MAREK ZIELIŃSKI¹⁾

WPŁYW DODATKU POPIOŁÓW LOTNYCH Z KOTŁÓW FLUIDALNYCH NA WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI ZAPRAW I BETONÓW²⁾

STRESZCZENIE. Przeprowadzone badania miały na celu określenie wpływu popiołów lotnych z kotłów fluidalnych na podstawowe właściwości mechaniczne zapraw i betonów konstrukcyjnych oraz wstępną ocenę możliwości zastosowania popiołów lotnych z kotłów fluidalnych jako aktywnego dodatku do betonu. Badaniami objęto zaprawy oraz betony konstrukcyjne, w których część cementu zastąpiona została popiołem lotnym pochodzącym z dwóch różnych kotłów fluidalnych. W przypadku zapraw mieszanki wykonano z 20 i 35 % zastąpieniem masy cementu, natomiast w przypadku betonów zastąpienie cementu wynosiło odpowiednio 20, 30 i 40 %. W przypadku zapraw, po upływie odpowiednio 7, 28 i 90 dni, przeprowadzono badania dynamicznego modułu sprężystości, wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu oraz wytrzymałości na ściskanie, natomiast w przypadku betonów konstrukcyjnych wykonano wyłącznie badania wytrzymałości na ściskanie. Analizie poddano wpływ zastosowanych dodatków, ich zawartości i warunków dojrzewania próbek na badane właściwości. Stwierdzono istotny wpływ dodatku popiołów fluidalnych na wytrzymałość i właściwości sprężyste badanych próbek.

1. WPROWADZENIE

Możliwości zastosowania popiołów lotnych z kotłów pyłowych do produkcji cementu i betonu są dość dobrze poznane. Niewiele natomiast wiadomo na temat możliwości takiego wykorzystania popiołów lotnych z kotłów fluidalnych. Technologia spalania

¹⁾ dr inż. – Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa

²⁾ praca finansowana w ramach Projektu Badawczo - Rozwojowego ze środków budżetowych na naukę w latach 2006-2008

węgla w kotłach fluidalnych wprowadzona została w energetyce polskiej na szeroką skalę w roku 1997. W porównaniu do spalania węgla w kotłach pyłowych, poprzez bezpośrednią ingerencję w proces spalania, polegającą na stosowaniu sorbentów siarki oraz utrzymaniu niedoboru tlenu i ograniczeniu temperatury w pierwotnej strefie spalania, uzyskano obniżenie emisji uciążliwych dla środowiska zanieczyszczeń, takich jak związki siarki i azotu. Nazwa popiół z kotłów fluidalnych (ang. *fluidized bed combustion ash*) pochodzi od wspomnianej wyżej technologii spalania pyłu węglowego z dodatkiem sorbentu w kotłach ze złożem fluidalnym. Ze względu na prędkość przepływu strumienia gazu w komorze spalania, skład frakcyjny materiału stanowiącego warstwę fluidalną oraz ciśnienie panujące w komorze paleniskowej kotły fluidalne dzielimy cztery rodzaje [1]. Obecnie najczęściej stosowaną na świecie technologią jest spalanie w kotłach z cyrkulacyjnym paleniskiem atmosferycznym (CFBC ang. *Circulating Fluidized Bed Combustion*). Popioły powstające w kotłach fluidalnych stanowią mieszaninę popiołu, produktów odsiarczania (najczęściej anhydrytu), aktywnego CaO oraz pewnej ilości węglanu wapnia [2 – 5]. Obecność powyższych składników sprawia, że popioły lotne z kotłów fluidalnych znacznie różnią się właściwościami fizyko-chemicznymi i składem fazowym od popiołów lotnych powstających w paleniskach pyłowych, które wykorzystywane są z powodzeniem jako dodatek do cementów mieszanych oraz do produkcji betonu towarowego. Wysokie zawartości SO₃, CaO, i wysokie straty prażenia, sprawiają, że popioły lotne z kotłów fluidalnych nie spełniają wymagań normy PN-EN 450 [6], co znacznie utrudnia ich wykorzystanie, a tym samym są one w dużej mierze gromadzone na składowiskach powierzchniowych, powodując szereg uciążliwości i zagrożeń dla środowiska.

Stopniowe, globalne wyczerpywanie tradycyjnych surowców do produkcji betonów oraz stale wzrastająca ilość odpadów z kotłów fluidalnych (przewiduje się, że ilość odpadów ze spalania fluidalnego w najbliższych latach wzrośnie ponad trzykrotnie w stosunku do roku 2000 [7]), które wymagają racjonalnego wykorzystania stanowią problemy, z jakimi boryka się wiele krajów na świecie. Okoliczności powyższe stanowią dziś silny bodziec do rozwoju nowych technologii, dzięki którym możliwe będzie oszczędzanie naturalnych złóż surowców poprzez zastępowanie ich materiałami odpadowymi. Opracowanie przemysłowej technologii wykorzystania popiołów lotnych pochodzących z kotłów fluidalnych w betonach jest fragmentem tych działań, ale wymaga szczegółowego poznania właściwości betonów wykonanych z ich dodatkiem.

Wpływ popiołów lotnych z kotłów fluidalnych na wytrzymałość betonu jest znany jedynie fragmentarycznie. Znane są prototypowe zastosowania aktywowanych popiołów z kotłów CFBC w betonach z określoną domieszką chemiczną przy zawartości popiołów ograniczonej do 20 % masy cementu. Autorzy publikacji [8] i [9] przedstawili wpływ popiołów fluidalnych na podstawowe właściwości betonów konstrukcyjnych. W rezultacie przeprowadzonych badań stwierdzili znaczny wzrost wytrzymałości betonów na ściskanie i na rozciąganie przy rozłupywaniu. Na uwagę zasługuje również wysoka wczesna wytrzymałość betonów wykonanych z popiołem z kotłów fluidalnych. Należy przypuszczać, że związana jest ona z odmiennymi właściwościami fizyko-chemicznymi popiołów fluidalnych w stosunku do popiołów z kotłów pyłowych, natomiast wysoka wytrzymałość z aktywnością pucolanową

i efektem zagęszczenia mieszanki. Spostrzeżenia powyższe, nie zostały jednak dotychczas dokładnie wyjaśnione. Podobne wyniki wzrostu wytrzymałości uzyskał autor we wstępnych badaniach betonów i zapraw wykonanych z dodatkiem aktywowanych mechanicznie popiołów lotnych pochodzących z kotłów fluidalnych [10 – 11]. Wyniki te wskazały, że nawet zastąpienie 50 % cementu przez popioły z kotłów fluidalnych może znacznie wpłynąć na polepszenie właściwości mechanicznych betonu. Wpływ popiołów lotnych fluidalnych z kotłów CFBC na wytrzymałość na ściskanie zapraw normowych przedstawiono w publikacji [12]. Autorzy badań przygotowali cementy, w których klinkier portlandzki w ilości odpowiednio 20 % oraz 35 % zastąpiono popiołem fluidalnym i wspólnie przemielono. Uzyskane wyniki badań wykazały, że zaczyny przygotowane z tych cementów charakteryzuje stosunkowo szybki początek i koniec wiązania. Zaprawy normowe wykonane na cementach z popiołami z kotłów fluidalnych wykazały szybki przyrost wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu oraz wytrzymałości na ściskanie.

Celem podjętych badań było poznanie wpływu popiołów lotnych ze spalania węgla w kotłach fluidalnych ze złożem cyrkulacyjnym na podstawowe parametry mechaniczne betonu konstrukcyjnego tj. wytrzymałość i sprężystość oraz ocena przydatności badanych popiołów jako dodatku do betonu. Ponadto, zróżnicowanie warunków dojrzewania i rodzaju użytych cementów miało na celu odpowiedzieć na pytanie, czy i w jakim stopniu wpływają one na wytrzymałość i sprężystość zapraw wykonanych z dodatkiem popiołów lotnych fluidalnych.

2. MATERIAŁY ZASTOSOWANE DO BADAŃ

2.1. CEMENTY I POPIOŁY LOTNE

Do wykonania zapraw i betonów konstrukcyjnych zastosowano powszechnie stosowane cementy: portlandzki CEM I 32,5R i hutniczy CEM III/A 32,5N oraz popioły lotne pochodzące z kotłów fluidalnych ze złożem cyrkulacyjnym pracujących w EC Żerań (FLW) i EC Katowice (FLK) oraz z kotła pyłowego w EC Siekierki (FAS). Zastosowane do badań popioły z kotłów fluidalnych zostały poddane tzw. aktywacji mechanicznej metodą „Elektrostatycznego Mechanicznego Dezintegratora Cząstek” (EMDC) [13]. Aktywacja polegająca na homogenizacji popiołu i rozbiciu agregatów ziaren przez uderzenia jest procesem całkowicie mechanicznym. Skład chemiczny oraz właściwości fizyczne popiołów lotnych i cementu podano w tablicach 1 i 2.

Tablica 1. Skład chemiczny badanych popiołów i cementu
Table 1. Chemical composition of investigated fly ash and cement

| Skład | Zawartość [% masy] | | | |
|----------------------------------|--------------------|-------|-------|-------|
| | FLW | FLK | FAS | CEM I |
| SiO ₂ | 34,36 | 47,46 | 50,08 | 20,38 |
| Al ₂ O ₃ | 20,82 | 23,39 | 20,70 | 5,40 |
| CaO | 12,22 | 7,48 | 6,04 | 63,04 |
| SO ₃ | 6,58 | 3,56 | 0,47 | 2,50 |
| Chlorki | 0,12 | 0,08 | 0,02 | 0,02 |
| CaO wolny | 1,79 | 0,35 | 0,40 | 0,84 |
| MgO | 4,02 | 3,10 | 3,69 | 1,74 |
| Fe ₂ O ₃ | 6,29 | 7,53 | 6,79 | 2,82 |
| Na ₂ O _{ek.} | 2,57 | 2,65 | 2,70 | 0,68 |
| Strata prażenia | 11,77 | 3,30 | 7,74 | 1,66 |
| Zawartość węgla | 3,90 | brak | 7,18 | brak |

Tablica 2. Właściwości fizyczne popiołów
Table 2. Physical properties of fly ashes

| Właściwość | Oznaczenie próbki | | |
|-------------------------------------|-------------------|------|-----------------|
| | FLW | FLK | FAS |
| Miałkość [% masy] | 16,6 | 15,2 | 42,1 |
| Gęstość [kg/m ³] | 2500 | 2570 | 2160 |
| Stałość objętości [mm] | 0,0 | 0,5 | 0,5 |
| Wskaźnik aktywności pucolanowej [%] | 28 dni | 116 | 129 |
| | 90 dni | 102 | 113 |
| | | | brak oznaczenia |

2.2. KRUSZYWA

W zależności od rodzaju badanych materiałów (zaprawy, betony konstrukcyjne) zastosowano różnego rodzaju kruszywa:

- betony konstrukcyjne (kruszywo do 16 mm): piasek naturalny, frakcji; 0-2 mm, grys bazaltowy, frakcji; 2-8 mm oraz 8-16 mm,
- zaprawy cementowe (kruszywo do 2 mm): piasek normowy CEN, zgodny z wymogami normy PN-EN 196-1:1996.

