

Wybrane właściwości fluidalnego popiołu lotnego przeznaczanego do wzmacniania podłoża gruntowego

Mgr inż. Karolina Knapik

Politechnika Śląska w Gliwicach, Wydział Budownictwa
University of Cassino and Southern Lazio, Cassino, Faculty of Engineering

Spojwa budowlane są materiałami powszechnie stosowanymi w geotechnice, zarówno do powierzchniowego wzmacniania, jak i do wzmacniania warstw gruntów zalegających na większych głębokościach. Jednym z czynników decydujących o wyborze metody wzmocnienia podłoża gruntowego jest koszt wykonania [1]. Możliwość zastosowania popiołów lotnych z fluidalnego spalania węgla może stanowić alternatywę dla innych materiałów ze względu na niski koszt oraz korzystne właściwości wynikające ze specyfiki jego powstawania. Polska energetyka jest oparta niemal całkowicie na energii pochodzącej ze spalania węgla. Na bieżąco powstają ogromne ilości elektrownianych żużli i popiołów lotnych. Materiały te od wielu lat znajdują szerokie zastosowanie w produkcji materiałów budowlanych i w górnictwie. Popioły lotne mogą być stosowane również do celów poprawy właściwości gruntów [10], jako składnik zawieszin twardniejących zabezpieczających ściany wykopów i otworów przed utratą stateczności [3] oraz jako składnik zaczynów uszczelniających stosowanych w technologiach wiertniczych [12, 13]. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że rodzaj stosowanej technologii spalania w elektrowniach i elektrociepłowniach znacząco wpływa na właściwości materiałów odpadowych. Nałożony na producentów energii obowiązek ograniczenia emisji zanieczyszczeń znajduje swoje odbicie w budowie nowych jednostek wytwórczych stosujących czyste technologie węglowe. Spalanie węgla w kotłach fluidalnych umożliwia ograniczenie emisji zanieczyszczeń do atmosfery. W najbliższych latach jest prognozowany rozwój techniki fluidalnego spalania węgla [9].

Skład chemiczny popiołów lotnych wynika w dużym stopniu z rodzaju spalanej paliwa (węgiel kamienny, węgiel brunatny, biomasa), co opisano, między innymi, w pracy [14]. Duża zmienność składu chemicznego popiołów lotnych z kotłów fluidalnych w porównaniu do popiołów lotnych z konwencjonalnych kotłów pyłowych jest pochodną odmiennych warunków spalania oraz zastosowania dodatku sorbentu. Sorbent (kreda, dolomit, wapień) wiąże związki siarki, dzięki czemu podczas spalania następuje jednocześnie odsiarczanie spalin. Ilość i rodzaj zastosowanego sorbentu oraz stopień jego przereagowania

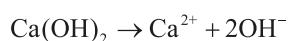
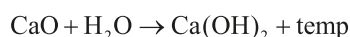
rzutują na skład chemiczny popiołu lotnego. Na ograniczenie emisji zanieczyszczeń wpływa stosunkowo niska temperatura spalania wynosząca 850°C [2]. Wpływ parametrów decydujących o efektywności odsiarczania, takich jak temperatura spalania i stosunek molowy Ca/S, uziarnienie sorbentu opisano w pracy [15].

Zachodzące podczas spalania procesy powodują powstawanie faz amorficznych, tlenku wapnia oraz anhydrytu. Fazy amorficzne (amorficzne glinokrzemiany) powstają na skutek dehydroksylacji (tracenia grup OH) minerałów ilastych zawartych w skale płonnej spalanej węgla [2, 9, 10]. Jak przedstawiono w [10] występują one w postaci nieregularnych ziaren agregatowych o dużej mikroporowatości wewnątrzziarnowej, które tworzą również oskorupienia na ziarnach kwarcu i okruchach skał ilastych. W ich składzie może występować wapń w różnych proporcjach [10]. Obecność wysoce reaktywnych faz amorficznych ma duży wpływ na aktywność pucolanową popiołu lotnego. W wyniku wiązania związków siarki poprzez zastosowany sorbent powstają całkowicie utlenione produkty odsiarczania, najczęściej w postaci anhydrytu, który wpływa korzystnie na właściwości wiążące [2, 10].

