



PRZEMYSŁAW BUCZYŃSKI
Politechnika Świętokrzyska
p.buczynski@tu.kielce.pl

Właściwości recyklowanej podbudowy z asfaltem spienionym w aspekcie spoiw drogowych

Recykling głęboki na zimno jest jedną z najczęściej stosowanych technologii przy przebudowie dróg w naszym kraju. Wykorzystanie tej technologii umożliwia zmniejszenie nakładów finanso-

wych, dzięki możliwości pełnego wykorzystaniu materiałów już wbudowanych. Wzrost ilości zdegradowanych odcinków dróg poddawanych naprawie tą technologią powoduje wzrost ilości zapotrzebowania na spoiwo, którym w tym przypadku jest cement. Dlatego też niezbędne jest poszukiwanie alternatywnych rozwiązań technologicznych, które umożliwią stosowanie innego typu spoiw.

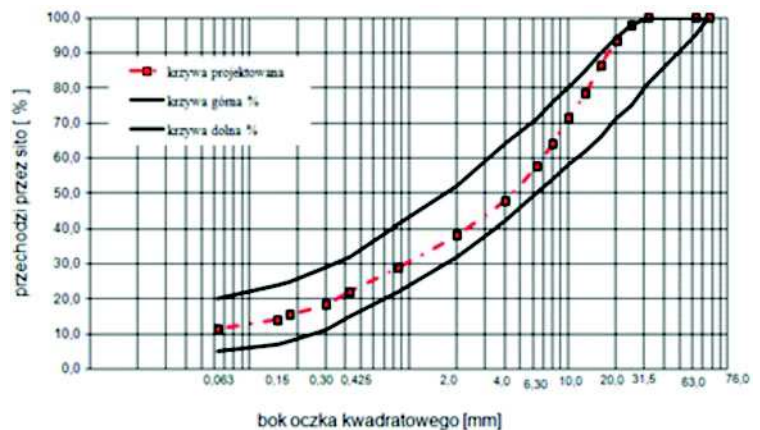
Metody statystyczne wykorzystujące plan sympleksowo-centroidowy, określane również planem mieszaniny, umożliwiają analizowanie rezultatów badań, w których stosowane są trzy bazowe składniki. Mieszanina trzech składników może być jednoznacznie określona poprzez podanie punktu w układzie współrzędnych trójkątnych zdefiniowanych przez trzy zmienne, a układy planu tworzone są poprzez pełną permutację bazowych składników. Uzyskane wyniki badań recyklowanej podbudowy w przypadku założonych w planie eksperymentu składników spoiw, tj. cementu, wapna hydratyzowanego oraz popiołu z odpylania w cementowni, pozwolą ocenić możliwość stosowania alternatywnych spoiw drogowych w technologii recyklingu głębokiego. Dodatkowo przedstawione podejście analizy danych ułatwi komponowanie składu spoiwa w zależności od wymaganych parametrów recyklowanej podbudowy.

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 mieszance zastosowano cztery składniki mineralne, tj.: destrukta asfaltowy 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 gabraowego w ilości 5% (m/m). Należy dodać, że zastosowanie pyłów mineralnych podyktowane było uzyskaniem wymaganego udziału frakcji wypełniającej (poniżej 0,063 mm), co w przypadku technologii recyklingu głębokiego na zimno z asfaltem spienionym jest wymagane. W trakcie otaczania powstała piana asfaltowa łączy się z drobnziarnistym ma-

terialem tworząc „zbrojenie rozproszone” z wytworzonego w ten sposób mastyksu [6,17]. Możliwość zastosowania pyłów mineralnych w składzie recyklowanej podbudowy z asfaltem spienionym została opisana szczegółowo w pracach [7,10].

Przebieg projektowanej krzywej uziarnienia recyklowanej podbudowy przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Uziarnienie mieszanki mineralnej recyklowanej podbudowy z asfaltem spienionym

Do wytworzenia piany asfaltowej wykorzystano asfalt drogowy 50/70 w ilości 3% (m/m). Natomiast spoiwo w składzie recyklowanej podbudowy stanowiło 2,5% (m/m) składu mieszanki mineralnej.

