

**ALEKSANDER WIDUCH, MICHAŁ CŹWIĄKAŁA\***

## **WYKORZYSTANIE POPIOŁÓW LOTNYCH Z WĘGLA BRUNATNEGO W BUDOWNICTWIE KOMUNIKACYJNYM**

### *Streszczenie*

*Do scharakteryzowania właściwości fizykochemicznych popiołu lotnego z węgla brunatnego obszaru konińskiego wykorzystano wyniki analizy rentgenograficznej oraz skaningowej analizy mikroskopowej. W artykule przedstawiono możliwość zastosowania aktywowanego popiołu lotnego z węgla brunatnego do produkcji hydraulicznych spoiw drogowych, a w szczególności – do stabilizowania podłoża gruntowego. Uzyskane wyniki badań nośności (CBR) oraz dynamiki narastania wytrzymałości ( $R_c$ ) mieszanek grunto – spoiwowych potwierdzają dobrą przydatność tego materiału dla potrzeb budownictwa komunikacyjnego.*

Słowa kluczowe: hydrauliczne spoiwo drogowe, aktywator magnetyczny, popiół lotny z węgla brunatnego

### **Wstęp**

Popiół lotny jest odpadem produkcyjnym powstającym na skutek spalania węgla kamiennego lub brunatnego w kotłach energetyki zawodowej [Cwiąkała i in. 2008; Pachowski 1976]. Rocznie wytwarza się miliony ton popiołu, stąd niezwykle potrzebne staje się umiejętne jego zagospodarowanie [Pachowski 2002]. Wykorzystanie popiołu lotnego jako wartościowego produktu wiąże się z poszukiwaniem procesów o wysokiej efektywności, które zapewnią uzyskanie produktu o wyższej jakości niż dotychczas stosowany produkt – nie zawierający popiołu lotnego.

Autorzy opracowania od dawna prowadzą badania mające na celu modyfikowanie (uszlachetnianie) popiołu lotnego ze spalania węgla brunatnego i zajmują się wdrażaniem nowatorskiej technologii aktywacji popiołów lotnych. Aktywację popiołów lotnych uzyskuje się poprzez wykorzystanie aktywatora magnetycznego Wapeco (rys. 1).

---

\* Wapeco Sp. z o.o.; Zakład Geotechniki; Warszawa



*Rys. 1. Aktywator magnetyczny Wapeco*  
*Fig. 1. Magnetic activator Wapeco*

Z uwagi na fakt niskiej jakości infrastruktury komunikacyjnej w Polsce, spowodowanej w dużej mierze stosowaniem materiałów, które nie zapewniają odpowiedniej wytrzymałości oraz trwałości oczywistym jest, że zapotrzebowanie na wysokiej jakości, nowoczesne materiały budowlane jest ogromne [Kraszewski 2008]. Nieodpowiednia technologia powoduje także, że infrastruktura komunikacyjna nie jest dostosowana do obciążeń, które faktycznie na niej występują. Głównym zadaniem, jakie stoi obecnie przed przedsiębiorcami jest poszukiwanie materiałów, które będą w stanie zapewnić wysoką jakość konstrukcji, lepszą wytrzymałość i mniejszą podatność na czynniki zewnętrzne.

Proces ulepszania materiałów odpadowych w postaci zmodyfikowanego popiołu lotnego jest jednym ze sposobów jego utylizowania, przy jednoczesnym wykorzystaniu tego produktu jako, m.in., głównego składnika hydraulicznych spoiw drogowych, a w szczególności – materiału stabilizującego warstwy konstrukcji nawierzchni drogowych [Aprobata techniczna... 2009].

## Materiały i metodyka badań

Zakres badań obejmował przede wszystkim określenie składu fazowego, składu chemicznego oraz morfologii nieaktywowanego popiołu lotnego z węgla brunatnego. Badania te przeprowadzono przy użyciu dyfraktometru rentgenowskiego oraz skaningowego mikroskopu elektronowego SEM.

W celu określenia parametrów mechanicznych mieszanek gruntowo – spoiwowych wykonano badania nośności (CBR) oraz wytrzymałości ( $R_c$ ). Badania przeprowadzono na 7 charakterystycznych gruntach z dodatkiem aktywowanego popiołu lotnego, będącego głównym składnikiem drogowego spoiwa hydraulicznego.