Specyficzny skład popiołów ze spalania węgla w kotłach fluidalnych nadaje im właściwości hydrauliczno-pucolanowe. Wskazuje to na możliwość zastosowania tego materiału do wzmacniania gruntów, zarówno w postaci samodzielnego spojwa, jak i w postaci składnika w mieszankach spoiw, takich jak wapno lub cement. Reakcja pucolanowa może zachodzić jedynie w środowisku alkalicznym i obejmuje proces łączenia się jonów wapnia (wydzielonych na skutek dysocjacji wodorotlenku wapnia) z bezpostaciowym żelem glinowo-krzemionkowym. Proces ten prowadzi do powstawania stałych produktów reakcji pucolanowej. Badania przedstawione w [10] prowadzone na mieszaninach gruntowo-popiołowych wykazały tworzenie się faz cementowych (monosulfat $\text{Ca}_4\text{Al}_2(\text{OH})_{12}(\text{SO}_4)\text{H}_2\text{O}$), zarówno wewnątrz agregatów cząstek, jak i pomiędzy nimi. Prowadzi to do powstawania zbitej mikrostruktury rodzaju „matrix”, w której nie jest widoczny szkielet ziarnowy. Wyniki badań prowadzonych w aparacie trójosiowego ściskania na mieszankach

gruntowo-popiołowych potwierdzają znaczący wzrost spójności wraz z wzrostem zawartości popiołu lotnego po 28 dniach [10].

Na skutek dekarbonizacji kalcytu, syderytu i dolomitu powstaje wolny tlenek wapnia, peryklaz i hematyt [9]. Wolny tlenek wapnia zawarty w popiele lotnym jest wysoce reaktywny [2, 9]. Jego ilość wpływa znacząco na właściwości wiążące materiału, gdyż umożliwia rozpoczęcie procesów reakcji pucolanowej. W gruntach drobnoziarnistych obecność wolnego wapnia powoduje zachodzenie dwóch mechanizmów występujących w różnych przedziałach czasowych – modyfikacji i stabilizacji gruntu [11]. Stabilizacja gruntu jest procesem długoterminowym i obejmuje reakcje pucolanowe. Modyfikacja zachodzi w krótkim czasie od momentu dodania wolnego wapnia do gruntu. Na skutek reakcji:



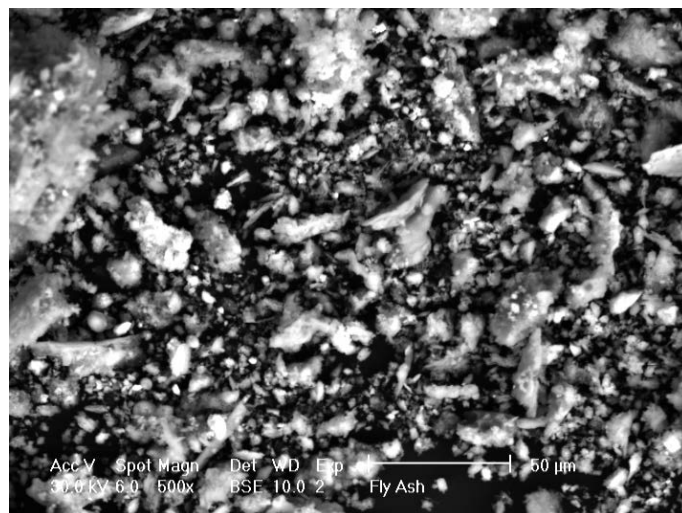
następuje odparowanie wody i wzrost pH cieczy porowej. W dalszej kolejności następuje również wymiana jonowa. Te procesy powodują flokulację cząstek stałych oraz ich przegrupowanie i zmieniają właściwości gruntu.

Określenie wpływu zastosowania popiołów lotnych z kotłów fluidalnych na zmianę właściwości gruntu jest zadaniem wymagającym dalszego uzupełniania. W artykule przedstawiono część dotychczasowych badań laboratoryjnych prowadzonych w celu poszerzenia wiedzy naukowej na ten temat.