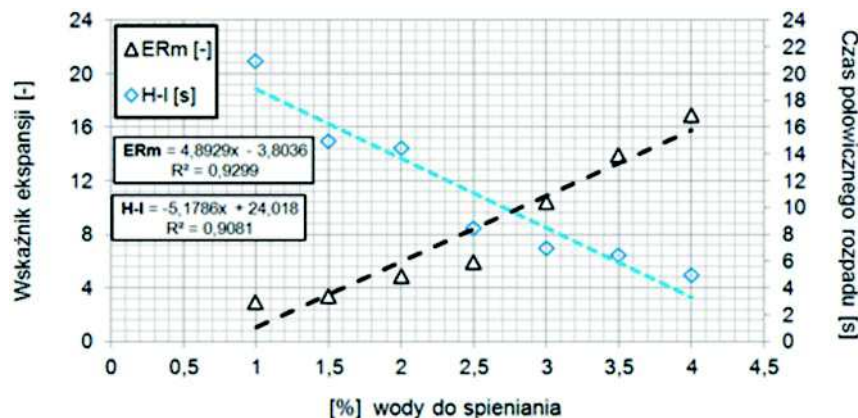
Właściwości asfaltu spienionego

W technologii recyklingu głębokiego z asfaltem spienionym wymagane jest zastosowanie takiego typu asfaltu, w przypadku którego uzyskuje się rekomendowane parametry spieniania. Właściwości te oceniane są na podstawie wskaźnika ekspansji ERm (*maximum Expansion Ratio*) oraz czasu połowicznego rozpadu H-I (*Half life*) [1,10]. Minimalne parametry piany asfaltowej w odniesieniu do wytycznych [1,17] powinny być równe, w przypadku kruszywa w temperaturze od 10°C do 15°C, przy wskaźniku ekspansji $ER_m \geq 10$ i czasie połowicznego rozpadu $H-I \geq 6s$ [1,17]. Jeżeli temperatura kruszywa jest wyższa od 15°C wówczas należy zastosować lepsze asfalty, którego parametry spieniania wynoszą odpowiednio $ER_m \geq 8$ oraz czas połowicznego rozpadu $H-I \geq 6s$ [1,17].

Do analizowanej mieszanki mineralno spoiwowej z asfaltem spienionym (msas) zastosowano asfalt drogowy o deklarowanej przez producenta penetracji 50-70 (0,1 mm). W celu potwierdzenia właściwości asfaltu drogowego wykonano podstawowe badania, których wyniki przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki badań podstawowych właściwości asfaltu drogowego 50/70 wykorzystanego w recyklowanej podbudowie.

Właściwości	Metodyka badania	j.m.	Średnia	Wsp. zmienności
			\bar{x}	V [%]
Penetracja w 25°C	PN-EN 1426	0,1 mm	56	1,2
Temperatura mięknięcia	PN-EN 1427	°C	49	2,5
Indeks penetracji PI (Pen25/T _{PIK})	-	°C	1,14	1,8
Temperatura tamiwości wg Fraassa	PN-EN 12593	°C	- 13,5	3,9



Rys. 2. Właściwości fizyczne piany asfaltowej otrzymanej z asfaltu drogowego 50/70

Na podstawie uzyskanych wyników badań podstawowych właściwości asfaltu drogowego, potwierdzono jego klasyfikację w odniesieniu do wymagań normy PN-EN 12591:2010. Liczebność prób była zgodna z metodyką badawczą danego parametru w przywołanej normie dotyczącej asfaltów drogowych. Uzyskany współczynnik zmienności na poziomie poniżej 5% świadczy o dużej dokładności uzyskanych wyników badań zastosowanego asfaltu drogowego 50/70.

Ocenę przydatności asfaltu drogowego do technologii recyklingu głębokiego na zimno z asfaltem spienionym wykonano zgodnie z wymaganiami określonymi w wytycznych [1,17] z wykorzystaniem urządzenia do spieniania asfaltu. Wyniki spieniania asfaltu 50/70 przedstawiono na rysunku 2.

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%. Określono ponadto parametr dot. wskaźnika ekspansji ERm (*maximum Expansion Ratio*) oraz czas połowicznego rozpadu H-I (*Half life*). Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, że optymalna zawartość wody potrzebna do spieniania zastosowanego asfaltu wynosi 2,9%. Wartość ta została określona na podstawie wytycznych [3]. Stanowi efekt przecięcia się liniowej linii trendu wskaźnika ekspansji (ERm) i czasu połowicznego rozpadu (H-I) oraz wyznaczenia środka przedziału minimalnych wartości ERm oraz H-I, co umożliwia określenie zalecanych wartości spieniania przy optymalnej ilości wody potrzebnej do uzyskania maksymalnego rozprężenia układu koloidalnego. Natomiast

wartość wskaźnika ekspansji badanego asfaltu uzyskała wartość ERm=11,0, przy czasie połowicznego rozpadu H-I=9,0. Należy również dodać, że zmienność uzyskanych wyników badań w przypadku współczynnika ekspansji jest równa (ERm: R²=0,9299), natomiast w przypadku czasu połowicznego rozpadu zmienność opisana jest na poziomie 90,81% (R²=0,9081).

Właściwości spoiw

Zastosowane środki wiążące stanowiły najbardziej popularne spoiwa stosowane w robotach drogowych i kubaturowych (wapno, cement) oraz mieszankę tych spoiw w różnych proporcjach z dodatkiem pyłów z pieców wapiennych i cementowych (CKD). W celu określenia wpływu spoiw hydraulicznych na właściwości recyklowanej podbudowy zastosowano siedem różnych spoiw drogowych, których skład opierał się na założeniach planu sympleksowo-centroidalnego [16]. Plan dotyczący składu drogowych spoiw hydraulicznych przedstawiono w tabeli 2. Podstawowym założeniem planu eksperymentu było uzyskanie mieszaniny składników, których suma wynosiła 100%. Takie założenie jest podstawowym kryterium możliwości stosowania

planu sympleksowo-centroidalnego. Dodatkowo w tabeli 2 przedstawiono wartości powierzchni właściwej określonej za pomocą metody dyfrakcji laserowej [14].

