

Właściwości popiołu lotnego a trwałość betonu

Popiół lotny może stanowić cenny składnik betonu zwykłego i betonów nowej generacji. Stosując popiół w produkcji cementu i betonu, należy szczególną uwagę zwrócić na jego skład chemiczny, a w szczególności na zawartość niespalonego węgla (koksik), miąłkość i jego wpływ na właściwości stwardniałego betonu.

Wprowadzenie

W trakcie procesu spalania pyłu węglowego w paleniskach elektrowni i elektrociepłowni powstają uboczne produkty spalania – popioły lotne i żużle paleniskowe. Popioły lotne od wielu lat są cennym dodatkiem mineralnym w produkcji cementu, spoiw wieloskładnikowych i betonu. O właściwościach popiołów lotnych decyduje wiele czynników, a do najważniejszych należą [1-3]: rodzaj spalanego węgla; rodzaj instalacji, w której zachodzi spalanie węgla, tj. typ kotła i technologiczne warunki spalania; sposób przygotowania paliwa; metoda wychwytywania, odprowadzania i magazynowania popiołów; technologia odsiarczania gazów oraz rodzaj stosowanego sorbentu SO_2 (jeśli prowadzi się jednocześnie procesy odsiarczania gazów). Najszersze zastosowanie w technologii cementu i betonu mają popioły lotne krzemionkowe, które spełniają wymagania norm PN-EN 197-1[4] i PN-EN 450-1 [5].

Popioły krzemionkowe w warunkach krajowych są otrzymywane głównie z węgla kamiennych. Ich

skład chemiczny zbliżony jest na ogół do składu wyprzonego tępku karbońskiego, stanowiącego główny składnik niepalny węgla kamiennych. Stąd też różnice między składami chemicznymi tej grupy popiołów lotnych nie są zbyt duże [6].

W prezentowanej pracy przeanalizowano wpływ podstawowych właściwości popiołów krzemionkowych, tj. składu chemicznego i mineralnego, miąłkości oraz aktywności pucolanowej na właściwości mieszanki betonowej i stwardniałego betonu mające duże znaczenie dla trwałości betonu.

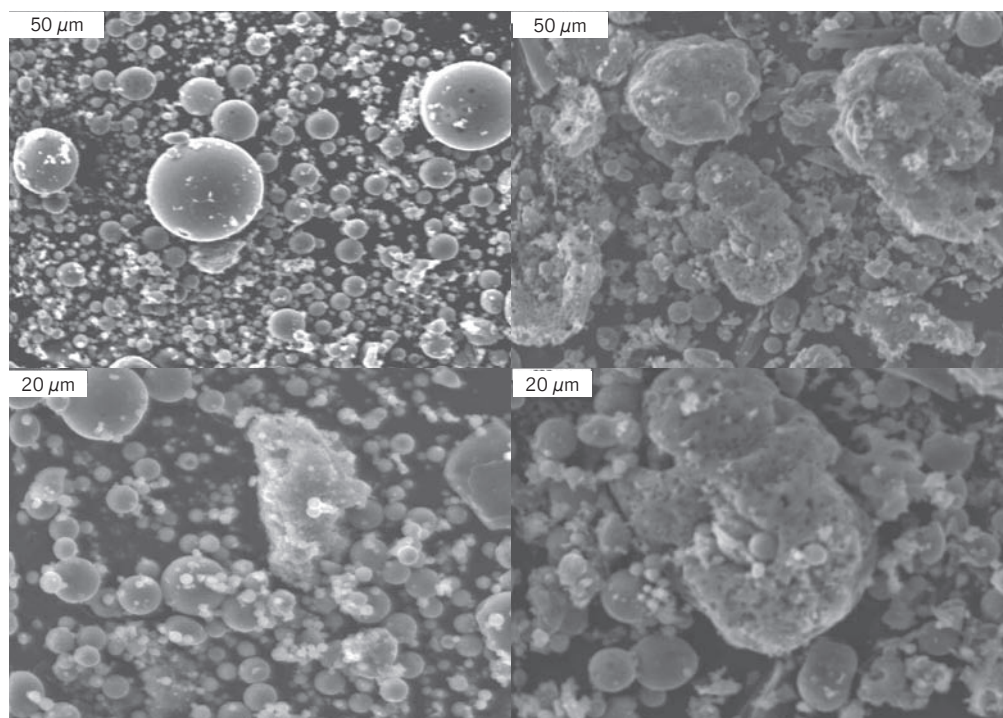
Skład chemiczny i mineralny

Głównymi składnikami popiołów lotnych krzemionkowych, w przeliczeniu na tlenki, są: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , SO_3 , MgO , Na_2O i K_2O , pochodzące z rozkładu minerałów ilastych, pirytu i kalcytu, stanowiące składniki nieorganiczne węgla.