CHARAKTERYSTYKA WYKORZYSTYWANYCH MATERIAŁÓW

Badania przeprowadzono na mieszaninach gruntu drobnoziarnistego oraz popiołu lotnego. Jako grunt drobnoziarnisty zastosowano Speswhite Kaolin, w którego skład wchodzi kaolinit (94%), muskowit (5%) i kwarc (1%). Grunt ten nie wykazuje pęcznienia na skutek zawilgocenia. Granica plastyczności gruntu wynosi 32%, a granica płynności 70%. Odczyn pH roztworu wodnego wynosi 4,2. Zastosowany w badaniach popiół lotny to materiał odpadowy uzyskany ze spalania węgla kamiennego w kotle fluidalnym. Wśród głównych składników wyróżnionych podczas badania XRD znajdują się: kwarc, muskowit, wolne wapno, kalcyt oraz portlandyt. Obraz SEM wskazuje na obecność nieregularnych ziaren oraz ziaren ostrokrawędzistych o bardziej regularnym kształcie (rys. 1). Skład chemiczny wyrażony w postaci tlenków dla gruntu Speswhite Kaolin oraz popiołu lotnego zastosowanego w badaniach przedstawiono w tabl. 1.

Przedstawione wyniki badań dotyczą gruntu oraz mieszanek gruntowo-popiołowych o różnej zawartości popiołu lotnego. Skład mieszanek wybrano na podstawie wcześniejszych badań przeprowadzonych w ramach trwającej pracy badawczej, czę-



Rys. 1. Obraz SEM popiołu lotnego (powiększenie × 500)

ściowo przedstawionych w publikacjach [4, 5, 6, 7]. W badaniach zastosowano dodatek popiołu lotnego w ilości 10%, 20%, 30% i 40% (oznaczone odpowiednio jako FA 10%, FA 20%, FA 30% i FA 40%). Mieszanki przygotowano poprzez ręczne wymieszanie suchych składników z wodą destylowaną (wilgotność początkowa 100%), a następnie próbki były przechowywane w szczelnych opakowaniach w temperaturze około 25°C. Badania wykonano w różnych okresach przechowywania próbek w celu określenia zmienności poszczególnych cech mieszanek w czasie. Przeprowadzono następujące oznaczenia:

- granice Atterberga – badanie po 21 godzinach,
- badania sedymentacyjne – badanie po 21 godzinach,
- badania pH – badanie wykonane zgodnie z ASTM D 4972-01 po 21 godzinach oraz 7, 14 i 28 dniach,
- badania edometryczne – badanie po 21 godzinach oraz 7 i 28 dniach; próbka była obciążona w 12 krokach, przy czym każde kolejne obciążenie było przykładane po ustabilizowaniu się mierzonych osiadań; następnie próbka była odciążana w 6 krokach.

WYNIKI BADAŃ LABORATORYJNYCH

Wyniki oznaczenia granic Atterberga przedstawiono w tabl. 2. Dodatek popiołu lotnego powoduje wzrost zarówno granicy plastyczności, jak i granicy płynności.

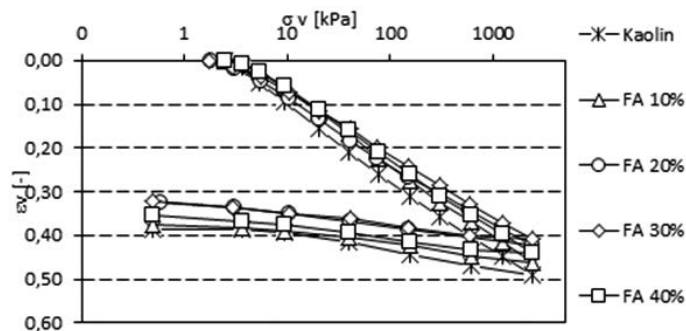
Na rys. 2 przedstawiono wyniki badania odczynu pH mieszanek w różnych okresach przechowywania próbek. Dodatek popiołu lotnego do gruntu powoduje zmianę odczynu cieczy w porach z kwaśnego na alkaliczny. Wartość pH wzrasta wraz z wzrostem zawartości popiołu lotnego w mieszance. Ze wzglę-