Grunty użyte do badań różniły się zasadniczo wskaźnikiem różnoziarnistości, zawartością frakcji pyłowej oraz zawartością frakcji iłowej, a były to:

- 1) pospółka (Po) o wskaźniku różnoziarnistości  $U=6,3$ , zawartości frakcji pyłowej  $f_p=3,5\%$  i zawartości frakcji iłowej  $f_i=1,5\%$ ,
- 2) piasek średni (Pś-1) o wskaźniku różnoziarnistości  $U=1,8$ , zawartości frakcji pyłowej  $f_p=0,5\%$  i zawartości frakcji iłowej  $f_i=0\%$ ,
- 3) glina (G) o wskaźniku różnoziarnistości  $U=26,1$ , zawartości frakcji pyłowej  $f_p=49\%$  i zawartości frakcji iłowej  $f_i=12\%$ ,
- 4) pospółka gliniasta (Pog-1) o wskaźniku różnoziarnistości  $U=131,6$ , zawartości frakcji pyłowej  $f_p=21,7\%$  i zawartości frakcji iłowej  $f_i=5,7\%$ ,
- 5) piasek gliniasty (Pg) o wskaźniku różnoziarnistości  $U=51,1$ , zawartości frakcji pyłowej  $f_p=19,9\%$  i zawartości frakcji iłowej  $f_i=4,8\%$ ,
- 6) pospółka gliniasta (Pog-2) o wskaźniku różnoziarnistości  $U=43,3$ , zawartości frakcji pyłowej  $f_p=10,3\%$  i zawartości frakcji iłowej  $f_i=3,1\%$ ,
- 7) piasek średni (Pś-2) o wskaźniku różnoziarnistości  $U=6,3$ , zawartości frakcji pyłowej  $f_p=7,8\%$  i zawartości frakcji iłowej  $f_i=1,8\%$ .

Do zastabilizowania powyższych gruntów użyto drogowego spoiwa hydraulicznego o wytrzymałości 3-5 MPa oraz 5-12,5 MPa. Składnikami tych spoiw w obu przypadkach był cement oraz aktywowane popioły lotne z węgla brunatnego. Proces aktywacji popiołu lotnego polegał na kruszeniu ziarna popiołowego w polu magnetycznym aktywatora Wapeco (rys. 1). Na skutek drgań elementów wypełnienia ferromagnetycznego zachodziło w nim kruszenie ziarna popiołowego, przez co zwiększała się jego powierzchnia właściwa, a ponadto następowało uwolnienie do materiału ulepszanego aktywowanym popiołem korzystnych związków fizykochemicznych (pochodzących z tego popiołu i nadających materiałowi lepsze właściwości wiążące). Szczegółowy opis omawianej, innowacyjnej technologii znajduje się w zgłoszeniu patentowym firmy Wapeco o numerze P 384199 z dnia 31.12.2007 r., opublikowanym w dniu 06.07.2009 r. w Biuletynie Urzędu Patentowego Nr 14/2009 o nazwie: „Sposób wytwarzania spoiwa hydraulicznego w postaci aktywowanego popiołu lotnego – aktywowany popiół lotny, spoiwo hydrauliczne, beton siarkowy lub cemen-

towy, mieszanka mineralno-asfaltowa oraz zastosowanie aktywowanego popiołu lotnego”. Powyższa technologia została również zgłoszona w Europejskim Urzędzie Patentowym w dniu 30.12.2008 r oraz opublikowana w dniu 05.08.2009 r. w Europejskim Biuletynie Patentowym 2009/32 o numerze publikacji EP 2085366.

Optymalne proporcje użytych składników (cement/aktywowany popiół lotny) wyznaczono na podstawie analizy badań skurczu i pęcznienia spoiwa. Prawidłowo zaprojektowane spoiwo hydrauliczne powinno charakteryzować się małym skurczem i pęcznieniem, co warunkuje jego wysoką trwałość oraz wpływa korzystnie na trwałość mieszanek gruntowo-spoiwowych [Kołodziejczyk i in. 2009; Halbiniak, Ćwiąkała 2010].

