

# **Wodoodporność recyklowanej podbudowy z asfaltem spienionym w aspekcie składu spoiwa drogowego**

**Przemysław Buczyński, Marek Iwański, Grzegorz Mazurek**

*Katedra Inżynierii Komunikacyjnej, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Świętokrzyska, e-mail: p.buczynski@tu.kielce.pl, iwanski@tu.kielce.pl, gmazurek@tu.kielce.pl*

**Streszczenie:** W referacie przedstawiono rezultaty badań recyklowanej podbudowy wykonanej w technologii recyklingu głębokiego na zimno z asfaltem spienionym oraz spoiwem mieszanym. W badaniach szczególną uwagę zwrócono na jej wodoodporność. Indywidualne projektowanie składu spoiwa pozwala na precyzyjne dostosowanie jego oddziaływania do warunków terenowych oraz wymaganych parametrów recyklowanej podbudowy. Projekt recyklowanej podbudowy z asfaltem spienionym symulował proces recyklingu głębokiego na zimno. Zastosowane składniki mineralne tj. destrukta asfaltowy, kruszywo 0/31,5 mm oraz kruszywo doziarniające 0/4 stanowiły materiał odpadowy z istniejącej konstrukcji. W składzie recyklowanej podbudowy zastosowano spoiwa drogowe, które wytworzono w warunkach laboratoryjnych z wymieszania trzech bazowych składników. Udział procentowy poszczególnych spoiw drogowych określono zgodnych z planem eksperymentu sympleksowo-centroidowego. Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono różnorodny wpływ analizowanych składników spoiw drogowych na właściwości mechaniczne oraz wodoodporność recyklowanej podbudowy. W oparciu o zastosowany plan eksperymentu możliwe było określenie składu spoiwa drogowego, które zapewni uzyskanie recyklowanej podbudowy odpornej na działanie wody.

**Słowa kluczowe:** spoiwa drogowe, recykling głęboki, asfalt spieniony, wapno hydratyzowane, cement portlandzki, pyły cementowe, podbudowa recyklowana.

## **1. Wprowadzenie**

Możliwość zastosowania materiałów budowlanych podlega głównie ocenie ich trwałości. Wobec czego oznaczane są ich właściwości fizyczne oraz mechaniczne. Ponadto ocena trwałości materiałów budowlanych wymaga uwzględnienia oddziaływania warunków klimatycznych. Wielu badaczy skupia swoją uwagę nad rozpoznaniem konfiguracji udziałów procentowych składników mineralnych, których zastosowanie zapewni uzyskanie wymaganej trwałości [1, 2, 3, 5, 6]. Ze względu na lokalizację podbudowy drogowej w układzie warstwy konstrukcyjnych narażone są w większym stopniu na działanie wody niż oddziaływanie wody i mrozu. Wynika to z ich umiejscowienia w układzie warstw konstrukcyjnych [7] oraz zabezpieczenia przed przemarzaniem przez warstwy zalegające powyżej. Zależność taka wskazuje na konieczność oceny odporności na działanie wody recyklowanych podbudów z asfaltem spienionym. Zastosowania spoiw drogowych w składzie podbudów recyklowanych [8] oraz na brak rozpoznania tego zjawiska, wymusza trwałość podbudów w odniesieniu do tego czynnika. Zastosowanie tradycyjnego spoiwa w postaci cementu portlandzkiego w składzie recyklowanej podbudowie w aspekcie odporności na działanie wody zostało rozpoznane przez wielu badaczy [1, 4, 9, 15, 16]. Analiza wyników badań wykazała pozytywne jego oddziaływanie. Zróżnicowanie składu spoiw

drogowych wynikający z wprowadzenia w jego składzie np. popiołów lotnych oraz pyłów cementowych [10, 11, 12], może w odmiennym stopniu wpływać na właściwości recyklowanej podbudowy. Zarówno w zakresie właściwości fizyczno-mechaniczne oraz odporności na działanie wody.

W związku z powyższym niezbędne wydaje się określenie odporności na działanie wody recyklowanej podbudowy z asfaltem spienionym w aspekcie rodzaju składników spoiw drogowych.

## **2. Obiekt badań**

Przedmiotem badań w aspekcie wpływu składników spoiwa na wodoodporność recyklowanej podbudowy z asfaltem spienionym jest zaprojektowana mieszanka mineralno-spoiwowa zgodnie z kryterium dobrego uziarnienia określonego w wytycznych [13, 14]. Próbkę zagęszczono w formach Marshalla dla wilgotności optymalnej równej 5,3% w efekcie czego uzyskano maksymalną gęstość szkieletu mineralno-spoiwowego równą 2,227 Mg/m<sup>3</sup>. Wilgotność optymalną określono za pomocą metody Proctora wg PN-EN 13286-2. Do wytworzenia piany asfaltowej wykorzystano asfalt drogowy o przedziale penetracji 50/70 w ilości 3%. Natomiast spoiwo w recyklowanej podbudowie stanowiło 2,5% mieszanki mineralnej.