Zastosowany cement portlandzki klasy I 32,5R – był zgodny z wymaganiami technicznymi [18], które do momentu wprowadzenia nowych wytycznych [5] nie dopuszczały innego rodzaju cementu. Mieszanka zawierająca cement portlandzki oznaczona została jako MIX-R – mieszanka referencyjna. Wapno palone zastosowano ze względu na swoje działanie koagulacyjne oraz wymianę jonów. W sytuacji wystąpienia w zastosowanym materiale mineralnym frakcji pylasto-ilastych jego działanie zredukuje ich negatywny wpływ na właściwości recyklowanej podbudowy. Technologia recyklingu głębokiego na zimno umożliwia zastosowanie materiałów mineralnych

Tabela 2. Skład spoiw zastosowanych w recyklowanej podbudowie

Lp.	Nazwa składnika spoiwa			Oznaczenie mieszanki	Składniki spoiw	Powierzchnia właściwa (cm²/g)
	CEM	Ca(OH) ₂	CKD			
	proporcje składników spoiwa w odniesieniu do 2,5% (m/m)					
1	1,0	0,0	0,0	MIX-R	CEM I	3800
2	0,0	1,0	0,0	MIX-1	Ca(OH) ₂	5432
3	0,0	0,0	1,0	MIX-2	CKD	7543
4	0,5	0,5	0,0	MIX-3	CEM+Ca(OH) ₂	4803
5	0,0	0,5	0,5	MIX-4	Ca(OH) ₂ +CKD	4930
6	0,5	0,0	0,5	MIX-5	CEM+CKD	5403
7	0,33	0,33	0,33	MIX-6	CEM+Ca(OH) ₂ +CKD	5517

charakteryzujących się niższymi parametrami [8,18], w których składzie mogą występować frakcje ilaste.

Pyły z odpalania pieców cementowych stanowią materiał odpadowy przy produkcji cementu. Dlatego też niezbędna jest próba ich utylizacji, którą to problematykę wielu badaczy podejmowało [2,15]. Ze względu na zawartość tlenu wapnia na poziomie 30-40% [15] pyły cementowe charakteryzują się dużą reaktywnością.

Użycie wszystkich wymienionych spoiw zgodnie z planem eksperymentu pozwoli dokonać oceny wpływu tych spoiw na właściwości recyklowanej podbudowy z użyciem asfaltu spienionego i ocenić możliwość ich stosowania do wykonania podbudów.

Metodyka badań, wyniki i analiza

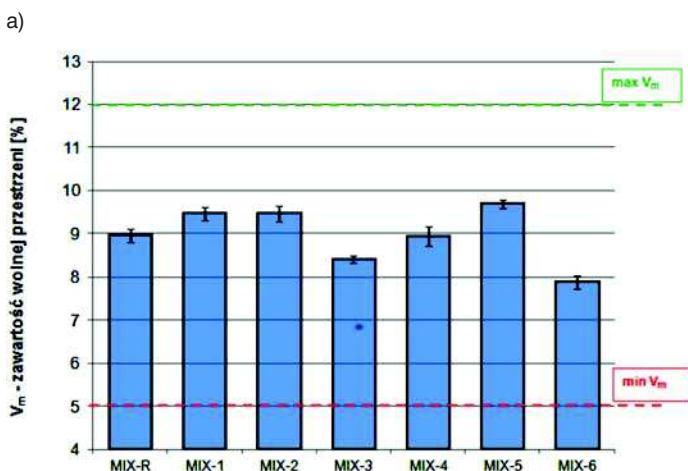
Celem badań było określenie wpływu spoiw hydraulicznych na zmiany właściwości fizycznych oraz mechanicznych recyklowanej podbudowy wykonanej w technologii na zimno z asfaltem spienionym oraz określenie jej odporności na działanie wody [1,11]. Ocenę jakości recyklowanej mieszanki dokonano z uwzględnieniem dwóch etapów analiz.

W etapie pierwszym dokonano oceny właściwościach fizycznych, tj. zawartości wolnej przestrzeni V_m , nasiąkliwości wagowej n_w . W etapie drugim analizie poddano wyniki badań właściwości mechanicznych rozpatrywanej mieszanki mineralno spoiwowej z asfaltem spienionym. Ocenie poddano następujące parametry:

- wytrzymałość na pośrodkie rozciąganie – badanie w temperaturze 25°C wg PN-EN 12697-23:2009,
- wytrzymałość na pośrodkie rozciąganie po procesie kondycjonowania w wodzie przez 24h – badanie w temperaturze 25°C wg PN-EN 12697-23:2009,
- odporność na działanie wody TSR,
- moduł sztywności w pośrodkim rozciąganiu IT-CY po 7 oraz 28 dniach.