Tabl. 1. Główne składniki gruntu Speswhite Kaolin i popiołu lotnego

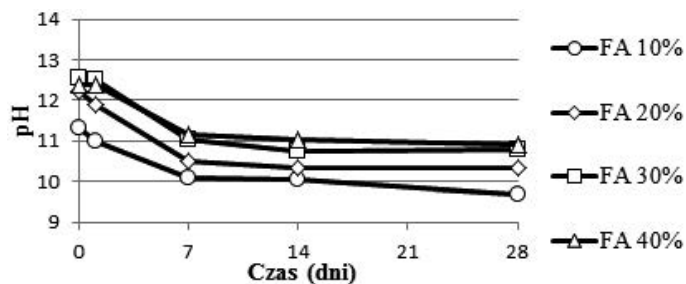
Kaolin		Popiół lotny					
Składnik	Zawartość [%]	Składnik	Zawartość [%]	Składnik	Zawartość [%]	Składnik	Zawartość [%]
SiO ₂	47	SiO ₂	39,73	CaO	18,73	Fe ₂ O ₃	7,52
Al ₂ O ₃	38	Al ₂ O ₃	20,04	CaO _{wolne}	5,24	SO ₃	4,11

Tabl. 2. Granice Atterberga badanych mieszanek

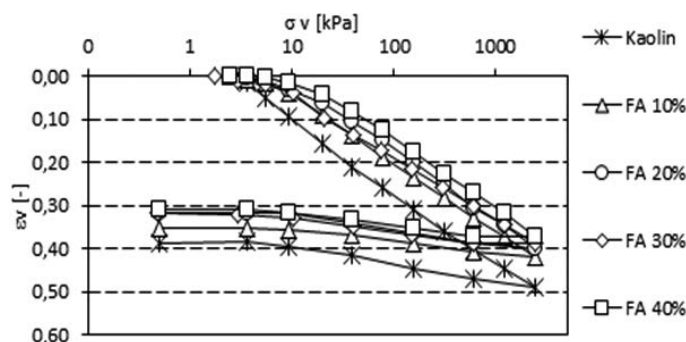
Nazwa	Granica plastyczności [%]	Granica płynności [%]	Wskaźnik plastyczności [%]
Kaolin	32	70	38
FA 10%	37,1	79,4	42,3
FA 20%	40,2	83,2	43
FA 30%	39,3	80,9	41,6
FA 40%	38	81	43



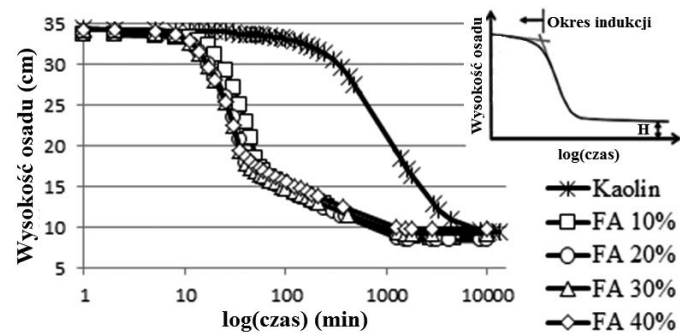
Rys. 4. Krzywe ścisłości mieszanek badanych po 21 godzinach



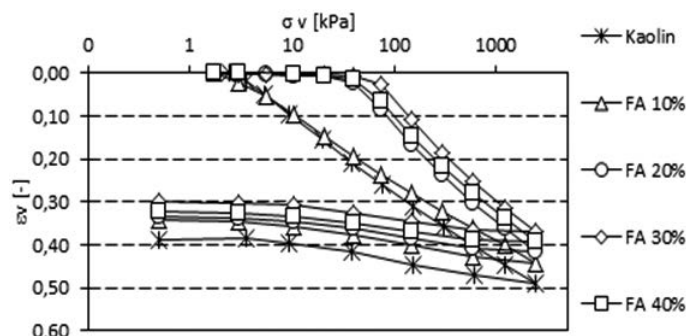
Rys. 2. Wyniki badań pH w funkcji czasu (por. [4])