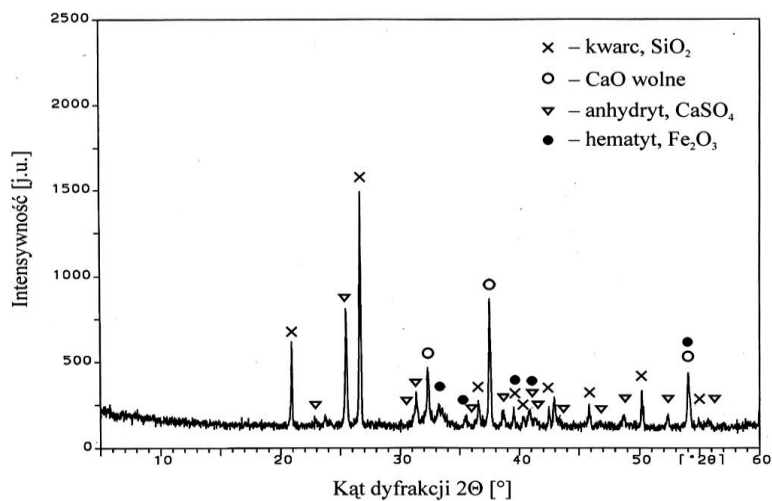
Badania mieszanek gruntowo-spoiwowych polegały na wyznaczeniu przyrostu wytrzymałości badanych próbek po 7, 14, 28, 42, 90 i 180 dniach oraz na określeniu przyrostu wskaźnika nośności po 7 dniach. Do wykonywania mieszanek gruntowo-spoiwowych użyto 8% dodatku spoiwa hydraulicznego.

Przygotowane mieszaniny spoiwa hydraulicznego z gruntami o wilgotności optymalnej wsypywano do formy walcowej (średnica i wysokość formy równa 8 cm) i zagęszczano dynamicznie w jednej warstwie energią 0,59 dżula na 1 cm<sup>3</sup> mieszanki – wg normalnej metody Proctora i zgodnie z normą wg PN-B-04481:1988. Próbki po uformowaniu pielęgnowano w komorze o stałej temperaturze (20°C) i wilgności (98%), a następnie ściskano na prasie hydraulicznej uzyskując wynik wytrzymałości na ściskanie. Natomiast próbki do badań nośności wykonano i przebadano zgodnie z załącznikiem A normy PN-S-02205:1998.

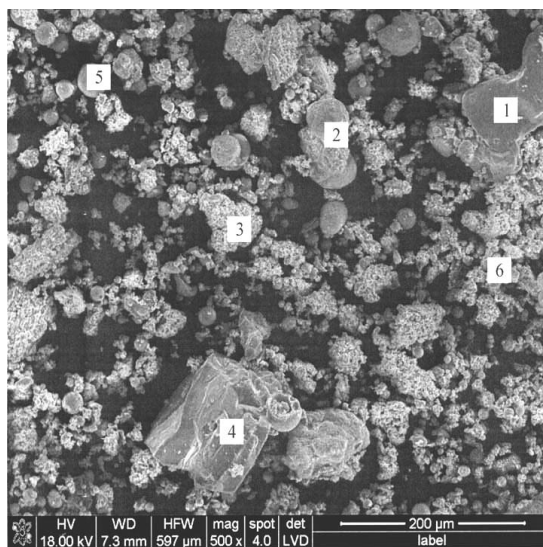
## Wyniki badań

Podczas analizy składu fazowego próbki popiołu lotnego z węgla brunatnego (przeprowadzonej przy pomocy dyfraktometru rentgenowskiego) stwierdzono obecność następujących faz krystalicznych: krzemionki (SiO<sub>2</sub>), wolnego tlenku wapnia (CaO), anhydrytu (CaSO<sub>4</sub>) oraz hematytu (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Z intensywności pików uzyskanych na dyfraktogramie (rys. 2) można wnioskować, iż dominującymi fazami w popiele lotnym są krzemionka oraz wolne CaO.

