

## **Spoivo hydrauliczne normalnie wiążące, stosowane zwłaszcza w mieszankach mineralno-cementowych z emulsją asfaltową MCE**

Przedmiotem wynalazku jest spoiwo hydrauliczne normalnie wiążące, stosowane zwłaszcza w mieszankach mineralno-cementowych z emulsją asfaltową MCE.

Technologia recyklingu głębokiego na zimno z emulsją asfaltową jest stosowana do wytwarzania podbudowy drogowej w ramach przebudowy lub remontu nawierzchni drogowych. Tradycyjne składniki stosowane w składzie recyklowanej mieszanki mineralno-cementowej z emulsją asfaltową to destrukta asfaltowy, czyli zniszczone warstwy asfaltowe z mieszanek mineralno-asfaltowych, kruszywo naturalne, sztuczne lub z recyklingu, lepiszcze asfaltowe, to jest emulsja asfaltowa oraz cement portlandzki.

Skład recyklowanej podbudowy z emulsją asfaltową określony jest w wytycznych zagranicznych (*Wirtgen Group, Cold Recycling Technology.1th edition, Wirtgen GmbH, Windhagen, Germany, 2012*). Rozpoznanie wiedzy, poprzez analizę literatury i wytycznych wskazuje, że wymagane jest stosowanie w składzie podbudowy recyklowanej z emulsją asfaltową jedynie cementu portlandzkiego. Taki rodzaj spoiwa hydraulicznego generuje duże ryzyko wystąpienia przeszywnienia podbudowy i wystąpienia spękań skurczowych. Ich obecność może się objawiać jako liczne spękania odbite, pęknięcia poprzeczne występujące w regularnych odstępach na całej szerokości warstwy ścieralnej, które mogą zostać przeniesione na warstwy z mieszanek mineralno-asfaltowych. Dlatego też niezbędne jest opracowanie dedykowanego spoiwa hydraulicznego do podbudów drogowych wykonywanych w technologii recyklingu głębokiego na zimno z emulsją asfaltową, którego skład pozwoli na zachowanie wymaganej nośności podbudowy i przy jednoczesnym ograniczaniu jej sztywności.

Występujące w polskich warunkach normy dedykowane spoiwom hydraulicznym szybko wiążącym (PN-EN 13282-1) oraz spoiwom hydraulicznym normalnie wiążącym (PN-EN 13282-2) określają wymagania w zakresie składu spoiwa spoiw hydraulicznych. Normy zharmonizowane określają również ograniczenia w zakresie składników drugorzędnych, których ilość łącznie nie może przekraczać 10% masy spoiwa.

Znane jest z publikacji wynalazku PL164323 spoiwo do produkcji betonu komórkowego, składające się z popiołu lotnego w ilości 40-60% wagowych; wapna palonego mielonego 15-40% wagowych; żużla konwertorowego 5-25% wagowych, kamienia gipsowego 5-12% wagowych.

Z polskiego opisu patentowego PL220745 znane jest hydrauliczne spoiwo drogowe, które stosowane jest przede wszystkim do stabilizacji i ulepszenia przewilgoconych gruntów spoistych i mało spoistych o niskiej jakości. Spoiwo to zawiera klinkier cementowy, łupki przywęglowe, popioły i składa się z 38-50 części wagowych klinkieru cementowego, 6-15 części wagowych piasków z kotła fluidalnego zawierających bezwodny siarczan wapnia w przeliczeniu na  $SO_3$  w ilości nie mniej niż 10% wagowych, 38-50 części wagowych przepalonych łupków przywęglowych zawierających 10-35% wagowych pyłu z procesu suszenia łupków przywęglowych, 2-8 części wagowych pyłu piecowego klinkierowego powstającego w procesie produkcji klinkieru oraz do 3 części wagowych pyłów z procesu suszenia surowców mineralnych stosowanych do produkcji klinkieru i/lub cementu.

Znana jest z publikacji opisu wynalazku PL372780 mieszanina stabilizująca dla budownictwa lądowego, mająca zastosowanie w szczególności do budowy nasypów, wałów, dróg i umocnień, składająca się z materiału mineralnego w ilości 65-93% wagowych, popiołu w ilości 7-35% wagowych oraz czynnika nawilżającego, a jej wilgotność wynosi 9-15%. Korzystnym materiałem mineralnym jest łupek przywęglowy nieprzepalony w postaci odpadu popłuczkowego.

Stosowanie rekomendowanego spoiwa, czyli cementu portlandzkiego w podbudowach drogowych z emulsją asfaltową wykonywanych w technologii recyklingu głębokiego na zimno, lub spoiw z jego znaczącym udziałem powyżej

75%, napotyka na ograniczenia w aplikacji wynikające z dużego prawdopodobieństwa uzyskania nadmiernej sztywności mieszanki.