Rys. 5. Krzywe ścisłości mieszanek badanych po 7 dniach



Rys. 3. Wyniki badań sedymentacyjnych (por. [8, 5])



Rys. 6. Krzywe ścisłości mieszanek badanych po 28 dniach

du na możliwość zachodzenia reakcji pucolanowej kluczową kwestią jest utrzymanie wysokiej wartości pH w dłuższych okresach przechowywania próbek.

Wyniki badań sedymentacyjnych przedstawiono na rys. 3. Zgodnie z obecną wiedzą charakter krzywej sedymentacji można opisać parametrami przedstawionymi w prawym górnym rogu rys. 3 (por. [8, 5]). Długość okresu indukcji (*induction period*) podaje informacje o stopniu połączenia cząstek stałych tuż przed rozpoczęciem procesu sedymentacji. Czas ten jest tym krótszy, im większy jest stopień połączenia cząstek stałych w mieszance. Można zatem stwierdzić, że dodatek popiołu lotnego zmniejsza stopień dyspersji cząstek stałych w porównaniu do gruntu bez dodatku popiołu lotnego. Zauważalne jest również skrócenie czasu osiadania cząstek stałych. Takie zachowanie może być związane z zachodzeniem flokulacji i powstawaniem aglomeratów cząstek na skutek zmiany odczynu fazy ciekłej roztworu z kwaśnego na zasadowy. Wyniki badań edometrycznych w postaci zależności obciążenia od odkształcenia objętościowego w skali półlogarytmicznej przedstawiono na rys. 4 ÷ 6.

Ze względu na brak możliwości występowania odkształceń próbki w pierścieniu edometrycznym w kierunku poziomym odkształcenie objętościowe obliczono na podstawie pomiaru

odkształceń pionowych. Wyniki badań mieszanek (wilgotność początkowa 100%) po 21 godzinach oraz 7 i 28 dniach przechowywania w szczelnych opakowaniach zestawiono wraz z krzywą ścisłości uzyskaną dla gruntu bez dodatku popiołu lotnego. W stosunkowo krótkim czasie od momentu przygotowania mieszanek można zauważyć zmianę kształtu krzywych ścisłości na ich początkowym odcinku (rys. 4, 5). Ta tendencja staje się bardziej wyraźna wraz z upływem czasu (rys. 6). W ciągu pierwszych 7 dni zauważono nieznaczny wzrost sztywności mieszanek. Może to wynikać ze zmiany wzajemnego ułożenia cząstek stałych na skutek zmiany odczynu cieczy w porach. Badania przeprowadzone po 28 dniach (rys. 6) pozwoliły stwierdzić znaczny wzrost sztywności mieszanek guntowo-popiołowych z dodatkiem 20%, 30% i 40% popiołu lotnego w porównaniu do gruntu bez dodatku popiołu lotnego. Dla mieszanki z dodatkiem 10% popiołu lotnego nie stwierdzono znaczącej zmiany ścisłości, co może być związane zarówno ze zbyt niską wartością pH (rys. 2), utrudniającą tworzenie się produktów reakcji pucolanowej, jak i niedostateczną ilością materiału o właściwościach hydrauliczno-pucolanowych w postaci popiołu lotnego.

PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono wybraną część wyników badań laboratoryjnych przeprowadzonych w ramach programu eksperymentalnego dotyczącego właściwości fizycznych i mechanicznych mieszanek gruntu drobnoziarnistego i popiołu lotnego pochodzącego ze spalania węgla w kotłach fluidalnych. Przygotowane próbki charakteryzowały się wysoką wilgotnością początkową przekraczającą granicę płynności mieszanek. Próbki były przechowywane przez 21 godzin, 7 dni, 14 dni lub 28 dni w celu określenia zmiany cech mieszanek w funkcji czasu.

