach. Próbka z zaprawy CL-S1 zachowuje się lepiej. Wytrzymałość wzrasta odpowiednio o 80% i 10% po 2 i 7 dniach. W kolejnych dniach wytrzymałość próbki spada nawet o 10%.

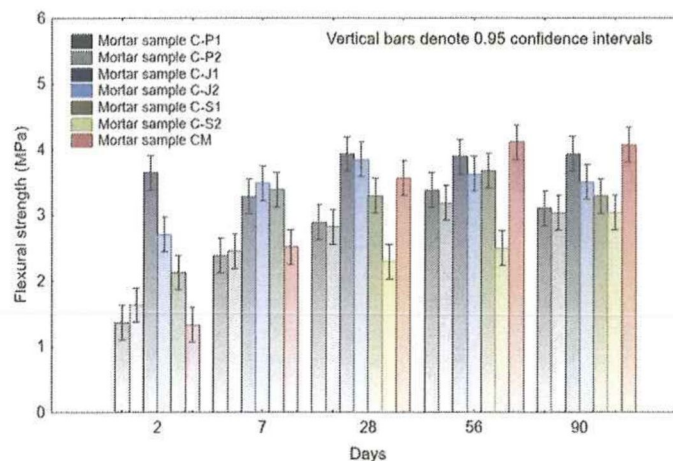
Podsumowując, wpływ dodatku włókien na wytrzymałość na ściskanie próbek zaprawy, można stwierdzić, że niższy procent dodatku włókien skutkuje wyższą wytrzymałością na ściskanie w porównaniu z większymi ilościami włókien.



Rys.3 Wytrzymałość na ściskanie a) próbek referencyjnych and b) zaprawy cementowej z włóknami

5.4. Wyniki badania wytrzymałości na zginanie zapraw z włóknami

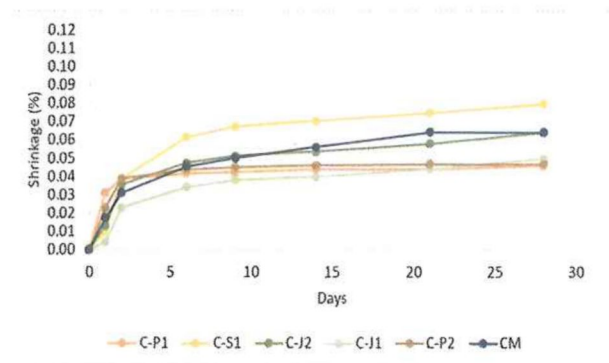
Wyniki badania wytrzymałości na zginanie zapraw cementowych przedstawiono na rys. 4. Wyniki zginania pokazują, że dodanie 1% wagowo włókna szalowego do cementu poprawia wytrzymałość na zginanie o 59% i 34% odpowiednio po 2 i 7 dniach. Wytrzymałość na zginanie spada do 7,5%, 10% i 18% po 28, 56 i 90 dniach. Większa ilość włókien szalowych (2%) początkowo zmniejsza wytrzymałość zaprawy na zginanie, wartości są zerowe z powodu zniszczenia próbki poza zakresem testowania maszyny, a zatem można je oszacować na mniej niż 1 MPa. Włókna jutowe zwiększają wytrzymałość zaprawy cementowej na zginanie. Wyniki wytrzymałości włókien juty we wszystkich próbkach referencyjnych były wysokie. Próbka z zaprawy C-J1 uzyskała 31% i 10% wzrost wytrzymałości na zginanie po 7 i 28 dniach w porównaniu z próbką kontrolną CM, chociaż wytrzymałość spadła o 6% po 56 dniach i 2% po 90 dniach. Próbka C-J2 wskazuje, że wytrzymałość na zginanie wykazała znaczną poprawę o 80% i 38% odpowiednio po 2 i 28 dniach w porównaniu z zaprawą cementową. Próbka C-P2 pokazuje, że wytrzymałość na zginanie zmniejsza się do 28% po 28 dniach i 18% po 90 dniach. Włókna polipropylenowe zmniejszają wytrzymałość zaprawy na zginanie, ponieważ krótsze włókna słabo łączą się z matrycą. Włączenie włókien jutowych zwiększa wytrzymałość materiału na zginanie poprzez wzmocnienie wiązania między włóknami a matrycą cementową.



Rys.4. Wytrzymałość na zginanie zapraw cementowych z włóknami

5.5. Wyniki badania wpływu włókien na skurcz podczas wysychania

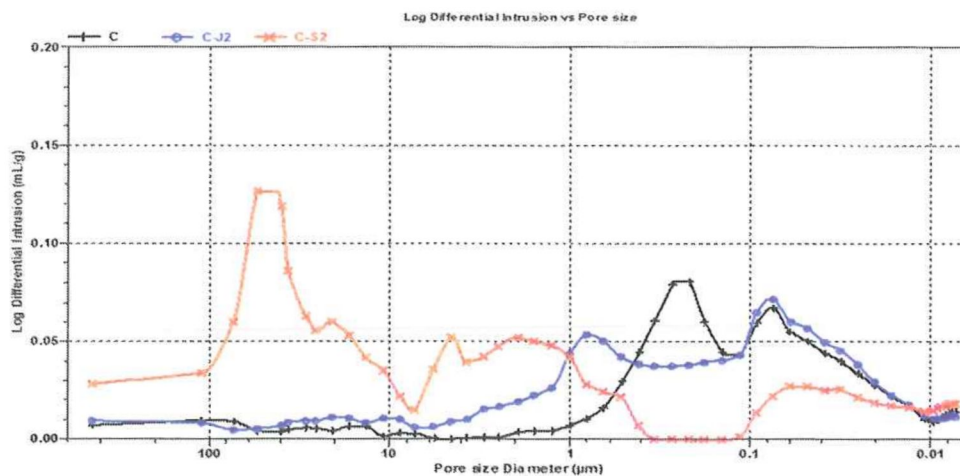
Skurcz wysychania próbek zaprawy zarówno z włóknami, jak i bez włókien określono w okresie 28 dni (Rys. 5). Dodatek 2% włókien szalowych powoduje znaczny 15% wzrost skurczu wysychania matrycy cementowej ze względu na ich hydrofilowy charakter. Dodatek 1% włókien szalowych powoduje zmniejszenie skurczu zapraw C-S1, który jest porównywalny do skurczu próbki referencyjnej. Podobnie zaprawy C-J1 i C-P2 wykazują podobne wyniki redukcji skurczu w porównaniu z zaprawą cementową. Dodanie 2% włókna jutowego i 1% włókna polipropylenowego do zaprawy cementowo-wapiennej powoduje zmniejszenie skurczu do 15%.



