

## **Warunki zastosowania popiołu lotnego jako wypełniacza do mieszanek mineralno – asfaltowych**

**Wojciech Grabowski, Jarosław Wilanowicz, Marta Andrzejczak,  
Marcin Bilski**

*Zakład Dróg, Ulic i Lotnisk, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Poznańska, e-mail: wojciech.grabowski@put.poznan.pl, jaroslaw.wilanowicz@put.poznan.pl, marta.andrzejczak@put.poznan.pl, marcin.bilski@put.poznan.pl*

**Streszczenie:** Głównym celem pracy jest poznanie właściwości strukturalnych i funkcjonalnych popiołów lotnych, czyli odpadów przemysłowych, pochodzących z elektrowni opalanej węglem brunatnym, z punktu widzenia możliwości zastosowania ich jako wypełniaczy do mieszanek mineralno-asfaltowych (MMA). Analiza wyników przeprowadzonych badań laboratoryjnych: uziarnienia, powierzchni właściwej, zawartości wolnych przestrzeni, właściwości usztywniających w zaczynach asfaltowych wykazała, że popioły lotne nie spełniają wymagań stawianych wypełniaczom do MMA, gdyż powodują zbyt duże oddziaływanie usztywniające. Rezultaty badań własnych wykazały, że popioły te mogą być stosowane do MMA, jako tzw. wypełniacze mieszane, z udziałem tradycyjnie stosowanego wypełniacza wapiennego.

**Słowa kluczowe:** wypełniacz, popiół lotny, zaczyn asfaltowy, mieszanka mineralno – asfaltowa, starzenie RTFOT.

### **1. Wprowadzenie**

Wykorzystanie w budownictwie drogowym ubocznych produktów spalania, jakimi są popioły lotne, ma wiele zalet, głównie związanych z istotnym zmniejszeniem kosztów zakupu surowca, ochroną zasobów naturalnych kruszyw, a szczególnie skuteczną próbą redukcji gromadzących się odpadów przemysłowych.

Istnieje bogata literatura techniczna dotycząca wykorzystania popiołów lotnych w budownictwie drogowym [1, 2, 3, 4, 5, 6], jako materiału do budowy nasypów drogowych, jako dodatku do stabilizacji gruntów, dodatków poprawiających właściwości kruszyw, zastosowań do hydraulicznych spoiw drogowych oraz podbudów z betonu popiołowego.

Prace [3, 7, 8, 9] mówią o próbach zastosowania popiołów lotnych jako wypełniacza do mieszanek mineralno – asfaltowych (MMA). W pracy [8] wykazano, że dodatek popiołu lotnego, łącznie z destruktem gumowym, istotnie poprawia właściwości asfaltów.

W pracy [9] wykazano, że dodatek popiołu lotnego zwiększa stabilność i podwyższa zawartość wolnych przestrzeni w MMA w porównaniu z wynikami uzyskanymi dla próbki referencyjnej. Brak w tych pracach szczegółowych informacji dotyczących wpływu popiołów lotnych na zmiany właściwości lepiszczy asfaltowych

z ich udziałem. Także brak szczegółowych danych dotyczących wpływu popiołów lotnych na właściwości MMA, w których zastosowano jako wypełniacz popiół lotny. Brakuje analiz porównawczych właściwości MMA z udziałem popiołów lotnych oraz tradycyjnie stosowanych wypełniaczy mineralnych.

Jakość połączenia lepiszcza do powierzchni kruszyw mineralnych stanowi istotny czynnik decydujący o szczelności, mrozoodporności i wodoodporności nawierzchni asfaltowej oraz jej odporności na odkształcenia [10]. Głównym czynnikiem decydującym o przyczepności lepiszcza asfaltowego do kruszywa jest zawartość krzemionki  $\text{SiO}_2$ . W zależności od procentowego udziału krzemionki, kruszywa dzielimy na dwie podstawowe grupy: kwaśne oraz zasadowe. Skąły kwaśne mają bardzo małą przyczepność do lepiszcza asfaltowego i zastosowanie MMA z ich udziałem wymaga dodania preparatów poprawiających adhezję. Na przyczepność oprócz składu chemicznego kruszywa ma wpływ jego tekstura, porowatość, wilgotność, zapylenie.

Przydatność wypełniaczy do MMA ocenia się również na podstawie rezultatów badań starzenia lepiszczy asfaltowych i MMA. Prace [10, 11] wykazały, że zarówno pochodzenie wypełniacza (skład chemiczny i mineralogiczny), jak i ich charakterystyka strukturalna mają istotny wpływ na starzenie lepiszczy asfaltowych zachodzące w zaczynach asfaltowych.