Do niepożądanych składników popiołu lotnego jako dodatku mineralnego należy zaliczyć: zbyt wysoką zawartość związków siarki, zawartość niespalonego węgla, zawartość wolnego wapna, a także – zdaniem niektórych autorów – zawartość związków żelaza [7]. Obecność dużej ilości żelaza w postaci hematytu lub magnetytu może negatywnie wpływać na przebieg reakcji pucolanowej. Związki te zazwyczaj powstają na powierzchni ziaren popiołu i utrudniają dostęp fazy ciekłej do jego substancji szklistej.

Wysoka zawartość niespalonego węgla (straty prążeń) zwiększa wodożądność popiołu oraz zmniej-

Rys. 1. Ziarna popiołów lotnych z różną zawartością strat prążeń (niespalonego węgla)



a) popiół lotny o stratach prążeń 2,2%

b) popiół lotny o stratach prążeń 17,9%

sza mrozoodporność zapraw i betonu z jego udziałem. Kolor popiołu zależy także od zawartości niespalonego węgla: im jego zawartość jest wyższa, tym popiół ma ciemniejszy kolor. Straty prażenia w krajowych popiołach lotnych pochodzących z węgla kamiennego, pozyskiwanych w elektrowniach, uległy w ostatnich latach obniżeniu i wahają się zwykle w granicach 1 ÷ 5%. Obniżeniu strat prażenia w ostatnich latach sprzyjały co najmniej dwie nakładające się na siebie tendencje [8]:

1. Świadomość producenta popiołów, że warunkiem racjonalnego zagospodarowania popiołów jest wytwarzanie ich o zdefiniowanych i powtarzalnych właściwościach (tym samym staje się on produktem i nabiera wartości rynkowej oraz może być przedmiotem obrotu handlowego).
2. Dążenie do poprawy skuteczności spalania (sprawności) przez modernizację palników.

Niepokojącym faktem są zaproponowane rozwiązania w najnowszej nowelizacji normy europejskiej PN-EN 450-1[5], w której wyróżnia się trzy nowe kategorie popiołów lotnych w zależności od wielkości strat prażenia (zawartości niespalonego węgla):

- kategoria A – straty prażenia ≤ 5,0%
- kategoria B – straty prażenia pomiędzy 2,0% a 7,0%
- kategoria C – straty prażenia pomiędzy 4,0% a 9,0%.

W tabeli 1 pokazano skład chemiczny wybranych krajowych popiołów lotnych różniących się znacznie zawartością strat prażenia (koksiku), a w tablicy 2 ich właściwości istotne dla dodatku popiołu stosowanego w składzie betonu zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 450-1 [5]. Wyraźnie widać, że ze wzrostem zawartości strat prażenia (nieopalonego węgla) zmniejszeniu ulega zawartość pozostałych składników (zwłaszcza SiO₂) istotnych dla aktywności pucolanowej popiołu lotnego. Popioły lotne z wysokim poziomem strat prażenia charakteryzują się wyższą wodożądnością (do 20%) w stosunku do popiołu o niskiej zawartości strat prażenia (tabela 2).

Wynika to z różnego pokroju ziaren popiołu (rys. 1). W popiołach o niskiej zawartości strat prażenia dominują ziarna sferyczne, natomiast w popiołach o zawartości strat prażenia 17,9% widoczne są ziarna koksiku o rozwiniętej powierzchni. Przy użyciu popiołów lotnych z wysoką zawartością niespalonego węgla zmniejsza się skuteczność działania domieszek chemicznych, zwłaszcza środków napowietrzających, plastyfikatorów i superplastyfikatorów. Znaczna ich ilość jest absorbowana na powierzchni porowatych ziaren koksiku (rys. 1b), co skutkuje potrzebą dozowania ich w ilości znacznie większej niż w przypadku betonu z popiołem dobrej jakości.

Jako przykład podano ilość wprowadzonej domieszki upłynniającej do mieszanki betonowej zawierającej popioły lotne różniące się znacznie zawartością strat prażenia. Uzyskanie podobnej konsystencji dla mieszanki betonowej na popiele lotnym z wysokim poziomem strat prażenia wymaga zwiększonego blisko trzykrotnie dozowania domieszki upłynniającej (tabela 3; w/s = 0,5; ilość cementu – 296 kg/m³, ilość popiołu w składzie betonu – 60 kg/m³).