2.3. DOMIESZKI

Zastosowano następujące domieszki:

- do zaprawy – kompleksowa domieszka uplastyczniająco-napowietrzającą BETOSTAT,
- do betonu konstrukcyjnego – domieszka upłynniająca WOERMENT FM 787 – na bazie eteru polikarboksylogowego.

2.4. OCENA ZASTOSOWANYCH MATERIAŁÓW

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono przekroczenie wymagań normy PN-EN 450 [6] dotyczących składu chemicznego popiołów, szczególnie w przypadku popiołów lotnych z kotłów fluidalnych pochodzących z EC Żerań (FLW). Przekroczenie dopuszczalnych zawartości dotyczyło: bezwodnika kwasu siarkowego, wolnego wapna oraz strat prażenia. W przypadku popiołu fluidalnego z EC Katowice (FLK) stwierdzono jedynie przekroczenie zawartości bezwodnika kwasu siarkowego (tabl. 1).

Na podstawie badań właściwości fizycznych stwierdzono, że popioły fluidalne spełniają wymagania normy PN-EN 450 [6] dotyczące miąższości, stałości objętości oraz wskaźnika aktywności pucolanowej (tabl. 2). Oznaczenie pęcznienia zaczynów cementowych wykonane metodą Le Chateliera w proporcjach: 50 % dodatku i 50 % cementu wyniosło dla popiołów fluidalnych FLK i FLW odpowiednio 0,5 i 0,0 mm, co jest wynikiem znacznie poniżej dopuszczalnej granicy, za jaką uznaje się 10 mm. Wynik zaprzeczył obawom nadmiernego pęcznienia zaczynów wynikającym z nadmiernej ilości wolnego tlenu wapnia (FLW), a także potwierdził dotychczasowe przypuszczenia o wysokiej reaktywności tlenu wapnia zawartego w popiołach fluidalnych i jego szybkemu uwodnieniu do postaci wodorotlenku [2]. Szybkie uwodnienie wolnego tlenu wapnia zapobiega procesom pęcznienia związanym z opóźnioną reakcją tlenu wapnia, która ma miejsce w popiołach lotnych pochodzących z kotłów pyłowych.

3. PRÓBKI DO BADAŃ

3.1. ZAŁOŻENIA OGÓLNE

Realizacja badań wymagała przygotowania z omówionych powyżej materiałów wyjściowych, kilku serii mieszanek, które podzielono ogólnie na: zaprawy i betony konstrukcyjne. Wszystkie serie próbek zaprojektowane zostały z dodatkiem popiołu fluidalnego, który dodawano przez zastąpienie części cementu. Do celów porównawczych, wykonano kilka serii próbek z dodatkiem popiołów z kotłów pyłowych. Do wszystkich serii wykonano mieszanki porównawcze, tzw. świadki, stosując cement portlandzki, bez dodatku popiołu.

3.2. PRÓBKİ ZAPRAW

Wykonano 2 serie próbek zapraw, oznaczając je A i B. Seria A wykonana została z cementu portlandzkiego CEM I 32,5R i różnych dodatków, przy zachowaniu stałego współczynnika wodno-spoiwowego, $w/s=0,5$. Seria B wykonana została z cementu hutniczego CEM III/A 32,5 z dodatkiem popiołu fluidalnego z EC Żerań (FLW), przy stałym współczynniku $w/s=0,5$. W stosunku do zaprawy normowej (PN-EN 196-1 [14]) modyfikacja składu zapraw polegała na zastąpieniu części cementu popiołem lotnym oraz dodaniu domieszki uplastyczniająco-napowietrzającej, w celu poprawy konsystencji mieszanek.

Szczegółowe zestawienie składu badanych zapraw przedstawiono w tablicach 3 i 4. Liczby oraz symbole znajdujące się w opisie każdej z serii próbek informują o procentowej zawartości i rodzaju zastosowanego dodatku w mieszance, na przykład FLW20, oznacza, że zastąpiono 20 % cementu popiołem fluidalnym pochodzącym z EC Żerań, a FLW35 zastąpienie 35 % cementu popiołem.

Tablica 3. Skład zapraw serii A wykonanych z cementu CEM I
Table 3. The composition of mortars prepared with CEM I (series A)

| Oznaczenie próbek | Cement | Dodatek | Piasek | Woda | Betostat | w/s |
|-------------------|---------------|---------|--------|------|----------|-------|
| | Zawartość [g] | | | | | |
| CEM I | 450 | 0 | 1350 | 225 | 1,8 | 0,50 |
| FLW20 | 357 | 89 | 1339 | 223 | 1,8 | 0,50 |
| FLW35 | 289 | 155 | 1332 | 222 | 1,8 | 0,50 |
| FLK20 | 358 | 89 | 1341 | 223 | 1,8 | 0,50 |
| FLK35 | 289 | 156 | 1334 | 222 | 1,8 | 0,50 |
| FAS20 | 355 | 89 | 1331 | 222 | 1,8 | 0,50 |
| FAS35 | 285 | 154 | 1317 | 219 | 1,8 | 0,50 |

Tablica 4. Skład zapraw serii B wykonanych z cementu CEM III
Table 4. The composition of mortars prepared with CEM III (series B)

| Oznaczenie próbek | Cement | Dodatek | Piasek | Woda | Betostat | w/s |
|-------------------|---------------|---------|--------|------|----------|-------|
| | Zawartość [g] | | | | | |
| CEM III | 450 | 0 | 1350 | 225 | 1,8 | 0,50 |
| FLW20 | 358 | 89 | 1341 | 223 | 1,8 | 0,50 |
| FLW35 | 289 | 156 | 1334 | 222 | 1,8 | 0,50 |

Zaprawy wykonano w mieszarce laboratoryjnej do przygotowywania zapraw normowych. Czas oraz prędkości mieszania poszczególnych składników zapraw dostosowano do wymagań normy PN-EN 196-1 [14]. Po wymieszaniu składników, mieszanki ułożono w formach o wymiarach $40 \times 40 \times 160$ mm i zagęszczono na stole wibracyjnym, wyrównując powierzchnią warstwę packą. Próbki przechowywane były w formach, pod przykryciem z folii, przez okres 24 godzin w temperaturze $18-20$ °C i wilgotności względnej 90-95 %. Następnie próbki rozformowano i podzielono na dwie grupy. Grupa pierwsza dojrzewała przez okres odpowiednio: 7, 28 i 90 dni w warunkach wysokiej wilgotności 90-95% (na ruszcie w zamkniętym pojemniku z wodą) w temperaturze $18-20$ °C. Druga grupa, po 7 dniach przebywania w warunkach wysokiej wilgotności, przechowywana była do momentu przeprowadzenia badań w warunkach powietrzno-suchych, w pomieszczeniu o wilgotność powietrza ok. 35-45 % i temperaturze $18-20$ °C.

3.3. PRÓBKIE BETONÓW KONSTRUKCYJNYCH

Betony konstrukcyjne wykonane zostały przy zachowaniu stałego współczynnika $w/s=0,42$ oraz stałej konsystencji mieszanki. Konsystencja wszystkich projektowanych mieszanek, przy założeniu konsystencji S-1, S-2 wg PN-EN 206-1 [15], regulowana była ilością domieszki upłynniającej. Ilości domieszki upłynniającej ustalono doświadczalnie. Mieszanki wykonano w mieszarce laboratoryjnej o pojemności 20 litrów. Po zmieszaniu wszystkich składników, mieszanki ułożono w formach $100 \times 100 \times 100$ mm i zagęszczono na stole wibracyjnym. Próbki przechowywano przez 24 godziny pod przykryciem z folii, następnie rozformowano i dalej pielęgnowano w poniższych warunkach cieplno-wilgotnościowych:

- badanie po 7 dniach – 7 dni w wodzie w temp. ok. 20 °C ,
- badanie po 28 dniach – 7 dni w wodzie, a następnie 21 dni w temp. ok. 20 °C przy wilgotności $R_H > 90$ % (nad wodą przykryte folią),
- badanie po 90 dniach – 7 dni w wodzie, a następnie w temp. ok. 20 °C i wilgotności $R_H > 90$ % (nad wodą przykryte folią).

Składy mieszanek betonowych oraz podstawowe ich właściwości przedstawiono w tablicach 5 i 6.

Tablica 5. Skład mieszanek betonowych
Table 5. Concrete mix proportions

| Oznaczenie próbek | Zawartość popiołu | Cement | Dodatek | Piasek | Bazalt 2-8 mm | Bazalt 8-16 mm | Woda | FM 787 |
|-------------------|-------------------|--------|---------|--------|---------------|----------------|------|--------------------------------|
| | | | | | | | | Zawartość [kg/m ³] |
| CEM I | brak | 360 | 0 | 680 | 690 | 720 | 150 | 2160 |
| FLW20 | 20% | 286 | 72 | 676 | 686 | 715 | 149 | 2862 |
| FLW30 | 30% | 250 | 107 | 673 | 683 | 713 | 149 | 3565 |
| FLW40 | 40% | 213 | 142 | 671 | 681 | 711 | 148 | 4263 |
| FLK20 | 20% | 287 | 72 | 677 | 687 | 717 | 149 | 2150 |
| FLK30 | 30% | 250 | 107 | 674 | 684 | 714 | 149 | 3569 |
| FLK40 | 40% | 213 | 142 | 672 | 682 | 712 | 148 | 4270 |

Tablica 6. Wybrane właściwości mieszanek betonowych
Table 6. Concrete mix properties

| Oznaczenie próbek | Opad stożka [mm] | Gęstość objętościowa [kg/dm ³] |
|-------------------|------------------|--|
| CEM I | 60 | 2,58 |
| FLW20 | 20 | 2,62 |
| FLW30 | 30 | 2,63 |
| FLW40 | 40 | 2,65 |
| FLK20 | 30 | 2,62 |
| FLK30 | 40 | 2,64 |

4. OPIS, WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

4.1. PROCEDURY BADAWCZE

Zbadano wytrzymałość i moduł sprężystości próbek zapraw serii A i B, które określono na podstawie:

- dynamicznego modułu sprężystości, wyznaczonego metodą rezonansową,
- wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu, wg [14] oraz
- wytrzymałości na ściskanie, wg [14].