Brak źródłowej wiedzy na temat wpływu popiołów lotnych na zmiany właściwości lepiszczy asfaltowych z ich udziałem oraz wpływu popiołów lotnych na cechy MMA był inspiracją do wykonania badań przedstawionych w niniejszym artykule [13].

## 2. Cel i zakres pracy

Praca przedstawia wyniki badań cech strukturalnych i właściwości funkcjonalnych popiołów lotnych z elektrowni opalanej węglem brunatnym. Głównym celem pracy jest poznanie właściwości strukturalnych i funkcjonalnych popiołów lotnych, z punktu widzenia możliwości zastosowania ich jako wypełniaczy do MMA.

Przedmiotem badań i analiz były 4 próbki popiołów lotnych o zróżnicowanym uziarnieniu, o symbolach: P-30, P-63, P-30/100 oraz próbka P (materiał wyjściowy). Dla przeprowadzenia analiz porównawczych przygotowano dodatkowe próbki: mieszanek popiołowo – wapienną (próbka P-W), referencyjny wypełniacz wapienny W-75 oraz pył melafirowy M-63 [13].

## 3. Badania cech strukturalnych i właściwości funkcjonalnych

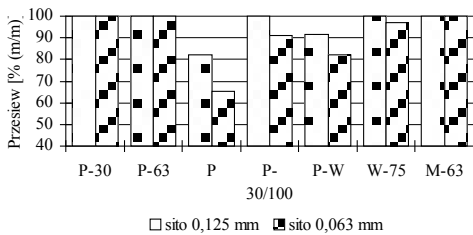
Program badań obejmował:

- a) Analizę cech strukturalnych wypełniaczy mineralnych, takich jak:
  - Uziarnienie (przesiew w strumieniu powietrza) wg PN-EN 933-10 [14].
  - Skład granulometryczny metodą Prószyńskiego wg PN-R-04032 [15].
  - Powierzchnia właściwa wg PN-EN 196-6 [16] (wg Blaine’a).
  - Zawartość wolnych przestrzeni wg PN-EN 1097-4 [17] (wg Rigden’a).
  - Wskaźnik błękitu metylenowego wg PN-EN 933-9 [18].

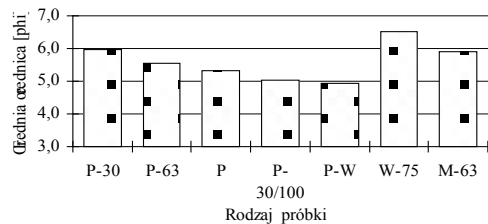
- b) Analizę właściwości funkcjonalnych wypełniaczy mineralnych, takich jak:
- Koncentracja objętościowa ziaren wg PN/S-96505 [19].
  - Przyrost temp. mięknięcia zaczynu asfaltowego wg PN-EN 13179-1 [20].
  - Przyrost lepkości dynamicznej zaczynu wg PN-EN 13702-2 [21].

c) Ocena przydatności próbek popiołów lotnych do MMA na podstawie rezultatów badań starzenia laboratoryjnego metodą RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) wg PN-EN 12607-1 [22].

Uziarnienie analizowanych próbek, przedstawione na rys. 1, spełnia, z wyjątkiem popiołu lotnego P (tj. próbki wyjściowej), wymagania techniczne [23]. Próbka P charakteryzuje się zbyt małą zawartością frakcji < 0,125 mm (przesiew < 85%) oraz frakcji < 0,063 mm (przesiew < 70%). Dodatek wypełniacza wapiennego (W-75) do popiołu lotnego (P) w ilości 50% (m/m) powoduje spełnienie powyższych wymagań dla mieszanki popiołowo – wapiennej (P-W).



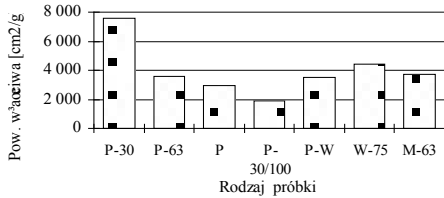
Rys. 1. Uziarnienie próbek wg PN-EN 933-10.



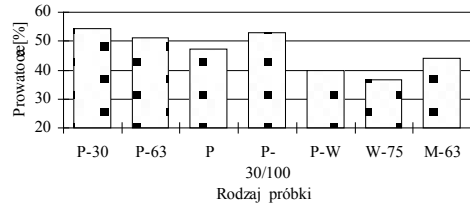
Rys. 2. Średnia średnica ziarna próbek (śred.).