Rys.5. Wartości skurczu zaprawy cementowej z włóknami

5.6. Wyniki analizy struktury porów zapraw z włóknami

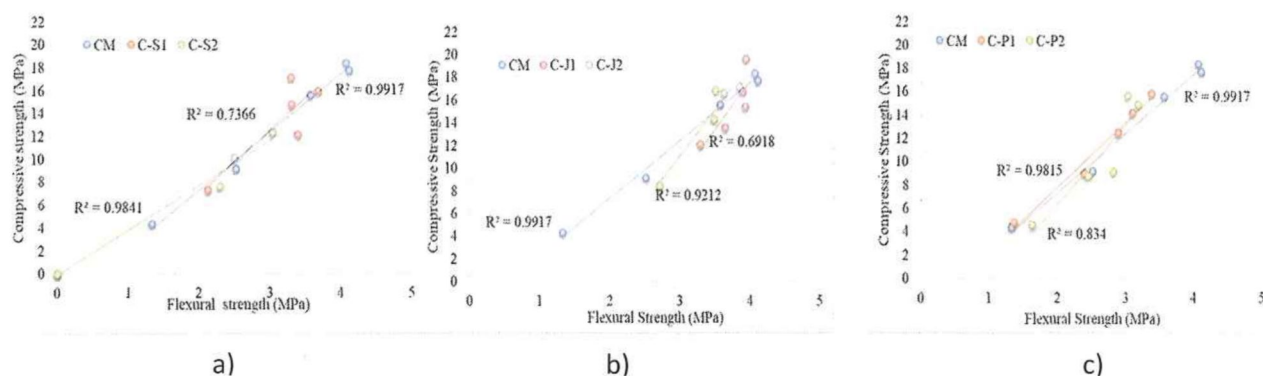
Zgodnie z wynikami MIP (Rys. 6) włókna jutowe nie zmieniły struktury porów zapraw cementowych i cementowo-wapiennych w porównaniu do próbek referencyjnych. Włókna zachowały więcej małych porów, których objętość była porównywalna z porami przed dodaniem włókien. Dodanie włókien jutowych do zapraw cementowych z domieszką APA spowodowało 54% wzrost obecności porów o małych średnicach w zakresie od 0,01 do 1 μm . Dodatek włókien szalowych do zapraw CL spowodowało znaczny wzrost liczby porów wykazujących mniejszy rozmiar w zakresie 0,1 - 1 μm o 77,6%. Dodanie 2% włókien jutowych spowodowało odpowiednio wzrost objętości porów o 22,4% (C-J2), 24,7% (CL-J2) i 25,7% (CA-J2). Włączenie 2% włókien szalu spowodowało znaczny wzrost porowatości, z wartościami odpowiednio 28,6% (C-S2), 26,8% (CL-S2) i 24,5% (CA-S2). Na średnie promienie porów w zaprawach ma wpływ obecność włókien, co przenosi się na zakresy dominujących średnic porów.



Rys.6. Rozkłady porów dla zaprawy cementowej z włóknami

5.7. Zależność między wytrzymałością na zginanie a wytrzymałością na ściskanie zapraw z dodatkiem włókien

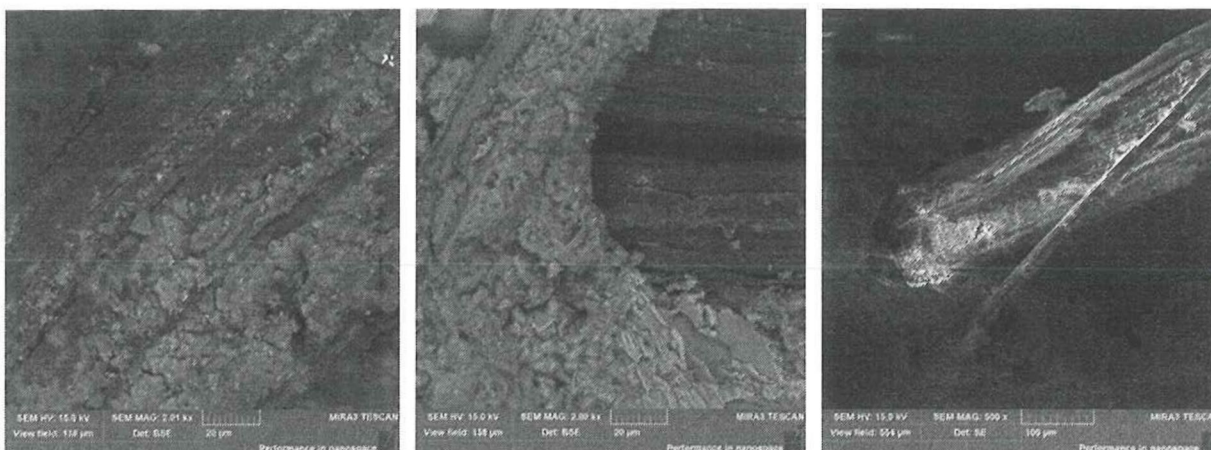
Korelację pomiędzy wytrzymałością na zginanie a wytrzymałością na ściskanie zapraw z dodatkiem włókien przedstawiono na Rys.7. Współczynnik determinacji (R^2) jest większy niż 0,9, co wskazuje na wysoką korelację. Ponieważ obie cechy uległy poprawie przy zmniejszonej zawartości objętościowej włókien, ustalono silny związek między wytrzymałością na zginanie a wytrzymałością na ściskanie kompozytu zaprawy wzmocnionej włóknami. Im wyższy procentowy dodatek włókien, tym niższe parametry wytrzymałościowe, co odnotowano przy wartościach R^2 . Włókna polipropylenowe działają lepiej w aspekcie obu wytrzymałości, wykazując równe wartości korelacji, a następnie włókna sizalowe, jednak gdy patrzymy na indywidualną wytrzymałość, włókna jutowe mają wyższe wartości.



Rys.7. Zależność między wytrzymałością na zginanie a wytrzymałością na ściskanie zapraw CM z dodatkiem włókien: a) sizalowych, b) jutowych, c) polipropylenowych.

