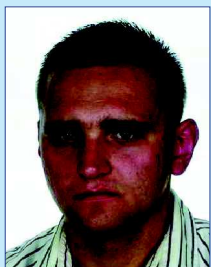




MAREK IWĄŃSKI

Politechnika
Świętokrzyska
m.iwanski@tu.kielce.pl



PRZEMYSŁAW
BUCZYŃSKI

Politechnika
Świętokrzyska
p.buczynski@tu.kielce.pl

Zastosowanie pyłów mineralnych w technologii recyklingu głębokiego na zimno z asfaltem spienionym

Dynamiczny rozwój sieci drogowej w kraju powoduje wzrost zapotrzebowania na kruszywo o wysokich parametrach jakościowych, które jest niezbędne do wykonania warstw konstrukcyjnych nawierzchni drogowej. Jednym z takich parametrów kruszywa jest ograniczona w nim ilość pyłów, ponieważ duża ich zawartość wpływa negatywnie na proces zapewnienia wymaganej adhezji asfaltu do powierzchni ziaren mineralnych.

Szczególne wymagania związane z zapewnieniem odpowiedniej jakości mieszanki mineralno-asfaltowej (mma) powodują, że w procesie jej wytwarzania w wytwórni następuje odpylanie pyłów z kruszywa. Przy tym tego rodzaju pyły mineralne są bardzo zróżnicowane, w zakresie pochodzenia mineralogicznego, ponieważ mma produkowane są z różnych rodzajów kruszywa, w celu zapewnienia odpowiedniej ich jakości [2, 7]. Wykorzystanie pyłów mineralnych z odpylania kruszywa, jako np. wypełniacza zastępczego w mieszance mineralno-asfaltowej, jest bardzo problematyczne. Szczególnie jeżeli stosowane jest kruszywo zawierające krzemionkę. Wówczas zastosowanie takich pyłów mineralnych może spowodować obniżenie jakości mma. Również w innych technologiach drogowych stosowanie tego rodzaju materiału jest obecnie bardzo ograniczone.

Należy również podkreślić, że w czasie wytwarzania kruszywa, w wyniku przeróbki materiału skalnego powstają też pyły mineralne, których ilość uzależniona jest od rodzaju przerabianego materiału mineralnego. Tak więc intensywny rozwój drogownictwa powoduje wytwarzanie dużych ilości materiału o bardzo drobnym uziarnieniu, którego wykorzystanie w drogownictwie do chwili obecnej było praktycznie niemożliwe.

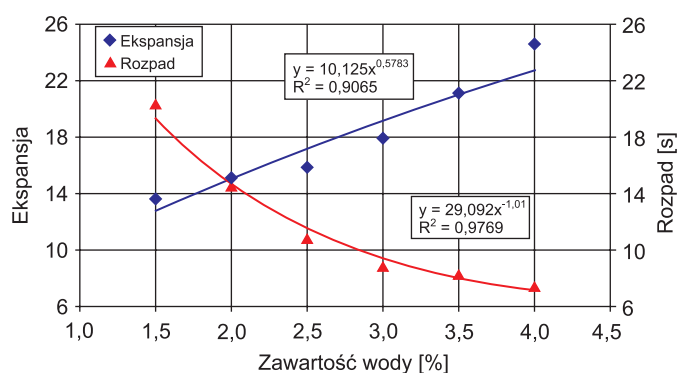
Niezbędne jest więc znalezienie takiej technologii, w której można będzie wykorzystać pyły mineralne. Jedną z potencjalnych możliwości jest ich zastosowanie w recyklingu głębokim konstrukcji nawierzchni na zimno z asfaltem spienionym. Mieszanka mineralna stosowana w tej technologii charakteryzuje się wymaganą ilością materiału mineralnego od 5 do 20% (m/m) na sicie 0,063 mm. Czyli znacznie więcej niż w przypadku mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej (mce). Dodatkowo, w recyklowanej mieszance z asfaltem spienionym duża ilość drobnej frakcji wpływa na zapewnienie jej wymaganej jakości, bowiem drobne ziarna

mieszanki mineralnej otaczane są przez asfalt spieniony, budując jego strukturę wewnętrzną, która zapewnia jakość recyklowanego materiału na wysokim poziomie [5].

Właściwości asfaltu spienionego

Technologia recyklingu głębokiego na zimno z asfaltem spienionym wymaga zastosowania asfaltów charakteryzujących się odpowiednim współczynnikiem ekspansji [WE] oraz czasem połowicznego rozpadu piany asfaltowej ($t_{1/2}$) [4]. Asfalt wykorzystany w badaniach dobrano na podstawie oznaczeń wykonanych w Katedrze Inżynierii Komunikacyjnej Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach [4].

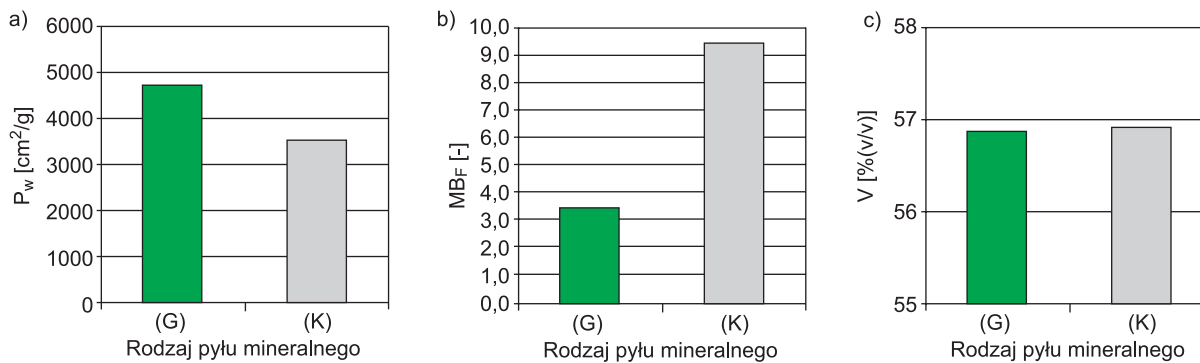
Wybrany asfalt, oznaczony symbolem 80 N (rys. 1), charakteryzował się (na podstawie szczegółowo opisanych badań [4], najkorzystniejszymi parametrami spienienia, tj. współczynnikiem ekspansji $WE = 15,1$ oraz czasem połowicznego rozpadu piany asfaltowej $t_{1/2} = 14,4$ s. Zastosowanie tego asfaltu podczas recyklingu głębokiego na zimno powinno gwarantować uzyskanie podbudowy o wysokich parametrach fizykomechanicznych.