Badania składu granulometrycznego zostały przeprowadzone metodą areometryczną wg Prószyńskiego. Na podstawie uzyskanych wyników określono graficzną średnią średnicę ziaren  $\phi_{sr}$  wg Folka i Warda wg [24]. Z analiz rezultatów badań przedstawionych na rys. 2 wynika, że w analizowanych próbkach, z wyjątkiem wypełniacza W-75, dominuje frakcja 0,02-0,05 mm (frakcja pyłu gruboziarnistego), natomiast w próbce W-75 dominują frakcje 0,005-0,02 mm oraz 0,02-0,05 mm (frakcje pyłu średnio- i gruboziarnistego).

Rezultaty pomiarów powierzchni właściwej wg Blaine'a [16] zamieszczone na rys. 3 wskazują, że zdecydowanie największą powierzchnię właściwą posiada popiół P-30 ( $P_w = 7\ 551\ \text{cm}^2/\text{g}$ ), natomiast najmniejszą - popiół P-30/100 ( $P_w = 1\ 919\ \text{cm}^2/\text{g}$ ). Dodatek wypełniacza W-75 do popiołu P w proporcji 1:1 m/m zwiększa wartość parametru  $P_w$  z 2 932 do 3 512  $\text{cm}^2/\text{g}$  dla mieszanki P-W. Z wyjątkiem próbek P-30 oraz P-30/100 analizowane wypełniacze spełniają wymagania normy [25] (wartości  $P_w$  mieszczą się w granicach  $2\ 500 \div 4\ 500\ \text{cm}^2/\text{g}$ ).



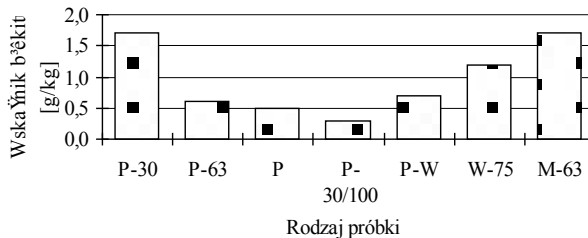
Rys. 3. Powierzchnia właściwa próbek wg Blaine'a (Pw).



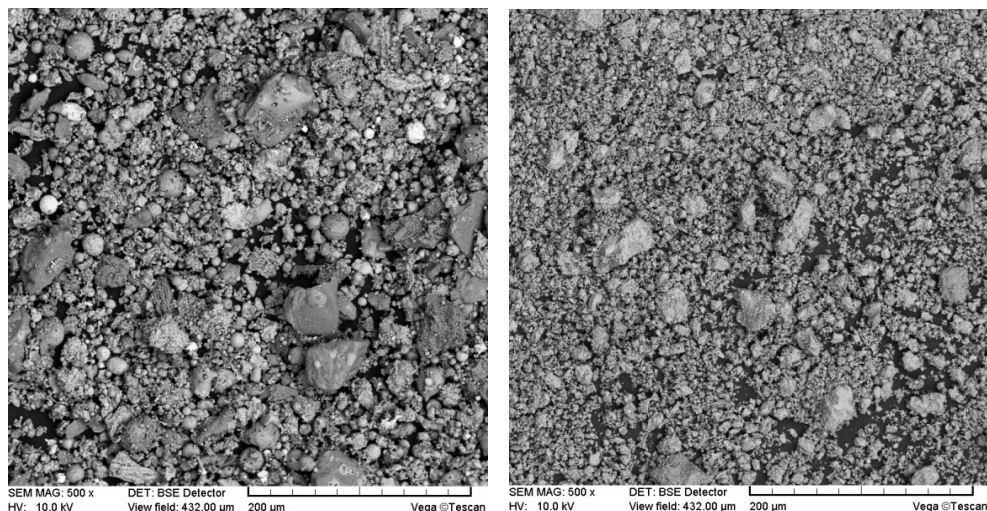
Rys. 4. Porowatość próbek wg Rigden'a (RV).

Zawartość wolnych przestrzeni  $RV$  (porowatość) oznaczono metodą Rigden'a [17], a rezultaty zamieszczono na rys. 4. Największą zawartość wolnych przestrzeni mają wszystkie próbki popiołów lotnych, które nie spełniają warunków technicznych [23] (wymagane  $RV = 28 \div 45\%$ ). Najmniejszą zawartość wolnych przestrzeni odnotowano dla wypełniacza wapiennego W-75 ( $RV = 36,5\%$ ) oraz dla mieszanki popiołowo – wapiennej P-W ( $RV = 40\%$ ).