Na podstawie zdjęć wykonanych na skaningowym mikroskopie elektronowym (rys. 3) można stwierdzić, iż badany popiół jest substancją o bardzo niejednorodnej granulacji; w luźno rozsypanym materiale można wyróżnić aglomeraty cząstek o rozmiarach od ok. 10-50 μm oraz składniki tych aglomeratów o wielkości od ok. 1-10 μm. W celu dokładnej analizy pojedynczych cząstek popiołu, w badaniach skaningowej mikroskopii elektronowej użyto przystawki EDS, umożliwiającej analizę składu chemicznego popiołu w obrębie bardzo małego obszaru.



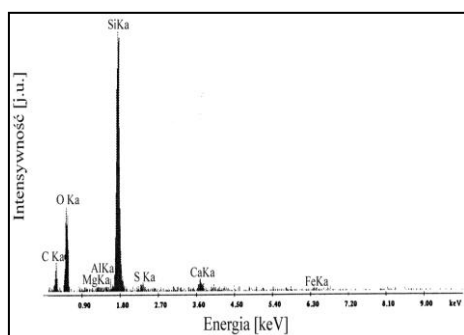
Rys. 2. Dyfraktogram popiołu lotnego z węgla brunatnego  
 Fig. 2. Diffraction pattern of brown coal fly-ash



Rys. 3. Obraz SEM popiołu lotnego z węgla brunatnego; Objaśnienia: 1-6 – miejsca pobrania próbek do szczegółowych badań dyfraktometrycznych  
 Fig. 3. SEM image of brown coal fly-ash; Commentary: 1-6 – places of taking samples for thorough diffraction examination

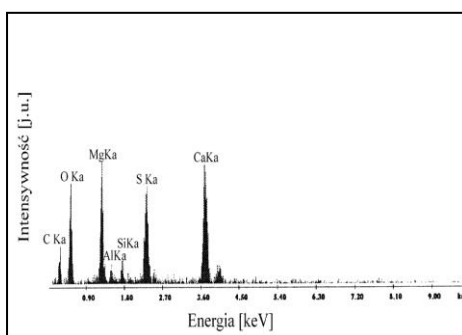
Charakterystyczne miejsca zaobserwowane na obrazie mikroskopowym zostały poddane dalszej szczegółowej analizie dyfraktometrycznej (rys. 4-13).

Z analizy uzyskanych dyfraktogramów można wnioskować, że popiół jest bogaty w magnez, wapń, siarkę oraz niewielkie ilości krzemu i aluminium. Niektóre z ziaren popiołu cechuje monolityczny, ostrokrawędziowy kształt, wskazujący na materiał kruchy. W niektórych fragmentach zidentyfikowano także krzemionkę, czyli związek typowo nieplastyczny (rys. 4 i 7). Wielkość ziaren krzemionki zbliżona jest do ok. 150  $\mu\text{m}$ , co stanowi grubszą frakcję badanego materiału. Inne z ziaren mają kształt typowo kulisty, o powierzchni gładkiej, z niewielkimi wtrąceniami. Ich skład chemiczny wskazuje na obecność  $\text{SiO}_2$  i  $\text{CaO}$  (rys. 8), z nieznaczną ilością związków magnezu, glinu i żelaza. W zbadanym popiele występują również cząstki, których morfologia zbliżona jest do sfery, lecz ich powierzchnia nie jest gładka (rys. 12). Cząstki te – ze względu na wysokie stężenie wapnia i siarki – mogą być identyfikowane jako anhydryty (rys. 6).



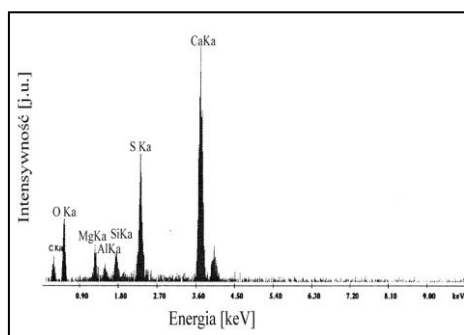
Rys. 4. Analiza dyfraktometryczna obszaru 1 z rys. 3