Badanie dynamicznego modułu sprężystości zapraw polegało na dokonaniu pomiaru podstawowej częstotliwości rezonansowej badanych próbek, przy użyciu urządzenia GrindoSonic MK5. Pomiar ten pozwala na wyznaczenie dynamicznego modułu sprężystości, w dalszej części pracy oznaczonego jako E_d . Badaniu poddawano po trzy beleczki każdej z serii próbek po upływie kolejno: 7, 28 i 90 dni dojrzewania.

Badania wytrzymałości zapraw na rozciąganie przy zginaniu wykonano po upływie: 7, 28 oraz 90 dni dojrzewania, na beleczkach o wymiarach $40 \times 40 \times 160$ mm, zgodnie z normą [14]. Badania zrealizowano przy użyciu maszyny wytrzymałościowej firmy Lloyd Instruments, typ EZ50, rejestrując wartość siły niszczącej.

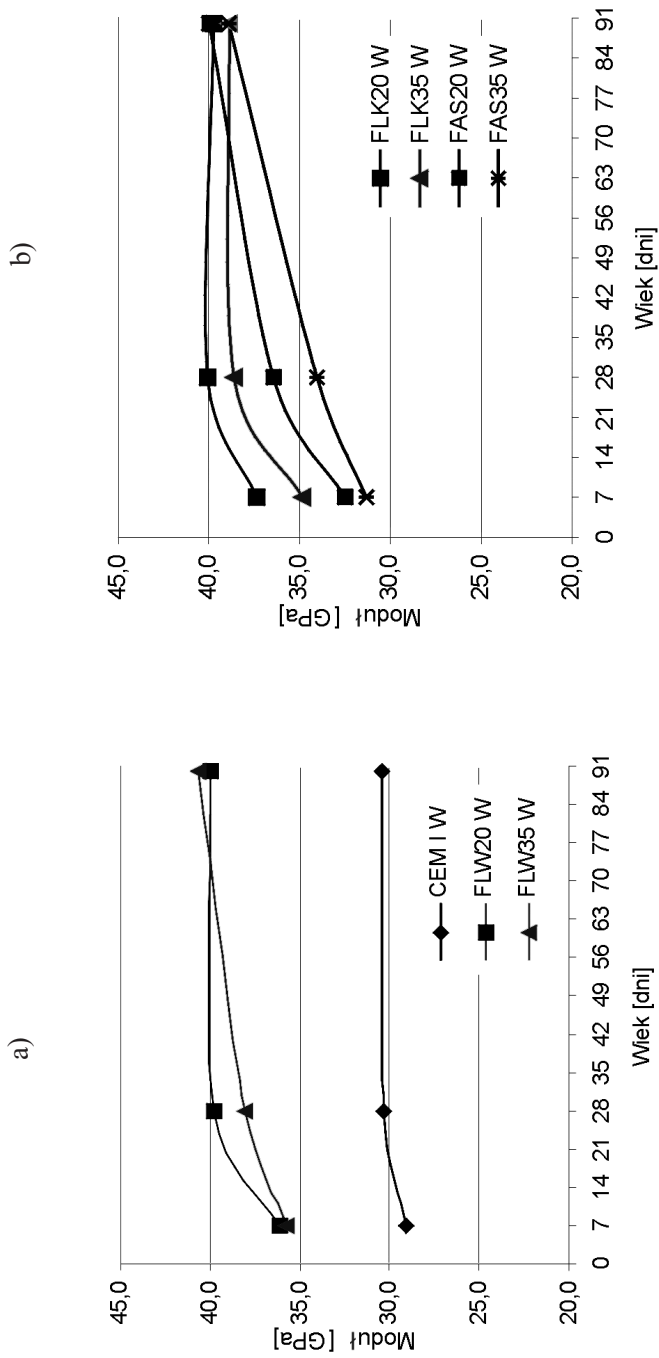
Wytrzymałość na ściskanie zapraw określono na połówkach beleczek przełamanych w czasie badań wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu. Badanie zrealizowano w prasie wytrzymałościowej stosując odpowiednie wkładki, umożliwiające przeprowadzenie pomiarów zgodnie z normą PN-EN 196-1 [14]. Badania wykonano po upływie: 7, 28 i 90 dni dojrzewania.

Badania betonów konstrukcyjnych obejmowały określenie wytrzymałości na ściskanie na kostkach sześciennych o boku 100 mm, kolejno po upływie: 7, 28 oraz 90 dni dojrzewania betonów w warunkach opisanych powyżej. Badanie przeprowadzono zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 12390-3:2001 przy użyciu prasy wytrzymałościowej o nośności 300 kN.

4.2. WYNIKI BADAŃ DYNAMICZNEGO MODUŁU SPRĘŻYSTOŚCI

Wartości średnie dynamicznego modułu sprężystości E_d zapraw serii A, dojrzewających w warunkach wysokiej wilgotności, przedstawiono na rys. 1a oraz 1b (przy oznaczeniu próbek dojrzewających w warunkach wilgotnych dodano literę W). Każdy punkt na wykresie reprezentuje średnią wartość z trzech pomiarów wykonanych na beleczkach danej serii.

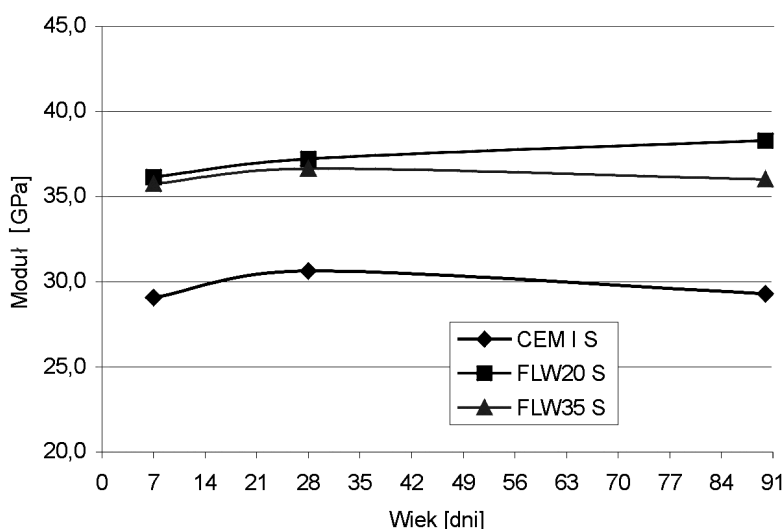
Uzyskane wyniki badań wskazują na znacznie wyższe wartości modułu sprężystości zapraw wykonanych z dodatkiem popiołów fluidalnych, w porównaniu do zaprawy porównawczej CEM I. Uzyskane wartości są średnio ok. 30 % wyższe, we wszystkich badanych okresach dojrzewania, od wartości modułu uzyskanego dla zaprawy CEM I. W przypadku zapraw z popiołami fluidalnymi najszybszy przyrost modułu zaobserwowano pomiędzy 7 a 28 dniem dojrzewania – po 28 dniach wartość modułu nie ulegała już większym zmianom, pozostając na poziomie ok. 40 GPa. Nieco inaczej zachowywały się zaprawy wykonane z dodatkiem popiołów konwencjonalnych, FAS. W tym przypadku wzrost modułu pomiędzy 7 a 90 dniem dojrzewania następował niemal liniowo, wykazując cały czas podobną tendencję wzrostową. Po upływie 90 dni, moduły sprężystości zapraw z popiołami fluidalnymi i zapraw z popiołami konwencjonalnymi były na wysokim i bardzo zbliżonym poziomie. W przypadku zaprawy porównawczej uzyskano początkowo niewielki przyrost wartości modułu, między 7 a 28 dniem dojrzewania, poczym wartość ta nie uległa dalszemu wzrostowi pozostając na poziomie 30 GPa, czyli blisko 30 % mniej niż moduł sprężystości zapraw z popiołami fluidalnymi.



Rys.1. Dynamiczny moduł sprężystości E_d w funkcji wieku zapraw serii A przechowywanych w warunkach wysokiej wilgotności (skład wg tabl. 3)

Fig. 1. Dynamic modulus of elasticity E_d of mortars stored in high humidity conditions - series A (table 3)