Wyniki oznaczeń wskaźnika błękitu metylenowego  $M_{Bf}$  zamieszczone na rys. 5 wskazują, że wszystkie analizowane próbki spełniają wymagania techniczne [23] (wymagane  $M_{Bf} \leq 10$  g/kg), gdyż posiadają niewielką zawartość frakcji pylasto – ilastej, co potwierdzają także wyniki badań składu granulometrycznego zamieszczone na rys. 2.

Rys. 5. Wskaźnik błękitu metylenowego ( $M_{Bf}$ ).

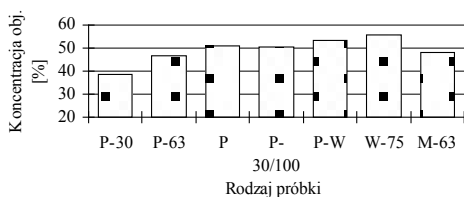
Analizując wyniki badań popiołów lotnych nie zaobserwowano, w przeciwieństwie do ogólnie stosowanych wypełniaczy wapiennych oraz pyłów mineralnych, bezpośredniej korelacji pomiędzy powierzchnią właściwą ziaren a porowatością popiołów lotnych (wzrost wartości  $P_w$  nie skutkuje wzrostem zawartości wolnych przestrzeni  $RV$ ). Ponadto popioły lotne posiadające zalecane wartości  $P_w$  w zakresie  $2\ 500 \div 4\ 500$  cm<sup>2</sup>/g charakteryzują się zbyt dużą zawartością wolnych przestrzeni  $RV$ . Przyczyną może być istotna różnica pomiędzy kształtem i teksturą ziaren popiołów a kształtem i teksturą ziaren pozostałych badanych próbek.



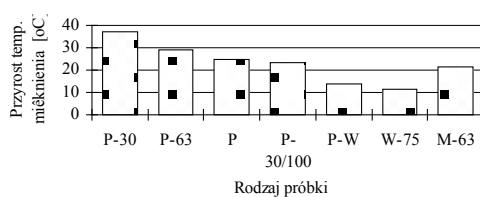
Rys. 6. Obraz mikroskopowy popiołu lotnego P (po lewej) oraz wypełniacza wapiennego W-75 (po prawej).

Na rys. 6 przedstawiono obraz mikroskopowy próbki popiołu lotnego P oraz próbki wypełniacza wapiennego W-75. Można na nich zauważyć bardzo istotne różnice zarówno kształtu, jak i tekstury ziaren analizowanych próbek. W próbce popiołu lotnego przeważają ziarna o kształcie kulistym i teksturze szklistej, które powstały w procesie technologicznym wypalania węgla brunatnego. W wypełniaczu wapiennym natomiast przeważają głównie ziarna o kształtach nieregularnych i teksturze ostrokrawędzistej (powierzchnie przełamane w procesie mielenia).

Badania koncentracji objętościowej ziaren  $K_o$  polegały na kontrolowanym dozowaniu nafty kosmetycznej do analizowanych próbek, aż do momentu całkowitego zwilżenia ich ziaren. Objętość nafty dodana i zaadsorbowana przez 15 g wypełniacza jest umowną miarą bitumochłonności wypełniacza w warunkach laboratoryjnych, która związana jest z adhezją lepiszcza do powierzchni ziaren. Spośród analizowanych próbek najmniejszą wartość  $K_o$ , czyli najmniejszą chłonnością asfaltu charakteryzuje się popiół P-30, a największą - wypełniacz W-75 (rys. 7). Chłonność asfaltu jest tym większa im większa jest wartość porowatości  $R_V$  wypełniacza. Wszystkie próbki (z wyjątkiem P-30) spełniają wymagania normy [19] (wymagane  $K_o = 40 \pm 60\%$ ).



Rys. 7. Koncentracja objętościowa ziaren ( $K_o$ ).

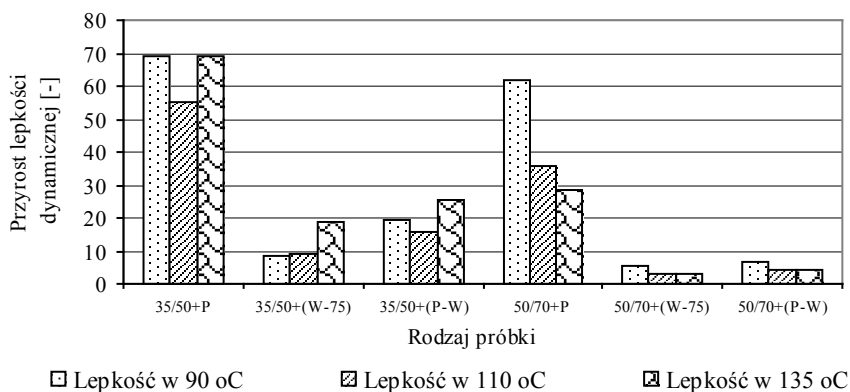


Rys. 8. Przyrost temperatury mięknienia DTPiK.