Także aktywność pucolanowa popiołu lotnego z wysoką zawartością strat prażenia jest niższa niż

| Oznaczany składnik | Zawartość składnika [% mas.] | | |
|--------------------------------|------------------------------|-----------|------------|
| | Popiół I | Popiół II | Popiół III |
| Strata prażenia | 2,2 | 17,9 | 12,8 |
| SiO ₂ | 51,5 | 42,1 | 47,2 |
| Al ₂ O ₃ | 27,8 | 22,0 | 24,8 |
| Fe ₂ O ₃ | 7,5 | 5,8 | 5,4 |
| CaO | 4,0 | 3,5 | 2,7 |
| w tym CaO _{wolne} | 0,1 | 0,5 | 0,3 |
| MgO | 2,5 | 2,1 | 1,6 |
| SO ₃ | 0,7 | 0,5 | 0,3 |
| Na ₂ O | 1,1 | 1,0 | 0,9 |
| K ₂ O | 3,0 | 2,4 | 2,7 |
| Cl ⁻ | 0,007 | 0,017 | 0,001 |

Tabela 1. Skład chemiczny popiołów lotnych z różną zawartością strat prażenia

| Właściwość | Popiół I | Popiół II | Popiół III |
|--|--------------|--------------|--------------|
| Straty prażenia [%] | 2,2 | 17,9 | 12,8 |
| Gęstość [g/cm ³] | 2,13 | 2,18 | 2,07 |
| Powierzchnia właściwa wg Blaine'a [m ² /kg] | 370,0 | 330,0 | 300,0 |
| Miałość – pozostałość na sicie 45 μm [%] | 34,4 | 39,8 | 45,3 |
| Wodożądność [%] (ilość H ₂ O [ml]) | 100 (225) | 120 (270) | 117 (265) |
| Wskaźnik aktywności pucolanowej po 28 dniach [%] | 78,4 | 75,5 | 69,5 |

Tabela 2. Właściwości popiołów lotnych z różną zawartością strat prażenia

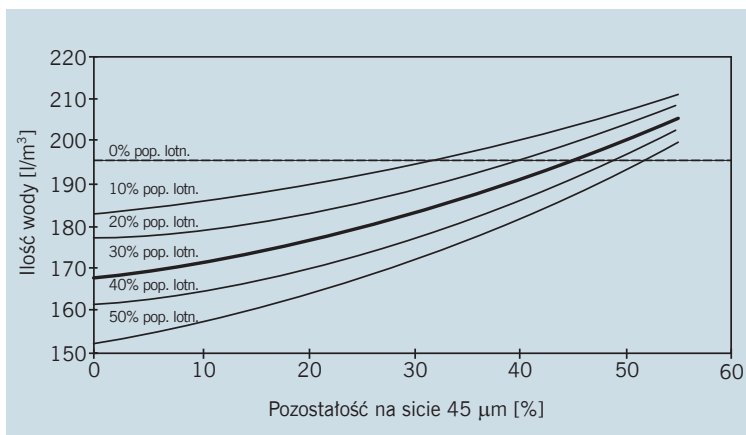
| Rodzaj popiołu lotnego | Opad stożka [cm] | Ilość superplastyfikatora [% masy cementu] | Zawartość powietrza [%] |
|--------------------------------------|------------------|--|-------------------------|
| Popiół I (2,2% strata prażenia) | 18 cm | 0,87 | 1,7 |
| Popiół II (17,9% strata prażenia) | 18 cm | 2,1 | 1,7 |

Tabela 3. Wpływ strat prażenia popiołu lotnego na właściwości mieszanki betonowej

popiołu lotnego o niskich stratach prażenia (tabela 2). Problem ten jest na tyle ważny, że część krajów europejskich w uregulowaniach krajowych przyjęła rozwiązania zawężające zakres stosowania popiołów lotnych o stratach prażenia przewyższających do 5% (tabela 4) [9]. Jest to także wskazówka dla naszego kraju, ponieważ zaostżone wymagania ja-