Właściwości fizyczne – etap I

Uzyskane wyniki badań analizowanych właściwości fizycznych, tj. zawartości wolnej przestrzeni V_m oraz nasiąkliwości n_w przedstawiono na rysunku 3.



Na podstawie uzyskanych wyników badań właściwości fizycznych można stwierdzić, że wszystkie badane mieszanki osiągnęły wymaganą zawartość wolnej przestrzeni w przedziale 5-12% w przypadku recyklowanych mieszanek zagęszczanych wg metody II [18]. Najwyższą szczelnością wynikającą z minimalnej zawartości wolnych przestrzeni charakteryzuje się mieszanka MIX-6, co potwierdza również wynik nasiąkliwości na poziomie 2,2%. Należy również dodać, że oceniane mieszanki charakteryzują się zbliżoną zawartością wolnej przestrzeni oraz nasiąkliwością. W przypadku zawartości wolnej przestrzeni różnica pomiędzy maksymalnym i minimalnym wynikiem jest równa $\Delta V_m = 1,9\%$, natomiast w przypadku nasiąkliwości $\Delta n_w = 1,5\%$.

Właściwości mechaniczne – etap II

Rezultaty wyników badań wytrzymałości na pośrodkie rozciąganie przedstawiono na rysunku 4. Do oceny wpływu poszczególnych składników spoiw na zmianę parametru ITS wykorzystano plan eksperymentu sympleksowo-centroidowy.

Do opisu uzyskanych wyników badań zastosowano model stopnia drugiego, którego ocenę istotności przedstawiono w tabeli 3, a wartości współczynników opisujących uzyskany model wraz z oceną istotności przedstawiono w tabeli 4.

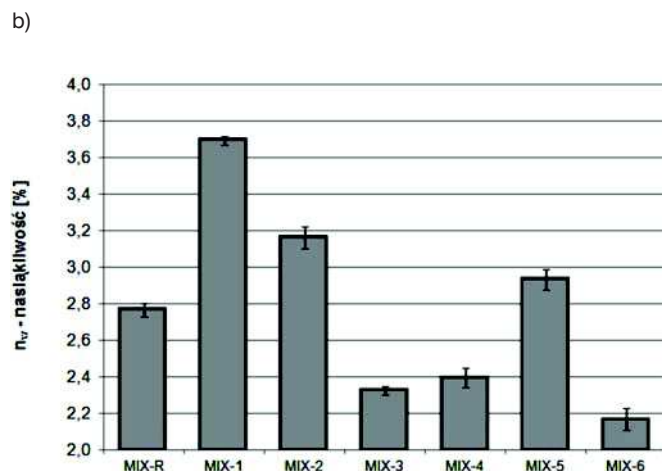
$$y = b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (1)$$

w którym:

$b_1 ; b_2 ; b_3$ – współczynniki funkcji regresji stanowiącej model,
 $x_1 ; x_2 ; x_3$ – wielkości wejściowe niezależne, czynniki.

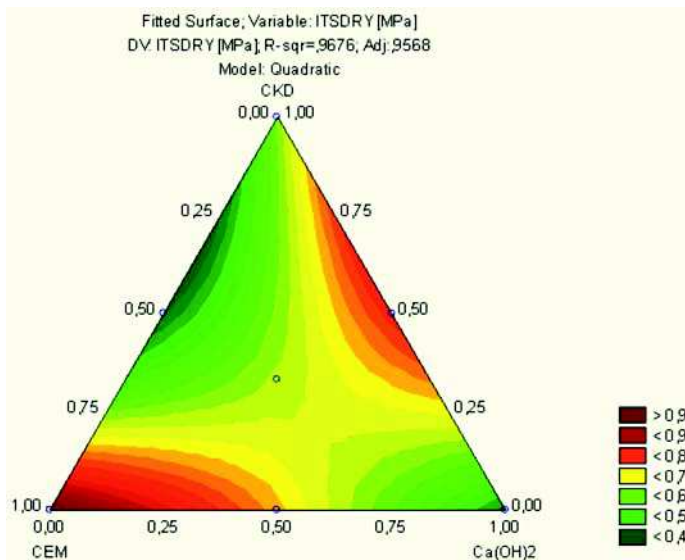
Tabela 3. Dopasowanie modelu matematycznego do rozkładu cechy ITS_{DRY} oraz ITS_{WET} recyklowanych podbudów

Parametr	Model	Wartość statystyki „F”	p- wartość	R ²	Skorygowane R ²
ITS _{DRY}	Linear	2,971	0,0767	0,248	0,1647
	Quadratic	111,149	0,000	0,968	0,957
	Special Cubic	0,243	0,630	0,9688	0,954
ITS _{WET}	Linear	5,794	0,011	0,392	0,324
	Quadratic	138,889	0,000	0,979	0,972
	Special Cubic	1,033	0,327	0,980	0,972