Celem wynalazku jest opracowanie składu dedykowanego spoiwa hydraulicznego, o zwiększonej zawartości ubocznych cementowych produktów pylastych tj. składników drugorzędnych powyżej 10% masy, przeznaczonego do podbudowy drogowej z emulsją asfaltową wykonanej w technologii recyklingu.

Spoivo hydrauliczne normalnie wiążące, stosowane zwłaszcza w mieszankach mineralno- cementowych z emulsją asfaltową (MCE) do wytwarzania podbudowy drogowej, zawierające w swoim składzie cement portlandzki, charakteryzuje się tym, że składa się z cementu portlandzkiego klasy I w ilość 60% wagowych, wapna hydratyzowanego  $\text{Ca(OH)}_2$  o zawartości  $\text{CaO} + \text{MgO} \geq 90\%$  w ilość 20% wagowych oraz pyły cementowe o składzie  $\text{SiO}_2 \geq 17,0\%$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 3,5\%$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 2,0\%$ ,  $\text{K}_2\text{O} \leq 6,8\%$  w ilości 20% wagowych, przy czym suma udziału procentowego składników jest równa 100%.

Wprowadzenie na etapie wytwarzania dedykowanego spoiwa hydraulicznego do składu recyklowanej podbudowy wpływa korzystnie na przebieg procesów wiązania. W efekcie niniejszy dodatek powoduje zmniejszenie sztywności w stosunku do mieszanki kontrolnej zawierającej w składzie cement portlandzki.

#### Przykład

W celu uzyskania spoiwa hydraulicznego miesza się następujące składniki: cement portlandzki klasy I o wytrzymałości 32,5 (zgodny z normą EN 197-1) o przyspieszonym początkowym czasie wiązania "R", wapno hydratyzowane  $\text{Ca(OH)}_2$  o zawartości  $\text{CaO} + \text{MgO} \geq 90\%$  oraz pyły cementowe o zawartości  $\text{SiO}_2 \geq 17,0\%$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 3,5\%$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 2,0\%$ ,  $\text{K}_2\text{O} \leq 6,8\%$ . Obecność wapna hydratyzowanego pełni rolę stabilizatora pęcznienia wywołanego obecnością pyłów cementowych oraz redukuje nadmierny przyrost sztywności spoiwa. Przykładowy udział procentowy spoiwa do mieszanki mineralnej z emulsją asfaltową zamieszczono w tabeli 1. Przedstawione kompozycje charakteryzowały się stałością objętości (wg EN 196-3) poniżej 30 mm.

Tabela 1

	Wapno Ca(OH) <sub>2</sub> [%]	CEM I 32,5R [%]	Pyły cementowe [%]
Skład spoiwa dedykowanego do MCE	20	60	20

Składniki spoiwa miele się ze sobą wspólnie do uzyskania powierzchni właściwej  $5000 \text{ cm}^2/\text{g} \pm 12\%$  wg Bleine'a.

Następnie przygotowuje się mieszankę mineralną z emulsją asfaltową z udziałem destruktu asfaltowego, kruszywa naturalnego o ciągłym uziarnieniu (materiał doziarniający), tak aby krzywa uziarnienia znajdowała się pomiędzy punktami kontrolnymi jak w tabeli 2. Proces przygotowania mieszanki jest następujący:

- oznaczenie zawartości lepiszcza w destrukcie asfaltowym na podstawie badania ekstrakcji,
- wykonanie analizy sitowej (na mokro) mieszanki mineralnej oraz sprawdzenie, czy jej uziarnienie mieści się w polu ograniczonym krzywymi granicznymi tabela 2,
- dobór ilości środków wiążących (zalecana zawartość cementu powinna wynosić od 1,0 % do 3,0 % (m/m), natomiast emulsji asfaltowej od 2,0 % do 5,0 % (m/m)),
- zaprojektowanie składu mieszanki mineralno-cementowej,
- oznaczenie wilgotności optymalnej i maksymalnej gęstości objętościowej mieszanki mineralno-cementowej wg metody Proctora,
- wykonanie próbek w formach typu Marshalla z mieszanki MCE;

Tabela 2

Sito # [mm]	% masy przechodzącej przez sito
63,0	100
31,5	80 – 100
16,0	55 – 93
8,0	35 – 80
4,0	25 – 67
2,0	16 – 55
1,0	9 – 43
0,5	5 – 33
0,125	2 – 15
0,063	0 – 12

W recyklowanej mieszance należy zastosować emulsję asfaltową w ilości od 1,2% do 5,0%, a zawartość spoiwa hydraulicznego musi się mieścić w przedziale od 1,0% do 3,0%. Należy również określić wilgotność mieszanki, którą określa się w oparciu o wilgotność optymalną mieszanki mineralno-spoiwowej wyznaczoną w badaniu *Proctora* zgodnie z normą PN-EN 13286-2: „Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym. Część 2: Metody określania gęstości i zawartości wody. Zagęszczanie metodą Proctora”. Destrukt asfaltowy, materiał doziarniający (kruszywo naturalne, sztuczne lub z recyklingu) należy dozować z dokładnością 15%, emulsję asfaltową z dokładnością 10% w stosunku do założonego jednostkowego zużycia.

