

## OCENA WPŁYWU WSKAŹNIKA ZAGĘSZCZENIA NA MODUŁ SZTYWNOŚCI BETONU ASFALTOWEGO

Andrzej PLEWA\*

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45 A, 15-351 Białystok

**Streszczenie:** Błędy technologiczne dotyczące niewłaściwego zagęszczenia warstw z mieszanek mineralno-asfaltowych są często główną przyczyną przedwczesnej utraty nośności konstrukcji nawierzchni drogowej. Stwarza to konieczność ciągłego doskonalenia technologii w budowywania mieszanek mineralno-asfaltowych. Cel ten może być realizowany poprzez wykorzystanie dostępnych osiągnięć z dziedziny reologii mieszanek mineralno-asfaltowych, jak również poprzez pogłębianie wiedzy z zakresu technologii drogowych. W artykule przedstawiono wyniki badań i analiz wpływu zagęszczenia mieszanek mineralno-asfaltowych typu beton asfaltowy (AC) na wartość modułu sztywności. Podjęto próbę określenia korelacji zachodzących pomiędzy wskaźnikiem zagęszczenia, a parametrami objętościowymi i modułem sztywności betonu asfaltowego AC16P z zastosowaniem lepszyczy asfaltowych: asfaltu 35/50 i elastomeroasfaltu PMB 25/55-60.

*Słowa kluczowe:* mieszanka mineralno-asfaltowa, beton asfaltowy (AC), moduł sztywności IT-CY, wskaźnik zagęszczenia.

### 1. Wprowadzenie

Zagęszczanie mieszanek mineralno-asfaltowych jest jednym z najważniejszych etapów wykonywania warstw konstrukcyjnych nawierzchni drogowych. Wpływa ono bowiem nie tylko na trwałość nawierzchni, ale także na ich cechy eksploatacyjne. Podczas procesu zagęszczenia, poprzez redukcję liczby wolnych przestrzeni oraz łączenia się „błonek” asfaltu otaczających ziarna kruszywa, dochodzi do zmniejszenia objętości mieszanki mineralno-asfaltowej oraz wzrostu jej gęstości. Pozwala to na osiągnięcie jej optymalnej spójności i odpowiednich właściwości eksploatacyjnych (Dowell i Stubbs, 2004; Mieczkowski, 2006; Dołżycki i Judycki, 2006).

Moduł sztywności mieszanek mineralno-asfaltowych jest wielkością zmienną w funkcji temperatury. Wraz ze spadkiem temperatury jego wartość wzrasta, czyniąc warstwę z mieszanki bardziej nośną, lecz z drugiej strony bardziej kruchą i podatną na spękania. Natomiast w wysokich temperaturach letnich ma miejsce zjawisko odwrotne – moduł sztywności maleje, obniżając tym samym odporność kompozytu na deformacje (Dołżycki i Judycki, 2006; Piłat i Radziszewski, 2010; Park i in., 2005; Radziszewski i in., 2011). Zachowanie dobrych właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych jest więc

nie lada wyzwaniem stawianym przed technologami laboratoriów drogowych. Głównym ich celem powinna więc być, oparta o liczne badania, optymalizacja właściwości mieszanki w całym zakresie temperatur eksploatacyjnych, możliwie wiernie odwzorowująca jej pracę w nawierzchni drogowej.

Właściwe dobranie poszczególnych składników mieszanek mineralno-asfaltowych determinuje między innymi uzyskanie wymaganych wartości parametrów kontraktowych – wskaźnika zagęszczenia i zawartości wolnej przestrzeni. Mimo, iż w znaczącym stopniu decydują one o nośności nawierzchni drogowej, to rozpatrywanie ich jako wyłączne kryterium brane pod uwagę podczas projektowania i w budowywania mieszanek może okazać się niewystarczające. Dopiero wprowadzenie do praktyki laboratoryjnej dodatkowych wymagań funkcjonalnych, dokładniej symulujących warunki panujące na drodze – mrozoodporności, odporności na zmęczenie i deformacje trwałe, sztywności itp., pozwala na podwyższenie jakości i trwałości nawierzchni drogowej (Iwański i Mazurek, 2010; Dołżycki i Judycki, 2006; Stefańczyk i Mieczkowski, 2008; Sybilski, 2009).

Istnieje wiele sposobów zagęszczania mieszanek mineralno-asfaltowych. Podstawowy podział metod zagęszczania determinowany jest przez miejsce i warunki

\* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: a.plewa@pb.edu.pl

towarzyszące temu procesowi. Na tej podstawie rozróżnia się zagęszczanie laboratoryjne i zagęszczanie „in situ” – na budowie (Dowell i Stubbs, 2004; Mieczkowski, 2006; Dołycki i Judycki, 2006).

Jednym z najważniejszych i zarazem podstawowym wymaganiem stawianym warstwie konstrukcyjnej nawierzchni drogowej wykonanej w technologii betonu asfaltowego, jest osiągnięcie wskaźnika zagęszczenia o wartości co najmniej 98%, a także możliwie małe zmiany uziarnienia szkieletu mineralnego, powstające na skutek zbyt dużych wpływów zewnętrznych (Judycki, 2006; WT-2 2010).

Beton asfaltowy jest kompozytem odpowiednio dobranej mieszanki kruszyw i lepiszcza asfaltowego, otrzymywanym w wyniku zagęszczania sposobem wymuszonym. Mieszanka mineralno-asfaltowa typu beton asfaltowy jest wykorzystywana do wszystkich warstw bitumicznych konstrukcji nawierzchni drogowej. Właściwości betonu asfaltowego między innymi zależą od składu mineralogicznego kruszywa oraz lepkosprężystych cech lepiszcza asfaltowego (Piłat i Radziszewski, 2010; Park i in. 2005; Radziszewski i in., 2011). Temperatura wpływa na właściwości asfaltu, a to z kolei przyczynia się do bezpośredniego kształtowania struktury mieszanki mineralno-asfaltowej. W niskiej temperaturze mieszanka mineralno-asfaltowa przejawia dominantę „materiału sprężystego”, w wysokiej natomiast ciała lepkoplastycznego. To właśnie „niestabilność” stanów reologicznych mieszanek mineralno-asfaltowych w różnych warunkach temperaturowych, czyni je jednymi z najbardziej złożonych kompozytów (Godlewski, 2011; Radziszewski i in., 2004).

## 2. Metodyka i przedmiot badań

Do badań laboratoryjnych wykorzystano mieszanki mineralno-asfaltowe typu beton asfaltowy AC16P do warstwy podbudowy, kategoria obciążenia ruchem KR3-KR6. Mieszanki zróżnicowano ze względu na zastosowane lepiszcza asfaltowe: asfalt drogowy 35/50 i asfalt modyfikowany PMB 25/55-60.

Projekt mieszanki wykonano przy wykorzystaniu aplikacji MASA w oparciu o gęstość lepiszcza asfaltowego i poszczególnych kruszyw mineralnych oraz ich analizę sitową. Metodą kolejnych korekt, polegającą na sprawdzaniu zgodności zawartości wolnej przestrzeni próbek zagęszczonych w ubijaku Marshalla, osiągnięto zamierzony efekt końcowy – skład mieszanki AC16P (tab. 1.), spełniającą wymagania normowe (WT-2, 2010).

Tab. 1. Skład betonu asfaltowego AC16P

Nazwa składnika mieszanki	Zawartość procentowa [%]	
	Mieszanka mineralna	Mieszanka mineralno-asfaltowa
Mączka wapienna	6,0	5,7
Piasek łamany 0/2	21,9	20,8
Grys 2/5	39,2	37,2
Grys 8/16	32,9	31,3
Lepiszczce: 35/50 lub PMB25/55-60	–	5,0

W celu zróżnicowania wartości wskaźników zagęszczenia, wykonano po 30 próbek betonu asfaltowego AC16P 35/50 i AC16P PMB25/55-60, zagęszczanych w ubijaku Marshalla, stosując różną temperaturę i energię zagęszczania (tab. 2).

Wszystkie próbki mieszanek mineralno-asfaltowych poddano następującym oznaczeniom:

- gęstości objętościowej (metoda SSD),
- zawartości wolnych przestrzeni,
- modułu sztywności w badaniu rozciągania pośredniego IT-CY, w temperaturach  $-5^{\circ}\text{C}$ ,  $+10^{\circ}\text{C}$  i  $+25^{\circ}\text{C}$ .

Wyniki badań objętościowych próbek z mieszanki mineralno-asfaltowej AC16P przedstawiono w tabeli 2.

Wskaźnik zagęszczenia wykonanych próbek mieszanki mineralno-asfaltowej AC16P obliczono na podstawie uzyskanych wyników badania gęstości objętościowej, korzystając z poniższego wzoru (Piłat i Radziszewski, 2010):

$$Z = \frac{\rho_b^{MMA(n)}}{\rho_b^{MMA(75)}} \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie:  $Z$  jest wskaźnikiem zagęszczenia próbki mieszanki mineralno-asfaltowej w %,  $\rho_b^{MMA(n)}$  jest gęstością objętościową mieszanki mineralno-asfaltowej AC16P zagęszczonej  $n$  uderzeniami ubijaka Marshalla z każdej strony próbki w  $\text{kg/m}^3$ , a  $\rho_b^{MMA(75)}$  jest gęstością objętościową mieszanki mineralno-asfaltowej AC16P zagęszczonej 75-cioma uderzeniami ubijaka Marshalla z każdej strony próbki w  $\text{kg/m}^3$ .

Odpowiednie, żądane wartości wskaźników zagęszczenia, podane w tabeli 2, w zakresie 95-97%, uzyskano poprzez obniżenie temperatury zagęszczenia ( $130^{\circ}\text{C}$  – AC16P z 35/50 i  $120-140^{\circ}\text{C}$  – AC16P z PMB25/55-60) oraz obniżenie energii zagęszczania w ubijaku Marshalla.

Wyniki badań modułu sztywności w badaniu rozciągania pośredniego IT-CY, w temperaturach badania  $-5^{\circ}\text{C}$ ,  $+10^{\circ}\text{C}$  i  $+25^{\circ}\text{C}$ , oznaczone na próbkach z mieszanki mineralno-asfaltowej AC16P, przedstawiono w tabeli 3.

Tab. 2. Średnie arytmetyczne wyników badań objętościowych betonu asfaltowego AC16P z lepiszczami 35/50 i PMB 25/55-60

Nr próbki	Temperatura zagęszczenia [°C]	Liczba uderzeń ubijaka Marshalla	Średnia wartość arytmetyczna:			
			Gęstość objętościowa [kg/m <sup>3</sup> ]	Zawartość wolnej przestrzeni [%]	Wskaźnik zagęszczenia [%]	
AC16P 35/50						
1-5	145	2 x 75	2393	4,3	100	
6-10		2 x 50	2370	5,3	99	
11-15		2 x 35	2342	6,4	98	
16-20		2 x 30	2324	7,1	97	
21-25		130	2 x 24	2303	8,2	96
26-30		2 x 20	2277	9,0	95	
AC16P PMB 25/55-60						
1-5	150	2 x 75	2372	5,2	100	
6-10		2 x 50	2340	6,5	99	
11-15		2 x 35	2319	7,3	98	
16-20		140	2301	7,8	97	
21-25		130	2 x 30	2287	8,6	96
26-30		120	2254	9,1	95	

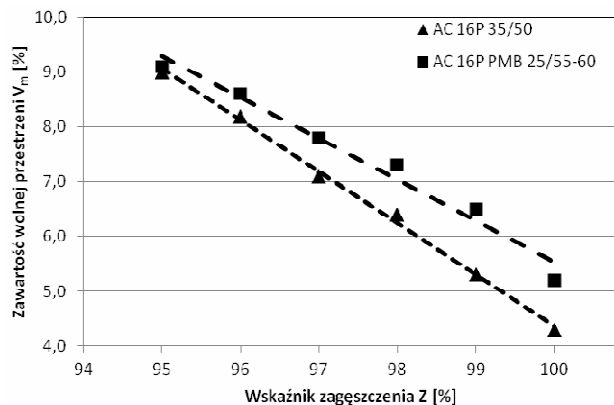
Tab. 3. Średnie arytmetyczne wyników badań modułu sztywności IT-CY betonu asfaltowego AC16P w temperaturach -5°C, +10°C i +25°C

Nr próbki	Wskaźnik zagęszczenia [%]	Średnia arytmetyczna modułu sztywności IT-CY [MPa], w temperaturze:		
		-5°C	+10°C	+25°C
AC16P 35/50				
1-5	100	20782	10248	3774
6-10	99	17802	9105	3314
11-15	98	15523	7903	2811
16-20	97	13575	7014	2460
21-25	96	12205	6505	2021
26-30	95	11404	6309	1888
AC16P PMB 25/55-60				
1-5	100	20045	10457	3911
6-10	99	17117	9287	3409
11-15	98	15024	8068	2944
16-20	97	13305	7223	2655
21-25	96	11840	6765	2191
26-30	95	11222	6603	2028

### 3. Analiza wyników badań

#### 3.1. Wpływ wskaźnika zagęszczenia na zawartość wolnej przestrzeni

Wyniki zawartości wolnej przestrzeni w funkcji wskaźnika zagęszczenia analizowanych mieszanek mineralno-asfaltowych przedstawiono w postaci graficznej na rysunku 1.



Rys. 1. Zawartości wolnej przestrzeni w funkcji wskaźnika zagęszczenia mieszanek mineralno-asfaltowej typu AC16P 35/50 i AC16P PMB25/55-60

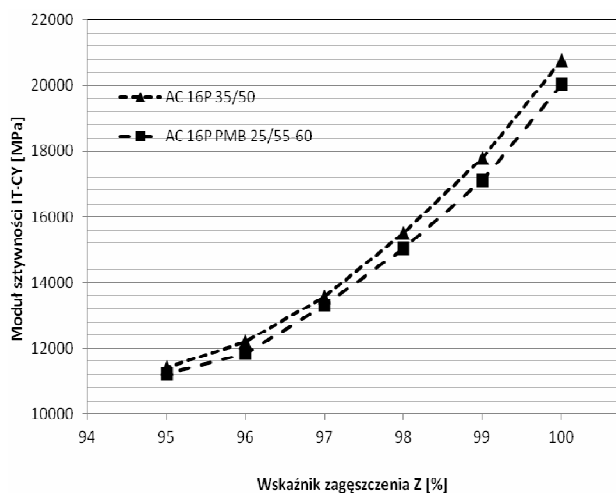
Z analizy zależności przedstawionych na rysunku 1 wynika, że zarówno dla mieszanki AC16P 35/50, jak i AC16P PMB 25/55-60 zmiany zawartości wolnej przestrzeni w funkcji wskaźnika zagęszczenia mają charakter bliski liniowemu. Dla rosnących wartości wskaźnika zagęszczenia następuje spadek zawartości wolnej przestrzeni, średnio o:

- 0,94%/1% wskaźnika zagęszczenia – mieszanka AC16P 35/50,
- 0,85%/1% wskaźnika zagęszczenia – mieszanka AC16P PMB25/55-60.

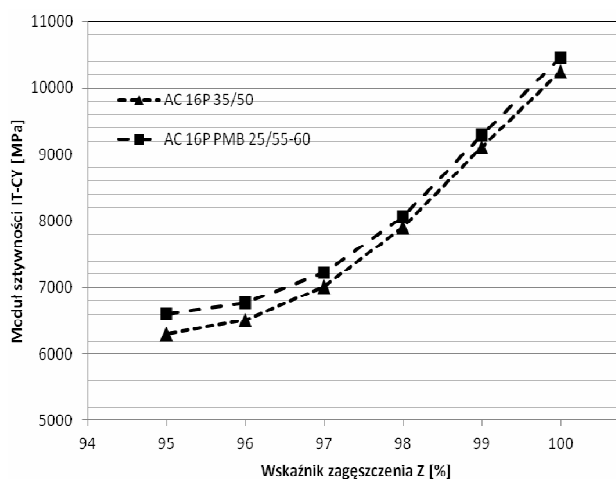
#### 3.2. Wpływ wskaźnika zagęszczenia na moduł sztywności IT-CY

Wyniki oznaczenia modułu sztywności określonego w badaniu rozciągania pośredniego IT-CY w funkcji wskaźnika zagęszczenia próbek mieszanki mineralno-asfaltowej AC16P, w temperaturach badania:  $-5^{\circ}\text{C}$ ,  $+10^{\circ}\text{C}$  i  $+25^{\circ}\text{C}$  przedstawiono na rysunkach 2-4.

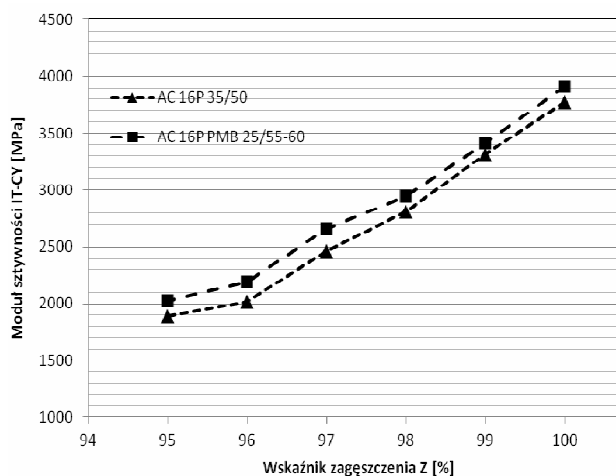
Z analizy wykresów zamieszczonych na rysunkach 2-4 wynika, że moduł sztywności mieszanki AC16P 35/50 i AC16P PMB25/55-60 maleje wraz ze wzrostem temperatury i spadkiem wskaźnika zagęszczenia. Na podstawie zależności przedstawionej na rysunku 2 należy stwierdzić, że wartości modułów sztywności mieszanki z asfaltem drogowym w temperaturze  $-5^{\circ}\text{C}$ , na wszystkich poziomach zagęszczenia, mają wartości wyższe od wartości uzyskanych dla mieszanki z lepiszczem modyfikowanym. Różnice te zwiększają się wraz ze wzrostem wskaźnika zagęszczenia i wynoszą od 182 MPa ( $Z = 95\%$ ) do 737 MPa ( $Z = 100\%$ ). W tej temperaturze, mieszanka AC16P 35/50 ulega



Rys. 2. Zmiana wartości modułu sztywności IT-CY mieszanki mineralno-asfaltowej AC16P w funkcji wskaźnika zagęszczenia, w temperaturze badania  $-5^{\circ}\text{C}$



Rys. 3. Zmiana wartości modułu sztywności IT-CY mieszanki mineralno-asfaltowej AC16P w funkcji wskaźnika zagęszczenia, w temperaturze badania  $10^{\circ}\text{C}$



Rys. 4. Zmiana wartości modułu sztywności IT-CY mieszanki mineralno-asfaltowej AC16P w funkcji wskaźnika zagęszczenia, w temperaturze badania  $25^{\circ}\text{C}$

większemu usztywnieniu. Możemy zatem przewidywać, że mieszanki betonu asfaltowego z asfaltem niemodyfikowanym podczas eksploatacji w konstrukcji nawierzchni drogowej w niskich ujemnych temperaturach (w okresie zimy) będą bardziej „kruche” i podatna na spękania w odniesieniu do mieszanek z asfaltem modyfikowanym. Z kolei kompozyt AC16P PMB25/55-60, z uwagi na mniejsze wartości modułów sztywności, staje się bardziej odporny na naprężenia termiczne. Można więc przyjąć założenie, że mieszanka z lepiszczem modyfikowanym, będzie bardziej trwała w ujemnych temperaturach zimowych.

Wykresy zawarte na rysunkach 3 i 4 przedstawiają odmienne zależności, niż zostało to ukazane na rysunku 2. W przypadku temperatury badania równej +10°C, jak i +25°C większymi modułami sztywności charakteryzują się próbki z mieszanek z asfaltem modyfikowanym. Różnice te są nieco mniejsze, niż w przypadku temperatury -5°C i wynoszą:

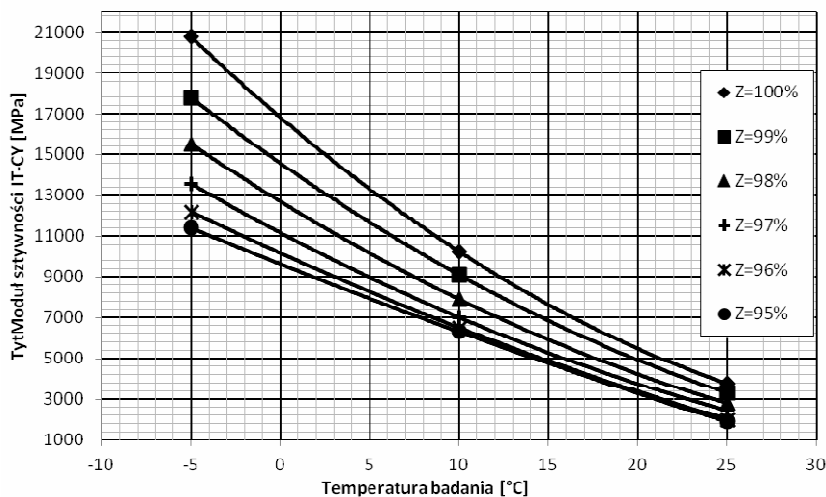
- 290 MPa (Z = 95%) - 209 MPa (Z = 100%) - temperatura badania +10°C,

- 140 MPa (Z = 95%) - 137 MPa (Z = 100%) - temperatura badania +25°C.

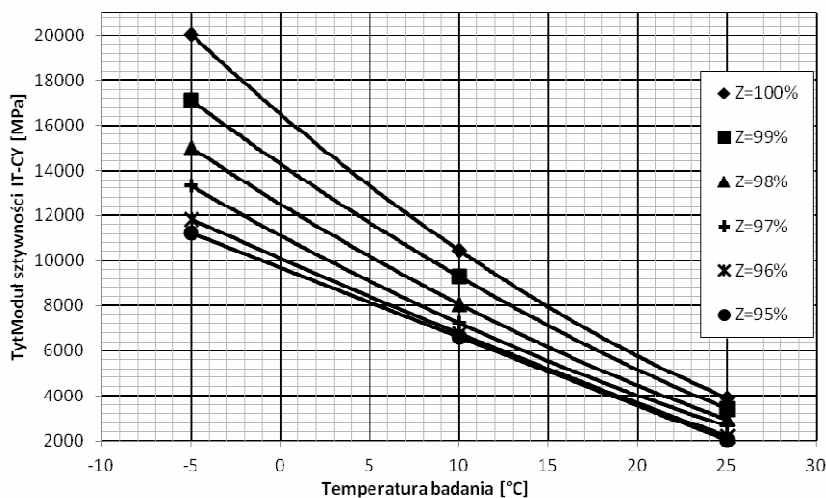
Z uwagi, na większe wartości modułów sztywności w zakresie temperatur od +10°C do +25°C, należy zakładać, że mieszanki z lepiszczem modyfikowanym będą bardziej odporne na deformacje lepkoplastyczne, w odniesieniu do mieszanek z asfaltem drogowym.

Reasumując, możemy przewidywać, że beton asfaltowy AC16P 35/50 będzie charakteryzował się mniejszą odpornością na koleinowanie w wysokich temperaturach eksploatacji i większym ryzykiem wystąpienia spękań niskotemperaturowych w temperaturach ujemnych, w odniesieniu do mieszanki AC16P PMB25/55-60. Można przypuszczać, że nawierzchnie w których zastosowany będzie kompozyt z asfaltem drogowym będą odznaczać się zwiększonymi kosztami utrzymania i remontów.

Na rysunkach 5 i 6 zamieszczono wykresy przedstawiające zmiany modułu sztywności w funkcji temperatury odpowiednio dla mieszanki AC16P 35/50 i AC16P PMB 25/55-60.



Rys. 5. Zmiana wartości modułu sztywności IT-CY mieszanki mineralno-asfaltowej AC16P 35/50 o różnym wskaźniku zagęszczenia w funkcji temperatury



Rys. 6. Zmiana wartości modułu sztywności IT-CY mieszanki mineralno-asfaltowej AC16P PMB 25/55-60 o różnym wskaźniku zagęszczenia w funkcji temperatury

Z analizy wykresów przedstawionych na rysunku 5 i 6, należy wywnioskować, że moduł sztywności mieszanek mineralno-asfaltowych maleje wraz ze wzrostem temperatury. Większymi spadkami modułów sztywności, wraz ze wzrostem temperatury, odznacza się beton asfaltowy AC16P 35/50 (dla poszczególnych wskaźników zagęszczenia próbek). Świadczy to o jej większej wrażliwości na zmiany temperaturowe. Natomiast niższe moduły sztywności mieszanki AC16P PMB 25/55-60 w temperaturze  $-5^{\circ}\text{C}$ , oraz wyższe w temperaturze  $+10$  i  $+25^{\circ}\text{C}$ , dowodzą o lepszych właściwościach funkcjonalnych zastosowanego w niej lepszycza modyfikowanego. Wartości modułów dla poszczególnych wskaźników zagęszczenia maleją średnio o:

a) mieszanka AC16P 35/50:

- $567\text{MPa}/1^{\circ}\text{C}$  -  $Z=100\%$ ,
- $483\text{MPa}/1^{\circ}\text{C}$  -  $Z=99\%$ ,
- $424\text{MPa}/1^{\circ}\text{C}$  -  $Z=98\%$ ,
- $371\text{MPa}/1^{\circ}\text{C}$  -  $Z=97\%$ ,
- $343\text{MPa}/1^{\circ}\text{C}$  -  $Z=96\%$ ,
- $317\text{MPa}/1^{\circ}\text{C}$  -  $Z=95\%$ ,

b) mieszanka AC16P PMB 25/55-60:

- $538\text{MPa}/1^{\circ}\text{C}$  -  $Z=100\%$ ,
- $457\text{MPa}/1^{\circ}\text{C}$  -  $Z=99\%$ ,
- $403\text{MPa}/1^{\circ}\text{C}$  -  $Z=98\%$ ,
- $365\text{MPa}/1^{\circ}\text{C}$  -  $Z=97\%$ ,
- $322\text{MPa}/1^{\circ}\text{C}$  -  $Z=96\%$ ,
- $310\text{MPa}/1^{\circ}\text{C}$  -  $Z=95\%$ .

Otrzymane zmiany wartości modułów sztywności w funkcji temperatury dla wyznaczonych wskaźników zagęszczenia, można przedstawić także w postaci zależności matematycznej (2). Funkcja ta, przyjmuje postać:

$$y = ax^2 + bx + c \quad (2)$$

gdzie:  $y$  jest modułem sztywności w MPa,  $x$  jest temperaturą w  $^{\circ}\text{C}$ , a  $a$ ,  $b$ ,  $c$  są współczynnikami równania określonymi w tabeli 4.

Zależność przedstawiona równaniem (2) może posłużyć jako doskonale narzędzie pomocnicze przy wymiarowaniu nawierzchni metodą mechaniczną lub do korekty trwałości zmęczeniowej konstrukcji nawierzchni drogowej, w której wbudowano warstwę z analizowanych mieszanek betonu asfaltowego o różnym wskaźniku zagęszczenia. Możliwość identyfikacji wartości modułu sztywności w dowolnie wybranej temperaturze, pozwala w szybki sposób na wyznaczenie wstępnej grubości warstw.

#### 4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych i analiz sformułowano przedstawione poniżej wnioski.

1. Wskaźnik zagęszczenia mieszanek mineralno-asfaltowych decydująco wpływa na ich wartość modułu sztywności. Przeprowadzone badania wykazały, że przykładowo w temperaturze  $+10^{\circ}\text{C}$

Tab. 4. Zestawienie współczynników równania (2) określającego zmienność modułu sztywności w funkcji temperatury

Rodzaj mieszanki mineralno-asfaltowej	Wskaźnik zagęszczenia [%]	Współczynniki równania (2)	Współczynnik determinacji $R^2$
AC16P 35/50	100	$a = 8,782$	0,849
		$b = -749,4$	
		$c = 17101$	
	99	$a = 6,037$	0,874
		$b = -610$	
		$c = 14697$	
	98	$a = 4,125$	0,848
		$b = -490,8$	
		$c = 12502$	
97	$a = 6,283$	0,831	
	$b = -503,6$		
	$c = 11113$		
AC16P PMB25/55-60	95	$a = 1,816$	0,811
		$b = -354,3$	
		$c = 9765$	
	100	$a = 6,976$	0,859
		$b = -675,1$	
		$c = 16\ 505$	
	99	$a = 4,97$	0,855
		$b = -565,6$	
		$c = 14424$	
98	$a = 5,041$	0,865	
	$b = -506,4$		
	$c = 12495$		
96	$a = 1,872$	0,908	

(odpowiadającej temperaturze referencyjnej dla wschodniego regionu Polski) dla mieszanki AC16P PMB25/55-60 zanotowano następujące wielkości modułu sztywności IT-CY:

- $10\ 457$  MPa (wartość maksymalna) - przy  $Z = 100\%$ ,
- $8\ 068$  MPa (wartość średnia) - przy  $Z = 98\%$ ,
- $6\ 069$  MPa (wartość minimalna) - przy  $Z = 95\%$ .

2. Zmiany modułu sztywności w funkcji temperatury analizowanych mieszanek betonu asfaltowego maleją wraz ze spadkiem wskaźnika zagęszczenia. Gwałtowniejsze zmiany wartości modułu sztywności wraz ze spadkiem wskaźnika zagęszczenia próbek zaobserwowano dla mieszanki AC16P 35/50, co świadczy o jej większej wrażliwości temperaturowej (w odniesieniu do AC16P PMB 25/55-60).

3. Rodzaj (jakość) asfaltu wpływa na wyniki badania modułu sztywności. Przeprowadzone badania potwierdziły, że lepszymi właściwościami

technicznymi charakteryzują się mieszanki z zastosowaniem elastomeroasfaltu.

4. Przedstawiona w artykule zależność modułu sztywności od temperatury, wyrażona różnicą (2), może posłużyć jako „narzędzie pomocnicze” przy wymiarowaniu nawierzchni metodą mechaniczną lub do korekty trwałości zmęczeniowej konstrukcji nawierzchni drogowej, w której wbudowano warstwę z betonu asfaltowego o różnym wskaźniku zagęszczenia. Możliwość identyfikacji wartości modułu sztywności w dowolnie wybranej temperaturze, pozwala w szybki sposób na wyznaczenie wstępnej grubości warstw.

### Literatura

- Dołycki B., Judycki J. (2006). Wpływ metod zagęszczania mieszanek mineralno-asfaltowych na wyniki badań ich cech mechanicznych. *52 Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB. Krynica*, 129-136.
- Dowell E., Stubbs J. (2004). tłumaczenie Grzybowski A., redagowanie Judycki J., Pszczoła M. Zagęszczanie i rozkładanie nawierzchni asfaltowych: teoria i praktyka. *Dynapac*, Szwecja, 12-18.
- Godlewski D. (2011). Nawierzchnie drogowe. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*. Warszawa.
- Iwański M., Mazurek G. (2010). Odporność na oddziaływanie wody i mrozu betonu asfaltowego z modyfikatorem niskowiskozowym. *56 Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB Kielce-Krynica*, 295-302.
- Mieczkowski P. (2006). Jak zagęścić MMA? *Magazyn Autostrady*, 8-9/2006, 44-49.
- Park H., Kim J., Kim Y., Lee H. (2005). Determination of the layer thickness for long-life asphalt pavements. *Asia Society for Transport Studies*, 5, 1948-1962.
- Piłat J., Radziszewski P. (2010). Nawierzchnie asfaltowe. *Wydawnictwa Komunikacji i Łączności*. Warszawa.
- Radziszewski P., Piłat J., Plewa A. (2004). Influence of amount of crumb rubber of used car tires and heating time on rubber asphalt properties. *The Nineteenth International Conference on Solid Waste Technology and Management*, University of Pennsylvania, Widener University. Philadelphia, 305-314.
- Radziszewski P., Piłat J., Plewa A., Kowalski K., Król J., Sarnowski M., Łaskiewicz A. (2011). Analiza możliwości wykorzystania kruszyw polodowcowych z rejonu Polski północno-wschodniej w konstrukcjach nawierzchni asfaltowej dla ruchu ciężkiego i bardzo ciężkiego oraz nawierzchni asfaltowych o wydłużonym okresie trwałości zmęczeniowej. *GDDKiA*, Warszawa.
- Stefańczyk S., Mieczkowski P. (2008). Mieszanki mineralno-asfaltowe. Wykonawstwo i badania. *Wydawnictwa Komunikacji i Łączności*. Warszawa.
- Sybilski D. (2009). Wymagania techniczne dotyczące nawierzchni asfaltowych na drogach publicznych – cz. I. *Magazyn Autostrady*, 3/2009, 60-67.
- WT-2 (2010) „Nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych. Mieszanki mineralno asfaltowe” – załącznik nr 2 do zarządzenia nr 102 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 19 listopada 2010r.

### THE INFLUENCE OF COMPACTION RATIO ON STIFFNESS MODULUS OF ASPHALT CONCRETE

**Abstract:** Technological errors of inadequate compaction of asphalt layers are often a major cause of premature degradation of the road surface. It creates a need for continuous improvement of technology incorporation of asphalt mixes. The aim can be achieved through the use of available achievements in the field of asphalt mix rheology, as well as through the advancement of knowledge in the field of road technology. This paper presents the research results and analysis of the impact of asphalt concrete (AC) compaction on the stiffness modulus IT-CY value. An attempt was made to determine the correlation between the compaction ratio and the parameters by volume and stiffness modulus of asphalt concrete AC16P based on unmodified bitumen 35/50 and modified bitumen PMB25/55-60.

Przedstawione w artykule wyniki badań i analiz zostały uzyskane w ramach pracy statutowej S/WBiŚ/2/10 oraz przy dofinansowaniu z projektu „Podniesienie potencjału uczelni wyższych jako czynnik rozwoju gospodarki opartej na wiedzy” współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.