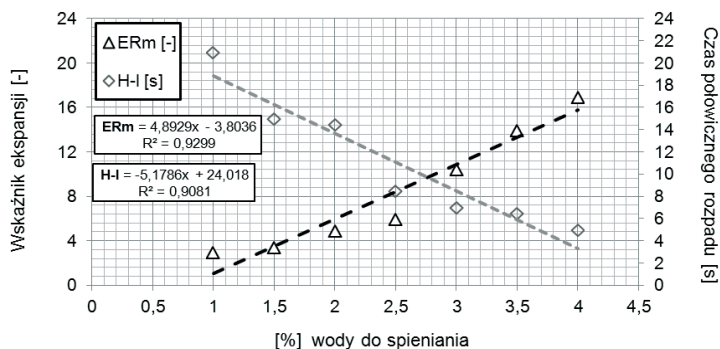
### **2.1. Projekt mieszanki mineralno-spoiwowej z asfaltem spienionym**

Projekt recyklowanej mieszanki podbudowy obejmował zastosowanie materiałów mineralnych, których zestawienie pozwoliło na symulację procesu recyklingu głębokiego na zimno w technologii "in situ". W recyklowanej mieszance zastosowano cztery składniki mineralne tj.: destrukta asfaltowy (RAP) o uziarnieniu 0/31,5 mm w ilości 50% (m/m), kruszywo naturalne wapienne z istniejącej podbudowy o uziarnieniu 0/31,5 mm w ilości 20% (m/m), kruszywo naturalne dolomitowe o ciągłym uziarnieniu 0/4 mm w ilości 22% (m/m) oraz pyły mineralne pochodzenia gabrowego w ilości 5% (m/m). Należy dodać, że zastosowanie pyłów mineralnych podyktowane było uzyskaniem wymaganej zawartości frakcji wypełniającej (poniżej 0,063 mm), co w przypadku technologii recyklingu głębokiego na zimno z asfaltem spienionym jest pożądane. W trakcie spieniania piany asfaltowa łączy się z drobnoziarnistym materiałem tworząc "zbrojenie rozproszone" z wytworzonego w ten sposób mastyksu [13, 17]. Możliwość zastosowania pyłów mineralnych w składzie recyklowanej podbudowy z asfaltem spienionym została opisana szczegółowo w pracach [18,19].

### **2.2. Właściwości asfaltu spienionego**

W technologii recyklingu głębokiego z asfaltem spienionym wymagane jest zastosowanie takiego typu asfaltu, dla którego uzyskuje się rekomendowane parametry spieniania. Właściwości te oceniane są na podstawie wskaźnika ekspansji ERM (maximum Expansion Ratio) oraz czasu połowicznego rozpadu H-L (Half life) [13, 14, 19].

Do analizowanej mieszanki mineralno-spoiwowej z asfaltem spienionym (msas) zastosowano asfalt drogowy o deklarowanych parametrach jak dla asfaltu 50/70. Wyniki spieniania asfaltu 50/70 przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Przebieg projektowanej krzywej uziarnienia MCAS

Ocenę właściwości piany asfaltowej określono na podstawie zmiany poziomu dozowania wody do spieniania w przedziale od 1,0 % do 4,5 % z krokiem co 0,5% oraz określenia parametru wskaźnika ekspansji  $ER_m$  (maximum Expansion Ratio) oraz czasu połowicznego rozpadu H-L (Half life). Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdza się, że optymalna zawartość wody potrzebna do spieniania analizowanego asfaltu jest równa 2,9%. Wartość ta została określona na podstawie wytycznych [13]. Jest efektem przecięcia się liniowej linii trendu ekspansji ( $ER_m$ ) oraz czasu połowicznego rozpadu (H-L) i wyznaczenia środka przedziału dla minimalnych wartości  $ER_m$  oraz H-L, który umożliwia określenie optymalnych wartości spieniania przy optymalnej ilości wody potrzebnej do uzyskania maksymalnego rozprężenia układu koloidalnego. Natomiast wartość wskaźnika ekspansji dla badanego asfaltu uzyskała wartość  $ER_m=11,0$  przy czasie połowicznego rozpadu H-L = 9,0 s. Należy również dodać, że zmienność uzyskanych wyników badań w przypadku współczynnika ekspansji jest równa ( $ER_m$ :  $R^2 = 0,9299$ ) natomiast w przypadku czasu połowicznego rozpadu zmienność opisana jest na poziomie 90,81% ( $R^2 = 0,9081$ ).