Mieszankę mineralno-spoiwową z emulsją asfaltową miesza się przez 5 minut przy wilgotności optymalnej, a następnie z gotowej i jednorodnej mieszanki odważa się taką ilość materiału, która zapewni uzyskanie maksymalnej gęstości objętościowej. Próbkę zagęszcza się w prasie żyratorowej (wg PN-EN 12697-31) w formie  $\varnothing 150$  mm. Wysokość docelowa próbki musi być równa  $180 \text{ mm} \pm 5\%$ . Próbkę przechowuje się przez okres 28 dni, ułożone na płaskiej powierzchni w pomieszczeniu o wilgotności względnej od 40% do 70% i temperaturze  $+20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ .

Korzystając z przedstawionego w tabeli 1 składu spoiwa hydraulicznego, dedykowanego do mieszanki mineralno-spoiwowej z emulsją asfaltową (MCE), sporządzono serię próbek laboratoryjnych. Celem tego działania było zainicjowanie procesu optymalizacji stanowiącego podstawowe narzędzie poszukiwania kompozycji spoiwa mieszanego o najlepszych walorach użytkowych. Efektem końcowym było zbudowanie nomogramu rozwiązań dopuszczalnych w skali znormalizowanej. Nomogram pozwala na odczytanie poziomu efektywności wpływu kompozycji przedmiotowego spoiwa mieszanego w skali od 0 (nieakceptowane) do 1 (najkorzystniejsze). Celem optymalizacji było wskazanie przestrzeni rozwiązań przedmiotowego składu spoiwa (tabela 1), dla której recyklowana mieszanka będzie odznaczać się zmniejszoną sztywnością przy zachowaniu jej maksymalnej sprężystości ( $\delta \rightarrow \min$ ). Do analizy wykorzystano badania przedstawione w tablicy 3.

Tabela 3

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	wolna przestrzeń $V_m$ [%]	wytrzymałość na pośrednie rozciąganie $ITS_{DPR}$ (25°C) [MPa]	wodoodporność TSR (25°C) [%]	woda i mrozoodporność IISR (25°C) [%]	odkształcenie po 10 <sub>6</sub> cyklach $\epsilon_6$ [ $\mu\epsilon$ ]	odporność na pękanie, $K_{IC}$ [N/mm <sup>3/2</sup> ]	moduł sztywności $E^*$ (DTC-CY) 40°C; 0,1 Hz [MPa]	kąt przesunięcia fazowego $\phi$ (DTC-CY) 40°C; 0,1 Hz [°]	moduł sztywności $E^*$ (DTC-CY) -10°C; 10 Hz [MPa]	kąt przesunięcia fazowego $\phi$ (DTC-CY) -10°C; 10 Hz [°]
lepsza	8,0 ± 15,0	0,35	75	55	min. 90 (95)*	6,0	max	min	min	max
gorsza		MAX	MAX	MAX	min. 85 (90)*	4,0	min	max	max	min

Nomogram określający obszary zalecane dla stosowania danego spoiwa mieszanego przedstawiono na rysunku.

Kompozycje znajdujące się wewnątrz obszaru nomogramu, dla których wynik optymalizacji wynosił  $UIII > 0,67$  (obszar wewnątrz linii przerywanej) reprezentują mieszankę recyklowaną o właściwościach wysoce satysfakcjonujących spełniających założone kryteria, powyżej założonej wartości minimalnej określonej przez kryteria, opierając się na skali funkcji użyteczności Harringtona. Natomiast rozwiązania optymalizacji wewnątrz obszaru, w którym wyniki optymalizacji wynosiły  $UIII > 0,37$  (ograniczonego linią ciągłą) reprezentują rozwiązania satysfakcjonujące, wciąż użyteczne, lecz znajdujące się blisko wartości granicznych przyjętych w tabeli 3. Wyniki optymalizacji  $UIII < 0,37$  uznano jako nieakceptowane. Na podstawie nomogramu odczytano kompozycję spoiwa (tab.1), która najkorzystniej wpłynęła na właściwości mieszanki recyklowanej względem kryteriów w tabeli 3.

Sugerując się rezultatami wykonanej optymalizacji zawartej w nomogramie zdefiniowano ostatecznie rozwiązania składu spoiwa mieszanego gwarantującego

uzyskanie założonych, co najmniej na poziomie satysfakcjonującym (użytkowym), wyników odnoszących się do jakości mieszanki recyklowanej przeznaczonej do podbudowy drogowej. Wyniki optymalizacji pozwalają na zastosowanie pyłów cementowych w ilości co najmniej 20% w składzie spoiwa mieszanego w mieszance recyklowanej. Niniejsze rezultaty przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4

	Wapno Ca(OH) <sub>2</sub> [%]	CEM I 32,5R [%]	Pyły cementowe [%]
Skład spoiwa dedykowanego do MCE	20	60	20