Rys. 1. Charakterystyki asfaltu spienionego dla asfaltu 80N [4]

Charakterystyka pyłów mineralnych

Przedmiotem badań w aspekcie zastosowania pyłów mineralnych w technologii recyklingu głębokiego na zimno z asfaltem spienionym były dwa rodzaje pyłów, które różniły się od siebie składem mineralogicznym. Jednym z nich były pyły gabrowe (G), które powstały w procesie odpylania kruszywa w czasie jego suszenia w wytwórni mieszanek mineralno-asfaltowych. Tego rodzaju kruszywo jest bardzo często



Rys. 2. Podstawowe cechy strukturalne pyłów mineralnych: a) powierzchnia właściwa wg Blaina, b) wskaźnik błękitu metylenowego (szkodliwość pyłów) c) puste przestrzenie suchego zagęszczonego wypełniacza (Rigden)

wykorzystywane w procesie produkcji mieszanki mineralno-asfaltowej ze względu na dobre powinowactwo z asfaltem. Należy zaznaczyć, że pyły gabrowe powstają również w wyniku płukania kruszywa w kopalni.

W związku z tym, że pyły gabrowe mają zasadowy charakter, w celu zróżnicowania rodzaju mineralogicznego, jako drugi rodzaj materiału badawczego, zastosowano pyły z piaskowca kwarcytowego (K), które zawierają ponad 90% krzemionki. Ponieważ nie produkuje się mieszanki mineralno-asfaltowej tylko z tego rodzaju kruszywa, pozyskano je z kopalni, gdzie powstają w procesie płukania kruszywa grubego.

W celu rozpoznania charakterystyki pyłów mineralnych konieczne było określenie ich podstawowych właściwości funkcjonalnych oraz cech strukturalnych. Cechy strukturalne można zdefiniować jako obraz budowy wewnętrznej pyłów mineralnych, a więc rozmieszczenie elementów składowych (fazy stałej, ciekłej i gazowej) [2]. Cechami strukturalnymi określonymi w ramach badań były: uziarnienie, powierzchnia właściwa (P_w), zawartość składników ilastych (MB_F) oraz zawartość wolnych przestrzeni suchego zagęszczonego pyłu mineralnego (V).

Natomiast właściwości funkcjonalne można określić jako grupę cech związanych z zachowaniem się oraz wzajemnym oddziaływaniem pyłów mineralnych w zaczynach asfaltowych [3]. Jedną z podstawowych właściwości funkcjonalnych jest bitumochłonność wypełniaczy mineralnych (pyłów), a drugą wskaźnik pH określany w celu rozpoznania ich kwasowości.

Wyniki badań podstawowych cech strukturalnych pyłów mineralnych przedstawiono graficznie na rysunku 2.

Analizując rezultaty badań cech strukturalnych (rys. 2) można stwierdzić, że rodzaj pyłu oraz jego pochodzenie mają istotny wpływ na uzyskane wyniki oznaczeń. Maksymalną wartość powierzchni właściwej ($P_w = 4901$ cm²/g) osiągnęły pyły mineralne gabrowe (G), co związane jest również z drobniejszym ich uziarnieniem. Wartość powierzchni właściwej określona została na podstawie stopnia rozdrobnienia pyłów mineralnych. Mniejszą powierzchnią właściwą charakteryzowały się pyły z piaskowca kwarcytowego (K), co jest konsekwencją ich uziarnienia oraz twardości skały, która wpływa na rozdrobnienia materiału mineralnego. Uziarnienie badanych pyłów przedstawiono w tabeli 1.

Wartość wskaźnika błękitu metylenowego MB_F odzwierciedlająca zawartość minerałów ilastych w badanym materiale

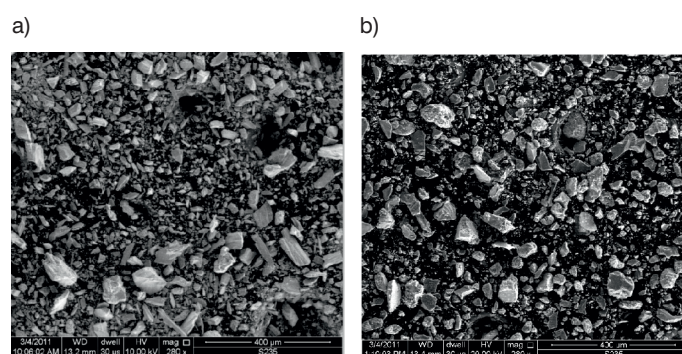
wskazuje, że pyły z piaskowca kwarcytowego charakteryzują się prawie trzykrotnie większą ich zawartością ($MB_F = 9,1$) w porównaniu z pyłami gabrowymi ($MB_F = 3,2$). Efekt ten może być konsekwencją występowania w pokładach piaskowca kwarcytowego iłotupka skalnego, który jest materiałem miękkim i podczas procesu kruszenia zostaje przetworzony na frakcję pylasto-ilastą. Powoduje to obniżenie jakości pyłów mineralnych (K).