5.8. Wyniki analiz morfologii powierzchni zapraw z włóknami

Analiza obrazów SEM (Rys.8) wykazała, że porównując próbkę zaprawy cementowej z próbką cementowo-wapienną. Ma ona mniejszą obecność pęknięć i pustek, a także gładszą i bardziej jednolitą powierzchnię, co przyczynia się do lepszego wiązania i właściwości materiału. Adhezja między włóknami a matrycą cementową wykazuje wysoki poziom wytrzymałości, co skutkuje zmniejszoną obecnością pęknięć i pustek w próbkach. Ta cecha prowadzi do skutecznej poprawy ogólnej wytrzymałości. Dodatek włókien jutowych wykazuje lepsze wiązanie między matrycą zarówno w przypadku zaprawy cementowej, jak i wapienno-cementowej. Jednak włókna sizalowe wykazują słabsze wiązanie ze względu na wysoką absorpcję wody. Włókna wyciągają się z powierzchni, pozostawiając puste przestrzenie powietrzne w większej ilości.



a)

b)

c)

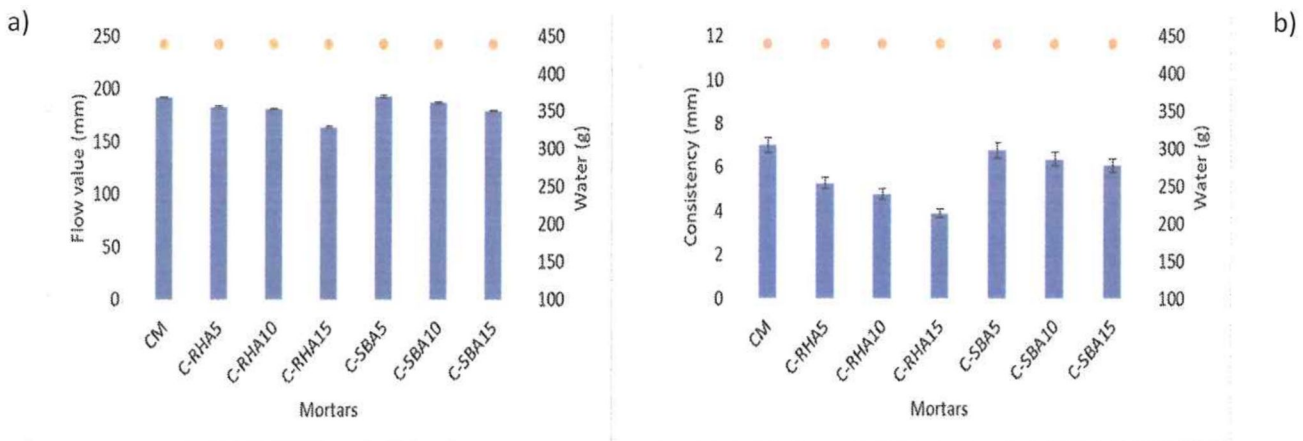
Rys. 8. Zdjęcia SEM po 28 dniach hydratacji: (a) zaprawa cementowa z 2% włókien szalowych, (b) zaprawa cementowa z 2% włókien jutowych, c) zaprawa cementowo-wapienna z 2% włókien jutowych.

Część 2. Wpływ popiołów odpadowych na właściwości zapraw

5.9. Analiza konsystencji zaprawy z popiołami

Zgodnie z wynikami badań stolikiem rozptywu dodanie popiołów w dowolnej procentowej ilości zwiększa wodożądność. Wraz ze wzrostem procentu zastąpienia cementu popiołem zapotrzebowanie na wodę wzrasta do 10% w przypadku zastąpienia 15% cementu popiołem z łusek ryżowych (RHA). Jeśli jednak przyjrzymy się wartościom konsystencji zapraw z popiołem z wytłoków trzciny cukrowej (SCBA), nie ma zmian w konsystencji w porównaniu z próbką referencyjną z dodatkiem 5% i 10%. Przy dodatku 15% następuje niewielki spadek konsystencji, a ilość zapotrzebowania na wodę wzrasta do 8%.

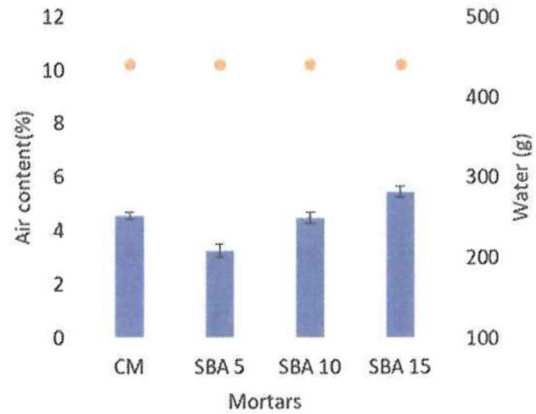
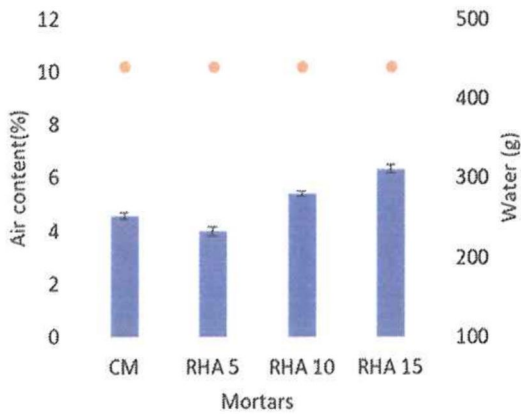
Analiza wyników badań stożkiem Novikowa pokazuje, że próbki z RHA wykazują niższą konsystencję niż próbki referencyjne i inne próbki z innymi dodatkami, ponieważ mają wyższą powierzchnię właściwą niż wytłoczyny z trzciny cukrowej i mączka wapienna, które wymagają więcej wody. Wartości konsystencji próbek C-RHA5, C-RHA10 i C-RHA15 są o 28%, 35% i 44% niższe niż referencyjnej zaprawy cementowej. Zastosowanie SCBA pogarsza konsystencję, przy czym próbka C-SCBA15 wykazuje spadek o 15% przy maksymalnej wartości 15%. Pokazuje to, jak dodatki popiołu wpływają na konsystencję zaprawy cementowej.