Fig. 4. Diffraction analysis of area 1 from fig. 3



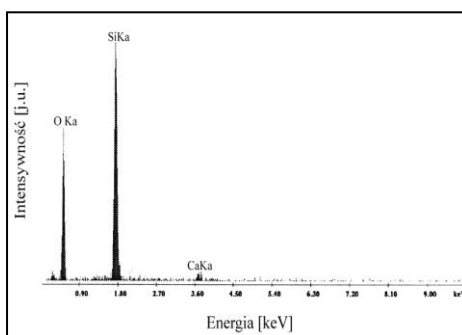
Rys. 5. Analiza dyfraktometryczna obszaru 2 z rys. 3

Fig. 5. Diffraction analysis of area 2 from fig. 3



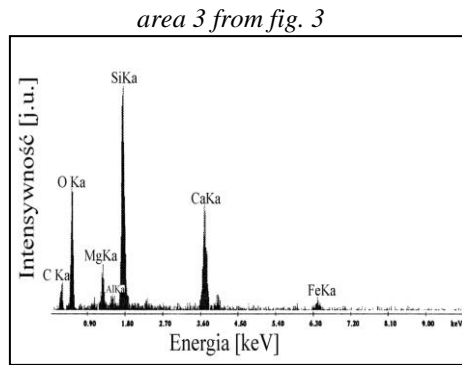
Rys. 6. Analiza dyfraktometryczna obszaru 3 z rys. 3

Fig. 6. Diffraction analysis of

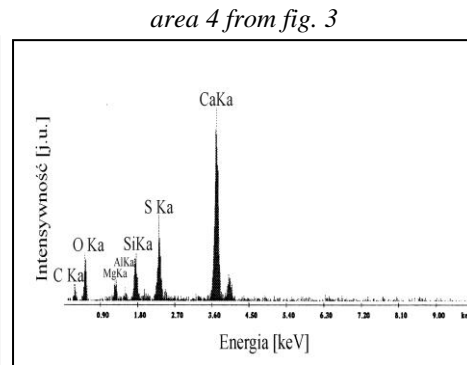


Rys. 7. Analiza dyfraktometryczna obszaru 4 z rys. 3

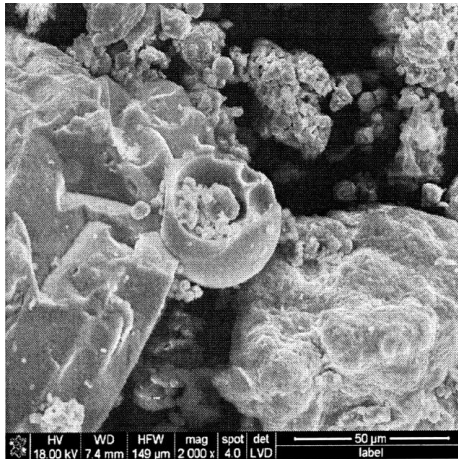
Fig. 7. Diffraction analysis of



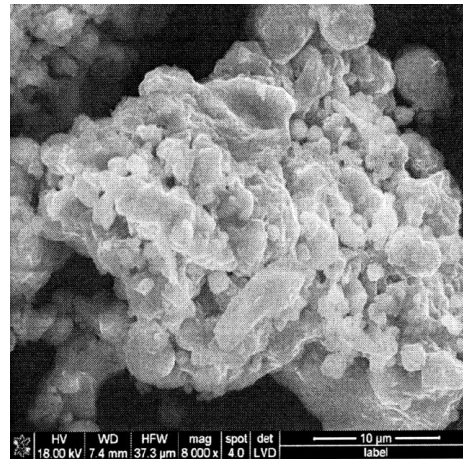
*Rys. 8. Analiza dyfrakcyjna  
obszaru 5 z rys. 3  
Fig.8. Diffraction analysis of  
area 5 from fig. 3*



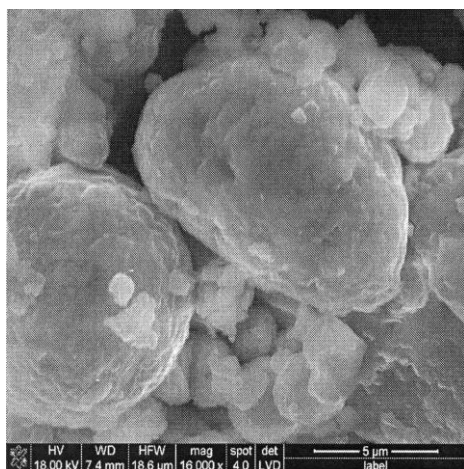
*Rys. 9. Analiza dyfrakcyjna  
obszaru 6 z rys. 3  
Fig.9. Diffraction analysis of  
area 6 from fig. 3*