Tabela 4. Stosowanie popiołu lotnego o różnej zawartości strat prażenia w krajach Unii Europejskiej [9]

| Kraj | Kategoria A (str. praż. ≤5%) | Kategoria B (str. praż. od 2 do 7%) | Kategoria C (str. praż. od 4 do 9%) |
|-------------------|---------------------------------|--|--|
| Austria | tak | nie | nie |
| Belgia | tak | tak (w klasie ekspozycji xf zawartość popiołu poniżej 25% m.c.) | nie |
| Czechy | tak | tak | tak |
| Dania | tak | nie | nie |
| Finlandia | tak | nie w klasie ekspozycji xf | nie |
| Francja | tak | nie w klasie ekspozycji xf4 | w trakcie dyskusji |
| Niemcy | tak | nie | nie |
| Irlandia | tak | w trakcie dyskusji | w trakcie dyskusji |
| Włochy | tak | tak | w trakcie dyskusji |
| Luksemburg | tak | w trakcie dyskusji | w trakcie dyskusji |
| Holandia | tak | nie | nie |
| Norwegia | tak | nie | nie |
| Portugalia | tak | tak | tak |
| Słowacja | tak | w trakcie dyskusji | w trakcie dyskusji |
| Słowenia | tak | tak | tak |
| Szwecja | tak | nie | nie |
| Szwajcaria | tak | nie | nie |
| Wielka Brytania | tak | tak | nie |



Rys. 2. Wpływ dodatku i uziarnienia popiołu lotnego (określanego jako pozostałość na sicie o rozmiarze oczka 45 µm) na ilość wody zarobowej w betonie przy stałej konsystencji [3]

kościowe dla popiołów przyjęto w krajach o zbliżonych do Polski warunkach klimatycznych. Problem ten powinien być rozważony przez odpowiedni Komitet Techniczny Polskiego Komitetu Normalizacyjnego.

W przypadku stosowania popiołu lotnego z wysoką zawartością strat prażenia można zaobserwować także wypływanie ziaren niespalonego węgla (koksiku) na powierzchnię betonu. Ma to wpływ na niekorzystny wygląd powierzchni betonu (utrata możliwości wykonywania betonów architektonicznych) oraz może utrudniać proces powierzchniowego utwardzania betonu z wykorzystaniem odpowiednich posypek, np. przy wykonywaniu posadzek z utwardzaniem warstwy wierzchniej.

Zawartość niezwiązanego tlenu wapniowego jest bardzo mała w popiołach krzemionkowych i nie stanowi problemu jakościowego. Wytyczne i normy niektórych krajów ograniczają także zawartość alkaliów w przeliczeniu na $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$. W przypadku stosowania kruszywa reaktywnych zawartość $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ w popiele nie powinna być wyższa niż 1,5%. Obowiązująca norma na popiół do betonu PN-EN 450-1 [5] dopuszcza możliwość stosowania popiołów lotnych o maksymalnej zawartości alkaliów w przeliczeniu $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ do 5%.

Współspalanie z węglem biomasy, drewna i szeregu innych materiałów może spowodować wzbogacenie popiołów lotnych w związki fosforu powyżej zawartości dopuszczalnej, określonej w normie EN-450-1 jako 100 mg rozpuszczalnych fosforanów (P_2O_5) na kilogram popiołu. Konsekwencją zbyt wysokiej zawartości jonów fosforanowych jest znaczne spowolnienie hydratacji oraz wydłużenie początku i końca wiązania betonu, a także obniżenie jego wytrzymałości wczesnych. Wytrzyma-

łości normowe cementów wzbogaconych w P_2O_5 nie ulegają istotnym zmianom [10]. Negatywnie na aktywność pucolanową wpływa zbyt duża wilgotność popiołu i dlatego normy ograniczają zawartość wody do 1÷3%.

Podstawowym składnikiem fazowym popiołów lotnych jest nietrwale szkło krzemionkowo-glinowo-potasowe, którego udział w składzie popiołów krzemionkowych jest zróżnicowany i waha się w granicach 30÷80%. Wysoka zawartość SiO_2 w popiołach krzemionkowych (tabela 1) oraz duży udział szkła w składzie popiołów powodują stosunkowo wysoką zawartość aktywnego SiO_2 (powinna przekraczać 25%), a więc krzemionki reagującej w normalnych warunkach z $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Rzutuje to na odpowiednio dużą aktywność pucolanową krzemionkowych popiołów lotnych [2-3,6,11-12].