Rys. 9. Konsystencja zapraw cementowych badanych a) stolikiem rozptywu, b) stożkiem Novikowa.

5.10. Analiza zawartości powietrza w zaprawach z popiołami

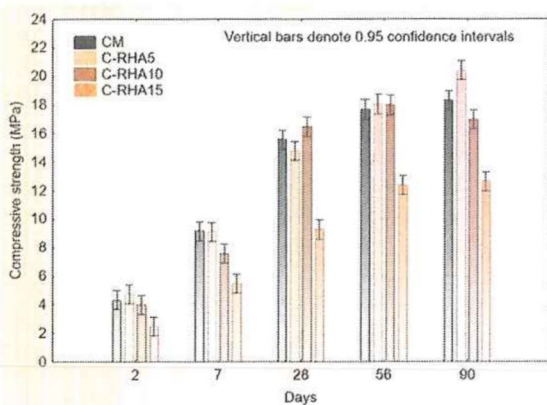
Wyniki wykazały, że zwiększenie ilości popiołów w mieszance zaprawy zmniejsza zawartość powietrza. SCBA zmniejsza zawartość powietrza w zaprawach cementowych o 22% i 5% odpowiednio dla mieszanki C-SBA5 i C-SBA10 (Rys. 10), jednak zwiększenie ilości SBA do 15% prowadzi do wzrostu zawartości powietrza do 22% w porównaniu z próbką referencyjną. Zawartość powietrza w zaprawie cementowo-wapiennej jest podobna do zwykłej zaprawy cementowej z SCBA. Wszystkie fazy zwiększają zawartość powietrza o 22%, 36% i 40% dla CL-SCBA5, CL-SCBA10 i CL-SCBA15. Powierzchnia właściwa RHA jest wyższa niż jakiegokolwiek innego zastosowanego spoiwa, dlatego dodanie łuski ryżowej do zaprawy cementowej zwiększa zawartość powietrza do 22% i 37% dla mieszanek C-RHA10 i C-RHA15. Podobne wyniki uzyskano w przypadku zaprawy cementowo-wapiennej. Zaprawy CL-RHA10 i CL-RHA15 mają o 13% i 44% więcej powietrza niż referencyjna zaprawa cementowo-wapienna ze względu na większą zawartość RHA.



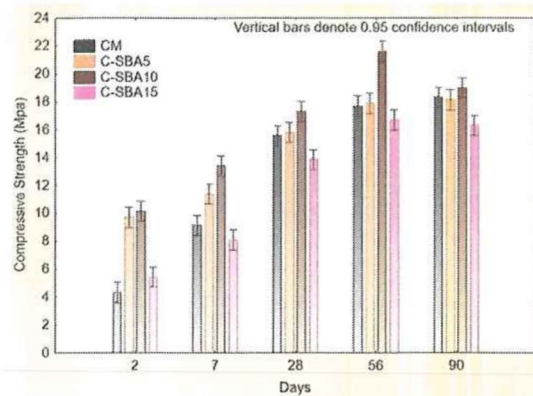
Rys. 10. Zawartość powietrza w zaprawach z popiołami odpadowymi

5.11. Wytrzymałość na ściskanie próbek zapraw z popiołem

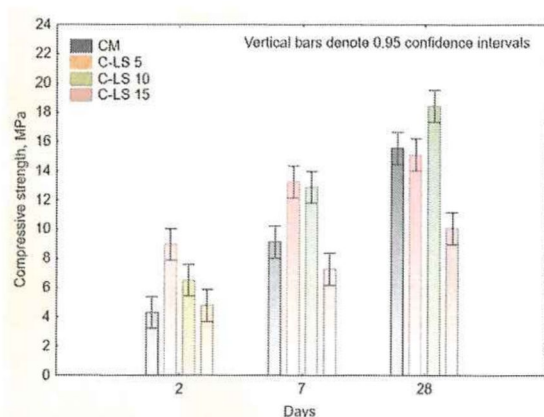
Wytrzymałość na ściskanie pokazuje, że wytrzymałość próbek C-RHA5 (Rys. 11) spada po 28 dniach, ale wzmacnia się o 3% i 20% po 56 i 90 dniach. Zaprawa C-RHA10 z popiołem 10% jest mocniejsza niż próbka referencyjna, zwiększając wytrzymałość do 16% po 28 dniach i 2% po 56 dniach. Wytrzymałość spada do 3% po 90 dniach, prawdopodobnie z powodu absorpcji wody. Dodanie wyższego udziału procentowego popiołu z łusek ryżowych (C-RHA15) do cementu powoduje zmniejszenie wytrzymałości, ze spadkami o 31%, 30% i 27% obserwowanymi odpowiednio po 28 dniach, 56 dniach i 90 dniach. Zaprawa z 10% SCBA wykazała zwiększoną wytrzymałość na wszystkich etapach. Po 28, 56 i 90 dniach wytrzymałość wzrosła odpowiednio do 22, 21 i 10%. Jednak dodanie wyższego odsetka 15% SCBA powoduje niewielki spadek wytrzymałości po 7 dniach do 3, 6 i 5% po 28, 56 i 90 dniach. Zastąpienie 10% mączki wapiennej zwiększa wytrzymałość zaprawy cementowej do 20%. Dodatek RHA w zaprawie cementowo-wapiennej powoduje obniżenie wytrzymałości. Przy niższej ilości 5% RHA do zaprawy cementowo-wapiennej następuje wzrost wytrzymałości do 2% i 10% po 56 i 90 dniach. Próbka zaprawy CL-RHA10 wykazuje wzrost wytrzymałości po 7 dniach do 12% i 5% odpowiednio dla 28 i 56 dni, a następnie wytrzymałość spada do 9% po 90 dniach. Próbka zaprawy CL-SBA5, która zawiera 5% dodatku SBA, wykazuje znaczny wzrost wytrzymałości na ściskanie, wynoszący 28% po 90 dniach.



a)



b)

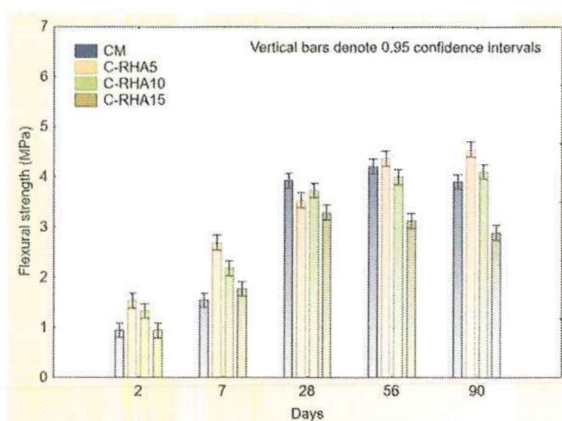


c)