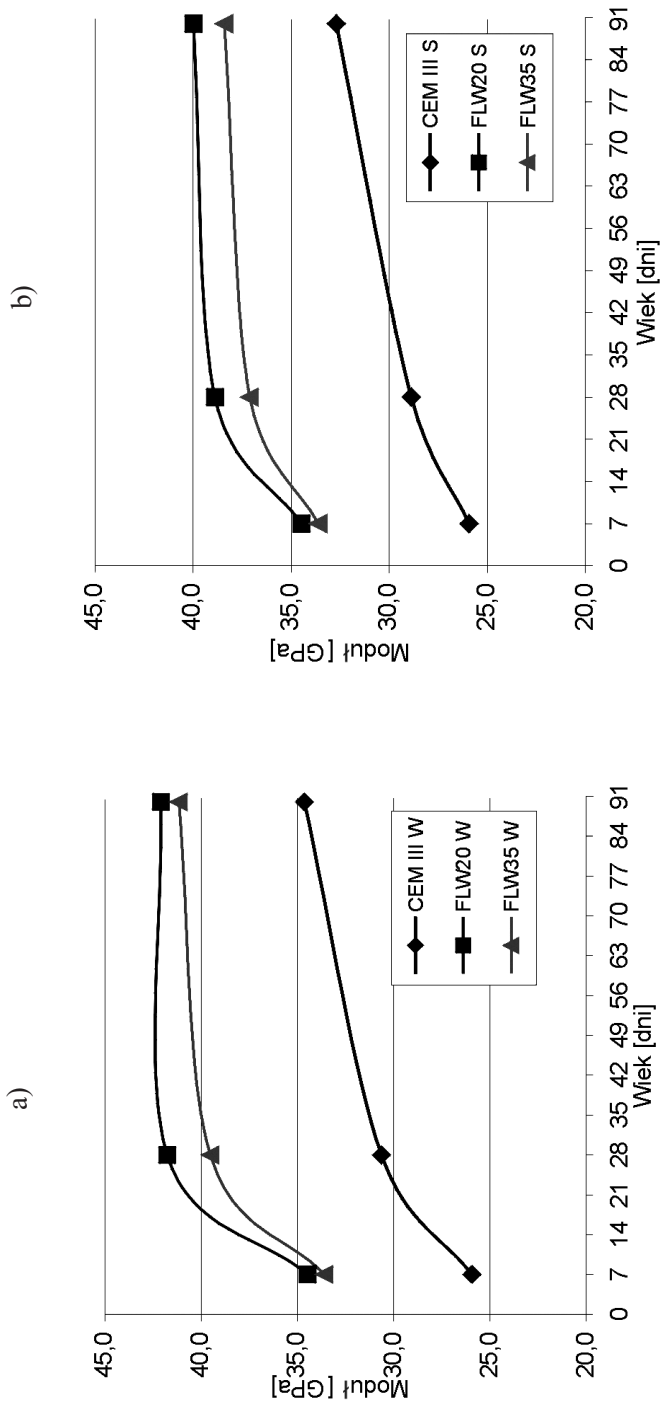
W przypadku zapraw serii A przechowywanych w warunkach powietrzno-suchych, $R_H = 35-45\%$, zaobserwowano niewielki wzrost dynamicznego modułu sprężystości pomiędzy 7 a 90 dniem dojrzewania zapraw. Uzyskane średnie wyniki badań przedstawiono na rys. 2. (dodatkowa litera S przy oznaczeniu próbek). Podobnie, jak w przypadku zapraw przechowywanych w warunkach wysokiej wilgotności, również w tym przypadku, moduł sprężystości zapraw wykonanych z dodatkiem popiołów fluidalnych był znacznie wyższy (ok. 20-25 %) od modułu zaprawy porównawczej. Moduł sprężystości zapraw przechowywanych w warunkach powietrzno-suchych okazał się po 90 dniach nieco niższy (ok. 5 %) od modułu tych samych zapraw przechowywanych w warunkach wilgotnych. Rozrzutu wyników w przypadku obu serii nie przekraczał 2 %.



Rys.2. Dynamiczny moduł sprężystości E_d w funkcji wieku zapraw serii A przechowywanych w warunkach powietrzno-suchych (skład wg tabl. 3)

Fig.2. Dynamic modulus of elasticity E_d of mortars stored in air-dry conditions - series A (table 3)

Wartości E_d zapraw serii B, wykonanych z cementu CEM III, dojrzewających w różnych warunkach wilgotnościowych, przedstawiono na rys. 3a i 3b. W obu przypadkach uzyskano podobne wartości oraz przebieg zmienności modułu sprężystości. Podobnie, jak dla zapraw wykonanych z cementu CEM I, stwierdzono znacznie wyższe moduły sprężystości zapraw wykonanych z dodatkiem popiołów w stosunku do zaprawy porównawczej CEM III oraz nieco niższe wartości modułu w przypadku zapraw przechowywanych w warunkach powietrzno-suchych. Niższe wartości modułu wynikały prawdopodobnie z różnej masy próbek: próbki przechowywane w warunkach powietrzno suchych zawierały mniej wody, co wpłynęło na ich gęstość objętościową, której wartość wpływa na wynik dynamicznego modułu sprężystości.



Rys.3. Dynamiczny moduł sprężystości E_d w funkcji wieku zapraw serii B (skład wg tabl. 4) przechowywanych:

a) w warunkach wysokiej wilgotności,

b) w warunkach powietrzno-suchych

Fig.3. Dynamic modulus of elasticity E_d of the series B mortars (table 4) stored in:

a) high humidity conditions,

b) air-dry conditions

Zaprawy wykonane z cementu CEM III, w porównaniu do zapraw wykonanych z cementu CEM I, wykazują inny przebieg zmienności modułu sprężystości w czasie. Zaobserwowano niższą wartość tego modułu w zaprawie porównawczej CEM III po upływie 7 dni oraz stały wzrost modułu pomiędzy 7 a 90 dniem – niezależnie od warunków, w jakich zaprawy te dojrzewały.

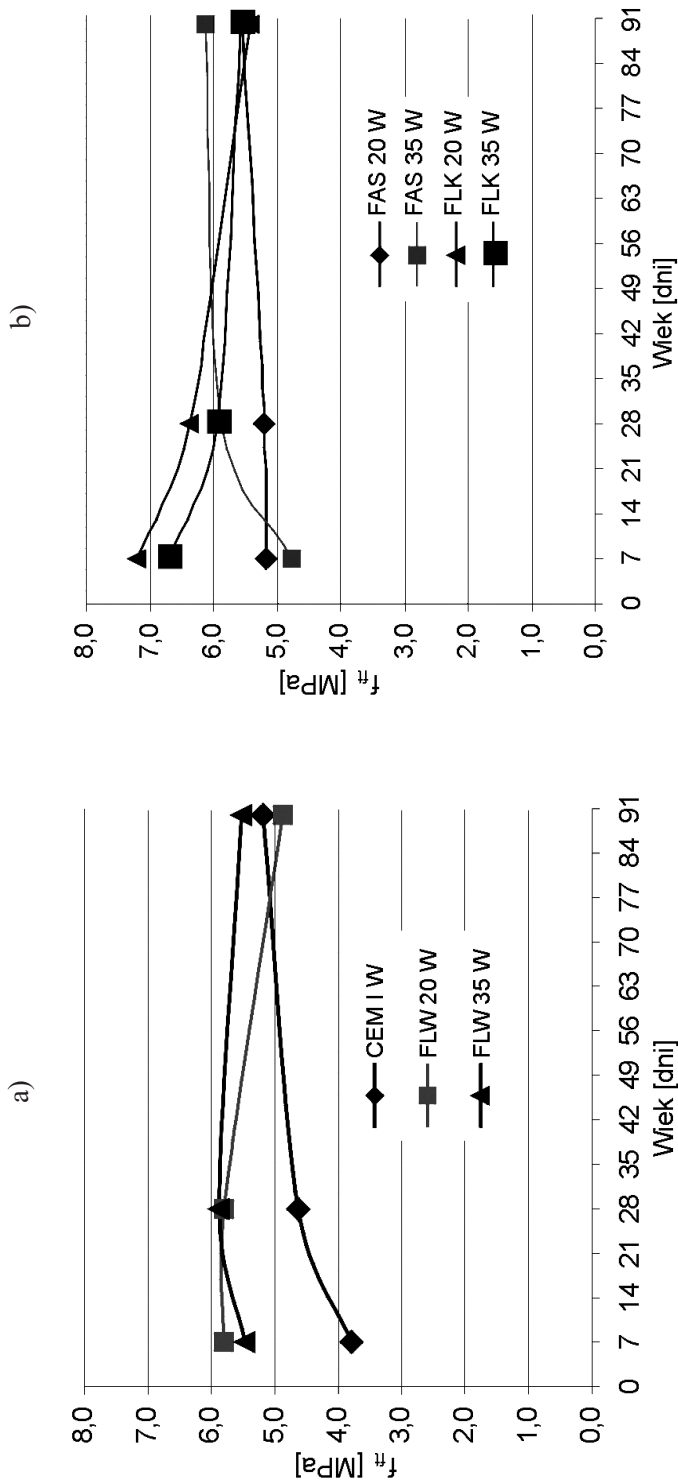
4.3. WYNIKI BADAŃ WYTRZYMAŁOŚCI NA ROZCIĄGANIE PRZY ZGINANIU

Badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu wykonano na beleczkach, na których wcześniej określono metodami nieniszczącymi wartości dynamicznego modułu sprężystości. Uzyskane wyniki badań zobrazowano w postaci wykresów, przedstawiających wartości średnie wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu f_{ft} beleczek, przechowywanych w różnych warunkach wilgotnościowych, w funkcji czasu.

Na rysunkach 4a i 4b przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu f_{ft} zapraw serii A przechowywanych w warunkach wysokiej wilgotności.

Zaobserwowano znacznie wyższą (nawet 40 - 50 %) 7 dniową wytrzymałość zapraw wykonanych z dodatkiem popiołów fluidalnych w porównaniu do zaprawy kontrolnej CEM I oraz zapraw wykonanych z dodatkiem popiołów konwencjonalnych FAS. Analizując wyniki badanych zapraw w funkcji wieku, stwierdzono odmienny przebieg zmienności wytrzymałości zapraw wykonanych z dodatkiem popiołów fluidalnych w stosunku do zaprawy CEM I oraz zapraw z dodatkiem popiołów konwencjonalnych. W przypadku prawie wszystkich zapraw z popiołami fluidalnymi zaobserwowano spadek wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu w stosunku do wytrzymałości ocenionej po 7 dniach. Spadek mieścił się w granicach 1,5 MPa, czyli był większy od rozrzutu wyników, który wynosił ok. 0,4 - 0,6 MPa. W przypadku zaprawy porównawczej oraz zapraw wykonanych z popiołami konwencjonalnymi zanotowano niższe wartości po 7 dniach oraz odmienną w czasie tendencję, polegającą na stałym wzroście wytrzymałości. Takie zachowanie się badanych materiałów doprowadziło do zrównania wytrzymałości wszystkich badanych zapraw po 90 dniach dojrzewania na poziomie 5 - 6 MPa.

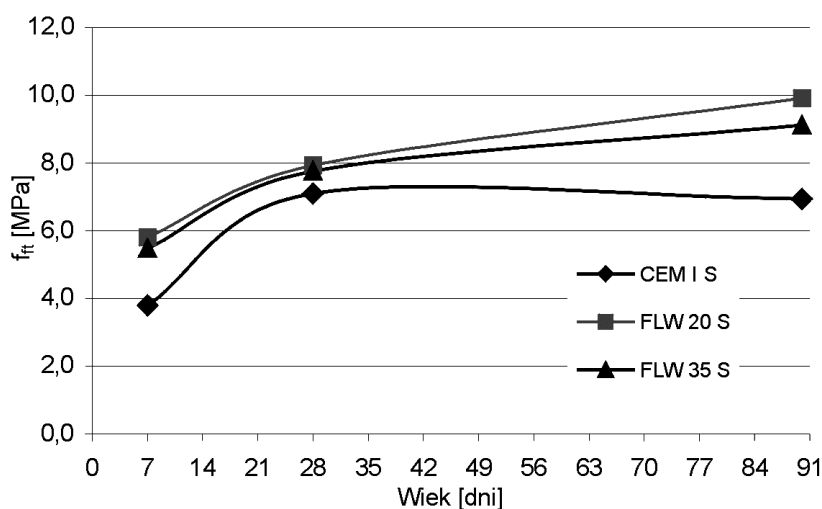
Odmienne zachowanie w czasie, w stosunku do zapraw przechowywanych w warunkach wysokiej wilgotności, wykazały te same zaprawy przechowywane w warunkach powietrzno-suchych. Zaobserwowany z upływem czasu spadek wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu próbek z popiołami fluidalnymi przechowywanych w warunkach wysokiej wilgotności, nie znalazł odzwierciedlenia w przypadku tych samych próbek przechowywanych w warunkach powietrzno-suchych. Uzyskane wyniki badań zapraw serii A przechowywanych w takich właśnie warunkach przedstawiono na rysunku 5.