Fazami krystalicznymi występującymi w popiołach lotnych z węgla kamiennego są najczęściej: kwarc, mullit, hematyt i magnetyt, które, podobnie jak niespalony węgiel, są praktycznie nieaktywne w procesie hydratacji. Jednakże, zdaniem autora, nie można przeprowadzać takiego porównania. Kwarc, aczkolwiek wolno, jednak reaguje z wodorotlenkiem wapnia, szczególnie gdy temperatura przekracza 30°C.

Miałość

Skład ziarnowy popiołów lotnych krzemionkowych jest zwykle dosyć zróżnicowany, a ich powierzchnia właściwa waha się od 2000 do 4200 cm^2/g według Blaine'a [11]. Zróżnicowany skład ziarnowy ma z kolei duży wpływ np. na wodożądność popiołu (podobny wpływ na tę właściwość ma także zawartość niespalonego koksiku, o czym wcześniej wspomniano).

Popioły lotne krzemionkowe składają się w przeważającej części z kulistych cząstek o średnicy 3÷40 µm. Pozostałości niespalonego węgla w formie okruchów o nieregularnych kształtach zawarte są we frakcji grubszej niż 45 µm. W skład frakcji grubych wchodzi ponadto ziarna kwarcu oraz szklatego żużla. Zróżnicowanie składu ziarnowego oraz zmienna powierzchnia właściwa nie mają większego znaczenia, jeśli popioły są mielone wspólnie z klinkierem i gipsem, dając cement. Może to natomiast mieć znaczenie podczas stosowania popiołów lotnych krzemionkowych jako dodatku mineralnego do betonów.

Podstawowe zmiany, jakie wywołuje dodatek popiołu lotnego w świeżej mieszance betonowej, związane są z wodożądnością i urabialnością. Dodatek

Tabela 5. Właściwości betonu z dodatkiem popiołu lotnego

| Rodzaj betonu | Skład betonu [kg/m^3] | | | | | Konsystencja, rozpyływ [cm] | Wytrzymałość $f_{\text{cm,cube}}$ po 28 dniach |
|---------------|---|----------|------|---------------|--------|-----------------------------|--|
| | cement | kruszywo | woda | plastifikator | popiół | | |
| B20 | 300 | 1826 | 175 | 1,5 | 40 | 47,2 | 27,0 |
| B20 | 310 | 1855 | 180 | 1,55 | 0 | 44,6 | 28,4 |
| B25 | 310 | 1806 | 180 | 1,55 | 40 | 47,2 | 33,2 |
| B25 | 340 | 1838 | 179 | 1,5 | 0 | 45,4 | 33,0 |
| B30 | 340 | 1795 | 177 | 1,7 | 30 | 47,1 | 38,7 |
| B30 | 350 | 1795 | 180 | 1,75 | 0 | 45,5 | 39,8 |

Tabela 6. Wymagania stawiane popiołom lotnym w normie PN-EN 450-1:2006 w zakresie miałości

| Właściwości | Wymaganie |
|---|--|
| Miałość – pozostałość na sicie o oczkach 45 µm przy przesiewaniu na mokro wg EN 451-2 w kategoriach: <ul style="list-style-type: none"> • N • S | <ul style="list-style-type: none"> ≤40% mas. ≤12% mas. |
| Wodożądność (dotyczy popiołu kategorii S) | ≤95% wodożądności cementu portlandzkiego CEM I użytego do badań* |

* zasada oznaczania podana w załączniku B do normy PN-EN 450-1:2006 (wodożądność oznacza się dla zaprawy, w której 30% cementu zastąpiono popiołem lotnym)

popiołu może zmniejszyć lub zwiększyć ilość wody zarobowej w mieszance betonowej. Zależy to przede wszystkim od składu ziarnowego popiołu lotnego oraz jego zawartości w betonie (rys. 2) [3].

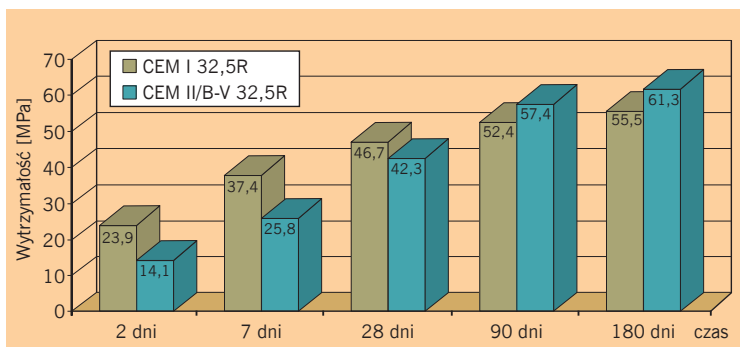
Popioły drobne (o bardzo niskiej pozostałości na sicie 45 μm) charakteryzują się mniejszą zawartością faz krystalicznych, przede wszystkim kwarcu i mulitu i większą zawartością fazy bezpostaciowej (szklistej) w stosunku do popiołu o wyższej pozostałości na sicie 45 μm [6].