Tabela 1. Uziarnienie badanych pyłów mineralnych

Sito #	Sposób badania	Procent przechodzącej masy	
		Gabro	Kwarcyt
2,0 mm	PN-EN 933-10	100	100
0,125 mm		96,2	96,3
0,063 mm		86,9	84,3

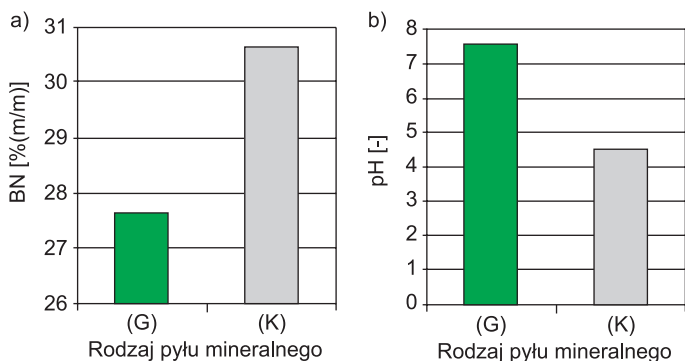
Zawartość wolnej przestrzeni $V\%(v/v)$ w suchym zagęszczonym pyłe gabro i z piaskowca kwarcytowego jest na porównywalnym poziomie 57%(v/v). Nieznacznie większą wartością $V\%(v/v)$ charakteryzują się jednak pyły z piaskowca kwarcytowego w porównaniu z pyłami z kruszywa gabro.

Na podstawie oceny fotografii pyłów mineralnych uzyskanych metodą napyłania za pomocą mikroskopu skaningowego, możliwe było zaobserwowanie różnicy w ich uziarnieniu (fot. 1). Pyły mineralne pochodzenia gabrowego charakteryzują się drobniejszym uziarnieniem w porównaniu do pyłów kwarcytowych.



Fot. 1. Obraz skaningowy uziarnienia badanych pyłów mineralnych: a) gabro, b) kwarcyt (fot. P. Buczyński)

Kolejny etap badań pyłów mineralnych polegał na określe- niu ich właściwości funkcjonalnych (rys. 3), które w istotny sposób wpływają na kształtowanie parametrów zaczynu as- faltowego.



Rys. 3. Właściwości funkcjonalne pyłów mineralnych: a) liczba bitu- miczna, b) odczyn pH

Na podstawie analizy liczby bitumicznej pyłów, określanej przez ich lepkość przy określonej ilości wody [6], można stwierdzić, że większym zapotrzebowaniem na wodę charak- teryzują się pyły z piaskowca kwarcytowego ($BN = 30,6$) w porównaniu do pyłów gąbrowych ($BN = 27,8$). Efekt więk- szego zapotrzebowania wody przez pyły kwarcytowe do uzy- skania odpowiedniej ich lepkości jest najprawdopodobniej wynikiem zawartości w nich minerałów ilastych, pochodzą- cych z procesu kruszenia skały zawierającej ilitupek.

Bardziej kwaśnym materiałem są pyły z piaskowca kwarc- ytowego o $pH < 4,5$, co jest konsekwencją materiału mine- ralnego, z którego zostały one pozyskane (piaskowiec kwarcytowy). Natomiast pyły gąbrowe można sklasyfikować jako obojętne/zasadowe, ponieważ charakteryzują się one $pH \geq 7,5$.

Analizując uzyskane cechy strukturalne oraz właściwości funkcjonalne badanych pyłów mineralnych należy stwierdzić, że w większości przypadków, wykluczając zawartość wolnej przestrzeni suchego zagęszczonego pyłu mineralnego z od- pylania kruszywa (V), są one zróżnicowane, a tym samym ich wpływ na właściwości recy- klowanej podbudowy z asfaltem spienionym będzie innego rodzaju.

Rozpatrując badane cechy można stwier- dzić, że istotny wpływ na właściwości recy- klowanej podbudowy może mieć powierzch- nia właściwa (P_w), zawartość minerałów ila- stych (MB_F), wskaźnik (pH) oraz liczba bitumiczna (BN).

Największy wpływ na uzyskane wyniki recy- klowanej podbudowy z asfaltem spienio- nym i pyłami mineralnymi może mieć odczyn pH . Zastosowanie kwaśnego materiału mine- ralnego w składzie tradycyjnej mieszanki mineralno-asfaltowej powoduje znacznie mniejszą jej odporność na działanie wody i mrozu w porównaniu do mieszanek mine- ralno-asfaltowych zawierających kruszywa zasadowe.

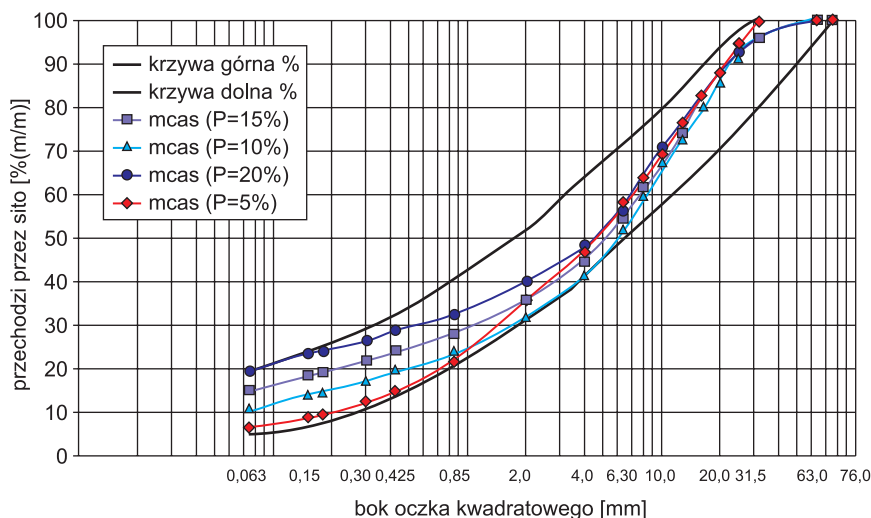
Przyjęta metodyka badań w dalszej części artykułu pozwo- li określić wpływ pyłów mineralnych na właściwości mecha- niczne oraz działanie czynników atmosferycznych recyklo- wanej podbudowy (mcas).

Projekt składu recyklowanych mieszanek mineralnych

Projekt zakładał wykorzystanie maksymalnej ilości mate- rialów już raz wbudowanych (pozyskanych z konstrukcji na- wierzchni drogowej) oraz pyłów mineralnych.