### 2.3. Składniki spoiwa

Materiałami wyjściowymi zastosowanymi do skomponowania spoiw drogowych, w celu możliwości zastosowania w składzie recyklowanej podbudowy z asfaltem spienionym były: wapno hydratyzowane  $Ca(OH)_2$ , pył cementowe (CKD) oraz cement portlandzki CEM I 32,5R. Analizę chemiczną składników przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Skład chemiczny składników spoiw

|                     | LOI  | Ca(OH) <sub>2</sub> | SiO <sub>2</sub> * | CaO ** | SO <sub>3</sub> | Na <sub>2</sub> O *** | MgO | Cl   | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
|---------------------|------|---------------------|--------------------|--------|-----------------|-----------------------|-----|------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
|                     | [%]  | [%]                 | [%]                | [%]    | [%]             | [%]                   | [%] | [%]  | [%]                           | [%]                            | [%]                            |
| CEM I 32,5R         | 3,1  | -                   | 20,2               | 63,5   | 3,4             | 0,16                  | 2,4 | 0,07 | 0,33                          | 4,4                            | 2,4                            |
| Ca(OH) <sub>2</sub> |      | 92,2                | -                  | 95,1   | 0,2             | -                     | 0,7 | -    | -                             | 0,4                            | 0,3                            |
| CKD                 | 25,2 | -                   | 14,9               | 54,4   | 1,5             | 0,3                   | 1,6 | 4,0  | -                             | 3,6                            | 1,9                            |

\* – reaktywna, \*\* – wolne, \*\*\* – ekwiwalent.

Zastosowany cement portlandzki klasy I 32,5R w podbudowy z asfaltem spienionym stanowił mieszankę referencyjną, która oznaczona została jako MIX-R. Wapno palone zastosowano ze względu na swoje działanie koagulacyjne oraz wymianę jonów. W sytuacji wystąpienia w zastosowanym materiale mineralnym części pylasto-ilastych jego działanie zredukuje ich negatywny wpływ na właściwości recyklowanej podbudowy. Technologia

recyklingu głębokiego na zimno umożliwiła zastosowanie materiałów mineralnych charakteryzujących się niższymi parametrami [12, 13, 18, 21], w których składzie mogą ujawnić się części ilaste.

Pyły z pieców cementowych są materiałem odpadowym przy produkcji cementu. Dla tego też niezbędna jest próba ich utylizacji [21, 23]. Ze względu na zawartość tlenu wapnia na poziomie 30-40% [22] charakteryzują się one dużą reaktywnością.

### 3. Plan eksperymentu

Ocenę recyklowanej podbudowy z asfaltem spienionym oraz projekt składu spoiwa drogowego zrealizowano zgodnie z założeniami planu eksperymentu sympleksowo-centroidalnego. Podstawowym kryterium projektowania mieszanki było uzyskanie sumy składników równiej 100% w odniesieniu do ilości spoiwa w składzie podbudowy [24, 25]. W projekcie spoiwa wykorzystano następujące składniki tj. cement portlandzki CEM I 32,5R (CEM), wapno hydratyzowane ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) oraz pyły cementowe (CKD). Zastosowanie założeń planu eksperymentu pozwoliło na uzyskanie siedmiu spoiw drogowych.

Do oceny wpływu składników spoiwa drogowego na właściwości recyklowanej podbudowy wykorzystano plan badań składający się z dwóch etapów. Pieszy etap zakładał ocenę właściwości fizycznych oraz mechanicznych:

- zawartość wolnej przestrzeni  $V_m$ ,
- nasiąkliwość wagową  $n_w$ ,
- wytrzymałość na pośrednie rozciąganie - badanie w temperaturze 25°C wg PN-EN 12697-23
- moduł sztywności w pośrednim rozciąganiu IT-CY po 7 oraz 28 dniach pielęgnowania wg PN-EN 12697-26.

Drugi etap badań obejmował optymalizację składu spoiwa drogowego w aspekcie ocenę odporności na działanie wody (TSR). Do tego celu wykorzystano liniową funkcję optymalizacji.

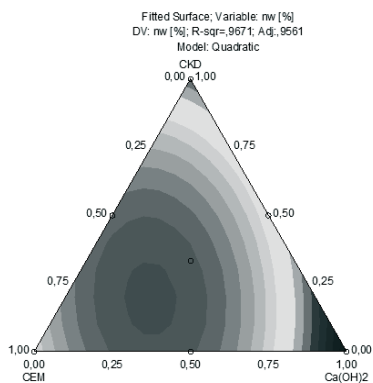
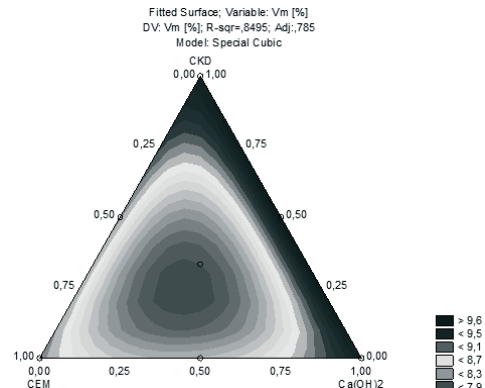
## 4. Wyniki badań