Rys.4. Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu w funkcji wieku zapraw serii A (skład wg tabl. 3)

przechowywanych w warunkach wysokiej wilgotności

Fig.4. Bending strength of mortars stored in high humidity conditions – series A (table 3)

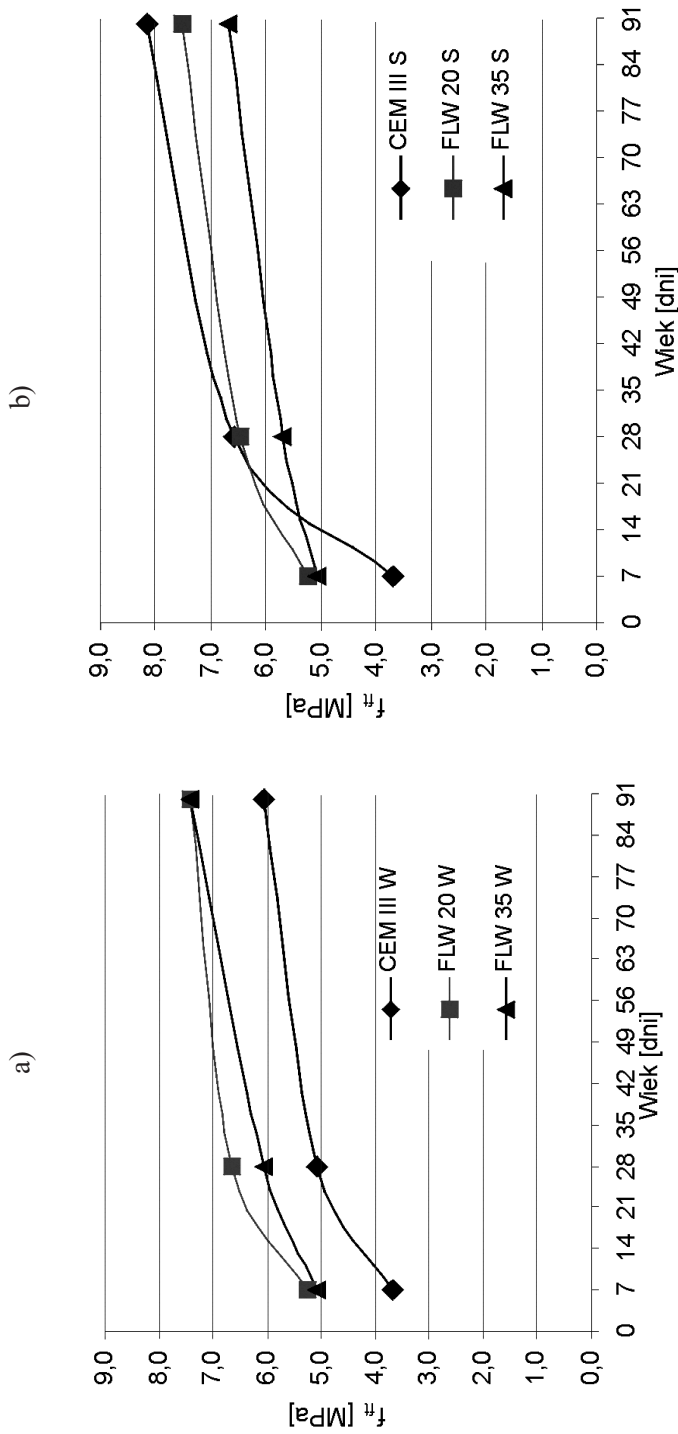


Rys.5. Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu zapraw serii A (skład wg tabl. 3.) przechowywanych w warunkach powietrzno-suchych
Fig.5. Bending strength of mortars stored in air-dry conditions - series A (table 3)

W warunkach powietrzno-suchych zaobserwowano stały wzrost wytrzymałości próbek w czasie pomiędzy 7 a 90 dniem od ich wykonania. Stwierdzono ponadto, że ilość dodanego popiołu fluidalnego nie wpłynęła w wyraźny sposób na uzyskaną wytrzymałość. W porównaniu do próbek z cementu CEM I, stwierdzono wyższe wartości wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu. Porównanie wytrzymałości próbek z dodatkiem popiołów fluidalnych, przechowywanych w różnych warunkach wilgotnościowych, po upływie 28 i 90 dni wykazało wyraźną różnicę: zaprawy z dodatkiem popiołów fluidalnych przechowywane przez 90 dni w warunkach powietrzno-suchych miały blisko o 70-80 % wyższą wytrzymałość w porównaniu do tych samych zapraw, przechowywanych w tym czasie w warunkach wysokiej wilgotności.

Na rysunkach 6a i 6b, przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu próbek serii B, wykonanych z cementu CEM III, przechowywanych odpowiednio w warunkach wysokiej wilgotności oraz w warunkach powietrzno-suchych. Przedstawione wyniki są wielkościami średnimi dla danej serii próbek.

Bez względu na warunki przechowywania próbek, we wszystkich przypadkach zapraw serii B, zaobserwowano wzrost wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu pomiędzy 7 a 90 dniem. Analiza wyników wykazała dodatni wpływ popiołów fluidalnych na uzyskiwane wartości wytrzymałości, oceniane zarówno w funkcji czasu, jak również w stosunku do wytrzymałości zaprawy porównawczej. Różnice w zawartości popiołów w zaprawach (20 % i 35 %) w bardzo niewielki sposób wpłynęły na uzyskane wyniki badań. Wytrzymałość beleczek z zapraw wykonanych z dodatkiem popiołów fluidalnych, które przechowywano w warunkach wysokiej wilgotności, była średnio o 25 % wyższa od wytrzymałości zaprawy porównawczej CEM I.



Rys. 6. Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu w funkcji czasu zapraw serii B, (skład wg tabl. 4)

a) warunki wysokiej wilgotności,

b) warunki powietrzno-suche

Fig. 6. Bending strength of the series B mortars (table 4) stored in:

a) high humidity conditions,

b) air-dry conditions

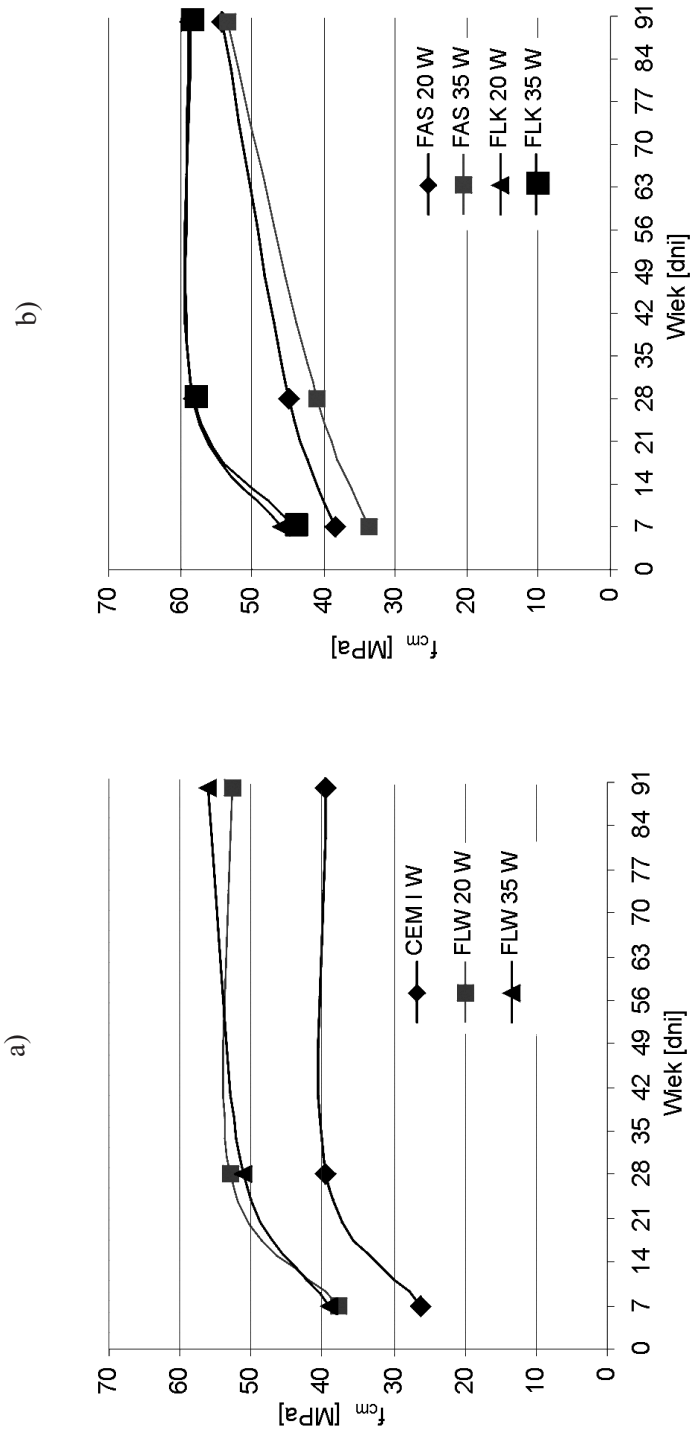
4.4. WYNIKI BADANIA WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCISKANIE

Na rysunkach od 7 do 10 przedstawiono wytrzymałość średnią na ściskanie, zapraw i betonów konstrukcyjnych, określoną po upływie danego okresu dojrzewania próbek. W przypadku zapraw każdy punkt na wykresie jest wartością średnią z 6-ciu pomiarów (badanie wykonane na połówkach beleczek badanych na zginanie), natomiast w przypadku betonów z 5-ciu pomiarów. Wytrzymałości na ściskanie f_{cm} zapraw serii A (wykonanych z cementu CEM I) dojrzewających w warunkach wysokiej wilgotności przedstawiono na rys 7a oraz 7b.