Mieszanek mineralną recyklowanej podbudowy stanowił materiał pozyskany w postaci destruktu asfaltowego (od 50 do 65% m/m), uzyskanego z frezowanych warstw konstruk- cyjnych, kruszywa – o uziarnieniu do 31,5 mm, stanowiącego wcześniej podbudowę z kruszywa stabilizowanego mecha- nicznie w ilości 30% (m/m) oraz materiału doziarniającego w postaci pyłów mineralnych (gąbro, piaskowiec kwarcyto- wy) stosowanych zamiennie w ilości 5% (m/m), 10% (m/m), 15% (m/m) oraz 20% (m/m). Jako lepiszcze zastosowano as- falt spieniony 80N w ilości 4,0% (m/m). Zastosowano również dodatek cementu w ilości 1,5% (m/m).

Przebieg krzywych uziarnienia bez względu na zastosowa- ne pyły mineralne, przy ich różnych zawartościach procento- wych, jest bardzo zbliżony w zakresie uziarnienia ponad 2 mm. Związane jest to z uziarnieniem materiałów mineral- nych wykorzystanych do sporządzenia mieszanek. Ponieważ przede wszystkim uziarnienie mieszanki mineralnej w zakre- sie grubego kruszywa odgrywa istotną rolę w kształtowaniu zawartości wolnych przestrzeni w mieszance mineralno-as- faltowej, przyjęto założenie, że pyły mineralne, niezależnie od ich ilości, nie będą miały znaczącego wpływu na wartość tego parametru. Prawdopodobność tego założenia potwierdziły wyniki badań laboratoryjnych [1]. Recyklowane mieszanki mineralno-asfaltowe zawierające w swoim składzie powyżej 5% (m/m) pyłów mineralnych, niezależnie od ich rodzaju, charakteryzowały się porównywalną zawartością wolnych przestrzeni na poziomie około 8% (v/v). W związku z tym, możliwe jest porównywanie badanych mieszanek mineral-



Rys. 4. Uziarnienie mieszanek mineralnych recyklowanej podbudowy z różną ilością pyłu mineralnego [9]

nych pod kątem wpływu ich uziarnienia na właściwości mechaniczne podbudów wykonanych w technologii recyklingu głębokiego na zimno z asfaltem spienionym.

Metodyka badań recyklowanych mieszanek podbudowy

Badanie mieszanek (mcas) z pyłami gabrowymi oraz z piaskowca kwarcytowego wykonano w oparciu o dziedzinę eksperymentu, która obejmowała zakres dozowania pyłu mineralnego w przedziale od 5% (m/m) do 20% (m/m) z krokiem co 5% (m/m) oraz asfalt spieniony w ilości 4% (m/m).

Pierwszy etap badań laboratoryjnych obejmował określenie podstawowych właściwości mechanicznych recyklowanej podbudowy, tj. stabilność (S), sztywność wg Marshalla (S_z), nasiąkliwość (n) i wytrzymałość na pośrednie rozciąganie (ITS).

W ramach drugiego etapu badań określono wpływ oddziaływania czynników klimatycznych na właściwości recyklowanej podbudowy. Ze względu na niekorzystne warunki klimatyczne panujące w Polsce, konieczne było wykonanie szerszego zakresu badań w celu określenia możliwości zastosowania tej technologii w praktyce drogowej. Określono następujące parametry: wskaźnik odporności na działanie wody TSR (ang. *Tensile Strength Retain*), zgodnie z wytycznymi [8], wskaźnik odporności na działanie wody (WR_w) oraz wskaźnik odporności na działanie wody i mrozu (WR_{w+m}), zgodnie z metodyką AAHSTO T283, przedstawioną w [6]. Dodatkowo, w celu określenia wpływu niskich wartości temperatury na recyklowane podbudowy, określono odporność na spękania niskotemperaturowe, zgodnie z fińską normą PANK 4302 [10].

Należy zwrócić uwagę, że parametr TSR , który charakteryzuje odporność na działanie wody recyklowanych mieszanek, nie jest tożsamy z parametrem $ITSR$ określanym na próbkach mieszanek mineralno-asfaltowych, wytwarzanych w technologii „na gorąco”, zgodnie z WT-2 2010 [11]. Próbki w badaniu tym poddawane są 24 godzinemu nasączeniu wodą, a wynik odzwierciedla odporność podbudowy na oddziaływanie wody i jest określany za pomocą wzoru.

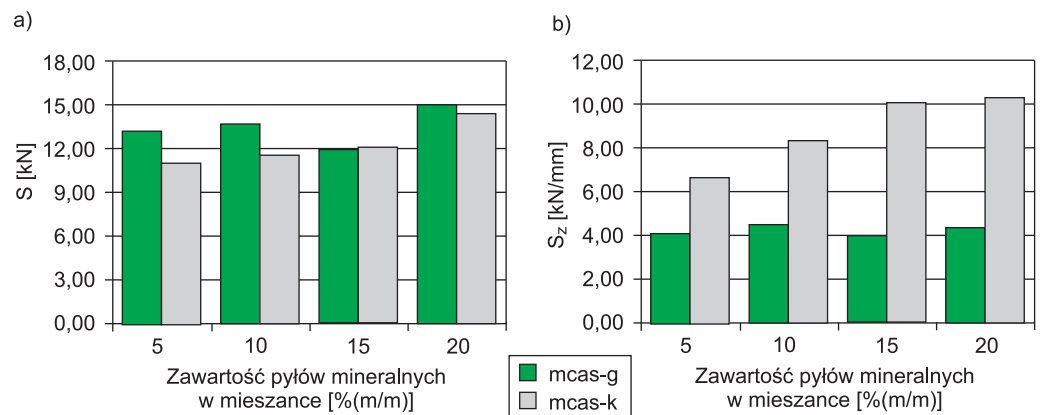
$$TSR = \frac{ITS_{woda}}{ITS} \quad (1)$$

w którym:

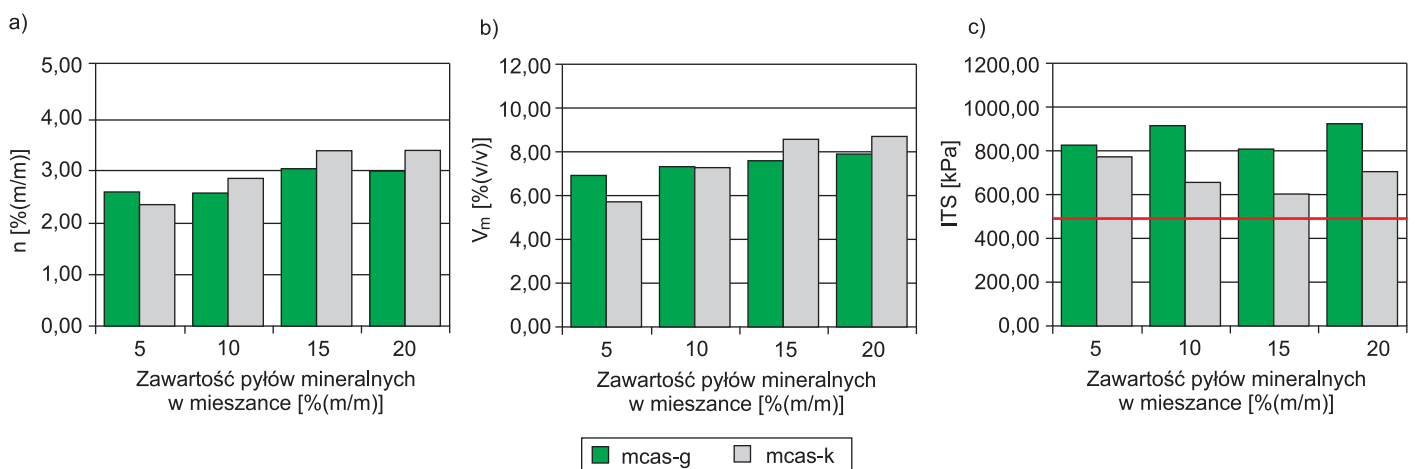
ITS_{woda} – wytrzymałość na pośrednie rozciąganie po 24 godzinnej pielęgnacji wodą próbek w temperaturze 25°C,
 ITS – wytrzymałość na pośrednie rozciąganie oznaczona na próbkach w warunkach powietrzno-suchych.

Podstawowe właściwości recyklowanych mieszanek

Wykonane zgodnie z metodyką pierwszego etapu badań rezultaty oznaczeń recyklowanych mieszanek podbudowy przedstawiono na rysunkach 5 i 6.



Rys. 5. Właściwości mechaniczne recyklowanej mieszanki podbudowy z pyłami gabrowymi mcas-g i kwarcytowymi mcas-k: a) stabilność wg Marshalla, b) sztywność wg Marshalla



Rys. 6. Podstawowe właściwości recyklowanej mieszanki podbudowy z pyłami gabrowymi mcas-g i kwarcytowymi mcas-k: a) nasiąkliwość n , b) zawartość wolnej przestrzeni V_m , c) wytrzymałość na pośrednie rozciąganie ITS

Analizując rezultaty badań właściwości mechanicznych recyklowanych mieszanek podbudowy można stwierdzić, że istotny wpływ na uzyskane charakterystyki przedstawione na rysunku 5, ma rodzaj stosowanego pyłu mineralnego oraz jego ilość.

Dokonując szczegółowej analizy rezultatów badań można zauważyć, że większą stabilnością wg Marshalla (S) charakteryzują się mieszanki podbudowy, w których składzie ramowym zastosowano pyły gabrowe. Należy również zauważyć, że wraz ze wzrostem ilości pyłów w recyklowanej mieszance podbudowy, wartość stabilności wzrasta, jedynie w mieszance z pyłami gabrowymi w ilości 15%(m/m) parametr ten jest mniejszy. Maksymalną wartość stabilności ($S = 14,74$ kN) uzyskała mieszanka (mcas-g) przy 20%(m/m) zawartości pyłów gabrowych.

Analizując wyniki oznaczeń wskaźnika sztywności Marshalla recyklowanych mieszanek podbudowy można stwierdzić, że parametr ten uzależniony jest w znacznym stopniu od rodzaju i ilości zastosowanych pyłów mineralnych w recyklowanych mieszankach. Wyższy wskaźnik sztywności S_z uzyskały mieszanki zawierające w swoim składzie pyły kwarcytowe, co najprawdopodobniej jest konsekwencją zawartości w ich składzie frakcji ilastej (określonej w badaniu MB_r). Wraz ze zwiększeniem koncentracji pyłów z piaskowca kwarcytowego, wzrasta sztywność recyklowanych mieszanek podbudowy i przy ich zawartości 15%(m/m) wynosi 10 kN/mm. Duża sztywność wg Marshalla recyklowanych mieszanek podbudowy z pyłami z piaskowca kwarcytowego może przyczynić się do ewentualnego powstawania spękań w warstwie konstrukcyjnej.

Oceniając wyniki badań nasiąkliwości oraz zawartości wolnej przestrzeni, przedstawione na rysunku 6a i 6b, można zauważyć, że wraz ze wzrostem ilości pyłów mineralnych w recyklowanych mieszankach, następuje wzrost wartości tych parametrów przy ich koncentracji powyżej 5%(m/m). Recyklowane mieszanki podbudowy zawierające 10%(m/m), 15%(m/m) oraz 20%(m/m) niezależnie od rodzaju pyłu mineralnego charakteryzują się porównywalną zawartością wolnych przestrzeni na poziomie około 8%(m/m). Podobna zależność występuje w przypadku nasiąkliwości recyklowanych mieszanek podbudowy, która występuje na porównywanym poziomie około 3,0%(m/m) przy zawartości pyłów mineralnych powyżej 10%(m/m) w mieszance mineralnej. Przy tym, teoretycznie, wraz ze wzrostem koncentracji pyłów mineralnych w recyklowanych mieszankach, wartości badanych parametrów powinny maleć, gdyż wzrost koncentracji pyłów powinien zapewnić większą ich szczelność. Najprawdopodobniej jednak wpływ na zmianę tej zależności recyklowanych mieszanek może mieć bitumochłonność pyłów mineralnych. Większa zawartość pyłów w składzie recyklowanej mieszanki powoduje jednocześnie agregowanie zwiększonej ilości wody wewnątrz struktury pyłów, a w związku z tym zwiększenie nasiąkliwości oraz zawartości wolnej przestrzeni w podbudowie przy większej ich koncentracji niż 5%(m/m). Wyniki badań nasiąkliwości oraz zawartości wolnej przestrzeni recyklowanych mieszanek korespondują z rezultatami oznaczeń charakterystyki pyłów mineralnych przedstawionych na rysunku 3a. Większą bitumochłonnością charakteryzują się pyły kwarcytowe, czego konsekwencją jest wzrost nasiąkliwości oraz zawartości wolnej przestrzeni recyklowanego materiału podbudowy, w którym zostały one zastoso-

wane. Maksymalną wartość nasiąkliwości uzyskała recyklowana mieszanka podbudowy z pyłami kwarcytowymi w ilości 20% (m/m) ($n = 3,37\%$ (v/v)).