### 4.1. Właściwości fizyczne

Podstawowymi parametrami oceny jakości recyklowanej podbudowy są zawartość wolnej przestrzeni  $V_m$  oraz nasiąkliwość  $n_w$ . Parametry te odpowiadają za zapewnienie szczelności recyklowanej mieszanki. W odniesieniu do wymagań [13, 14, 21] określony został przedział graniczny zawartości wolnej przestrzeni  $V_m = 5 \div 12$  [%]. Uzyskane wyniki dla analizowanych właściwości fizycznych przedstawiono na rysunku 2 i 3. Do oceny zmiany parametrów wykorzystano, wspomniany wcześniej, plan eksperymentu sympleksowo-centroidowy [24]. Do opisu uzyskanych wyników badań zastosowano model wielomianu opisany wzorem 1. Wartości współczynników opisujących uzyskany model wraz z oceną istotności przedstawiono w tabeli 2.

$$y_{SC} = b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (1)$$

gdzie:  $y_{SC}$  - model wielomianu stopnia trzeciego,  $b_1$ ;  $b_2$ ;  $b_3$  - współczynniki funkcji regresji stanowiącej model,  $x_1$ ;  $x_2$ ;  $x_3$  wielkości wejściowe niezależne, czynniki.

Rys. 2. Wynik planu eksperymentu mieszanki dla parametru nasiąkliwość  $n_w$ Rys. 3. Wynik planu eksperymentu mieszanki dla parametru wolna przestrzeń  $V_m$ 

Wyniki analizy statystycznej wykazały, że do opisu zmian cechy nasiąkliwości ( $n_w$ ) recyklowanych podbudów w aspekcie składników spoiw drogowych najbardziej adekwatny jest model wielomianu stopnia drugiego ( $R^2 = 0,96$ ). Natomiast zmiany zawartości wolnej przestrzeni ( $V_m$ ) najlepiej opisuje jest model wielomianu stopnia trzeciego ( $R^2 = 0,79$ ). Wartości współczynników opisujących uzyskany model wraz z oceną istotności przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wartość współczynników eksperymentalnych dla cechy  $n_w$  oraz  $V_m$ 

|       | CEM     | Ca(OH) <sub>2</sub> | CKD    | CEM*Ca(OH) <sub>2</sub> | CEM*CKD | Ca(OH) <sub>2</sub> *C<br>KD | CEM*<br>Ca(OH) <sub>2</sub> *CKD |
|-------|---------|---------------------|--------|-------------------------|---------|------------------------------|----------------------------------|
| $n_w$ | 2,77803 | 3,70378             | 3,1724 | -3,8497                 | -2,5061 | -2,1997                      | -                                |
| $V_m$ | 8,9545  | 9,4678              | 9,4656 | -3,2075                 | -1,1008 | 0,8778                       | -27,785                          |

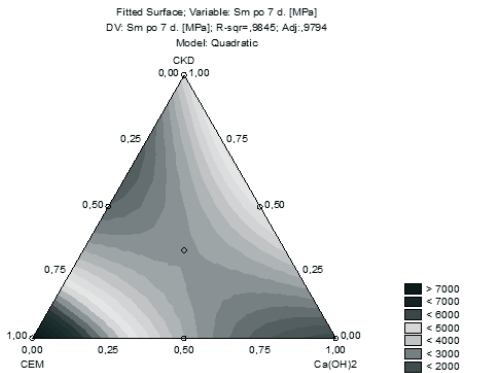
Pogrubiona czcionka oznacza istotny wpływ składników spoiwa lub interakcji składników na badany parametr przy założonym poziomie istotności  $\alpha = 0,1$

Na podstawie uzyskanych wyników badań nasiąkliwości oraz zawartości wolnej przestrzeni można stwierdzić, że najwyższą wartość analizowanych parametrów recyklowane podbudowy z asfaltem spienionym uzyskały w zakresie dozowania składników od 0% do 100% w odniesieniu do wapna hydratyzowanego oraz pyłów cementowych. Największą szczelność niezależnie od analizowanego parametru wykazują recyklowane podbudowy, w których składzie zastosowano wszystkie składniki spoiwa przy proporcjonalnym ich udziale (punkt centralny planu eksperymentu). Należy również dodać, że w odniesieniu do wymagań określonych przez wytyczne [13, 14, 21] wszystkie recyklowane podbudowy spełniają wymaganą zawartości wolnej przestrzeni  $V_m = 5 \div 12$  [%]. Dodatkowo w przypadku nasiąkliwości istotny wpływ wywołuje interakcja wszystkich składników spoiw czego w przypadku parametru zawartości wolnej przestrzeni nie zaobserwowano. Ponadto w przypadku cechy  $V_m$  ważną rolę odgrywa efekt interakcji pomiędzy wszystkimi składnikami spoiw (CEM\* Ca(OH)<sub>2</sub>\*CKD). Ten efekt potwierdza, że w czasie twardnienia zachodzą pomiędzy składnikami procesy chemiczne.