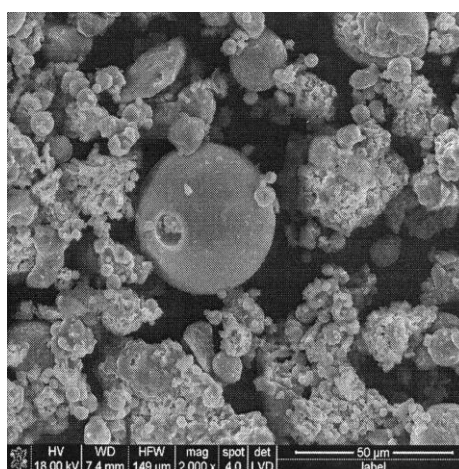
*Rys. 10. Morfologia cząstek  
popiołu lotnego  
Fig. 10. Morphology of fly-ash molecule*



*Rys. 11. Aglomerat cząstek  
popiołu lotnego  
Fig. 11. Agglomerate of fly-ash molecules*

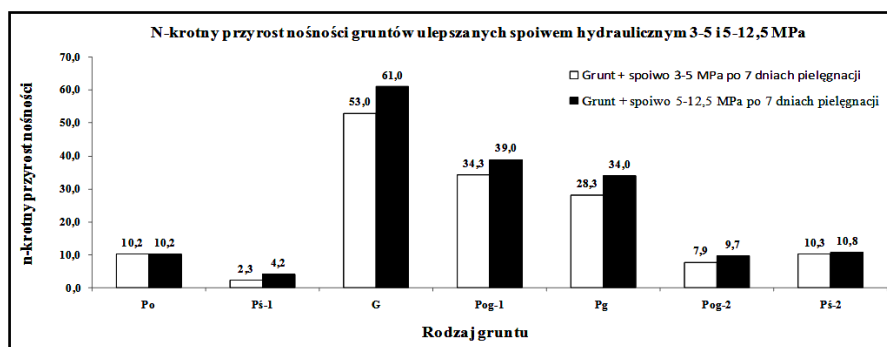


Rys. 12. Morfologia sferycznych cząstek popiołu lotnego  
Fig. 12. Morphology of spherical fly-ash molecules



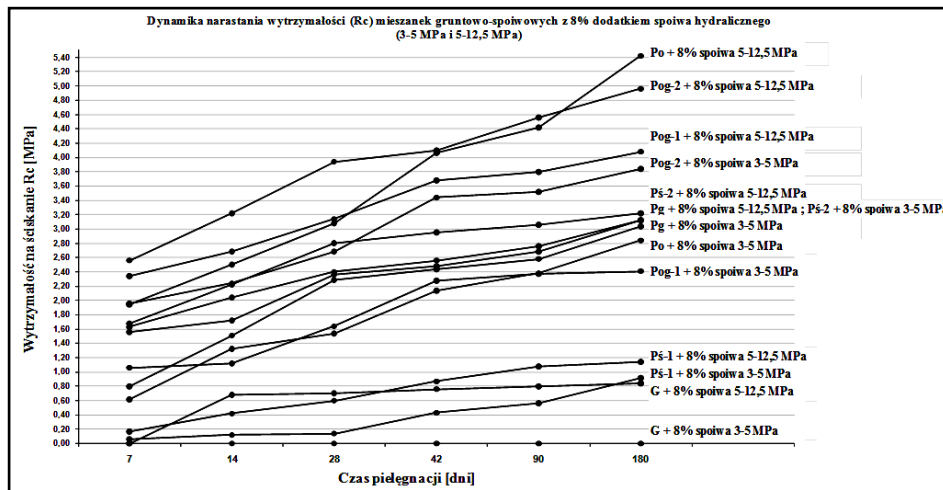
Rys. 13. Cząstki popiołu lotnego o kulistej, gładkiej powierzchni  
Fig. 13. Fly-ash molecules with spherical, smooth surface

Wytrzymałość na ściskanie oraz nośność są podstawowymi i bardzo istotnymi parametrami decydującymi o właściwościach użytkowych, takich jak trwałość konstrukcji drogowych bądź inżynierskich. Wyniki badań przedstawiających dynamikę narastania wytrzymałości na ściskanie oraz n-krotny przyrost nośności gruntów stabilizowanych hydraulicznym spoiwem drogowym zaprezentowano na rys. 14 i rys. 15.