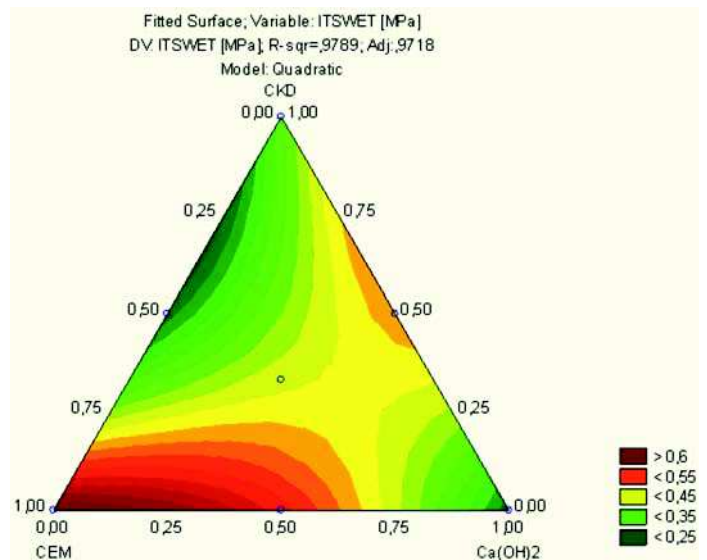


Rys. 3. Właściwości fizyczne przestrzeni recyklowanych mieszanek (słupki błędów oznaczają odchylenie standardowe)

a)



b)

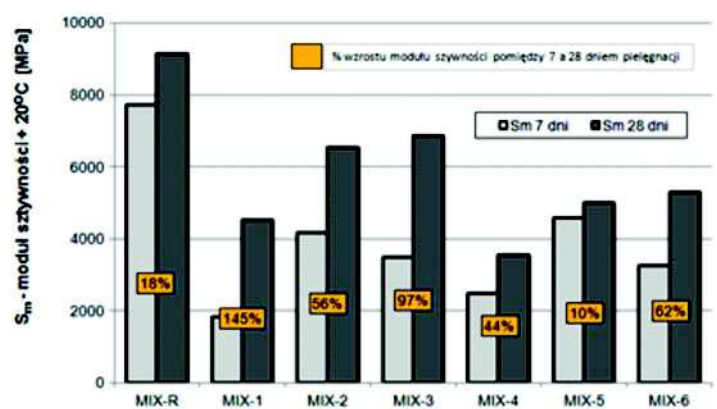


Rys. 4. Wyniki planu mieszaniny parametrów mechanicznych: a) wytrzymałości na pośrodkie rozciąganie (ITS_{DRY}), b) wytrzymałości na pośrodkie rozciąganie po działaniu wody (ITS_{WET})

Wyniki analizy statystycznej wykazały, że przy opisie zmian wytrzymałości na pośrodkie rozciąganie (ITS_{DRY} oraz ITS_{WET}) recyklowanych podbudów w aspekcie składników spoiw drogowych, najbardziej adekwatny jest model kwadratowy. Wartość współczynnika determinacji opisującego jego dopasowanie kształtuje się na wysokim poziomie, tzn. R^2 powyżej 0,9. Model liniowy typu „Linear” nie wyjaśnia w sposób wystarczający zmienności badanych parametrów. Natomiast model typu „Special Cubic” nie wnosi istotnego wkładu w wyjaśnienie zmienności badanych cech.

Na podstawie uzyskanych wyników badań wytrzymałości na pośrodkie rozciąganie można stwierdzić, że najwyższą wytrzymałością, niezależnie od formy kondycjonowania, charakteryzują się recyklowane podbudowy, w których składzie zastosowano cement. Najniższą wytrzymałość stwierdzono w obrębie udziału składnika w przedziale 50-100% na linii CEM-CKD (kolor ciemnozielony na rysunku 4) oraz w obrębie 100% wapna hydratyzowanego. Interesujące zjawisko zaobserwowano na linii spoiwa CEM - $Ca(OH)_2$, gdzie po określonym czasie oddziaływania wody nie odnotowano osłabienia połączenia wszystkich składników, tzn. asfaltu spienionego, spoiwa, kruszywa mineralnego oraz destruktu, wchodzących w skład recyklowanej podbudowy.