Badania właściwości usztywniających wypełniaczy przeprowadzono na próbkach zaczynów asfaltowych sporządzonych z udziałem popiołów, wypełniacza wapiennego, mieszanki P-W oraz pyłu melafirowego wg pkt. 2 (stosunek obj. W/A = 0,60). Miarą usztywnienia zaczynów były przyrosty temperatury mięknięcia  $\Delta T_{PIK}$  w stosunku do  $T_{PIK}$  asfaltu drogowego 70/100, pomierzone zgodnie z normą [20] oraz przyrosty lepkości dynamicznej  $\Delta \eta$  zaczynów w stosunku do lepkości asfaltu drogowego 35/50 oraz 50/70.

Przedstawione na rys. 8 wyniki badań temperatury mięknięcia dowodzą, że wszystkie próbki popiołów lotnych oraz pył melafirowy powodują duże oddziaływanie usztywniające w zaczynach asfaltowych (wymagany zakres  $\Delta T_{PIK} = 8 \div 25^\circ\text{C}$ ). Wynika to z dużej (zbyt dużej) zawartości wolnych przestrzeni RV w tych próbkach, których wartości zostały pokazane na rys. 4. W przypadku mieszanki P-W zaobserwowano też istotny wpływ wypełniacza wapiennego na zmniejszenie przyrostu  $\Delta T_{PIK}$  do wartości optymalnej wynoszącej  $13,6^\circ\text{C}$ .

Badania lepkości dynamicznej przeprowadzono w temperaturze  $90^\circ\text{C}$ ,  $110^\circ\text{C}$  i  $135^\circ\text{C}$  z użyciem lepkościomierza obrotowego Rheotest. Badania wykonano na próbkach asfaltu drogowego 35/50 i 50/70 oraz na próbkach zaczynów asfaltowych z udziałem popiołu lotnego (P), wypełniacza wapiennego (W-75) oraz mieszanki popiołowo – wapiennej (P-W). Efekt usztywniający popiołu lotnego (P) mierzony przyrostem  $\Delta \eta$  (rys. 9) jest średnio o 440% większy w stosunku do oddziaływania wypełniacza wapiennego (W-75) w zaczynach z asfaltem 35/50 oraz ok. 970% w zaczynach z asfaltem 50/70. Natomiast efekt usztywniający mieszanki P-W jest większy średnio o 70% w stosunku do oddziaływania wypełniacza W-75 w zaczynach z asfaltem 35/50 oraz o ok. 32% w zaczynach z asfaltem 50/70.



Rys. 9. Przyrost lepkości dynamicznej  $D\eta$  zaczynu z asfaltem 35/50 i 50/70, gdzie:

$$\Delta \eta = \frac{\eta^Z}{\eta^A} \quad (1)$$

$\eta^Z$  - lepkość dynamiczna zaczynu w temperaturze 90, 110 i  $135^\circ\text{C}$ , [Pa s],

$\eta^A$  - lepkość dynamiczna asfaltu w temperaturze 90, 110 i  $135^\circ\text{C}$ , [Pa s],

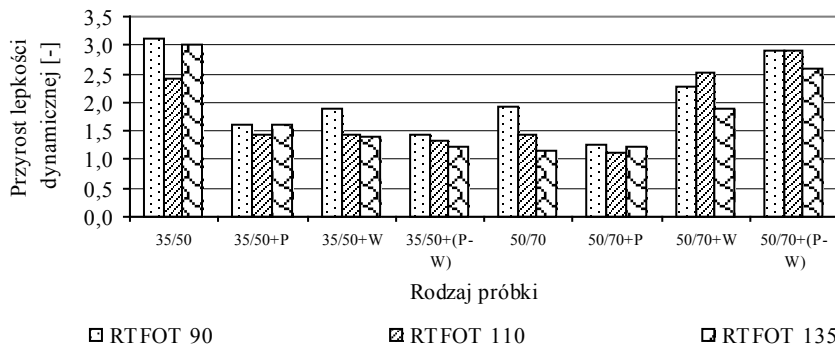
$D\eta$  - przyrost lepkości dynamicznej, [-].