Rys. 14. N-krotny przyrost nośności dla poszczególnych gruntów ulepszonych 8% dodatkiem hydraulicznego spoiwa drogowego o klasie wytrzymałości 3-5 i 5-12,5 MPa  
Fig. 14. N-tuple increase in bearing capacity for particular kind of ground modified by 8% hydraulic binding agents with compressive strength of 3-5 and 5-12,5 MPa





Rys. 15. Wykres wytrzymałości na ściskanie dla poszczególnych gruntów ulepszonych 8% dodatkiem hydraulicznego spoiwa drogowego o klasie wytrzymałości 3-5 i 5-12,5 MPa  
 Fig. 15. Diagram illustrating compression capacity for particular kind of ground modified by 8% hydraulic binding agents with compressive strength of 3-5 and 5-12,5 MPa

Wśród gruntów ulepszonych spoiwem hydraulicznym najlepsze rezultaty – pod względem nośności uzyskały kruszywa o dużej zawartości frakcji pyłowo-łowej (rys. 14). Inny słowy, w przypadku gruntów takich jak: gliny, piaski gliniaste oraz pospółki gliniaste, dodatek spoiwa hydraulicznego na bazie popiołów lotnych z węgla brunatnego powoduje zwiększenie wskaźnika nośności gruntów od 30 do 60 razy. W związku z tym, grunty te, uznawane powszechnie za nieprzydatne w drogownictwie, po ulepszeniu ich spoiwami hydraulicznymi, zawierającymi aktywowane popioły lotne, mogą być z pewnością wykorzystywane do budowy nasypów bądź nawet – jako warstwy konstrukcyjne nawierzchni drogowej [Ćwiąkała i in. 2008; Aprobata techniczna... 2009].

Z kolei, wyniki badań przedstawiające dynamikę wytrzymałości na ściskanie (rys. 15) gruntów ulepszonych spoiwami hydraulicznymi, zawierającymi aktywowane popioły lotne, wskazują na ciągły wzrost wytrzymałości tych gruntów, nawet po 180 dniach. Jest on spowodowany zastosowaniem w spoiwie hydraulicznym zmodyfikowanych popiołów lotnych (o odpowiednich parametrach fizykochemicznych, uzyskanych na skutek aktywowania ich w aktywatorze magnetycznym Wapeco).

## Wnioski

Uboczne produkty spalania (UPS), jakimi są m.in. aktywowane popioły lotne z węgla brunatnego mogą być wykorzystywane w wielu dziedzinach gospodarki. Przykładowo, z dodatkiem cementu stają się popularnym spoiwem hydraulicznym, o korzystnych właściwościach wytrzymałościowych.

Analiza składu fazowego popiołu lotnego, wykonana przy użyciu dyfraktometru rentgenowskiego, pozwoliła na zidentyfikowanie głównych faz występujących w popiele lotnym, w tym:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  (wolny),  $\text{CaSO}_4$  i  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Zdjęcia popiołu lotnego, wykonane przy zastosowaniu Skaningowego Mikroskopu Elektronowego SEM wykazały, że poszczególne ziarna popiołu różnią się morfologią oraz składem chemicznym.

Analiza rentgenograficzna pozwoliła na wykonanie oceny ilościowej, która wykazała zawartość pierwiastków dominujących w zbadanym popiele.

Porównanie analiz mikroskopowych i rentgenostrukturalnych pozwala na określenie wielkości i kształtu cząstek popiołu lotnego w poszczególnych jego fazach.