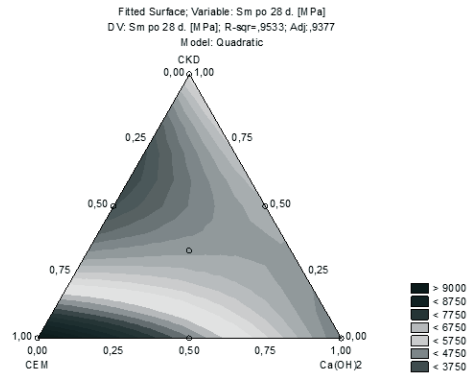
#### 4.2. Właściwości mechaniczne mieszanki recyklowanej

Ocena właściwości mechanicznych recyklowanej podbudowy z asfaltem spienionym polegała na ocenie modułu sztywności sprężystej  $S_m$  [MPa]. Moduł sztywności sprężystej

określa nośność recyklowanej podbudowy w zakresie sprężystym, czyli takim w jaki się odbywa ruch samochodowy przy czasie obciążenia 0,02s. Analizę przedstawiono na rysunku 4 oraz 5.



Rys. 4. Rezultaty mieszanki składników dla parametru modułu sztywności  $S_m$  po 7dn [MPa]



Rys. 5. Rezultaty mieszanki składników dla parametru modułu sztywności  $S_m$  po 28dn [MPa]

Wyniki analizy statystycznej, przedstawione na rysunku 4 oraz 5 wykazały, że do opisu zmian cech ( $S_m$  po 7 dn oraz  $S_m$  po 28 dn) recyklowanych podbudów w aspekcie składników spoiw drogowych najbardziej adekwatny jest model wielomianu stopnia drugiego. Dla którego wartość współczynnika determinacji opisującego jego dopasowanie kształtuje się na poziomie  $R^2$  powyżej 0,9 (rys.4 i rys. 5). Wartości współczynników opisujących uzyskany model wraz z oceną istotności przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Wartość współczynników eksperymentalnych dla cech  $S_m$  po 7 dniach oraz  $S_m$  po 28 dniach

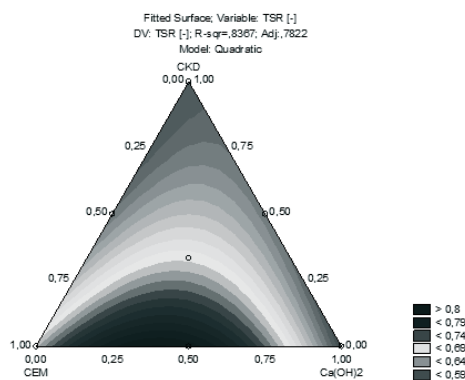
|                | CEM    | Ca(OH)2 | CKD    | CEM*Ca(OH)2 | CEM*CKD | Ca(OH)2*CKD |
|----------------|--------|---------|--------|-------------|---------|-------------|
| $S_m$ po 7 dn  | 7730   | 1839,3  | 4171,7 | -5079,8     | -13750  | 6408,9      |
| $S_m$ po 28 dn | 9121,3 | 4480    | 5882,6 | 908,7       | -15070  | 14,00       |

Pogrubiona czcionka oznacza istotny wpływ składników spoiwa lub interakcji składników na badany parametr przy założonym poziomie istotności  $\alpha=0,1$

Dokonując analizy uzyskanych wyników badań modułu sztywności sprężystej przedstawionych na rysunku 4 oraz 5 dla recyklowanej podbudowy z asfaltem spienionym, w aspekcie składników spoiwa drogowego możliwe jest stwierdzenie, że największą sztywność, niezależnie od czasu pielęgnacji zaobserwowano przy 100% udziale cementu portlandzkiego. Należy zauważyć, że w obszarze osi składnika cement po 7 dniu pielęgnacji ujawnia się interakcja z pozostałymi składnikami. Ujawnia się stopniowy spadek wytrzymałości na ściskanie przy zwiększaniu udziału pozostałych składników spoiwa w stosunku do ilości cementu. Należy również dodać, że najniższe moduły sztywności uzyskano dla recyklowanych podbudów, w składzie których występuje jedynie wapno hydratyzowane. Interakcja wapna hydratyzowanego z pozostałymi składnikami spoiw nie wykazała istotnego wpływu na przyrost modułu sztywności sprężystej po 28 dniach dojrzewania.

### 4.3. Wodoodporność recyklowanej podbudowy

Do oceny odporności na działanie wody recyklowanej podbudowy z asfaltem spienionym w aspekcie zastosowanych spoiw drogowych wykorzystano metodykę badawczą opisaną w wytycznych [13]. Wartość wskaźnika TSR zgodnie z wytycznymi [13] powinna wynosić minimalnie 0,7. Badanie ma na celu określenie wpływu zawilgocenia recyklowanej podbudowy na osłabienie wiązania asfaltu spienionego oraz zastosowanych spoiw drogowych z kruszywem. Trwałość podbudowy uzależniona jest od cykli, których oddziaływanie powoduje spadek nośności konstrukcji. W przypadku braku odporności na działanie wody, znaczny spadek wytrzymałości na pośrednie rozciąganie powoduje obniżenie trwałości zmęczeniowej warstwy konstrukcyjnej. Sytuacja ta może mieć miejsce w czasie pór roku przejściowych: zima-wiosna, jesień-zima, kiedy występuje duży napływ do wnętrza konstrukcji wód opadowych oraz powierzchniowych. Wyniki odporności na działanie wody recyklowanej podbudowy z asfaltem spienionym i spoiwami drogowymi przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Wynik planu eksperymentu mieszanki dla wodoodporności recyklowanej podbudowy TSR