Przedstawione na rys. 8 i 9 wyniki badań wskazują, że dodatek popiołu lotnego (P) powoduje zdecydowanie większe oddziaływanie usztywniające w zaczynach asfaltowych w stosunku do wypełniacza wapiennego (W-75), niezależnie od gatunku zastosowanego asfaltu drogowego. Wynika to z dużej zawartości wolnych przestrzeni  $R_V$  w próbce P, których wartości zostały przedstawione na rys. 4.

Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników badań można stwierdzić, że dodatek wypełniacza wapiennego do popiołu lotnego zmniejsza oddziaływanie usztywniające mieszanki P-W w zaczynie asfaltowym do poziomu nieznacznie przewyższającego oddziaływanie usztywniające wypełniacza wapiennego, powszechnie stosowanego w budownictwie drogowym.

#### 4. Badania i analiza porównawcza lepkości dynamicznej zaczynów asfaltowych po starzeniu metodą RTFOT

Program badań przewidywał wykonanie oznaczenia starzenia lepiszczy asfaltowych 35/50 i 50/70 w warunkach laboratoryjnych metodą RTFOT oraz zaczynów z udziałem próbek popiołu lotnego (P), wypełniacza wapiennego (referencyjnego W) oraz mieszanki popiołowo – wapiennej (P-W). Celem tych badań była ocena przydatności próbek popiołów lotnych do MMA poprzez porównanie właściwości reologicznych asfaltów i zaczynów asfaltowych przed i po starzeniu metodą RTFOT.



Rys. 10. Zmiany lepkości dynamicznej  $D_h$  po starzeniu wg RTFOT (indeks stwardnienia  $IS$ ), gdzie:

$$\Delta\eta = \frac{\eta^{RTFOT}}{\eta} = IS \quad (2)$$

$IS$  - indeks stwardnienia zaczynu asfaltowego,

$\eta^{RTFOT}$  - lepkość dynamiczna zaczynu asfaltowego w temp. 90, 110 i 135 °C po starzeniu wg RTFOT, [Pa s],

$\eta$  - lepkość dynamiczna zaczynu asfaltowego w temperaturze 90, 110 i 135 °C przed starzeniem, [Pa s].

Wartości indeksu stwardnienia  $IS$ , obliczone na podstawie pomierzonych lepkości dynamicznych przed i po starzeniu RTFOT, które przedstawiono na rys. 10 pokazują, że usztywnienie spowodowane procesem starzenia asfaltu wyjściowego

35/50 jest zdecydowanie większe niż usztywnienie zaobserwowane w zaczynach asfaltowych z udziałem wypełniacza wapiennego, popiołu lotnego i mieszanki P-W. Świadczy to o łagodzącym wpływie wszystkich badanych wypełniaczy na stwardnienie zaczynu po starzeniu. Największy łagodzący wpływ na stwardnienie zaczynu po starzeniu posiada mieszanka P-W, nieznacznie większy – popiół lotny i wypełniacz wapienny. Świadczy to o korzystnych cechach popiołu lotnego jako wypełniacza mieszanego z wypełniaczem wapiennym do MMA.

W przypadku zaczynów asfaltowych z asfaltem 50/70 łagodzący wpływ wypełniaczy na stwardnienie zaczynu po starzeniu nie jest już tak jednoznaczny. Zaobserwowano tutaj nieznaczne zmniejszenie usztywnienia zaczynu z popiołem lotnym oraz wzrost usztywnienia zaczynu z wypełniaczem wapiennym oraz mieszanką P-W, w szczególności w temperaturze 110 °C.

Niewielkie zmniejszenie usztywnienia zaczynów lub jego wzrost w stosunku do usztywnienia asfaltu 50/70 może wynikać ze stosunkowo małej zmiany lepkości asfaltu 50/70 przed i po starzeniu RTFOT. Zmiana lepkości dynamicznej przed i po starzeniu asfaltu 50/70 wyniosła  $\Delta\eta = 1,1, 1,4$  i  $1,9$  odpowiednio dla temperatury pomiaru wynoszącej 135, 110 i 90 °C, tymczasem dla asfaltu 35/50 zmiany lepkości wyniosły odpowiednio  $\Delta\eta = 3, 2,4$  i  $3,1$ .