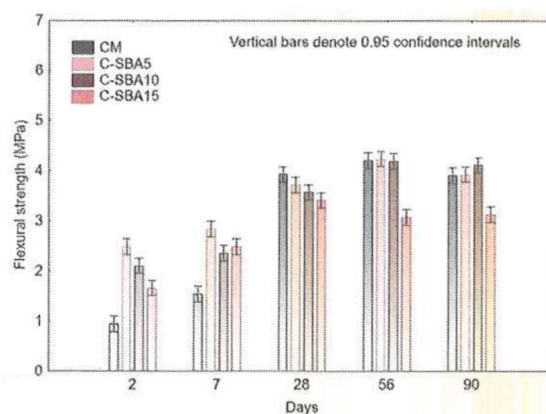
Rys.11. Wytrzymałość na ściskanie zapraw z a) RHA, b) SCBA i c) mączki LS

5.12. Wytrzymałość na zginanie próbek zapraw z popiołami

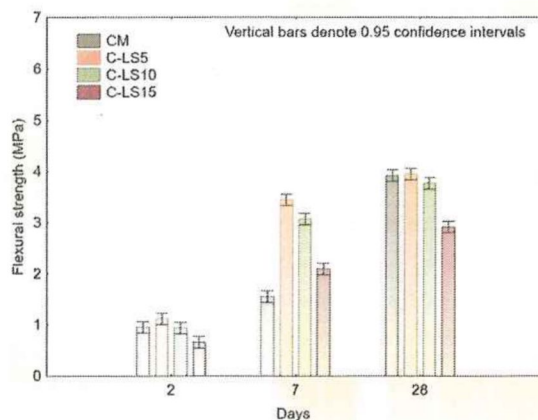
Zaprawy z dodatkiem 10% RHA wykazują wzrost wytrzymałości na zginanie do 56 dni do 5% w porównaniu z próbką kontrolną. Próbki z dodatkiem 10% RHA wykazuje wzrost wytrzymałości na zginanie z nagłym spadkiem wytrzymałości o 5% po 56 dniach do wzrostu o 5% po 90 dniach w porównaniu z próbką referencyjną. Wyższa ilość dodatku wpływa negatywnie na wytrzymałość na zginanie. Zastąpienie cementu SCBA zwiększa wytrzymałość na zginanie ilości 5%. Jednak przy 10% dodatku SCBA wytrzymałość zaprawy na zginanie jest równa wytrzymałości próbek referencyjnych. Dodatek 15% SCBA zwiększa wytrzymałość o 50% po 2 i 7 dniach. Jak stwierdzono, zastąpienie cementu powyżej 15% zmniejsza wytrzymałość. Wytrzymałość na zginanie zmieniła się po dodaniu mączki wapiennej. Co istotne, wytrzymałość spada wraz ze wzrostem ilości dodatku. W przypadku wytrzymałości zarówno RHA, jak i SBA działają zupełnie inaczej po zastąpieniu ich w zaprawie cementowo-wapiennej. Poprawa wytrzymałości na zginanie zapraw cem-wapiennych CL-RHA5 i CL-RHA10 w porównaniu do zaprawy kontrolnej wahała się od 31% do 78%. Po zastąpieniu cementu SCBA w zaprawie na poziomie 5% i 10%, średnia wytrzymałość na zginanie wzrasta odpowiednio o około 26% i 27% w porównaniu z zaprawą cementowo-wapienną.



a)



b)

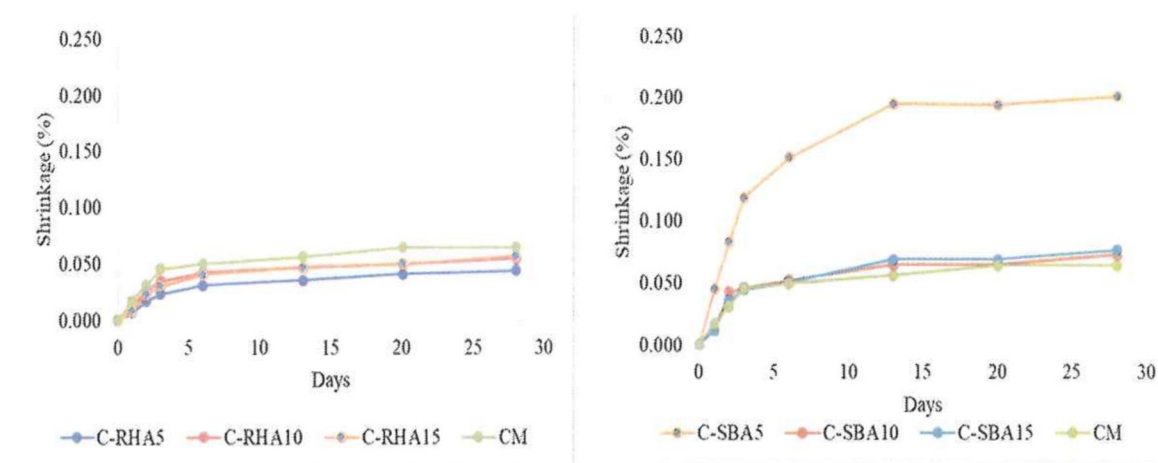


c)

Rys.12. Wytrzymałość na zginanie zapraw cementowych z a) RHA, b) SCBA i c) mączki LS