Do opisu zmian wytrzymałości na pośrednie rozciąganie (TSR) recyklowanych podbudów w aspekcie składników spoiw drogowych wykorzystano model kwadratowy. Wartość współczynnika determinacji dla modelu kwadratowego opisującego zmienne jest równa ( $R^2=0,78$ ). Współczynniki opisujące uzyskany model wraz z oceną ich istotności przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Wartość współczynników eksperymentalnych dla TSR

|     | CEM     | Ca(OH) <sub>2</sub> | CKD     | CEM*Ca(OH) <sub>2</sub> | CEM*CKD | Ca(OH) <sub>2</sub> *CKD |
|-----|---------|---------------------|---------|-------------------------|---------|--------------------------|
| TSR | 0,70696 | 0,58946             | 0,60068 | 0,59026                 | -0,1251 | 0,11347                  |

Pola szare oznaczają istotny wpływ składników spoiwa na badany parametr przy założonym poziomie istotności  $\alpha=0,1$

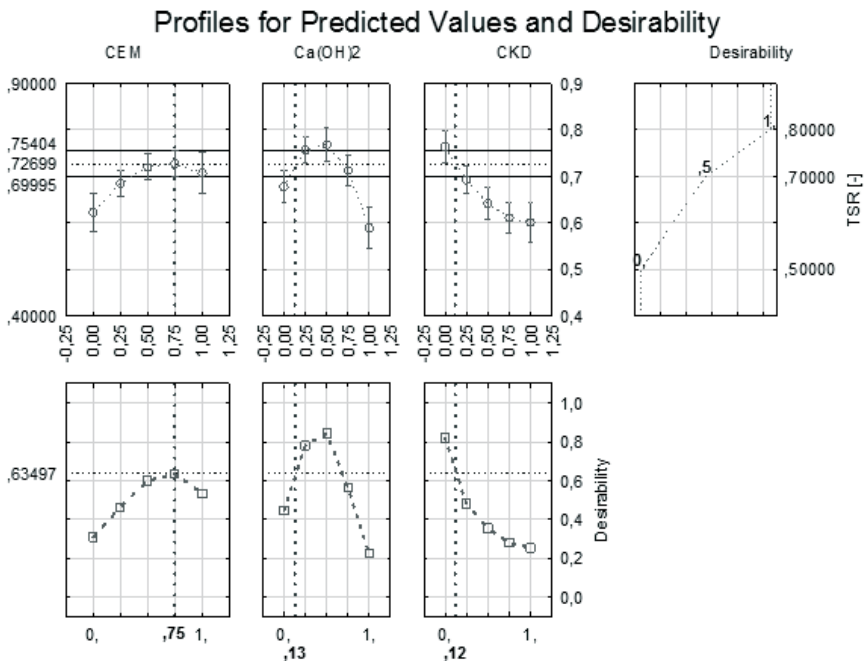
Na podstawie uzyskanych wyników badań można stwierdzić, że spoiwo, w którego składzie nie zostanie zastosowany cement charakteryzuje się brakiem wymaganej wodoodporności. Maksymalne wartości wskaźnika TSR uzyskała mieszanka, w której składzie zastosowano spoiwo składające się z cementu oraz wapna hydratyzowanego w proporcjach 50% CEM + 50% Ca(OH)<sub>2</sub> wartość TSR=0,80. Dodatkowo należy zauważyć, że spoiwo które zostanie wytworzone z pewnym udziałem procentowym wapna hydratyzowanego (około 30%) oraz niewielką ilością pyłów cementowych (10%) charakteryzuje się wymaganą wartością wskaźnika TSR.



## 5. Optymalizacja składu spoiwa drogowego

Do rozwiązania problemu optymalizacyjnego zaproponowano liniową funkcję optymalizacji określoną trzema charakterystycznymi przedziałami. Funkcja użyteczności przyjmuje wartość 1 dla poziomu parametru TSR równemu 0,8, dla poziomu akceptowalnego parametru TSR wynoszącego 0,7 funkcja użyteczności przyjmuje wartość 0,5. Natomiast dla poziomu minimalnego dla parametru TSR równego 0,5 [13] funkcja przyjmuje wartość 0.

W związku z tym wykorzystując metodę Simplex [25, 26] oraz pakiet Statistica estymowano wartości rekomendowane dodatków w mieszance recyklowanej podbudowy z asfaltem spienionym względem uzyskania satysfakcjonującego rozwiązania w odniesieniu do parametru wodoodporności TSR. Rezultaty przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Rozwiązanie dla funkcji użyteczności wnoszącej 0,73

W tabeli 5 przedstawiono trzy warianty optymalizacji w zależności od wyniku funkcji użyteczności.