Popioły lotne dzięki kulistemu kształtowi ziaren (rys. 1a) wydatnie poprawiają urabialność mieszanki betonowej, co jest bardzo istotne, zwłaszcza w przypadku betonów pompowanych (łatwiejsze podawanie betonu wydłuża żywotność pomp i innych urządzeń transportujących). Mieszanka betonowa zawierająca popioły lotne jest spoiwa i wykazuje mniejszą tendencję do wydzielania mlecza cementowego. W przypadku betonu z popiołami lotnymi zazwyczaj łatwiejsze jest także kształtowanie powierzchni wykonywanej konstrukcji betonowej.

W tabeli 5 przedstawiono rozptył betonu z dodatkiem popiołów lotnych w porównaniu do betonu wykonanego z cementu portlandzkiego CEM I 32,5R. Wyraźnie widoczny jest korzystny wpływ dodatku popiołu lotnego na konsystencję betonu. Wpływ uziarnienia na jakość popiołów lotnych znalazł odzwierciedlenie w znowelizowanej normie europejskiej dotyczącej popiołu lotnego PN-EN 450-1:2006 [5]. Wprowadzono podział popiołów na kategorię N i S, przy czym jako ważną właściwość uznano zmniejszenie wodożądności przez popiół kategorii S (tabela 6). Zdaniem autora, popiół ten ma bardzo dobrą jakość i bardzo często stosowany jest jako składnik betonów wysokowartościowych.

Aktywność pucolanowa krzemionkowych popiołów lotnych

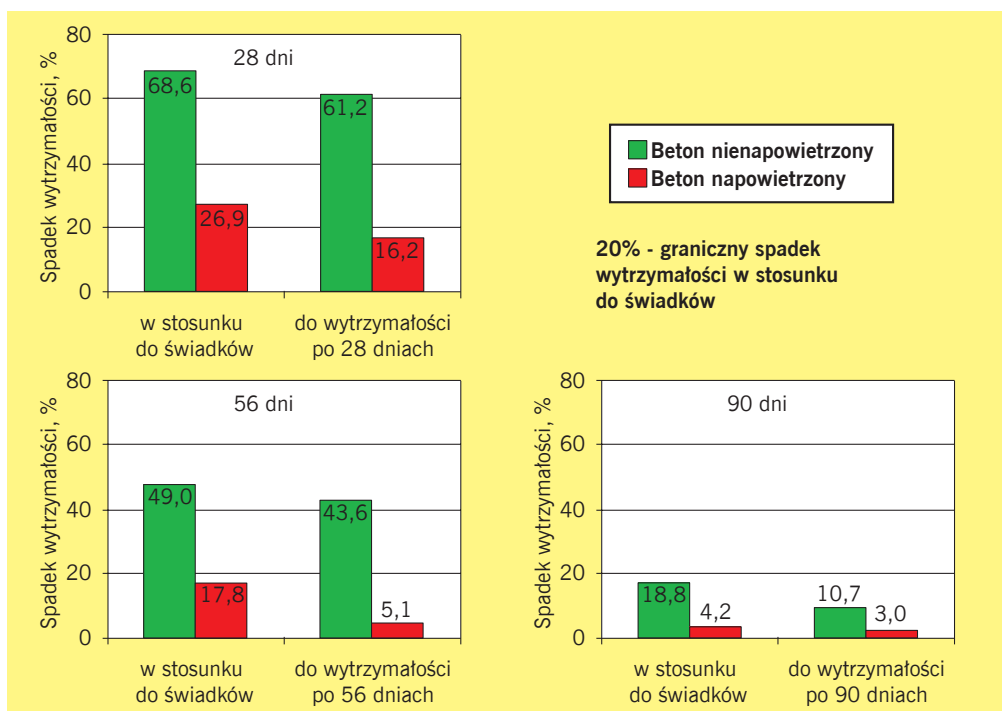
Popioły lotne krzemionkowe (w kraju są to głównie popioły ze spalania węgla kamiennego) charakteryzują się aktywnością pucolanową, tzn. że same nie posiadają właściwości wiążących, ale w obecności