5.13. Wpływ dodatku popiołu na skurcz

Skurcz wysychania zaprawy po zastąpieniu cementu przez SCM przedstawiono na Rys.13. Próbkę zaprawy C-RHA5 ma mniejszy skurcz wysychania niż referencyjna zaprawa cementowa. Wartość skurczu w próbce SCBA jest zróżnicowana. Zastąpienie cementu ilością 5% SCBA zwiększa skurcz nawet o 70%, chociaż wzrost spowalnia powyżej 10%. Przepuszczalnie wraz ze wzrostem substytucji popiołu SCBA maleje stosunek wody do cementu, a wtedy SCBA poprawia mikrostrukturę zaprawy ze względu na efekt wypełniania i reakcję pucolanową, która zmniejsza wysychanie zaprawy, co jest ważną przyczyną skurczu. Dodatek mączki wapiennej w ilości 5% i 10% zmniejsza skurcz wysychania zaprawy cementowej odpowiednio o 5% i 7%. Badania zapraw cementowo-wapiennych wykazuje, że zastąpienie RHA5 i RHA10 zmniejsza wartość skurczu odpowiednio o 35% i 30%. Wyniki są dość interesujące w przypadku zastąpienia cementu niewielką ilością SCBA w zaprawie cementowo-wapiennej, gdyż wartość skurczu jest dość podobna do próbki referencyjnej

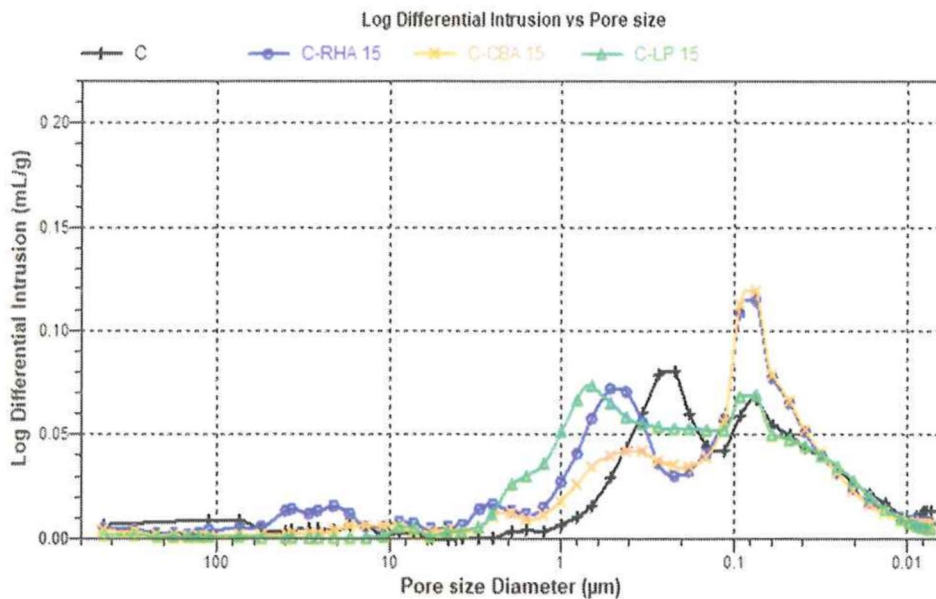


Rys. 13. Skurcz zapraw cementowych z a) RHA, b) SCBA

5.14. Analiza struktury porów

Wyniki badań MIP i rozkładów struktury porów pokazuje Rys.14. Z porównania widać, że dodatki RHA i SCBA wpłynęły na strukturę zaprawy w różny sposób, w zależności od zastosowanego dodatku. Zaobserwowano, że popiół RHA wpłynął na wzrost udziału porów o większych średnicach 0,5 - 1,0 μm we wszystkich zaprawach, nieznacznie w zaprawie cementowej, a w większym stopniu w zaprawie

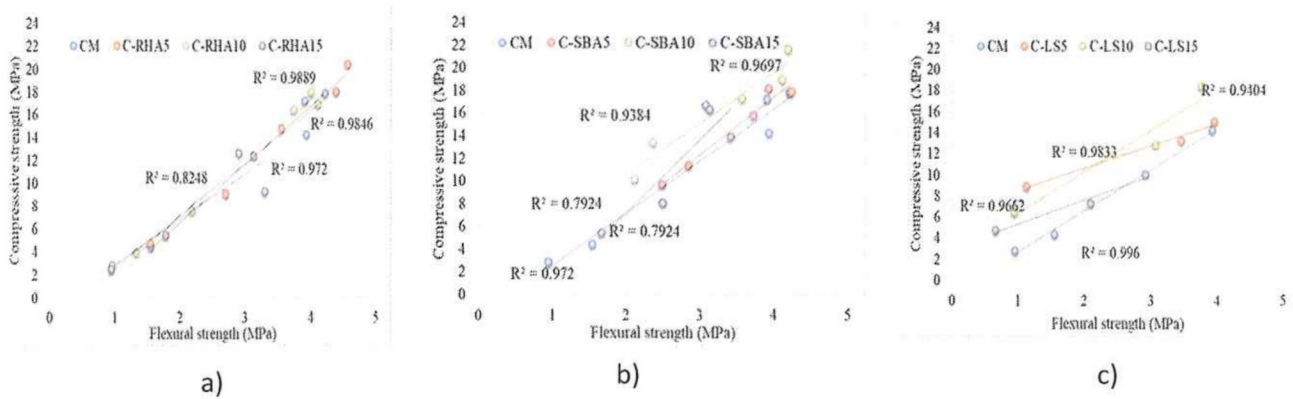
cementowo-wapiennej i w zaprawie z domieszką APA. Z kolei dodatek SBA spowodował wzrost udziału porów o mniejszych średnicach w porównaniu do zapraw referencyjnych. Natomiast przy domieszce APA w zakresie 0,5 - 10 μm . W zaprawach cementowo-wapiennych dodatki popiołów RHA i SCBA zwiększają średni promień porów, odpowiednio 0,43 i 0,33 μm . W zaprawach cementowych dodatek popiołu SCBA zmniejsza promień do 0,10 μm , podczas gdy dodatek mączki wapiennej LP zwiększa promień do 0,22 μm . Z drugiej strony, w zaprawie CA z domieszką APA, dodatek popiołu RHA zwiększył średni promień porów do 8,80 μm , podczas gdy dodatek popiołu SCBA spowodował znaczne zmniejszenie do 0,71 μm , podobnie jak dodatek mączki wapiennej, do 1,93 μm . W zaprawie CA tylko popiół RHA zmienił powierzchnię porów, powodując jej zmniejszenie do wartości 5,5 m^2/g . Dodatek popiołu SCBA nie zmienił znacząco powierzchni porów. W przypadku dodatku mączki wapiennej, powierzchnia porów w zaprawie cementowej C i CA została zmniejszona odpowiednio do 5,7 i 4,6 m^2/g .