Sztywność recyklowanej podbudowy w aspekcie czasu pielęgnacji określono w teście pośredniego rozciągania (IT-CY). Wyniki badań przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Wyniki wzrostu modułu sztywności na pośrodkie rozciąganie recyklowanej podbudowy z asfaltem spienionym

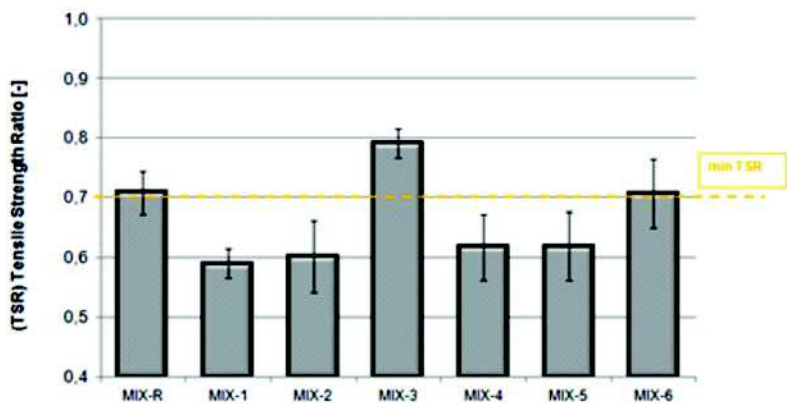
Na podstawie uzyskanych wyników badań modułu sztywności w pośrednim rozciąganiu można stwierdzić, że mieszanka zawierająca w swoim składzie wapno hydratyzowane (MIX-1) charakteryzuje się największym przyrostem modułu sztywności w czasie. Wartość modułu sztywności jest prawie półtora raza większa od pozostałych. Zjawisko to ma związek z usztywniającym oddziaływaniem wapna hydratyzowanego. Zastosowanie wapna hydratyzowanego powoduje szybsze osuszenie mieszanki recyklowanej podbudowy, co w efekcie wpływa również na sztywność. Podobne zjawisko jest obserwowane w przypadku pozostałych mieszanek zawierających

w swoim składzie wapno hydratyzowane (MIX-3, MIX-4, MIX-6), jednak nie z tak dużą intensyfikacją. Najniższym przyrostem modułu sztywności charakteryzuje się mieszanka MIX-5 (CEM+CKD). Można to wyjaśnić w ten sposób, że poprzez połączenie cementu oraz popiołu lotnego w proporcjach 1: 1 (50%/50%) wytworzony został cement portlandzki ni-

Tabela 4. Wartość współczynników eksperymentalnych opisujących uzyskany model badanej cechy ITS_{DRY} oraz ITS_{WET} w przypadku recyklowanych podbudów

	CEM	Ca(OH) ₂	CKD	CEM*Ca(OH) ₂	CEM*CKD	Ca(OH) ₂ *CKD
ITS_{DRY}	0,96078	0,43832	0,60937	0,04048	-1,4588	1,06736
ITS_{WET}	0,67954	0,25786	0,36531	0,37416	-1,0425	0,71969

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



Rys. 6. Odporność na działanie wody TSR recyklowanej podbudowy z asfaltem spienionym (słupki błędów oznaczają odchylenie standardowe)

skokaloryczny typu IV [13]. Zaprawy z cementów z dodatkiem popiołu mają znacznie wolniejsze tempo przyrostu wytrzymałości w porównaniu do tradycyjnych cementów typu I.

Najwyższy moduł sztywności po 7 oraz 28 dniach pielęgnacji uzyskano w przypadku mieszanki referencyjnej zawierającej w swoim składzie cement portlandzki. Moduł sztywności po 7 dniach pielęgnacji osiągnął wartość $S_{m7d} = 7\,736$ MPa, natomiast po 28 dniach $S_{m28d} = 9\,162$ MPa. W drugim przypadku zaobserwowano najniższe tempo przerostu modułu sztywności, które wynosi 18%. Odwołując się do uzyskanego tempa przyrostu (MIX-R) można stwierdzić, że recyklowana podbudowa zawierająca w swoim składzie cement osiągnęła w początkowej fazie (po 7 dniach pielęgnacji) 82% sztywności końcowej.

Do oceny odporności na działanie wody, recyklowanej podbudowy z asfaltem spienionym w aspekcie zastosowanych spoiw drogowych wykorzystano metodykę badawczą opisaną w wytycznych [17]. 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. Wyniki odporności na działanie wody recyklowanej podbudowy z asfaltem spienionym i spoiwami drogowymi przedstawiono na rysunku 6.

Na podstawie uzyskanych wyników badań można stwierdzić, że jedynie trzy mieszanki (MIX-R, MIX-3, MIX-6) charakteryzują się dopuszczalnym spadkiem wytrzymałości na pośrednie rozciąganie po procesie oddziaływania wody. Maksymalną wartość wskaźnika TSR uzyskała mieszanka, w której składzie zastosowano spoiwo składające się z cementu oraz wapna hydratyzowanego w proporcjach 50% CEM + 50% $\text{Ca}(\text{OH})_2$ wartość $\text{TSR} = 0,80$. Korzystny wpływ wapna hydratyzowanego wynika z wymiany jonów z frakcją ilastą, która może występować w składzie materiałów wykorzystywanych w recyklingu. Należy również zaznaczyć, że zadowalającą wartość wskaźnika uzyskała mieszanka referencyjna MIX-R zawierająca cement, który jest rekomendowany przez wytyczne [18]. Jednakże jest ona niższa niż wytworzone w warunkach laboratoryjnych spoiwo zastosowane w mieszance MIX-3.

Wnioski

Na podstawie analizy wyników badań recyklowanej podbudowy z użyciem asfaltu spienionego w aspekcie rodzaju zastosowanego składnika spoiwa można sformułować następujące wnioski:

- 1) zastosowane w analizie spoiwa potwierdzają, że istnieje możliwość stosowania alternatywnych środków wiążących w składzie recyklowanej podbudowy w zależności od wymagań projektowych i pełnionej funkcji wykonanej warstwy w układzie warstwowym konstrukcji nawierzchni.
- 2) wszystkie recyklowane podbudowy z asfaltem spienionym, pyłem mineralnym oraz dodatkiem spoiw drogowych, spełniają wymagania w zakresie minimalnej zawartości wolnej przestrzeni. Minimalną zawartość wolnej przestrzeni równą $V_m = 7,9\%$ uzyskała mieszanka, w której składzie zastosowano spoiwo składające się ze wszystkich analizowanych składników ($\text{CEM} + \text{CKD} + \text{Ca}(\text{OH})_2$).
- 3) najwyższą wytrzymałością na pośrednie rozciąganie charakteryzuje się mieszanka referencyjna zawierająca w swoim składzie cement, niezależnie od metody kondycjonowania próbek. Stwierdzono, że dodatek wapna hydratyzowanego w ilości od 0 do 50% w składzie spoiwa nie wpływa na zmniejszenie wytrzymałości na pośrednie rozciąganie.
- 4) uzyskana wartość modułu sztywności w pośrednim rozciąganiu (IT-CY) w przypadku mieszanki referencyjnej po 28 dniach pielęgnowania ($S_{m28d} = 9\,162$ MPa) może powodować powstawanie pęknięć skurczowych.
- 5) analizując ocenę odporności na działanie wody należy stwierdzić, że jedynie mieszanki MIX-R, MIX-3 oraz MIX-6 charakteryzują się wymaganą odpornością na działanie wody.
- 6) najkorzystniejsze wyniki badań właściwości fizycznych oraz mechanicznych uzyskano w przypadku mieszanki zawierającej w swoim składzie dodatek wapna hydratyzowanego w połączeniu z cementem.

Bibliografia

- [1] Academy, A., A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilised Materials, 2009
- [2] M. Bożym, Alternatywne metody wykorzystania pyłów z pieców wapienniczych i cementowych, ze szczególnym uwzględnieniem gospodarki osadowej. Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych, Nr 8, 2011, s.59-68
- [3] S.F. Brown, D. Needham, A study of cement modified bitumen emulsion mixtures. In: *Proceedings of Association of Asphalt Pavement Technologist*. vol. 69. Reno, NV: Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT), 2000, s. 92–121
- [4] P. Buczyński, Wpływ pyłów powstałych w procesie odpylania kruszywa na właściwości podbudowy z asfaltem spienionym, Praca doktorska, Politechnika Świętokrzyska, 2013, s. 206
- [5] B. Dożycki, Instrukcja projektowania i wbudowywania mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE), GDDKiA, Gdańsk 2014
- [6] P. Fu, D. Jones, J. Harvey and F. Halles, *Investigation of the Curing Mechanism of Foamed Asphalt Mixes Based on Micromechanics Principles*, J. Mater. Civ. Eng. No. 22 (2010), s. 29–38
- [7] M. Iwański, P. Buczyński, Zastosowanie pyłów mineralnych w technologii recyklingu głębokiego na zimno z asfaltem spienionym, *Drogownictwo* 5/2013, s. 143-148

- [8] M. Iwański, P. Buczyński, *Wpływ pyłów mineralnych na moduł sztywności podbudowy z asfaltem spienionym*, Zeszyt Naukowy Politechniki Rzeszowskiej Budownictwo i Inżynierii Środowiska zeszyt 59 (nr 3/2012/IV), 2012, s. 221-228
- [9] W. Klonecki, *Statystyka dla inżynierów*, PWN, Warszawa, Wrocław, 1999, s. 283
- [10] G. Martinez-Arguelles, F. Giustozzi, M. Crispiono, W. Flintsch G., *Investigating physical and reological properties of foamed bitumen*, Construction and Building Materials 72 (2014), s. 423-433
- [11] A. Modarres, P. Ayar, *Comparing the mechanical properties of cold recycled mixture containing coal waste additive and ordinary Portland cement*, International Journal of Pavement Engineering, 2014
- [12] D.G. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 5th Edition, John Wiley and Sons, 2001, s. 607
- [13] A.M. Neville, *Właściwości betonu*, V edycja, Stowarzyszenie Producentów Cementu Kraków 2012
- [14] Simon J. Blott, Debra J. Croft, Kenneth Pye, Samantha E. Saye, Helen E. Wilson, *Particle size analysis by laser diffraction*, The Geological Society of London 2004
- [15] A. Sreekrishnavilasam, S. Rahardja, R. Kmetz, M. Santagata, *Soil treatment using fresh and landfilled cement kiln dust*, Construction and Building Materials, Vol. 21, 2007, s. 318-327
- [16] StatSoft Polska, *Zastosowania statystyki i data mining w badaniach naukowych* – materiały z seminarium XI.2013
- [17] Wirtgen GmbH, 2012. *Wirtgen cold recycling technology*. 1st ed. Windhagen: Wirtgen GmbH
- [18] J. Zawadzki, J. Matras, T. Mechowski, D. Sybilski, *Warunki techniczne wykonywania warstw podbudowy z mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej (MCE)*, Zeszyt 61, IBDiM, Warszawa 1999



GRZEGORZ MAZUREK

Politechnika
Świętokrzyska
gmazurek@tu.kielce.pl

Ocena reologicznych zmian w strukturze asfaltu spowodowanych dodatkiem wosku syntetycznego F-T

Jednym z najbardziej istotnych wyzwań, jakie musi rozwiązać dzisiejsze społeczeństwo, jest efektywność i ekonomiczność w zarządzaniu energią pochodzącą z paliw ze źródeł nieodnawialnych. Jednym z rozwiązań długofalowych może być stosowanie mniej energochłonnych technologii produkcji i wbudowania mieszanek mineralno-asfaltowych w technologii WMA (ang. *Warm Mix Asphalt*) [1, 19]. Tego typu technologie wymagają dodatkowych zabiegów lub modyfikatorów, które umożliwiają obniżenie lepkości asfaltu przy zadanej temperaturze technologicznej. Jednym z możliwych rozwiązań jest zastosowanie wosku syntetycznego Fischera-Tropscha (F-T) [20]. Wosk F-T to dodatek organiczny stosowany w celu poprawy urabialności oraz obniżenia temperatury produkcji i zagęszczenia mieszanek mineralno-asfaltowych. Po wystygnięciu nawierzchni, na skutek procesu krystalizacji związków wosku, następuje wzrost sztywności asfaltu oraz wzrost odporności na deformacje plastyczne całego kompozytu mineralno-asfaltowego. W literaturze technicznej jest mało informacji na temat mechanizmów wywołujących wzrost sztywności asfaltu modyfikowanego woskiem syntetycznym, skali oddziaływań krystalizacji wosku oraz związanych z tym konsekwencjami zmian w strukturze samego asfaltu. W związku z tym w artykule zamieszczono wnioski z badań wynikające z obecności wosków syntetycznych w asfaltach o różnym stanie reologicznym.

Podstawowe parametry asfaltów

Do badań użyto dwóch rodzajów asfaltów o różnej penetracji, tzn. asfalt 35/50 oraz 160/220. Asfalt 160/220 nie jest

stosowany jako lepiszcze do warstw konstrukcyjnych. W przyjętym zakresie badań jego obecność miała na celu pokazanie trendu, jaki można zaobserwować w efekcie modyfikacji asfaltów miękkich woskiem syntetycznym. Ponadto zastosowanie zaproponowanego zestawu asfaltów miało służyć określeniu, czy stan reologiczny asfaltu wyjściowego wpływa na szybkość zmian w strukturze asfaltu po dodaniu wosku syntetycznego. Do badań wykorzystano wosk syntetyczny wytworzony w procesie syntezy Fischera-Tropscha (F-T), o średniej liczbie atomów w cząsteczce – oscylującej wokół 100. Stężenie wosku syntetycznego w przypadku asfaltów 35/50 i 160/220 wynosiło: 0% (referencyjny), 3% oraz 6% w stosunku do masy asfaltu. Próbkę asfaltu przygotowaną według [1] pozostawiono na okres 24 h między innymi w tym celu, aby wytworzyła się stała faza w formie krystalitów wosku syntetycznego F-T. Rezultaty wyników badań przedstawiono w tabeli 1.

Wyniki wykonanego zakresu badań wskazują, że podstawowe normowe parametry reologiczne obydwu użytych asfaltów zmieniają się w odmienny sposób po dodaniu do nich takiej samej ilości wosku syntetycznego F-T. Poddane badaniu asfalty stan żelu, czyli indeks penetracji $IP > 2$ [18], został osiągnięty przy dodatku wosku syntetycznego wynoszącym 3%. Wzrost wartości indeksu penetracji nastąpił bardzo szybko w przypadku asfaltu 160/220, co może dawać powody do obaw. Tak dynamiczny wzrost może powodować dwójaki skutek, tzn. może wskazywać na podwyższony poziom granicy plastyczności, po przekroczeniu której znacznie spadnie, szybciej niż w asfalcie 35/50, lepkość dynamiczna do bardzo niskiej wartości. Drugim skutkiem, który może wywołać poziom przyrostu indeksu penetracji, jest obniżenie ciągliwości asfaltu, szczególnie w niskiej temperaturze. Badania podstawowe (tabela 1) nie są do końca w stanie rozstrzy-