Tabela 5. Rezultat optymalizacji

| Wynik funkcji użyteczności | Wynik parametru TSR | 95% Przedział ufności średniej dla parametru TSR | Ilość cementu (CEM) | Ilość wapna (Ca(OH) <sub>2</sub> ) | Ilość pyłów (CKD) |
|----------------------------|---------------------|--|---------------------|------------------------------------|-------------------|
| [-]                        | [-]                 | [-]  | [%]                 | [%]                                | [%]               |
| 0,5                        | ≈0,7                | 0,67 ; 0,73                                      | 34                  | 34                                 | 32                |
| 0,63                       | ≈0,73               | 0,7 ; 0,75                                       | 75                  | 13                                 | 12                |
| 1,0                        | ≈0,8                | 0,76 ; 0,84                                      | 58                  | 42                                 | 0                 |



Analiza rekomendowanych składów spoiwa wykazała, że ich połączenie, które gwarantuje uzyskanie odporności na działanie wody jest następująca: cement od 34% do 75%, wapna hydratyzowanego od 13% do 42%, pyły cementowe CKD maksymalnie 32%. Należy zwrócić uwagę, że zastosowanie samego cementu nie zapewni wysokiej wodoodporności. Aby zapewnić maksymalną odporność na działanie wody należy pominąć obecność pyłów CKD na koszt kompozycji CEM -  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  wynoszącej 58%/42%. Podsumowując, zalecana ilość cementu (CEM) musi być w przedziale około od 58% do 75%, wapna hydratyzowanego ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) w przedziale 13% do 42%, natomiast pyłu z systemu odpylania nie więcej niż 12%. Taka kompozycja składników zapewni wymaganą wodoodporność na poziomie parametru TSR równą 0,7.

## 6. Wnioski

Analiza uzyskanych wyników badań umożliwia sformułowanie następujących wniosków:

- zastosowane w analizie składniki spoiwa potwierdza, że istnieje możliwość stosowania alternatywnych środków wiążących w składzie recyklowanej podbudowy w zależności od wymagań projektowych i pełnionej funkcji recyklowanej mieszanki w układzie warstwowym przy zachowaniu wymaganej wodoodporności,
- najkorzystniejsze wyniki badań właściwości fizycznych oraz mechanicznych uzyskano dla mieszanki zawierającej w swoim składzie dodatek wapna hydratyzowanego w połączeniu z cementem,
- wszystkie recyklowane podbudowy z asfaltem spienionym spełniają wymaganie minimalnej zawartości wolnej przestrzeni. Najniższą zawartość wolnej przestrzeni równą  $V_m=7,9\%$  uzyskała mieszanka, w której składzie zastosowano spoiwo składające się ze wszystkich analizowanych składników (CEM+CKD+ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ),
- zastosowanie samego cementu nie zapewni wystarczającej wysokiej wodoodporności recyklowanej mieszanki,
- rekomendowany skład spoiwa zapewniający uzyskanie wymaganej wodoodporności ( $\text{TSR} \geq 0,70$ ) jest następujący: (58% - 75%) CEM + (13% - 42%)  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  + maksymalnie 12% CKD.

## Literatura

- 1 Iwański M., Chomicz-Kowalska A. Laboratory Study on Mechanical Parameters of Foamed Bitumen Mixtures in the Cold Recycling Technology. *Procedia Engineering*, Volume 57 (2013) 433-442.
- 2 Cyr M., Pouhe R. The frost resistance of alkali-activated cement-based binders *Handbook of Alkali-Activated Cements. Mortars and Concretes* (2015) 293-318
- 3 Iwański M., Mazurek G. The impact of aging on water and frost resistance of asphalt concrete with low-temperature bitumen. *Structure and Environment Vol. 2 no. 1* (2010) 24-31.
- 4 Iwański M., Chomicz-Kowalska A. Resistance of the pavement to water and frost in the cold recycling technology. *Structure and Environment Vol. 2 no. 1* (2010) 9-14.
- 5 Judycki J., Jaskuła J. Badania odporności betonu asfaltowego na oddziaływanie wody i mrozu, *Drogownictwo* 12 (1997) 374-378.
- 6 Iwański M. Wodo- i mrozoodporność betonu asfaltowego z kruszywem kwarcytowym. V Konferencja Międzynarodowa. Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe. Kielce 11-12 maja (1999) 77-84.