Rys.14. Analiza MIP zapraw cementowych z 15% dodatkiem popiołów

5.15. Zależność między wytrzymałością na zginanie a wytrzymałością na ściskanie próbek z wszystkimi dodatkami popiołowymi z biomasy

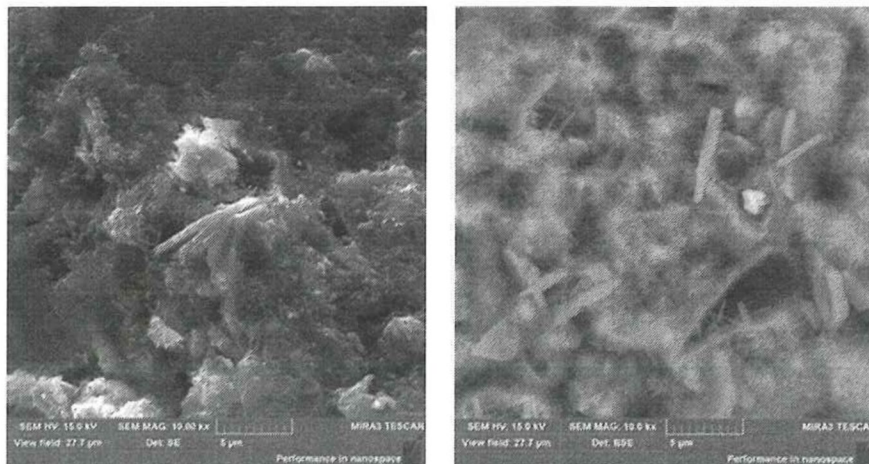
Na Rys.15 przedstawiono zależność między wytrzymałością na zginanie i ściskanie zaprawy cementowej z różnymi dodatkami SCM (RHA, SCBA, LS) przy różnych ich zawartościach w stosunku do masy cementu 5, 10 i 15%. Można zauważyć, że wytrzymałość na zginanie i ściskanie zaprawy są dobrze skorelowane dla poszczególnych zapraw zawierających różne zamienniki popiołowe i mączki wapiennej. Wartości współczynnika determinacji R^2 mieszczą się w zakresie 0,7924 - 0,9889. Z analizy regresji wynika, że próbka z 15% dodatkiem ma niższe wartości R^2 . Może to mieć związek z obniżeniem wytrzymałości i na skutek osłabienia przyczepności matrycy i dodatku. Wartość regresji poniżej 0,8 może wynikać z tej przyczyny, mniejszej przyczepności matrycy i dodatku.



Rys. 15. Zależność między wytrzymałością na zginanie a wytrzymałością na ściskanie zaprawy cementowej CM z dodatkiem: a) popiołu RHA, b) SCBA, c) mączki LS

5.16. Wyniki analiz morfologii powierzchni z popiołami

Zdjęcia SEM (Rys.16) wykazały, że SCBA to drobniejsze cząstki, które reagują szybciej niż RHA, poprawiając właściwości zaprawy. Wskaźnik aktywności wytrzymałościowej i zapotrzebowanie na wodę zależą od rozdrobnienia materiału. Próbkę RHA z wapnem i SCBA mają gładkie powierzchnie. Po dodaniu domieszki APA do matrycy cementu i popiołów powierzchnia ma mikrostrukturę w kształcie igieł kryształów. Naturalne popioły wypełniają pory powierzchni. Można również zauważyć, że dodatek domieszki APA pozostawia duże pustki powietrzne.



Rys. 16. Fotografie SEM: a) zaprawy cementowej z dodatkiem 15% popiołu RHA, b) zaprawy cementowej z dodatkiem 15% SBA

Rozdział 6. Podsumowanie, wnioski

Niniejszy rozdział przedstawia kompleksowe podsumowanie dyskusji i analiz wynikających z wyników badań. Wyniki te są zgodne z celami i zadaniami nakreślonymi na początku pracy.

Prace badawcze zostały podzielone na dwie części. Pierwsza część dotyczyła dodania do zaprawy włókien takich jak juta, sizal i polipropylen. Druga część dotyczyła wykorzystania popiołu z łusek ryżu (RHA), popiołu z wytłoków trzciny cukrowej (SCBA) i mączki wapiennej jako częściowego zamiennika

cementu. Wyjaśniono wpływ wszystkich zastosowanych dodatków. Na tej podstawie można wyciągnąć następujące wnioski:

- Włókna jutowe i polipropylenowe mają niewielki wpływ na zawartość powietrza w zaprawie. Włókna sisalowe zwiększyły zawartość powietrza w zaprawie cementowej i cementowo-wapiennej. Wyjaśnieniem może być pochłaniająca wodę hydrofilowa celuloza włókna sisalowego.

- Włókna wpływają na konsystencję zapraw. Włókna jutowe i polipropylenowe zmniejszają konsystencję o 5%. Próbkę zapraw cementowych C-P2 i CA-S2 wykazują wyższy rozptyw. Wzrost ilości krótszych polipropylenowych włókien mógł wpłynąć na dynamikę interakcji C-P2, a zastosowanie domieszki APA w zaprawie CA-S2 i włókien sisalowych powoduje poprawę konsystencji. Test konsystencji stożkiem Novikova daje spójne wyniki dla włókien jutowych i polipropylenowych, zgodne z wynikami badań stolikiem rozptywowym.

- Dodanie 1% i 2% włókien jutowych zwiększa wytrzymałość na ściskanie odpowiednio o 11% i 15% po 28 dniach w porównaniu do próbki referencyjnej. Po 28 dniach 1% dodatku włókien polipropylenowych i sisalowych zwiększa wytrzymałość o 10%. Dodatek domieszki APA zmniejsza wytrzymałość zapraw na ściskanie. Ze względu na wprowadzone do mieszanki powietrze, APA wydaje się negować korzyści wzmocniające innych mieszanek zapraw wzmocnionych włóknami.

- Wytrzymałość na zginanie znacznie wzrasta w przypadku zapraw z włóknami jutowymi w ilości 1% i 2% po 28 dniach utwardzania. Zaprawa cementowa ma o 10% i 38% wyższą wytrzymałość na zginanie niż próbka referencyjna. Po 28 dniach dodatek 1% i 2% włókien jutowych zwiększa wytrzymałość na zginanie zaprawy cementowo-wapiennej o 37% i 40%. Włókna sisalowe z powodzeniem wzmocniają zaprawę cementowo-wapienną. Wytrzymałość na zginanie wzrasta o 7,5% i 10% dla 1% i 2% włókien polipropylenowych po 56 dniach.