Większe usztywnienie zaczynu z wypełniaczem wapiennym, a w szczególności z mieszanką P-W, przed i po starzeniu, w stosunku do usztywnienia asfaltu 50/70 może też wynikać z dużego spadku masy zaczynu po starzeniu RTFOT w stosunku do spadku masy asfaltu 50/70. Spadek masy spowodowany jest odparowaniem lżejszych składników asfaltu, które zmienia właściwości reologiczne zaczynu. Lżejsze składniki zaczynu asfaltowego zawarte są głównie w „asfalcie wolnym”. Jeżeli następuje duży ubytek masy zaczynu po starzeniu można przypuszczać, że w tym zaczynie był duży udział „asfaltu wolnego”, a mniejszy „asfaltu związanego”, których ilościową miarą jest procentowa objętość „fazy stałej”  $V_B$  w zaczynie. Wyniki badań struktury wypełniaczy mineralnych zamieszczone w [13] wykazały, że w zaczynach asfaltowych z wypełniaczem wapiennym i mieszanką P-W objętość „fazy stałej”  $V_B$  jest najmniejsza, a tym samym zawartość „asfaltu wolnego” jest w nich największa.

## 5. Wnioski

Wykonane badania laboratoryjne właściwości strukturalnych i funkcjonalnych popiołu lotnego z elektrowni opalanej węglem brunatnym oraz ich ocena z punktu widzenia wymogów stawianych wypełniaczom do MMA upoważniają do sformułowania następujących wniosków:

- Badane próbki popiołów lotnych spełniają wymagania techniczne [25] pod względem jakości (tj. szkodliwości) pyłów, natomiast nie spełniają pod względem porowatości ( $RV > 45\%$ ) oraz przyrostu temperatury mięknięcia ( $\Delta T_{PK} > 25^\circ\text{C}$ ), a próbka wyjściowa P także pod względem uziarnienia.
- Popioły lotne P-30 i P-30/100 nie spełniają wymagań normy [23] pod względem powierzchni właściwej ziaren, a popiół P-30 – wymagań normy [19] pod względem chłonności asfaltu (zbyt duża bitumochłonność próbki).
- Wypełniacz mieszany (próbka P-W) spełnia wymagania techniczne [23].
- Porowatość, przyrost temperatury mięknięcia oraz lepkość dynamiczna wska-



- zują, że analizowane próbki popiołów mogą powodować zbyt duże usztywnienie zaczynów (przy proporcji obj. W/A = 0,60), a tym samym mieszanek MMA (zaczyn asfaltowy będzie za sztywny i kruchy).
- Dodatek wypełniacza wapiennego (W) do popiołu lotnego (P) w proporcji 1:1 m/m zdecydowanie zmniejsza właściwości usztywniające wypełniacza mieszanego (mieszanki P-W) w zaczynie asfaltowym, zarówno przed jak i po starzeniu RTFOT.
  - Zaobserwowano łagodzący wpływ mieszanki popiołowo - wapiennej (P-W), a w szczególności popiołu lotnego (P) na usztywnienie zaczynów asfaltowych po starzeniu metodą RTFOT.
  - Nie zaobserwowano prostej korelacji pomiędzy powierzchnią właściwą ziaren analizowanych próbek a ich porowatością. Przyczyną braku korelacji może być różnica pomiędzy teksturą ziaren popiołów lotnych a teksturą ziaren pozostałych badanych próbek.

Rezultaty badań i analiza wyników wykazały więc, że popiół lotny jako samodzielny wypełniacz (wypełniacz podstawowy) jest nieprzydatny do MMA z uwagi na zbyt duże oddziaływanie usztywniające w zaczynach asfaltowych. Dodatek wypełniacza wapiennego do popiołu lotnego (P) zdecydowanie zmniejsza te właściwości w mieszance P-W, która może być przydatna jako wypełniacz mieszany do MMA.

## Literatura

- [1] Szczygielski T. *Uboczne produkty spalania w drogownictwie*. Normy a aprobaty techniczne, Magazyn Autostrady, 10 (2009) 24-27.
- [2] Pachowski J. *Popioły lotne i ich zastosowanie w budownictwie drogowym*, Warszawa, WKiŁ 1976.
- [3] Szczygielski T., Myszkowska A. *Popioły wysoko-wapniowe - przetwarzanie i wykorzystanie*, Magazyn Autostrady, 4 (2006) 38-43.
- [4] Pachowski J. *Rozwój technologii powstawania ubocznych produktów elektrowniowych oraz ich charakterystyka i możliwości zastosowań w technologiach budownictwa drogowego*, Drogi i Mosty, 1 (2002) 59-99.
- [5] Zawisz E., Franczak A. *Wytrzymałość i mrozoodporność stabilizowanych popiołów lotnych*, Drogownictwo, 6 (2010) 202-207.
- [6] PN-S-06103: Drogi samochodowe. Podbudowa z betonu popiołowego, grudzień 1997.
- [7] Widuch A., Ćwiakała M., Korzeniowska J., Kraszewski C. *Możliwość zagospodarowania popiołów lotnych z węgla brunatnego w drogownictwie*, Drogownictwo, 12 (2011) 390-394.
- [8] Zhang W., Chen Ch. *Experiment Study on the Rubber and Fly Ash of Modified Asphalt, Water Resource and Environmental Protection (ISWREP)*, 2011, 2971-2974.
- [9] Mikoc M., Markovic D. *Influence of slag, fly ash, silica fume on the mechanical and physical properties of asphalt*, Technical Gazette 17, 4 (2010) 505-514.
- [10] Jaskuła P. *Niszczące działanie wody i mrozu na mieszanki mineralno-asfaltowe przegląd literatury*, Drogi i Mosty, 4 (2004) 8-12.
- [11] Johansson L. S., Isacson U. *Influence of Testing Conditions on the Capacity of Hydrated Lime to Inhibit Bitumen Ageing*, Royal Institute of Technology, Stockholm, 3 (1998) 1-12.
- [12] Johansson L. S., Xiaohu L., Isacson U. *Ageing of Road Bitumens – State of the Art*, Royal Institute of Technology, Stockholm, 1 (1998) 1-45.
- [13] Wilanowicz J., Grabowski W., Andrzejczak M. *Właściwości strukturalne i funkcjonalne*