Aktywowany popiół lotny z węgla brunatnego, stosowany jako składnik spoiwa hydraulicznego w mieszankach gruntowo – spoiwowych, wpływa korzystnie na podwyższenie ich parametrów mechanicznych. Zestawienie wyników badań mieszanek gruntowo – spoiwowych (z udziałem 7 charakterystycznych gruntów) pod kątem nośności i wytrzymałości, wskazuje na możliwość zastosowania tych mieszanek do wykonywania nasypów drogowych w budownictwie komunikacyjnym – zgodnie z wymaganiami normy PN-S-02205 „Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania”.

Ze względu na coraz większy brak odpowiednich materiałów kruszywowych, spełniających wymagania normowe dla poszczególnych warstw konstrukcyjnych nawierzchni drogowych i wysoki koszt cementu, zaleca się wykorzystywanie spoiw hydraulicznych, wytwarzanych na bazie aktywowanych popiołów lotnych.

## Literatura

1. Aprobata techniczna wydana przez Instytut Badawczy Dróg i Mostów Nr AT/2009-03-2510: *Hydrauliczne spoiwo drogowe WAPECO I*. Warszawa 2009
2. ĆWIAKAŁA M., SOSIŃSKI R., NOWAK W., SZYMAŃSKA J.: *Aktywowanie popiołów lotnych z węgla brunatnego elektrowni Pątnów w młynie elektromagnetycznym*. W: Inżynieria i Ochrona Środowiska, T. II Nr 4; Wydawnictwo PAN, Częstochowa 2008
3. ĆWIAKAŁA M., KMIOTEK B.: *Method for producing hydraulic binding agent in a form of activated fly ash, activated fly ash, hydraulic binding*

- agent, sulfur or cement concrete, mineral-asphalt mixture and application of the activated fly ash.* Europejski Biuletyn Patentowy 2009/32 o numerze publikacji EP 2085366
4. HALBINIAK J., ĆWIAKAŁA M.: *Zasady projektowania betonów w zależności od składu.* Materiały Budowlane, Nr 3/2010, Wydawnictwo Czasopism i Książek Technicznych Sigma-Not, Warszawa 2010
  5. KOŁODZIEJCZYK U., ĆWIAKAŁA M., WIDUCH A., HALBINIAK J., ROJNA A.: *Podbudowa drogi. Podbudowy z gruntów lub kruszyw stabilizowanych spoiwami hydraulicznymi. Wskazówki do projektowania spoiwa hydraulicznego oraz mieszanek gruntowo – spoiwowych z wykorzystaniem ubocznych produktów spalania.* W: Warunki techniczne wykonania i odbioru dróg i mostów – Poradnik kierownika budowy i inspektora nadzoru, Wydawnictwo Verlag Dashofer, Warszawa 2009
  6. KRASZEWSKI C.: *Analiza wyników badań mrozoodporności mieszanek z kruszyw związanych hydraulicznie.* W: Drogi i Mosty, Nr 3/2008, Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa 2008
  7. PACHOWSKI J.: *Popioły lotne i ich zastosowanie w budownictwie drogowym.* Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1976
  8. PACHOWSKI J.: *Rozwój technologii powstawania ubocznych produktów elektrowniowych oraz ich charakterystyka i możliwości zastosowań w technologii budownictwa drogowego.* W: Drogi i Mosty, Nr 1/2002, Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa 2002
  9. PN-88/B-04481: *Grunty budowlane. Badania próbek gruntu.* Polski Komitet Normalizacji, Miar i Jakości, Warszawa 1988
  10. PN-98/S-02205: *Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania.* Polski Komitet Normalizacji, Miar i Jakości, Warszawa 1998

## APPLICATION OF BROWN COAL FLY-ASH IN COMMUNICATION ENGINEERING

### *S u m m a r y*

*In order to describe chemical and physical properties of brown coal fly-ash from Konin region, analysis of X-ray radiography and scanning microscopy was used. The article aims to present the possibility of application activated brown coal fly-ash for hydraulic binding agents production, especially – to stabilize foundation soil. Findings on bearing capacity (CBR) and dynamics of growing compressive strength ( $R_c$ ) of soil and binders mixture, prove its suitability for communication engineering.*

Key words: hydraulic binding agents, magnetic activator, brown coal fly-ash