- Wyniki strukturalne MIP i SEM pokazują, że włókno sisalowe w zaprawie cementowej ma gorszą przyczepność do matrycy cementowej niż inne włókna. Powoduje to 80% wzrost porów o większych rozmiarach (1-100 μm). Jednak drobniejsze cząstki wapna w matrycy cementowo-wapiennej sprzyjają adhezji i wiązaniu między włóknami sisalowymi a matrycą.

- Zastąpienie cementu 15% RHA lub 15% SCBA powoduje zmniejszenie rozptywu o 10% i 8% przy wzroście zapotrzebowania na wodę, zgodnie z badaniami stolikiem rozptywowym, jednak ze względu na wyższy ciężar właściwy RHA i zastosowanie domieszki APA zmniejsza zużycie wody o 40%, podczas gdy większe ilości popiołu z wylóków z trzciny cukrowej zmniejsza go o 23%.

- Konsystencja badana stożkiem Novikowa jest mniejsza dla zapraw C-RHA5, C-RHA10 i C-RHA15 w porównaniu do referencyjnej zaprawy cementowej (odpowiednio 28%, 35% i 44%). Spójność zmniejsza się przy maksymalnej wymianie 15%. Konsystencja zaprawy cementowo-wapiennej spada do 36% i 34% dla CL-RHA15 i CL-SCBA15, zwiększając zużycie wody.

- Zamienniki SCM zwiększają zawartość powietrza we wszystkich testach. Dodatek 15% SCBA zwiększa zawartość powietrza w zaprawie cementowej do 22%. Próbki C-RHA5 i CL-RHA15 miały o 37% i 44% większą zawartość powietrza. Ten wzrost zawartości powietrza wskazuje, że zastąpienie popiołu zmieniło ilość powietrza wprowadzoną do zaprawy.

- Po 28 dniach, dodatek 10% i 5% RHA zwiększył wytrzymałość na ściskanie zapraw o 10% i 40% w próbkach CA-RHA5 i CA-RHA10. W próbkach zapraw CA-SBA5, CA-SBA10 i CA-SBA15 wytrzymałość na ściskanie wzrosła 12%, 5% i 28% po 28 dniach. Próbka z dodatkiem 10% SCBA skutkuje 80% poprawą wytrzymałości zaprawy cementowej. Może to być spowodowane tym, że popiół z wylóków trzciny cukrowej poprawia przyczepność mieszanki w matrycy cementowej.

- Próbkę zaprawy cementowo-wapiennej z dodatkami popiołów wykazują różnice w wytrzymałości na ściskanie po 56 i 90 dniach. Próbka CL-RHA5 z 2% dodatkiem ma większą wytrzymałość na ściskanie niż próbka z 10% dodatkiem. Próbka CL-SBA5 z 5% zamiennikiem SCBA wykazuje o 28% wyższą wytrzymałość na ściskanie po 90 dniach. Gdy poziom zastąpienia wzrasta do 15% w próbce CL-SBA15, wytrzymałość wzrasta o 34% po 2 dniach, a następnie spada do 11%, 12% i 2% po 7, 28 i 56 dniach.

- Próbkę CL-RHA5 i CL-RHA10 wykazały 31%, 75% i 31% wzrost wytrzymałości na zginanie po 28, 56 i 90 dniach w porównaniu do referencyjnej zaprawy cementowo-wapiennej. Wydłużenie czasu hydratacji zapraw CL-SBA5 i CL-SBA10 do 90 dni zwiększyło wytrzymałość na zginanie odpowiednio o 15% i 6%. Ta lepsza wytrzymałość w czasie twardnienia pasuje do materiałów zastępujących cement. Po 28, 56 i 90 dniach 15% SCBA zwiększa wytrzymałość zaprawy cementowej na zginanie o 18%, 11% i 2%. Próbkę z dodatkiem mączki wapiennej C-LS5 i C-LS10 wykazują podobną wytrzymałość w porównaniu do referencyjnej zaprawy cementowej. W próbce zaprawy cementowej z dodatkiem APA CA-RHA15 i CA-SCBA15 zawartość powietrza w próbce APA spada do 10% i 13%.

- Badania porozymetryczne MIP wykazały, że dodanie popiołu z łusek ryżowych (RHA) i mączki wapiennej zwiększa wielkość porów 0,5-1 μm we wszystkich rodzajach zapraw. Efekt ten jest silniejszy w przypadku zaprawy cementowo-wapiennej i zwiększa się wraz z domieszką APA (0,5-10 μm). Dodatek popiołu SCBA zwiększył pory o mniejszej średnicy. Po dodaniu do zapraw cementowo-wapiennych, popioły RHA i SCBA zwiększają średni promień porów odpowiednio do 0,43 μm i 0,33 μm . Dodatek popiołu SCBA w zaprawach cementowych zmniejsza średni promień porów do 0,10 μm , podczas gdy mączka wapienna (LP) zwiększa go do 0,22 μm . W zaprawie cementowej CA z domieszką APA dodanie popiołu RHA zwiększyło średni promień porów do 8,80 μm , podczas gdy dodanie popiołu CBA lub mączki wapiennej zmniejszyło go odpowiednio do 0,71 μm i 1,93 μm .

- Wyniki analiz skaningowych SEM pokazały, że pod względem mikrostruktury materiału zaprawa cementowo-wapienna jest drobniejsza niż zaprawa cementowa. Zaprawa cementowa z domieszką APA ma mocną mikrostrukturę "igłową" po stwardnieniu zapraw, domieszka APA wspomaga wchłanianie wody i rozszerzanie szczelin. Zastosowanie popiołu SCBA prowadzi do mniejszej porowatości niż RHA. Drobniejsza matryca wzmacnia materiał. Dla zapraw z dodatkiem mączki wapiennej i popiołu z biomasy wytrzymałości na ściskanie i zginanie wzrosły prowadząc do jednorodnej powierzchni i drobniejszych porów.

- Można wyciągnąć wniosek o przewadze naturalnych dodatków odpadowych nad syntetycznymi. Przy ilości włókien juty 1% i 2% oraz popiołu SCBA 10% poprawiają oczekiwane właściwości w porównaniu z polipropylenem i mączką wapienną.

Jyoti Rashmi Nayak
11/12/2023