$\text{Ca}(\text{OH})_2$ w roztworze (może to być $\text{Ca}(\text{OH})_2$ z hydrolizy faz krzemianowych klinkieru cementowego) reagują z nim, tworząc produkty o właściwościach wiążących i hydraulicznych (uwodnione krzemiany i gliniany wapniowe) [6, 11-12]. Mechanizm reakcji w układzie pucolana – $\text{Ca}(\text{OH})_2$ jest przedmiotem zainteresowania badaczy od wielu lat. Do czynników wpływających na reaktywność popiołów lotnych z $\text{Ca}(\text{OH})_2$ lub cementem zaliczyć należy – obok składu chemicznego i mineralnego – także miאלkość, morfologię ziaren oraz dodatkowo czynniki przyspieszające przebieg reakcji pucolanowej (przemiał, obróbkę termiczną, stosowanie dodatków chemicznych) [6].

Cechą charakterystyczną cementów popiołowych (betonu z dodatkiem popiołu lotnego) jest dosyć wolny przyrost wytrzymałości w początkowym okresie twardnienia (rys. 3). Jest to związane ze stosunkowo wolnym przebiegiem reakcji pucolanowej i wpływem jej produktów na kształtowanie się właściwości mechanicznych zapraw i betonów. Szczególnie jest to widoczne w okresie obniżonych temperatur zewnętrznych. Natomiast po dłuższym okresie dojrzewania (90 dni i dłużej) wytrzymałość cementu popiołowego (betonu) osiąga znaczne wytrzymałości, co skutkuje podwyższoną trwałością. Jest to widoczne w badaniach mrozoodporności betonu wykonanego z cementu portlandzkiego popiołowego CEM II/B-V 32,5R. Badaniom poddano betony zawierające w swoim składzie cement

Rys. 3. Wytrzymałość na ściskanie cementu portlandzkiego popiołowego CEM II/B-V 32,5R (30% popiołu) w porównaniu do cementu portlandzkiego CEM I 32,5R



Rys. 4. Wyniki badań mrozoodporności betonu

w ilości 350 kg/m³, a wskaźnik w/c wynosił 0,48. Otrzymane wyniki badań przedstawiono na rys. 4. Z przeprowadzonych badań mrozoodporności można wyciągnąć wnioski, że:

- otrzymanie betonu mrozoodpornego na cemencie (betonie) z wysoką zawartością popiołu lotnego wymaga dłuższego okresu dojrzewania
- napowietrzanie betonu znacznie ułatwia otrzymanie betonu odpornego na działanie mrozu
- cementy (betony) z wysoką zawartością popiołu lotnego nie powinny być stosowane w okresach obniżonych temperatur do wykonywania obiektów (konstrukcji) budowlanych narażonych na działanie mrozu.

Cementy z dodatkiem popiołu lotnego (CEMII, CEMIV i CEMV) są bardzo dobrym materiałem wiążącym do produkcji betonu towarowego, szczególnie stosowanego do wykonania konstrukcji narażonych na działanie środowisk agresywnych, do których należą m.in.: oczyszczalnie ścieków, roboty górnicze, zbiorniki na ścieki, składowiska odpadów, ekrany przeciwfiltracyjne oraz inne konstrukcje inżynierskie.

Do czynników, które w głównej mierze decydują o dobrej odporności na agresję chemiczną cementów z dodatkami pucoalanowymi zaliczyć należy [6,11,12-14] :

- ograniczenie zawartości faz klinkierowych podatnych na korozję, m.in. glinianu trójwapniowego, co wiąże się ze zmniejszeniem udziału klinkieru w składzie cementu na rzecz popiołu lotnego
- zmniejszenie zawartości Ca(OH)₂ w zaczynie w wyniku reakcji pucoalanowej
- wypełnienie porów produktami reakcji pucoalanowej, w wyniku czego mikrostruktura stwardniałego zaczynu jest bardziej zwarta, co utrudnia dyfuzję i oddziaływanie wodorotlenków sodu i potasu na reaktywne składniki kruszyw
- zmniejszenie stężenia jonów Na⁺ i K⁺ w cieczy w porach betonu, przez co zmniejsza się jej agresywność w stosunku do reaktywnych składników kruszywa
- efekt uszczelniający przez nieprzereagowane ziarna popiołu lotnego i/lub pyłu krzemionkowego.