Analiza wyników przedstawionych na rysunku 7a i 7b wskazuje na znacznie wyższe wytrzymałości zapraw wykonanych z dodatkiem popiołów fluidalnych, w porównaniu do zaprawy porównawczej z cementu CEM I. Zaobserwowana zależność dotyczy popiołów fluidalnych pochodzących z obu źródeł (FLW i FLK). Uzyskane wytrzymałości były w przypadku zapraw z popiołami fluidalnymi, we wszystkich badanych okresach dojrzewania, co najmniej o 30 % wyższe od wyników uzyskanych dla zaprawy porównawczej. Zaprawy wykonane z dodatkiem popiołów konwencjonalnych (FAS) charakteryzowały się niższą początkową wytrzymałością (po 7 dniach) oraz wolniejszym tempem przyrostu wytrzymałości w czasie w stosunku do zapraw wykonanych z popiołami fluidalnymi. W przypadku zapraw z popiołami konwencjonalnymi przyrost wytrzymałości pomiędzy 7 a 90 dniem dojrzewania następował niemal liniowo, wykazując przez cały czas podobną tendencję wzrostową. Po upływie 90 dni, wytrzymałość na ściskanie zapraw z popiołami fluidalnymi oraz zapraw z popiołami konwencjonalnymi była na wysokim i bardzo zbliżonym poziomie. W stosunku do zaprawy porównawczej, zaprawy z dodatkiem popiołów (po 90 dniach dojrzewania w warunkach wysokiej wilgotności) miały blisko 50 % większą wytrzymałość na ściskanie. Stwierdzono również wyższą wytrzymałość zapraw wykonanych z dodatkiem popiołu fluidalnego FLK w stosunku do popiołu fluidalnego FLW.

Wyniki badań wpływu dodatku popiołów fluidalnych na wytrzymałość na ściskanie zapraw serii A wykonanych na bazie CEM I, przechowywanych w warunkach powietrzno-suchych, przedstawiono na rysunku 8.

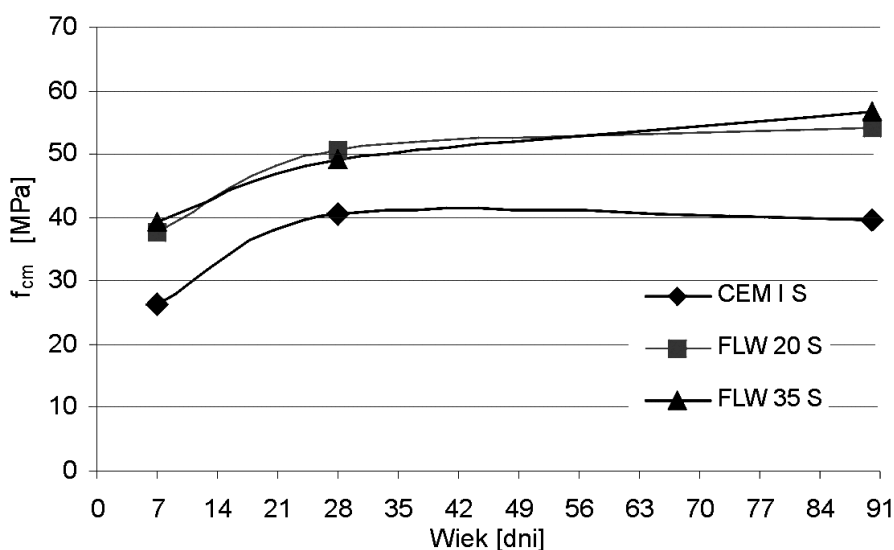
Zarówno wytrzymałość na ściskanie zapraw serii A, przechowywanych w warunkach powietrzno-suchych, po upływie kolejno: 7, 28 oraz 90 dni, jak i tempo przyrostu wytrzymałości były bardzo zbliżone do wyników uzyskanych w przypadku przechowywania tych zapraw w warunkach wysokiej wilgotności. Nieznaczny wpływ na wytrzymałość miała ilość zastosowanego dodatku. Zaprawy wykonane przy 20 % i 35 % zastąpieniu cementu popiołem fluidalnym FLW miały podobne wytrzymałości. Stwierdzenie to dotyczy zapraw dojrzewających zarówno w warunkach wysokiej wilgotności, jak i w warunkach powietrzno-suchych.



Rys.7. Wytrzymałość na ściskanie f_{cm} w funkcji wieku zapraw serii A (skład wg tabl. 3)

przechowywanych w warunkach wysokiej wilgotności

Fig.7. Compressive strength f_{cm} of mortars stored in high humidity conditions - series A (table 3)

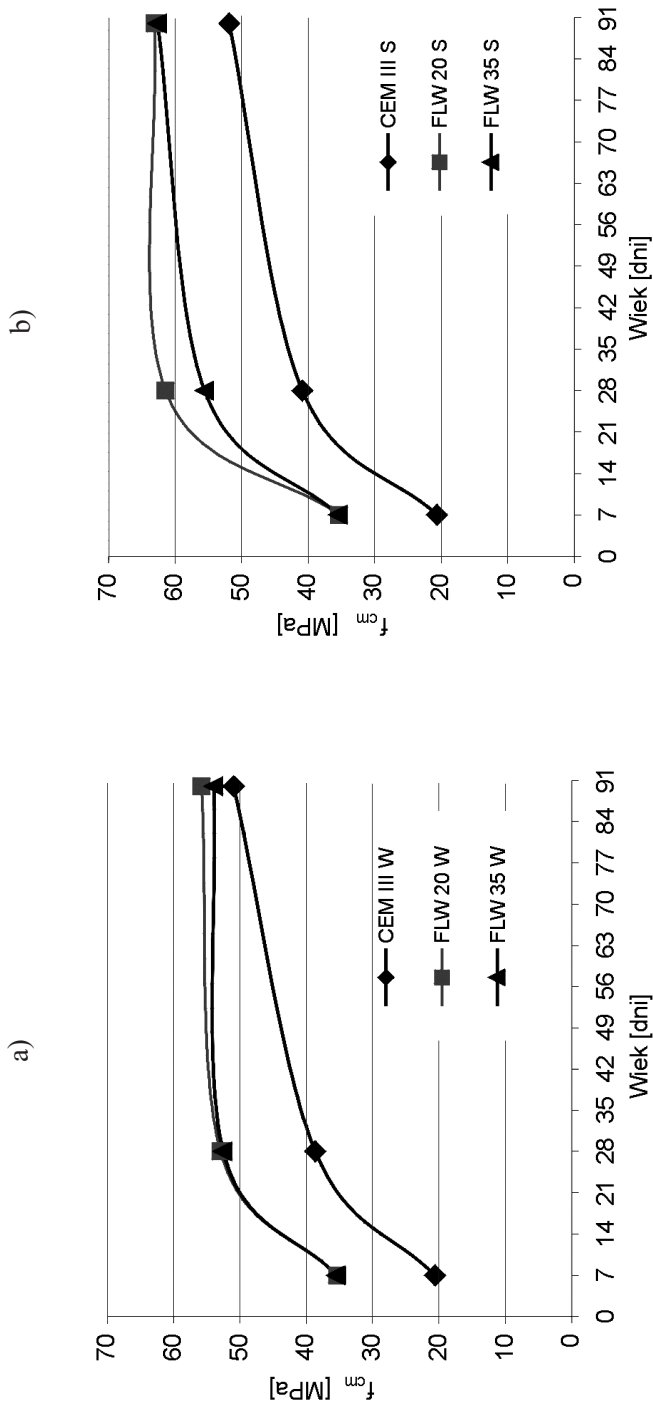


Rys.8. Wytrzymałość na ściskanie f_{cm} w funkcji wieku zapraw serii A (skład wg tabl. 3) przechowywanych w warunkach powietrzno-suchych
 Fig.8. Compressive strength f_{cm} of mortars stored in air-dry condition – series A (table 3)

Wpływ dodatku popiołów fluidalnych na wytrzymałość na ściskanie zapraw serii B, przechowywanych w różnych warunkach wilgotnościowych, przedstawiono na rysunku 9.

W przypadku zapraw serii B, podobnie do wytrzymałości na ściskanie zapraw serii A, wyniki wytrzymałości na ściskanie próbek wykonanych z dodatkiem popiołów fluidalnych były znacznie wyższe od wytrzymałości próbek porównawczych. Zaobserwowano ponadto pewne charakterystyczne cechy zapraw wykonywanych z cementów hutniczych: niższą wytrzymałość wczesną oraz wyższą wytrzymałość po 90 dniach dojrzewania. Stwierdzono niewielkie różnice w wytrzymałości w zależności od sposobu przechowywania próbek: przechowywane 90 dni w warunkach powietrzno-suchych miały większą wytrzymałość na ściskanie w porównaniu do tych samych próbek przechowywanych w warunkach wysokiej wilgotności.

Na rysunku 10 przedstawiono wytrzymałości na ściskanie betonów konstrukcyjnych w funkcji czasu tj. po upływie kolejno 7, 28 i 90 dni.



Rys.9. Wytrzymałość na ściskanie f_{cm} w funkcji czasu zapraw serii B (skład wg tabl. 4):

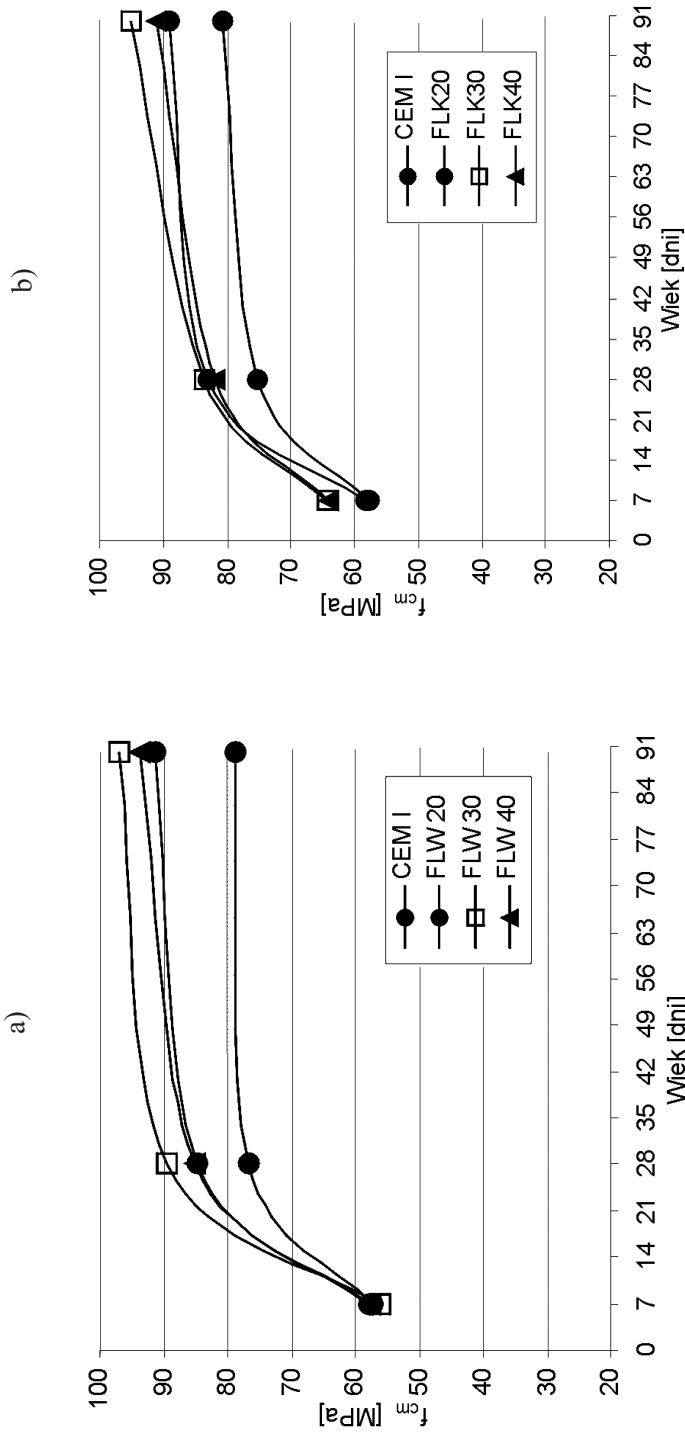
a) warunki wysokiej wilgotności,

b) warunki powietrzno-suche

Fig.9. Compressive strength f_{cm} of the series B mortars (table 4) stored in:

a) high humidity conditions,

b) air-dry conditions



Rys.10. Wytrzymałość na ściskanie w funkcji wieku betonów wykonanych z dodatkiem popiołów lotnych fluidalnych (skład wg tabl. 5):

a) popiół fluidalny EC Żerań,

b) popiół fluidalny EC Katowice

Fig.10. Compressive strength of concrete with different content and type of the fluidized bed combustion fly ash (table 5):

a) fly ash from EC Żerań,

b) fly ash from EC Katowice

Uzyskane wyniki wytrzymałości na ściskanie zapraw znalazły potwierdzenie w wynikach wytrzymałości na ściskanie betonów konstrukcyjnych. Stwierdzono w tym przypadku, że dodatek popiołów fluidalnych również wpłynął na wzrost wytrzymałości na ściskanie w stosunku do betonu porównawczego. Wytrzymałość średnia badanych betonów po upływie 7 dni, była na zbliżonym poziomie 56-57 MPa. Wyższą wytrzymałość w tym okresie o blisko 7 MPa osiągnęły tylko betony z dodatkiem popiołu FLK. Do 28 dni wytrzymałość wszystkich betonów znacząco narastała. Po upływie 28 dni próbki z betonu porównawczego nie wykazały dalszego wzrostu wytrzymałości. W inny sposób zachowywały się betony zawierające popioły fluidalne. Kształt krzywych na rysunku 10 wskazuje, że betony z popiołami, po upływie 28 dni, wykazywały dalszą tendencję wzrostową, a uzyskana wytrzymałość tych betonów po upływie 90 dni była blisko o 20 % wyższa od wytrzymałości betonu porównawczego.

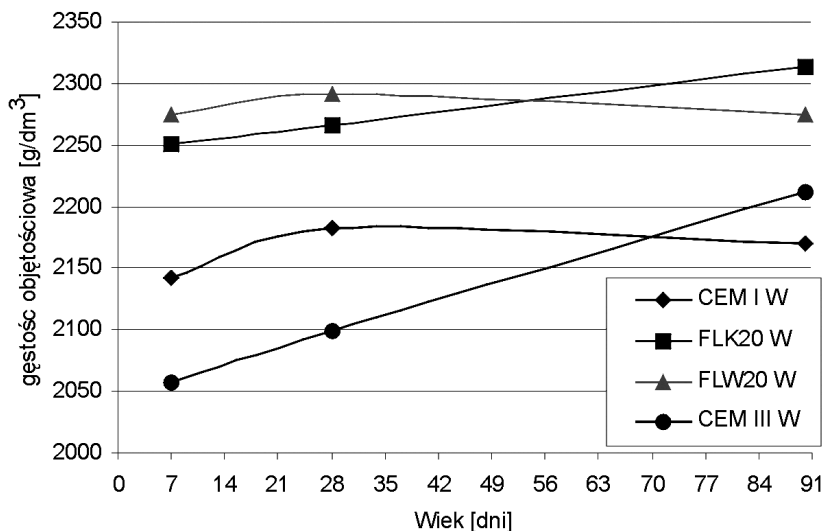
Na szczególną uwagę zasługują dwa zjawiska. Pierwsze z nich dotyczy szybkiego przyrostu wytrzymałości betonów wykonanych z dodatkiem popiołów fluidalnych: po 7 dniach dojrzewania, nawet w przypadku 40 % zastąpienia cementu, wytrzymałość betonów była na poziomie betonu porównawczego. Drugie, dotyczy wartości uzyskiwanych wytrzymałości: w przypadku betonów, w których 40% masy cementu zastąpiono popiołem fluidalnym, wytrzymałość 90-dniowa, nie tylko była wyższa od wytrzymałości betonu porównawczego o średnio 15 %, ale jej wartość sięgała 95 MPa.

5. Dyskusja wyników

Podobnie, jak w przypadku innych dodatków mineralnych, również w przypadku popiołów fluidalnych, wpływ na wytrzymałości betonów jest zjawiskiem złożonym i związanym z jednoczesnym występowaniem kilku zjawisk. Prawdopodobne mechanizmy powodujące wzrost wytrzymałości i sprężystości betonu związane są w tym przypadku z:

- zagęszczeniem struktury betonów w wyniku wprowadzenia większej objętości drobnych ziaren – efekt zagęszczenia wynika z gęstości popiołów,
- reakcją pucolanową, w wyniku której wodorotlenek wapnia powstały w czasie uwodnienia cementu przechodzi w fazę C-S-H, co powoduje dalsze zagęszczenie struktury zaczynu cementowego.

Wysoka wytrzymałość zapraw zawierających dodatek popiołów fluidalnych jest wynikiem nie tylko aktywności pucolanowej popiołów, ale także zdolności drobnych cząstek popiołów do „wpasowywania się” między cząstki cementu, a tym samym zagęszczania mikrostruktury. Wniosek powyższy jest oparty na pomiarach i analizie gęstości objętościowej zapraw, wykonanych na tych samych beleczkach, na których przeprowadzano badania modułu sprężystości oraz wytrzymałości. Wyniki pomiarów gęstości objętościowej zapraw serii A i porównawczo zaprawy CEM III, dojrzewających w warunkach wysokiej wilgotności, przedstawiono na rysunku 11.



Rys.11. Gęstość objętościowa beleczek serii A wykonanych przy 20% zastąpieniu cementu popiołami lotnymi w funkcji wieku (skład wg tabl. 3)

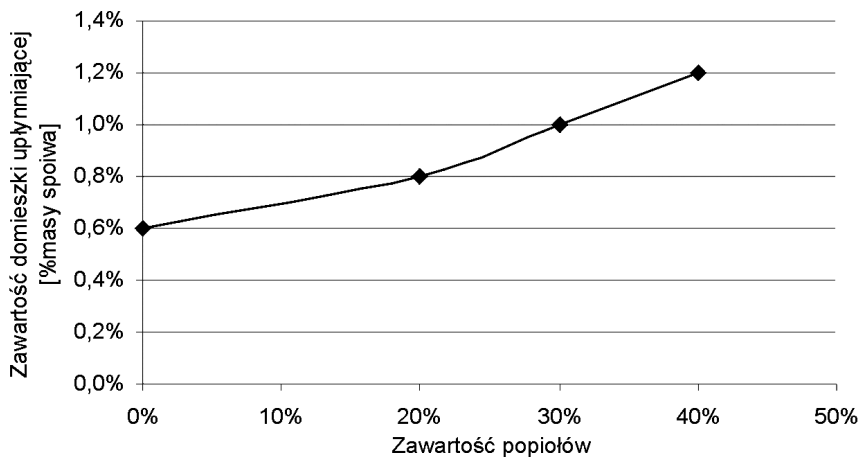
Fig.11. Density of the series A mortars beams prepared with 20% fly ash addition (table 3)

W wyniku zastąpienia 20% cementu popiołami lotnymi z kotłów fluidalnych stwierdzono wzrost gęstości objętościowej zapraw o 100-150 g/dm³ w porównaniu do gęstości zapraw wykonanych z cementu portlandzkiego. Pośrednim dowodem potwierdzającym istotny wpływ popiołów z kotłów fluidalnych na wytrzymałość, w wyniku zagęszczenia mikrostruktury, są również wyniki badań wytrzymałość zapraw wykonanych z tymi popiołami w połączeniu z cementem hutniczym, gdzie reakcja pucolanowa jest mało prawdopodobna, a mimo wszystko zaobserwowano wzrost wytrzymałości w stosunku do zaprawy porównawczej.

Szybki przyrost wytrzymałości jest ważną cechą technologiczną betonu, szczególnie z punktu widzenia wykonawców konstrukcji betonowych. Podstawowa niedogodność związana ze stosowaniem do betonów popiołów lotnych (spełniających wymagania normy PN-EN 450) wynika z opóźnionego przyrost wytrzymałości betonu w czasie. Zjawisko to spowodowane jest tzw. okresem inkubacji popiołów lotnych, czyli ich opóźnionym efektem oddziaływania na wytrzymałość betonów. Pomimo faktu, że wolniejszy przyrost wytrzymałości może przyczynić się poprzez obniżenie ciepła hydratacji do polepszenia trwałości betonu, niektórzy badacze próbują zwiększyć aktywność popiołów tradycyjnych poprzez różnego rodzaju zabiegi, polegające przede wszystkim na ich aktywacji chemicznej, aby w ten sposób przyczynić się do szybszego przyrostu wytrzymałości betonu w czasie. W odróżnieniu od popiołów z kotłów pyłowych, dużą zaletą popiołów z kotłów fluidalnych jest ich wysoka aktywność bez potrzeby stosowania jakichkolwiek dodatkowych aktywatorów chemicznych. Zjawisko powyższe prawdopodobnie związane jest z wysoką reaktywnością popiołów

z kotłów fluidalnych, która jest wynikiem temperatury spalania węgla w złożu fluidalnym i stosowania sorbentów w postaci rozdrobnionej skały wapiennej. Wymagania dotyczące maksymalnej zawartości związków siarki (SO_3), ustalone w normie PN-EN 450 na poziomie 3 %, praktycznie wykluczają zastosowania popiołów lotnych z kotłów fluidalnych jako dodatku do betonu; norma amerykańska ASTM C 618 dopuszcza 5 %. W obu przypadkach ilość ta jest mniejsza od zawartości związków SO_3 , występujących w większości popiołów z kotłów fluidalnych. Przeszkoda ta może być pokonana przez zastosowanie mieszaniny popiołów fluidalnych (zasobnych w regulator czasu wiązania w postaci anhydrytu II) z nisko-reaktywnymi popiołami z kotłów pyłowych, w których zawartość SO_3 jest z reguły poniżej 1 %. Połączenie to przyczynić powinno się także do szybszego przyrostu wytrzymałości betonów wykonanych z popiołami tradycyjnymi.

W betonach konstrukcyjnych zachowanie stałej konsystencji mieszanki, przy wzrastającej zawartości popiołów, wymagało zastosowania zwiększonej zawartości domieszki upłynniającej, proporcjonalnie do zawartości popiołu. Rezultat tej obserwacji zamieszczono na rysunku 12. Bezpośrednia przyczyna tego zjawiska związana jest z kształtem ziaren popiołów fluidalnych oraz z ich gęstością objętościową. Kształt ziaren popiołów fluidalnych jest „kanciasty” i nieregularny przypominając kształtem ziarna cementu – zupełnie inny niż ziarna popiołów lotnych konwencjonalnych, które dzięki kulistym kształtom ułatwiają wzajemny ruch drobnych cząstek cementu.



Rys.12. Wzrost zawartość domieszki upłynniającej w funkcji zawartości popiołów fluidalnych w mieszankach betonowych o ustalonej konsystencji (skład wg tabl. 5)

Fig.12. Increase of superplasticizer content versus content of fluidized bed combustion fly ash in concrete mixes with a constant slump (table 5)

Z kolei niższa gęstość popiołów fluidalnych, w porównaniu do gęstości cementu powoduje, że w przypadku zastąpienia części masy cementu przez popioły fluidalne, większa objętość ziaren trafia do mieszanki zwiększając tym samym zapotrzebowanie na wodę niezbędną do ich zwilżenia. Zjawisko powyższe może mieć również wpływ na uzyskane wyniki wytrzymałości (obniżenie objętościowego wskaźnika wodno-spoiwowego). Dodać należy, że do wzrostu wytrzymałości na ściskanie betonów konstrukcyjnych przyczynić mogło się także zwiększanie ilości domieszki upłynniającej.

6. WNIOSKI

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że dodatek mechanicznie aktywowanych popiołów lotnych z kotłów fluidalnych dodawany do zapraw i betonów jako częściowe zastąpienie masy cementu wpływa na:

- Wzrost dynamicznego modułu sprężystości zapraw z dodatkiem popiołu o 20-30 % w stosunku do próbek porównawczych, które wykonano stosując cement bez tego dodatku, przy zachowaniu identycznych proporcji masowych wszystkich pozostałych składników. Wpływ ten był niezależny od ilości zastosowanego dodatku w zakresie od 20 do 35 %, warunków dojrzewania próbek oraz rodzajów zastosowanych cementów.
- Wzrost wytrzymałości betonów i zapraw z dodatkiem popiołu, w stosunku do próbek porównawczych. Wzrost ten jest stały i nie zależy od rodzaju zastosowanego cementu i warunków przechowywania próbek. Pewien wyjątek stanowią wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu uzyskane w przypadku zapraw serii A, wykonanych z dodatkiem popiołów z kotłów fluidalnych i przechowywanych w warunkach wysokiej wilgotności, w których zaobserwowano ok. 20 % spadki wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu.
- Relatywnie szybki, w stosunku do próbek wykonywanych z dodatkiem popiołów lotnych z kotłów pyłowych oraz próbek wykonanych z cementu bez dodatków, wzrost wytrzymałości betonów i zapraw w początkowej fazie dojrzewania.
- Spadek konsystencji oraz wzrost gęstości objętościowej mieszanki betonowej (tabl. 6) proporcjonalny do ilości popiołu dodanego do betonu. Zwiększanie ilości popiołu w mieszance prowadzi do systematycznego spadku jej konsystencji. Zaobserwowany negatywny wpływ popiołów lotnych z kotłów fluidalnych na konsystencję i urabialność mieszanek betonowych powinien być uwzględniany przy ustalaniu proporcji mieszanki betonowej.

Przeprowadzone badania pozwoliły również na sformułowanie postulatów dotyczących dalszych kierunków badań w zakresie wpływu popiołów lotnych z kotłów fluidalnych na właściwości betonów:

- W celu ustalenia optymalnej zawartości dodatku popiołów lotnych z kotłów fluidalnych do produkcji betonów konstrukcyjnych niezbędna jest analiza ich trwałości w różnych środowiskach agresywnych.

- Uwzględnienie popiołów fluidalnych, jako składnika spoiwa, na etapie projektowania mieszanki betonowej wymaga określenia ich przydatności poprzez wprowadzenie wartości współczynnika k , który uwzględnia wpływ popiołów na wytrzymałość i trwałość betonu (według normy PN-EN 206-1). W tym celu niezbędne jest przeprowadzenie badań umożliwiających określenie dokładnej wartości tego współczynnika w określonych środowiskach agresywnych.
- Zastosowanie popiołów z kotłów fluidalnych do betonów konstrukcyjnych zbrojonych, wymaga przeprowadzenia dodatkowych badań, które pozwolą ocenić wpływ popiołów na korozję stali zbrojeniowej w betonie.
- Do projektowania mieszanek betonowych konieczne jest przeprowadzenie badań wodozadržności popiołów fluidalnych, co ułatwi uwzględnienie ich wpływu na spadek konsystencji betonów już na etapie projektowania składu betonu.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Ciszewski G.*: Elektrownie Kondensacyjne. http://www.elektrownie.com.pl/kotly_fluidalne.html
- [2] *Brandstetr J., Havlica J., Odler I.*: Properties and use of solid residue from fluidized bed coal combustion, Noyes Publications. Westwood, New Jersey, USA 1997
- [3] *Giergiczny Z., Gawlicki M.*: Popiół lotny jako aktywny składnik cementów i dodatek mineralny do betonu. Materiały konferencji „Dni Betonu”, Polski Cement, Kraków 2004
- [4] *Havlica J., Brandstetr J., Odler I.*: Possibilities of utilizing solid residues from pressured fluidized bed coal combustion for the production of blended cements. Cement and Concrete Research, **28**, 2, 1998, 229-307
- [5] *Roszczyński W., Nocun-Wczelik W., Gawlicki M., Matolepszy J.*: Popioły lotne ze złoża fluidalnego jako składnik spoiw mineralnych. Materiały III Konferencji Ceramicznej; Zakopane, 20-23 września 2001
- [6] PN-EN 450-1:2006 Popiół lotny do betonu. Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności
- [7] *Jarema-Suchorowska S., Szczygielski T.*: Perspektywy gospodarowania ubocznymi produktami spalania w świetle Krajowego Planu Gospodarki Odpadami. IX Międzynarodowa Konferencja „Popioły z energetyki”, Ustroń 98-11 października 2002 r.
- [8] *Glinicki M.A., Ładyżyński K.*: Aktywowany popiół lotny z kotłów o spalaniu fluidalnym – nowy dodatek do betonów. XVIII Konferencja Naukowo Techniczna „Beton i prefabrykacja - Jadwisin 2002”, CEBET, Tom 1, 120-127
- [9] *Glinicki M.A., Ładyżyński K.*: Wpływ dodatku aktywowanych popiołów lotnych ze spalania fluidalnego na właściwości betonów konstrukcyjnych. VII Międzynarodowa Konferencja „Popioły z Energetyki”, Międzyzdroje 24-26 października 2001
- [10] *Glinicki M.A., Zieliński M.*: Influence of fly ash type on modulus of elasticity and strength of concrete. 3rd International Conference „Concrete and Concrete Structures”, Zilina, Slovakia, 24-25 April 2002, 47-52

- [11] *Zieliński M.*: Effects of FBC Fly Ash on mechanical properties and durability of concrete. Proceedings of the US - Poland Workshop on Diagnosis of Concrete Materials and Structures for Infrastructure Facilities, Warszawa 17-18 May 2004
- [12] *Brylicki W., Malolepszy J.*: Właściwości cementów zawierających odpady z fluidalnego spalania paliw w paleniskach cyrkulacyjnych-atmosferycznych. Materiały III Konferencji Ceramicznej, Zakopane 20-23 września 2001
- [13] Patent 180380: Sposoby i urządzenia do otrzymywania materiałów wiążących z popiołów kotłowych energetycznych, zwłaszcza z paleniskiem fluidalnym. Urząd Patentowy RP, 2001
- [14] PN-EN 196-1: 1996 Metody badania cementu. Oznaczenie wytrzymałości
- [15] PN-EN 206-1:2003 Beton- Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność

INFLUENCE OF FLUIDIZED BED COMBUSTION FLY ASH ON SELECTED PROPERTIES OF MORTAR AND CONCRETE

Abstract

The research was initiated to assess the influence of Circulating Fluidized Bed Combustion (CFBC) fly ash on the modulus of elasticity, the compressive strength, the bending strength of mortars and the compressive strength of concretes. The objective was to examine possibilities of using the CFBC fly ash in structural concrete. The range of materials included mechanically activated fly ash coming from combustion of hard coal in two different fluidized bed combustion boilers. Several concrete and mortar mixes were designed with constant water to binder ratio and in each mix a part of cement was substituted by CFBC fly ash. In case of mortars the substitution of 20 and 35 % of cement weight was applied, whereas in concrete fly ashes were used as 20, 30 and 40 % replacement of cement weight. After 7, 28 and 90 days of curing the modulus of elasticity, the bending strength and the compressive strength of mortar as well as the compressive strength of concrete were tested. Obtained results revealed a significant influence of used additive on elastic and strength properties of investigated materials as well as on concrete mix behavior.