Analizując wyniki wytrzymałości na rozciąganie pośrednie można zauważyć, że wszystkie recyklowane mieszanki podbudowy osiągnęły zalecaną wartość 500 kPa [5]. Na podstawie rezultatów badań można stwierdzić, że rodzaj zastosowanego pyłu mineralnego odgrywa istotną rolę w zakresie wartości wskaźnika ITS . Większymi parametrami wytrzymałości na pośrednie rozciąganie charakteryzują się mieszanki podbudowy zawierające w swoim składzie pyły gabrowe, niż te z pyłem kwarcytowym. Przy zawartości pyłów gabrowych w ilości 20% (m/m) recyklowana mieszanka uzyskała największą średnią wartość parametru $ITS = 934,80$ kPa. Natomiast najmniejszą wartością wytrzymałości na pośrednie rozciąganie charakteryzuje się mieszanka podbudowy z pyłami kwarcytowymi przy ich koncentracji w ilości 15% (m/m) ($ITS = 612,05$ kPa).

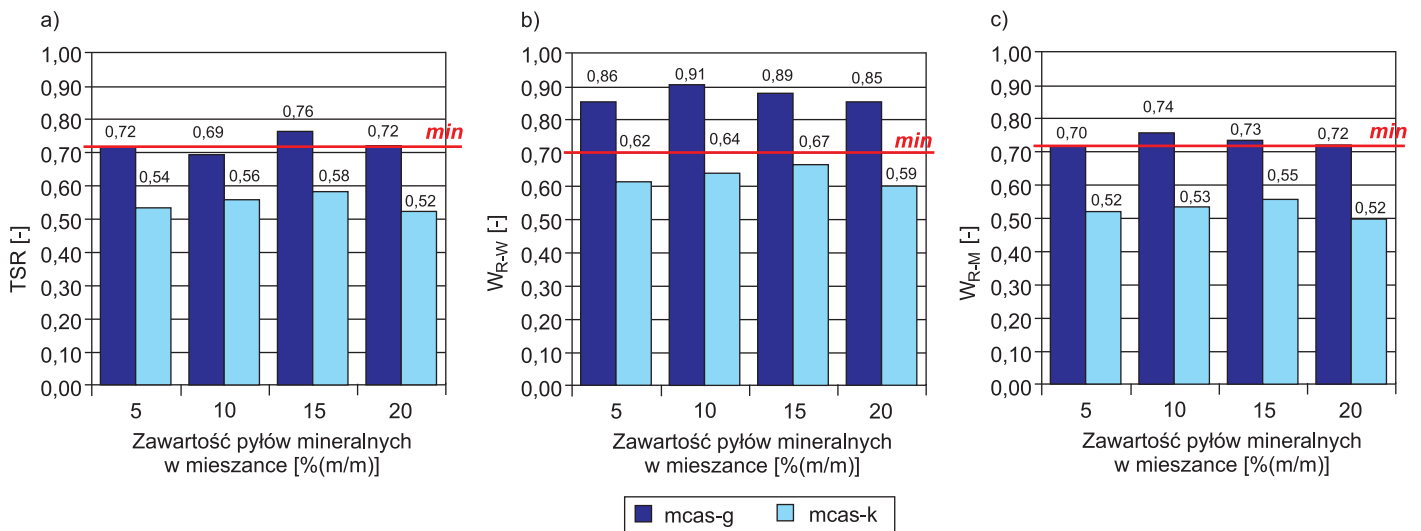
Odporność recyklowanej mieszanki podbudowy na oddziaływanie wody i mrozu

W celu możliwości wykorzystania pyłów mineralnych w recyklowanych mieszankach podbudowy z asfaltem spienionym w polskich warunkach klimatycznych, konieczne jest określenie ich odporności na oddziaływanie wody i mrozu (rys. 7).

Oceniając odporność recyklowanej podbudowy na działanie wody (TSR) można stwierdzić, że praktycznie wszystkie mieszanki zawierające w swoim składzie pyły gabrowe charakteryzują się wymaganą wartością wskaźnika, określoną na poziomie 0,70. Natomiast recyklowane mieszanki na bazie pyłów kwarcytowych nie są odporne na działanie wody. Określone dla nich wartości wskaźnika TRS są mniejsze od 0,70. Jest to związane z ich kwaśnym odczynem, który powoduje szybszą degradację materiału recyklowanej podbudowy w wyniku utraty adhezji lepiszcza do ziaren pyłów kwarcytowych.

Kompleksową ocenę wodo- i mrozoodporności recyklowanych mieszanek uzyskano na podstawie badań wykonanych zgodnie z metodyką określoną w AASHTO T283 [6] (rys. 7 b, c). Wyniki badań odporności na działanie wody (W_{R-W}) pozwalają stwierdzić, że podbudowy z pyłami mineralnymi pochodzenia gabrowego są odporne na działanie wody, natomiast z pyłami kwarcytowymi nie wykazują wymaganego minimalnego wskaźnika na poziomie 0,7 [6]. Wyniki tych badań korelują z rezultatami wskaźnika TSR recyklowanych mieszanek podbudowy.

Należy zaznaczyć, że korzystniejsze rezultaty badań odporności na oddziaływanie wody recyklowanych podbudów uzyskano wg metodyki badań AASHTO T283 w porównaniu z metodyką wg niemieckich wytycznych [8]. Spowodowane to może być procesem kondycjonowania próbek przygotowywanych do badań. Zgodnie z metodyką AASHTO T283, próbki przechowuje się w temperaturze 60°C przez 24 godziny. W tym czasie może wystąpić w recyklowanej mieszance uplastycznienie asfaltu spienionego oraz asfaltu znajdującego się w destrukcie, co w konsekwencji doprowadza do uszczelnienia jej struktury. W związku z tym następuje ograniczenie penetracji wody w głąb próbek recyklowanej mieszanki, a więc i mniejsze nasączenie ich wodą.

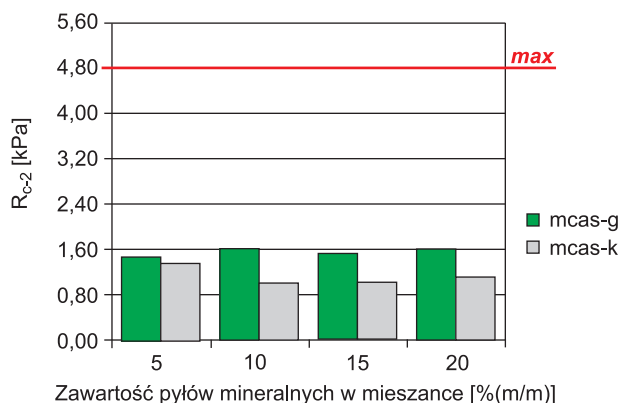


Rys. 7. Wskaźniki odporności na działanie czynników klimatycznych recyklowanej mieszanki podbudowy z pyłami gabrowymi mcas-g i kwarcytowymi mcas-k: a) wskaźniki odporności na działanie wody TSR, b) wskaźnik odporności na działanie wody wg AASHTO T283, c) wskaźnik odporności na działanie wody i mrozu wg AASHTO T283

Analizując wyniki wodo- i mrozoodporności przedstawione na rysunku 7c, można stwierdzić, że recyklowane mieszanki podbudowy z pyłami gabrowymi są odporne na działanie wody i mrozu w całym badanym zakresie ich dozowania w mieszance mineralnej, tj. od 5% (m/m) do 20% (m/m). Natomiast kwaśny odczyn recyklowanych mieszanek zawierających pyły kwarcytowe powoduje, że utraciły one wymaganą odporność na oddziaływanie tych czynników klimatycznych.

W celu określenia usztywniającego wpływu pyłów mineralnych w zaczynach asfaltowych, konieczne jest określenie odporności recyklowanej mieszanki podbudowy na spękania niskotemperaturowe. Oznaczenie wykonano zgodnie z procedurą opisaną w fińskiej normie PANK 4302 [10].

Oceniając odporności na spękania niskotemperaturowe wg PANK 4302 [10], należy zauważyć, że żadna z badanych recyklowanych mieszanek podbudowy nie przekroczyła rekomendowanej wartości granicznej wynoszącej 4,8 MPa. W związku z tym można wnioskować, że podbudowa będzie odporna na spękania niskotemperaturowe w okresie zimy.



Rys. 8. Wytrzymałość na rozciąganie pośrednie w temperaturze -2°C recyklowanej mieszanki podbudowy z pyłami gabrowymi mcas-g i kwarcytowymi mcas-k wg PANK 4302

Podsumowanie

Na podstawie wykonanych badań laboratoryjnych można sformułować następujące wnioski:

- w celu zastosowania pyłów mineralnych w technologii recyklingu głębokiego na zimno z asfaltem spienionym, konieczne jest dokonanie rozpoznania ich właściwości w zakresie cech strukturalnych i właściwości funkcjonalnych, a zwłaszcza określenie wskaźnika pH, zawartości części ilastych oraz bitumochłonności,
- zastosowanie pyłów mineralnych wpływa na poprawę charakterystyk mechanicznych recyklowanej mieszanki na zimno w zakresie stabilności wg Marshalla oraz wytrzymałości na pośrednie rozciąganie *ITS*, przy czym intensywność oddziaływania uzależniona jest od ich rodzaju oraz składu mineralogicznego,
- recyklowane mieszanki mineralne zawierające w swoim składzie pyły mineralne z piaskowca kwarcytowego charakteryzują się dużą sztywnością, określaną przez wskaźnik sztywności wg Marshalla (*Sz*), konsekwencją tego przesztywnienia mogą być spękania warstwy konstrukcyjnej,
- recyklowane mieszanki podbudowy charakteryzują się odpornością na spękania niskotemperaturowe, niezależnie od ilości zastosowanych pyłów mineralnych oraz ich rodzaju,
- zastosowanie w recyklowanych mieszankach podbudowy pyłów mineralnych pochodzenia gabrowego zapewnia uzyskanie wymaganej ich odporności na oddziaływanie wody i mrozu niezależnie od ich koncentracji. Natomiast recyklowane mieszanki podbudowy z pyłami z piaskowca kwarcytowego nie są odporne na oddziaływanie wody i mrozu.

Uzyskane wyniki badań wskazują na potencjalne możliwości szerokiego zastosowania w technologii recyklingu głębokiego konstrukcji nawierzchni z asfaltem spienionym pyłów mineralnych, zwłaszcza zasadowego charakteru, pochodzących z odpylania kruszywa w wytwórniach mieszanek mineralno-asfaltowych

W artykule przedstawiono wyniki badań naukowych, które zostały wykonane w ramach realizacji projektu „Innowacyjne środki i efektywne metody poprawy bezpieczeństwa i trwałości obiektów budowlanych i infrastruktury transportowej w strategii zrównoważonego rozwoju” współfinansowanego przez Unię Europejską z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka.

Bibliografia

- [1] P. Buczyński, *Wpływ pyłów powstałych w procesie odpylania kruszywa na właściwości podbudowy z asfaltem spienionym*. Praca doktorska, Politechnika Świętokrzyska, 2013, s. 206
- [2] W. Grabowski, *Struktura a właściwości funkcjonalne wypełniaczy mineralnych stosowanych w drogownictwie*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2007

- [3] M. Iwański, *Właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej a rodzaj kruszywa*, *Drogownictwo* 6/2004, s. 185-195
- [4] M. Iwański, A. Chomicz, *Przydatność do spieniania asfaltów drogowych stosowanych w Polsce*, *Drogownictwo* 8/2006, s. 267-271
- [5] M. Iwański, A. Chomicz, *Właściwości recyklowanej podbudowy z asfaltem spienionym*, *Drogownictwo* 9/2011, s. 271-277
- [6] J. Judycki, J. Jaskuła, *Badania odporności betonu asfaltowego na oddziaływanie wody i mrozu*, *Drogownictwo* 12/1997
- [7] J. Piłat, P. Radziszewski, *Nawierzchnie asfaltowe*, WKŁ, Warszawa, 2007, s. 540
- [8] *Wirtgen Cold Recycling Manual*. Wirtgen GmbH, Windhagen, Germany 2006
- [9] PN-EN 13179-2. Badania kruszyw wypełniających stosowanych do mieszanek bitumicznych – Część 2: Liczba bitumiczna
- [10] PNAK 4302 – *Standard asphalt pavements. Low temperature resistance. Method of determining indirect strength*
- [11] Nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych WT-2 2010 Załącznik 1. Określenie odporności próbek mieszanek mineralno-asfaltowych na działanie wody i mrozu ■



MAREK MISTEWICZ

Instytut Badawczy
Dróg i Mostów
mmistewicz@ibdim.edu.pl

Mosty dawnego Elbląga na ilustracjach

Wisła u ujścia do Bałtyku rozdzielała się na odnogi, z których dwie, Wisła Elbląska dzisiaj nazywana Szkarpałą i Nogat wpływały do Zalewu Wiślanego połączonego z Bałtykiem w Cieśninie Bałgijskiej. Na wschód

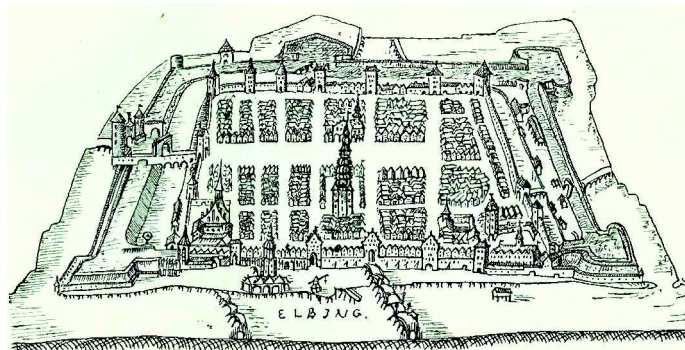
od Nogatu rozpościerały się nisko położone tereny, później nazwane Żuławą Elbląską, a za nimi wyżej już położony teren Kępy Elbląskiej. Właśnie tam, nad rzeką Elbląg, której wody łącząc się z wodami Nogatu wpadały do Zalewu Wiślanego, w 1237 r. rycerze zakonu krzyżackiego założyli portowe miasto oraz wybudowali zamek, siedzibę dla mistrza krajowego [11]. Stare Miasto Elbląg lokowane na prawie Lubeki w 1246 r. otrzymało charakterystyczny układ nazywany grzebieniowym, z wydłużonym rynkiem i większością ulic prostokątnych do nabrzeża rzeki. Pokazuje go widok perspektywiczny ufortyfikowanego miasta na przełomie XVI i XVII w. w *Elbinger Jahrbuch Heft 2* (fot. 1), który utrwalił E. Reich na podstawie rysunków Israhela Hoppego, burmistrza Elbląga, wykonanych około 1636 r. [6]. Do Starego Miasta prowadzą dwa mosty przez rzekę Elbląg i trzy mosty przez fosę wokół średniowiecznych murów obronnych.

Pierwsze wzmianki o elbląskich mostach pochodzą z kroniki Petera Himmelreicha (b. d. – 1582), który pracując w Radzie Miejskiej Elbląga pisał ją na podstawie niezachowanych do dzisiaj dokumentów. W 1320 r. po oblężeniu i ostrzelaniu Elbląga przez *mężów Zakonu*, odnotował zbudowanie **Mostu Tobiasza**, w języku niemieckim *Tobiasbrücke*. W 1321 r. w kronice wzmiankowany jest **Most św. Jerzego** – *Gergensbrücke*, a w 1323 r. długi most (*Lange brücke*) nazywany *Kookenbrücke* [14]. Zapewne długim mostem nazwano pomost, przy którym cumowały okręty, tak samo jak w ówczesnym Gdańsku. Nie wydaje się prawdopodobne, żeby

w XIV w., w okresie czterech kolejnych lat zbudowano dwa mosty przez rzekę Elbląg. Zapewne to nazwa mostu przez rzekę Elbląg ulegała zmianom, zwłaszcza że w dalszych zapiskach jest wymieniany jeden most, konsekwentnie nazywany **Wysokim Mostem** (*Hohen brücke*).

W 1433 r. czytamy, że most zwany Wysokim został przez prąd rzeki zrzucony i zalany wodą [14]. Miasto, wyczerpane uczestnictwem w wojnie trzynastoletniej z zakonem krzyżackim, nie było w stanie udźwignąć kosztów odbudowy mostu, zadowolając się uruchomieniem przeprawy promowej w obrębie powstającego Nowego Miasta.

W 1466 r. po zawarciu pokoju toruńskiego z zakonem i włączeniu do Prus Królewskich, Elbląg liczył na wsparcie Rzeczypospolitej przy odbudowie zniszczonego mostu. Wcześniej, bo już w 1445 r., miasto zburzyło zamek krzyżacki i złożyło



Fot. 1. Widok Elbląga na przełomie XVI i XVII w. z dwoma mostami przez rzekę na wykonany przez E. Reicha na podstawie rys. I. Hoppego z ok. 1636 r. za *Elbinger Jahrbuch Heft 2* za E. Krüger, *Elbing Eine Kulturkunde auf heimatlicher Grundlage*, Elbląg 1930, s. 16 (oai:dlibra.biblioteka-elblaska.pl:1200)