- 7 Judycki J. Analiza i projektowanie konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności. Warszawa 2014.
- 8 Dołżycki B. Instrukcja projektowania i wbudowywania mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE). GDDKiA, Gdańsk 2014.
- 9 Iwański M., Buczyński P. Properties of the Recycled Base Course with Respect to the Road Binder Type. 9th International Conference Environmental Engineering at Vilnius (2013).
- 10 Deja J., Gołek Ł., Kołodziej Ł. Application of glass cullet in binder production. Cement-Lime-Concrete Vol. 2011/6 (2011) 349-354.
- 11 Gawlicki M., Wons W. Popioły lotne z kotłów fluidalnych jako składniki popiołowo-cementowych spoiw drogowych. Scientific Works of Institute of Ceramics and Building Materials Vol. 8 Warszawa-Opole (2011) 69-78.
- 12 Iwański M., Buczyński P., Mazurek G. Statistical evaluation of water and frost resistance of deep cold recycled bases with foamed bitumen, hydrophobic activators and fines. Third International Conference on Transportation Infrastructure April 22-25 (2014) 203-212.
- 13 Wirtgen GmbH. Wirtgen cold recycling technology. 1st ed. Windhagen: Wirtgen GmbH 2012.
- 14 Asphalt Academy, Technical Guideline TG2: Bitumen Stabilised Materials, A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilised Materials. Second Edition, Pretoria, South Africa, 2009
- 15 Kavussi A., Modarres A. Laboratory fatigue models for recycled mixes with bitumen emulsion and cement, Construction and Building Materials 24 (2010).
- 16 Modarres A., Ayar P. Comparing the mechanical properties of cold recycled mixture containing coal waste additive and ordinary Portland cement. International Journal of Pavement Engineering (2014).
- 17 Fu P., Jones D., Harvey J., Halles F. Investigation of the Curing Mechanism of Foamed Asphalt Mixes Based on Micromechanics Principles. Journal Material Civil Engineering No. 22 (2010) 29-38.
- 18 Iwański M., Buczyński P. Zastosowanie pyłów mineralnych w technologii recyklingu głębokiego na zimno z asfaltem spienionym. Drogownictwo 2013/ 5 (2013) 143-148.
- 19 Martinez-Arguelles G, Giustozzi F., Crispiono M., W. Flintsch G. Investigating physical and reological properties of foamed bitumen. Construction and Building Materials 72 (2014) 423-433.
- 20 Simon J. Blott, Debra J. Croft, Pye K., Samantha E. Saye S. E., Wilson H. E. Particle size analysis by laser diffraction. The Geological Society of London 2004.
- 21 Zawadzki J., Matras J., Mechowski T., Sybilski D. Warunki techniczne wykonywania warstw podbudowy z mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej (MCE). Zeszyt 61, IBDiM, Warszawa 1999.
- 22 Srekrishnavilasam A., Rahardja S., Kmetz R., Santagata M. Soil treatment using fresh and landfilled cement kiln dust. Construction and Building Materials Vol. 21 (2007) 318-327.
- 23 Bożym, M. Alternatywne metody wykorzystania pyłów z pieców wapienniczych i cementowych, ze szczególnym uwzględnieniem gospodarki osadowej. Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych Nr 8 (2011) 59-68.
- 24 StatSoft Polska "Zastosowania statystyki i data mining w badaniach naukowych" - materiały z seminarium XI.2013.
- 25 Montgomery D. G. Design and Analysis of Experiments. 5th Edition. John Wiley and Sons 2001.
- 26 Zivorad R. Lazic, Design of Experiments in Chemical Engineering: A Practical Guide, Wiley-VCH 2004.

## The water resistance of a recycled base with foamed bitumen in the aspect of road binder composition

Przemysław Buczyński, Marek Iwański, Grzegorz Mazurek,

*Katedra Inżynierii Komunikacyjnej, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Świętokrzyska,  
e-mail: p.buczynski@tu.kielce.pl , iwanski@tu.kielce.pl, gmazurek@tu.kielce.pl*

**Abstract:** The paper describes research results of recycled base which was performed in a cold deep recycling technology with foamed bitumen and different type of hydraulic mixed binder in the aspect of water resistance. An individual design of a composition of a binder enables to achieve a precise adjustment of a binder's impact to local conditions and required parameters of a recycled base. The design a recycled base with foamed bitumen simulated a cold deep recycling process with materials from existing crushed bituminous pavement layers ("technology in-situ"). To produce the foamed bitumen a road bitumen of penetration grade 50/70 was used. Moreover, the following mineral components were categorised as a waste material: reclaimed asphalt pavement, 0/31,5 mm aggregate and aggregates for soil gradation improvement 0/4. A composition of the recycled base consisted of the binders prepared in the laboratory as a result of a mix of three basic components. The percentage of individual road binders was determined in line with the plan of the simplex-centroid experiment. For the purpose of determining an influence of such a hydraulic road binder on the water resistance in recycled base, the following tests were carried out: void contents  $V_m$ , tensile strength ratio TSR (water resistance). Additionally, an evaluation of increase of indirect tensile modulus (IT-CY) was conducted. On the basis of the test results, a varied impacts of tested hydraulic road binders on mechanical properties and water resistance of recycled base with foamed bitumen were observed. On the basis of the plan of the experiment, it was possible to determine the recommended road binder composition that enabled to obtain the water resistance in the recycled base with foamed bitumen.

**Keywords:** hydraulic road binder, cold deep recycling, foamed bitumen, hydrated lime, portland cement, cement dust, recycled base.