- popiołów lotnych jako wypełniaczy do mieszanek mineralno – asfaltowych*, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, 283, 59 (2012) 369-376.
- [14] PN-EN 933-10: *Badania geometrycznych właściwości kruszyw. Część 10: Ocena zawartości drobnych cząstek - Uziarnienie wypełniaczy (przesiewanie w strumieniu powietrza)*, maj 2002.
- [15] PN-R-04032: *Gleby i utwory mineralne. Pobieranie próbek i oznaczanie składu granulometrycznego*, styczeń 1998.
- [16] PN-EN 196-6: *Metody badania cementu. Oznaczanie stopnia zmielenia*, luty 1997.
- [17] PN-EN 1097-4: *Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Część 4: Oznaczanie pustych przestrzeni suchego, zagęszczonego wypełniacza*, styczeń 2002.
- [18] PN-EN 933-9: *Badania geometrycznych właściwości kruszyw. Ocena zawartości drobnych cząstek. Badanie błękitem metylenowym*, luty 2001.
- [19] PN-S-96505: *Mączki mineralne do mas bitumicznych*, maj 1977.
- [20] PN-EN 13179-1: *Badania kruszyw wypełniających stosowanych do mieszanek bitumicznych. Część 1: Badania metodą pierścienia delta i kuli*, maj 2002.
- [21] PN-EN 13302: *Asfalty i lepiszcza asfaltowe. Oznaczanie lepkości dynamicznej lepiszczy asfaltowych lepkościomierzem obrotowym*, 2011.
- [22] PN-EN 12607-1: *Asfalty i lepiszcza asfaltowe. Oznaczanie odporności na starzenie pod wpływem ciepła i powietrza. Część 1: Metoda RTFOT*, sierpień 2009.
- [23] Wymagania Techniczne Nr 1. *Kruszywa do mieszanek mineralno - asfaltowych i powierzchniowych utrwaleń na drogach publicznych, IBDiM*, Warszawa 2010.
- [24] Gradziński R., Kostecka A., Radomski A., Unrug R. *Zarys sedymentologii*, Warszawa, Wydawnictwo Geologiczne 1986.
- [25] PN-S-96504: *Drogi samochodowe. Wypełniacz kamienny do mas bitumicznych*, grudzień 1961.

## Conditions for use of fly ashes as filler for hot-mix asphalt

Wojciech Grabowski, Jarosław Wilanowicz, Marta Andrzejczak,  
Marcin Bilski

*Zakład Dróg, Ulic i Lotnisk, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Poznańska, e-mail: wojciech.grabowski@put.poznan.pl, jaroslaw.wilanowicz@put.poznan.pl, marta.andrzejczak@put.poznan.pl, marcin.bilski@put.poznan.pl*

**Abstract:** The main purpose of this work is to get to know the structural and functional properties of fly ashes, i.e. industrial waste from lignite-fired power plant, from the perspective of their use as fillers for hot-mix asphalt (HMA). Analysis of the results of laboratory tests: grain-size distribution, specific surface, air voids of dry compacted fillers, stiffening properties in bituminous mastics showed that the fly ashes do not meet the requirements for fillers to HMA, because they cause too much stiffening impact. The results of extensive research has shown that these ashes can be used for the HMA, as so-called the mixed fillers with the participation of limestone filler used traditionally.

**Keywords:** filler, fly ash, bituminous mastic, hot-mix asphalt, ageing RTFOT.