Przedstawione wyniki badań potwierdzają alkaliczny odczyn mieszanek gruntowo-popiołowych, możliwe zmiany w początkowym kształcie i wielkości aglomeratów cząstek stałych oraz wzrost sztywności mieszanek, w których udział popiołu lotnego przekraczał 20% w dłuższych okresach przechowywania próbek.

LITERATURA

1. Bzówka J., Juzwa A., Knapik K., Stelmach K.: Geotechnika komunikacyjna. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013.
2. Giergiczny Z.: Rola popiołów lotnych wapniowych i krzemionkowych w kształtowaniu właściwości współczesnych spoiw budowlanych i tworzyw cementowych. Politechnika Krakowska, Kraków 2006.
3. Kledyński Z., Rafalski L.: Zawiesiny twardniejące. Komitet Inżynierii Wodnej i Łądowej PAN, Warszawa 2009.
4. Knapik K., Bzówka J., Russo G.: The pH value of kaolinite treated with fluidal fly ash and lime. Zpevnování, těsnění a kotvení horninového masivu a stavebních konstrukcí. Ostrava 27-28 luty 2014.
5. Knapik K.: Sedimentation of fine grained soil treated with fluidal fly ash and lime. Praca zbiorowa pod redakcją Joanny Bzówki. Wiedza i eksperymenty w budownictwie. Prace naukowe doktorantów. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 105-111.
6. Knapik K., Bzówka J., Russo G., Croce P., Modoni G.: Physical and mechanical properties of fine grained soils treated by fluidal fly ash. Publikacja dostępna na stronie internetowej konferencji Incintro Annuale Ricercatori di Geotecnica Chieti 2014: www.iarg2014.unich.it.
7. Knapik K., Bzówka J., Russo G.: Compressibility of kaolinite treated with fly ash from fluidized bed combustion. Budownictwo i Architektura, Politechnika Lubelska, Lublin 2014, Vol. 13(2) 2014, 33-38.
8. Palomino A. M., Burns S. E., Santamarina J. C.: Mixtures of fine – grained minerals – kaolinite and carbonate grains. Clays and Clay Minerals, Vol. 56, No. 6, 2008, 599-611
9. Rajczyk K.: Popioły lotne z kotłów fluidalnych i możliwości ich uszlachetniania. Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych, Opole 2012.
10. Rybicki S., Górnjak K., Gawęł A.: Właściwości mieszanin gruntowo-popiołowych i ich wykorzystanie w inżynierii środowiska. Geologia 2007, tom 33, zeszyt 4, 439-462.
11. Rogers C.D.F., Glendinning S.: Modification of Clay Soils using Lime. Lime Stabilisation. (Eds: Rogers C.D.F., Glendinning S., Dixon N.), Thomas Telford, Londyn 1996, 99-126.
12. Stryczek S., Małolepszy J., Gonet A., Wiśniowski R., Kotwica Ł., Złotkowski A., Ziąja J.: Popioły z fluidalnego spalania węgla brunatnego jako dodatków do zaczynów uszczelniających. Wydawnictwa AGH, Kraków 2013.
13. Stryczek S., Małolepszy J., Gonet A., Wiśniowski R., Kotwica Ł.: Wpływ dodatków mineralnych na kształtowanie się właściwości technologicznych zaczynów uszczelniających stosowanych w wiertnictwie i geoinżynierii. Zakład Poligraficzny S.C.M.R. Wioska, Agencja Wydawniczo-Reklamowa Omnidium, Kraków 2011.
14. Szponder D. K.: Badania wybranych właściwości popiołów lotnych z zastosowaniem analizy obrazu. Rozprawa doktorska, AGH, Kraków 2012.
15. Trybuś T.: Fluidalne spalanie paliw jako metoda ograniczenia emisji dwutlenku siarki i tlenków azotu. Ochrona Środowiska, nr 2/1995.

Karolina Knapik jest Stypendystką w ramach projektu „DoktoRIS – Program stypendialny na rzecz innowacyjnego Śląska” współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.