Popiół lotny i cementy popiołowe są także chętnie stosowane w: produkcji betonu samozagęszczalnego, produkcji elementów poddanych niskociśnieniowej obróbce cieplnej, stabilizacji gruntu w budownictwie drogowym oraz produkcji zapraw murarskich i tynkarskich (cement ma ciemny odcień i należy to uwzględnić przy projektowaniu składu zaprawy). Do produkcji prefabrykatów wielko- i drobnowymiarowych szczególnie przydatny jest cement klasy wytrzymałościowej 42,5, np. cement portlandzki popiołowy CEM II/A-V 42,5R lub CEM II/A-V 42,5N.

Betony wykonane z tych cementów wymagają jednak doboru właściwego wskaźnika w/c i starannej pielęgnacji, co jest zrozumiałe w świetle wcześniej opisanych ich właściwości.

Podsumowanie

Popiół lotny może stanowić cenny składnik betonu zwykłego i betonów nowej generacji. Stosując popiół w produkcji cementu i betonu, należy szczególnie uwagę zwrócić na jego skład chemiczny, a w szczególności na zawartość niespalonego węgla (koksik), miąłkość i jego wpływ na właściwości stwardniałego betonu. Szczególną uwagę na-

leży zwrócić na właściwy wybór kategorii popiołu (w warunkach krajowych powinna to być kategoria A) przeznaczonego do wykonywania betonów narażonych na ekstremalne oddziaływanie środowiska (odporność na działanie mrozu w obecności środków odładzających, silna agresja chemiczna). Najczęściej są tu pomocne normy i przepisy obowiązujące w kraju stosowania popiołu, np. wskaźniki zawarte w normie PN-EN 206-1 [15] i jej krajowym uzupełnieniu [16]. Zapewnienie właściwych warunków produkcji i ułożenia mieszanki betonowej oraz prawidłowa i odpowiednio długa pielęgnacja świeżo zabudowanego betonu pozwolą osiągnąć efekt końcowy w postaci trwałych elementów i konstrukcji betonowych.

dr hab. inż. Zbigniew Giergiczny
profesor Politechniki Opolskiej
Politechnika Opolska, Górażdże Cement SA

Literatura

- 1 S. Bastian, *Betony konstrukcyjne z popiołem lotnym*, Arkady, Warszawa 1980
- 2 *Use of fly ash in concrete. Reported by ACI Committee 232*, American Concrete Institute, 2003
- 3 Sear L.K.A., *Properties and use of coal fly ash*. Thomas Telford, Londyn 2001
- 4 PN-EN 197-1:2002 Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku
- 5 PN-EN 450-1:2006 Popiół lotny do betonu. Część 1. Definicje, wymagania i kryteria zgodności
- 6 Z. Giergiczny, *Rola popiołów lotnych wapniowych i krzemionkowych w kształtowaniu właściwości współczesnych spoiw budowlanych i tworzyw cementowych*. Monografia 325, Seria „Inżynieria Lądowa”, Politechnika Krakowska, Kraków 2006
- 7 W. Richartz, *Zusammensetzung und Eigenschaften von Flugaschen*, „Zement-Kalk-Gips”, 1984, nr 2, s. 62-71
- 8 J. Małolepszy, J. Deja, Z. Pytel, et al., *Recycling of Fly Ashes for Producing Building and Construction materials on a New Mineral Binder System*. Copernicus Project 1994, No CIPA-CT94-0178
- 9 CEN TC 104/SC1 *Survey of national requirements used in construction with EN 2006-1:2000*; 2006
- 10 Z. Giergiczny, M. Gawlicki, *Popiół lotny do betonu – nowelizacja normy EN 450*, „Budownictwo, Technologie, Architektura”, nr 3/2005, s. 34-37
- 11 W. Kurdowski, *Chemia cementu*, PWN, Warszawa 1991
- 12 V. M. Malhotra, A.A. Ramezaniapour, *Fly ash in concrete*, second ed.: CANMET, Natural Resources Canada, 1994, p. 307
- 13 J. D. Bapat, *Performance of cement concrete with mineral admixtures*. *Advances in Cement Research*. 2001, Vol. 13, No 4, pp. 139-155
- 14 U. Stark, A. Mueller, *Particle size distribution of cements and mineral admixtures – standard and sophisticated measurements*. *Proceedings of the 11th International Congress on the Chemistry*, Durban, South Africa, 2003, vol. 1, pp 303–312
- 15 PN-EN 206-1: 2003 Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
- 16 PN-B-062265:2004 *Krajowe uzupełnienia PN-EN 206-1 Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność*