



MUHAMMAD KARAMI¹⁾
 RAHAYU SULISTYORINI²⁾
 INDAH MARLINA ARDIANTI³⁾

RESILIENT MODULUS MASTER CURVE FOR BRA-MODIFIED ASPHALT MIXTURES

KRZYWA WIODĄCA MODUŁU SZTYWNOŚCI SPRĘŻYSTEJ MIESZANEK ASFALTOWYCH ZAWIERAJĄCYCH LEPI SZCZE MODYFIKOWANE ASFALTEM NATURALNYM BUTON (BRA)

STRESZCZENIE. Celem opisanych w pracy badań była ocena wpływu zastosowania naturalnego asfaltu skalnego BRA (Buton Rock Asphalt) jako dodatku modyfikującego na podstawie opracowanych krzywych wzorcowych modułu sztywności sprężystej mieszank asfaltowych. Zakres badań obejmował ocenę laboratoryjną modułu mieszanki metodą pośredniego rozciągania (ITSM) w aparacie UTM25 zgodnie z normą australijską AS2891.13.1-1995. Badanie przeprowadzono w pięciu temperaturach: 5°C, 15°C, 25°C, 40°C i 60°C oraz przy trzech częstotliwościach obciążeń: 0,33 Hz, 0,50 Hz i 1,0 Hz – na mieszankach o ciągłym uziarnieniu (do 10 mm) zawierających lepiszcze modyfikowane oraz niemodyfikowane. Uzyskane wyniki wykazały, że szczególnie w zakresie średnich i wysokich wartości temperatury oraz przy małych częstotliwościach moduł sztywności sprężystej mieszank zawierających dodatek modyfikujący BRA był wyższy niż moduł mieszank zawierających lepiszcze niemodyfikowane. Stwierdzono, że charakter lepkosprężysty był wyraźniejszy w przypadku mieszank zawierających lepiszcze modyfikowane BRA niż w przypadku mieszank z lepiszczem niemodyfikowanym.

SŁOWA KLUCZOWE: granulowany asfalt naturalny Buton, krzywa wiodąca modułu sztywności sprężystej, mieszanki asfaltowe.

ABSTRACT. The objective of this research was to evaluate the impact of using granular Buton Rock Asphalt (BRA) modifier binder in asphalt mixtures, based on the developed resilient modulus master curve. This involved laboratory evaluation of indirect tensile stiffness modulus (ITSM) on UTM25 test equipment in accordance with the Australian Standard AS2891.13.1-1995. The test was applied to dense-graded (10 mm) unmodified and BRA-modified asphalt mixtures at five different test temperatures: 5°C, 15°C, 25°C, 40°C and 60°C and three different loading frequencies: 0.33 Hz, 0.50 Hz and 1.0 Hz. The results showed that in the high-intermediate temperature range and at low frequency the resilient modulus of BRA-modified asphalt mixtures was higher than the modulus of unmodified mixtures. It was discovered that the viscoelastic behavior of BRA-modified asphalt mixtures was more pronounced than in the case of unmodified asphalt mixtures.

KEYWORDS: asphalt mixtures, granular Buton Rock Asphalt, resilient modulus master curve.

DOI: 10.7409/rabdim.020.020

¹⁾ Universitas Lampung, Department of Civil Engineering, Jl. Soemantri Brojonegoro No.1 Bandar Lampung 35145, Indonesia; muhammad.karami@eng.unila.ac.id (✉)

²⁾ Universitas Lampung, Department of Civil Engineering, Bandar Lampung 35145, Indonesia; sulistyorini.smd@gmail.com

³⁾ Universitas Lampung, Department of Civil Engineering, Bandar Lampung 35145, Indonesia; indahmarlinaa@gmail.com

1. WSTĘP

Moduł sztywności sprężystej jest stosowany w różnych badaniach do ocen i analiz mieszanek asfaltowych, ponieważ może zostać wyznaczony w nieskomplikowanych testach i okazuje się przydatny do charakteryzowania podstawowych właściwości mieszanek [1]. Opublikowane wyniki badań wskazują, że określenie modułu sztywności sprężystej przez pomiar zależności naprężenie-odkształcenie z zastosowaniem metody ITSM pozwala na zbadanie potencjalnych właściwości sprężystych mieszanek asfaltowych [2-5]. Moduł sztywności sprężystej mieszanek asfaltowych jest bardzo istotnym czynnikiem w projektowaniu grubości poszczególnych warstw nawierzchni. Wyższy moduł wiąże się z obniżeniem wymaganej grubości warstwy asfaltowej. Moduł sztywności sprężystej wylicza się jako stosunek naprężenia do wywołanego odkształcenia odwracalnego w danej temperaturze i przy określonej częstotliwości w warunkach wielokrotnego obciążenia [5, 6], zgodnie z wzorem (1):

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_t}, \quad (1)$$

gdzie: σ_d to naprężenie dewiatorowe (naprężenie osiowe w badaniu ściskania bez skrępowania bocznego lub nadwyżka naprężenia osiowego w stosunku do ciśnienia bocznego w badaniu ściskania trójosiowego) a ε_t to odkształcenie odwracalne.

Zapotrzebowanie na modyfikację asfaltów wynika z ograniczeń wybranego lepiszcza w zakresie odporności na uszkodzenia [7, 8]. Kiedy właściwości reologiczne i mechaniczne asfaltu zwykłego okazują się niewystarczające wobec postępujących zmian w obciążeniu pojazdów, natężeniu ruchu, środowisku i wymogach stawianych nawierzchniom, stosuje się modyfikację mającą na celu poprawienie właściwości lepiszcza. Asfalt modyfikowany przygotowany jest z użyciem dodatków modyfikujących. Bahía [9] wyjaśnia, że modyfikacji lepiszcza asfaltowego dokonuje się w celu poprawienia jednej lub kilku podstawowych właściwości, związanych z jednym lub kilkoma rodzajami uszkodzeń. Właściwości te obejmują m.in. mięknięcie, łamliwość, sprężystość, stabilność składowania, trwałość i wytrzymałość zmęczeniową. Modyfikacji asfaltu dokonuje się zazwyczaj przy pomocy związków chemicznych, granulatu gumowego czy polimerów, mających poprawić wybrane właściwości [4, 10-15] i zwiększyć odporność na odkształcenia plastyczne przy przewidzianych w projekcie obciążeniach ruchem i temperaturą. Inną możliwością stanowi modyfikacja poprzez dodanie asfaltu naturalnego, który również poprawia właściwości reologiczne lepiszcza oraz właściwości wyprodukowanych z jego użyciem mieszanek asfaltowych [16].

1. INTRODUCTION

Resilient modulus has been used in a number of studies evaluating and analyzing asphalt mixtures, as it may be determined in simple tests and proved effective in characterizing the fundamental properties of asphalt mixtures [1]. According to the studies, obtaining the resilient modulus of asphalt mixtures using the ITSM test is a means of studying the potential elastic properties of asphalt mixtures in the form of stress-strain measurement [2-5]. The resilient modulus of asphalt mixtures is a very important factor in pavement design with regard to calculating the required pavement thickness. A higher resilient modulus means reduction in the necessary thickness of the asphalt layer. Resilient modulus is obtained by dividing the applied stress by recoverable strain at a particular temperature and frequency under repeated load [5, 6], as presented in eq. (1):

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_t}, \quad (1)$$

where: σ_d is the deviator stress (axial stress in an unconfined compression test or the axial stress in excess of the confining pressure in a triaxial compression test) and ε_t is recoverable strain.

The need for asphalt modification is caused by limitations in the capability of the chosen base asphalt binder to resist distress [7, 8]. When the rheological and mechanical properties of base asphalt binder are not sufficient for accommodating changes in traffic load, traffic volume, environment and pavement structure requirements, modification is used to improve asphalt binder properties. Modified bitumen is prepared using additives to improve its service performance. Bahía [9] has explained that the modification of asphalt binder is performed to improve one or more basic properties of asphalt binder related to one or more types of pavement distress, including rigidity, elasticity, brittleness, storage stability and durability, and resistance to accumulated damage. The modification of pure binder is performed through the use of chemicals, rubber particles or polymers to enhance the target property [4, 10-15] and to increase the resistance to permanent deformation at the design traffic loads and temperatures. Alternatively, modification by adding natural asphalt to the base asphalt binder also improves rheological properties of the binder and the properties of the produced asphalt mixtures [16].

This study is devoted to the use of granular Buton Rock Asphalt (BRA) modifier binder in order to improve the resilient modulus of asphalt mixtures. The raw materials for natural rock asphalt are found on Buton Island, Indonesia,

Opisane badanie poświęcone jest zastosowaniu asfaltu naturalnego Buton Rock Asphalt (BRA) pod postacią granulatu skalnego jako dodatku modyfikującego, mającego poprawić moduł sztywności sprężystej uzyskanych mieszanek asfaltowych. Materiał skalny zawierający naturalny bitum wydobywany jest na wyspie Buton w Indonezji i nazywany tradycyjnie asfaltem Buton („Asbuton”). Celem niniejszego badania jest analiza potencjału zastosowania granulowanego BRA jako dodatku modyfikującego poprawiającego moduł mieszanek asfaltowych przy różnych wartościach temperatury i częstotliwościach obciążeń.

2. KONCEPCJA KRZYWEJ WIODĄCEJ MODUŁU SZTYWNOŚCI SPRĘŻYSTEJ

W metodzie amerykańskiej AASHTO 2004 (MEPDG) koncepcja krzywej wiodącej stosowana jest do przedstawienia wartości modułu dynamicznego mieszanek asfaltowych w zależności od temperatury i częstotliwości obciążeń. Moduł dynamiczny stosowany jest do określenia odpowiedzi materiału pod obciążeniem dynamicznym w zakresie od liniowo sprężystego do lepkosprężystego. Kiedy odkształcenia pozostają na poziomie $100 \mu\epsilon$ i niższym, mieszanki asfaltowe uważane są za materiał liniowo lepkosprężysty [17]. Według Yao i in. [18] moduł dynamiczny, oznaczany przez $|E^*|$, definiowany jest jako iloraz amplitudy naprężeń przez odpowiadające im odkształcenie odwracalne.

Wyniki pomiarów modułu dynamicznego uzyskane w zadanym zakresie wartości temperatury i częstotliwości obciążeń na potrzeby dalszej analizy mogą zostać zestawione w jedną krzywą wiodącą. Apeageyi [19] opisuje przesłanki do konstruowania krzywych wiodących w następujący sposób: mogą być one wykorzystywane do prognozowania modułu dynamicznego przy różnych wartościach temperatury i/lub częstotliwościach, do modelowania pracy nawierzchni w każdych warunkach klimatycznych i przy dowolnym charakterze obciążeń, jak również do porównywania pracy różnych mieszanek. Według Christensena i Andersona [20] reakcja mieszanek asfaltowych na przyłożone obciążenie w temperaturze referencyjnej przy ustalonym zakresie częstotliwości lub czasów obciążenia może być przedstawiona pod postacią krzywej wiodącej. Ponadto krzywą wiodącą można zastosować do opisu zachowania lepkosprężystego asfaltów i mieszanek asfaltowych [21].

Krzywe wiodące opracowywane są na podstawie zasady superpozycji czasowo-temperaturowej [21-23]. Według Kima [24] krzywą wiodącą opracowuje się, używając: po pierwsze, modułów dynamicznych zmierzonych w wartościach temperatury wyższych od referencyjnej, uwzględniając ich przesunięcie poziome w kierunku niższej częstotliwości; po drugie,

and are traditionally known as Buton asphalt (“Asbuton”). The objective of this research is to analyze the potential for using granular BRA modifier binder in asphalt mixtures with the purpose of increasing the resilient modulus values over a range of temperatures and frequencies.

2. THE CONCEPT OF RESILIENT MODULUS MASTER CURVE

In MEPDG, the concept of master curve is used to represent the dynamic modulus of asphalt concrete in relation to temperature and loading frequency. The dynamic modulus is used to determine the response of the material under dynamic loading in the range between linear elastic and viscoelastic. Asphalt mixtures are considered to be a linear viscoelastic material when the strain level is $100 \mu\epsilon$ or lower [17]. According to Yao et al. [18], the dynamic modulus, referred to as $|E^*|$, is obtained by dividing the loading stress amplitude by the resulting peak-to-peak recoverable strain.

The data for the dynamic modulus within the range of test temperatures and loading frequencies can be combined to develop the master curve for further analysis. Apeageyi [19] described the reasons for constructing master curves as follows. Master curves can be used for laboratory prediction of dynamic modulus at various temperatures and/or frequencies when there are limitations on equipment and time, modeling the pavements under all possible climates and loading conditions, as well as comparing the performance of asphalt mixtures. According to Christensen and Anderson [20], the reaction of asphalt mixtures to application of loads at a reference temperature over a range of frequencies or loading times can be represented by a master curve. Furthermore, a master curve can be used to describe the viscoelastic behavior of asphalt binders and mixtures [21].

Master curves are developed based on the time-temperature superposition principle [21-23]. According to Kim [24], a master curve is developed using: firstly, the dynamic moduli measured at test temperatures higher than the reference temperature, horizontally shifted to a lower frequency; secondly, the dynamic modulus measured at a test temperature lower than the reference temperature, shifted to a higher frequency. The data are shifted in this manner until a single smooth function is constructed. The master curve of the dynamic modulus is modeled by the sigmoidal function described in eq. (2) [18, 22, 25, 26]. The procedure for constructing the $|E^*|$ curve can be seen in Apeageyi et al. [23]. Fig. 1 shows development of a master curve in which the dynamic modulus measured

modułów dynamicznych zmierzonych przy wartościach temperatury niższych od referencyjnej, uwzględniając przesunięcie w kierunku wyższej częstotliwości. Powyższe dane są przesuwane aż do uzyskania jednej gładkiej funkcji. Krzywą wiodącą modułu dynamicznego modeluje się za pomocą funkcji sigmoidalnej opisaną wzorem (2) [18, 22, 25, 26]. Procedurę konstruowania krzywej $|E^*|$ przedstawili Apeageyi i in. w pracy [23]. Rys. 1 pokazuje konstrukcję krzywej wiodącej, w której moduły dynamiczne zmierzone w różnych wartościach temperatury (4,4°C; 21,1°C; 37,8°C i 54°C) przesunięto równoległe do osi częstotliwości, tworząc przez aproksymację „dopasowaną” pojedynczą krzywą:

$$\log|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + [\gamma(\log f_r)]}}, \quad (2)$$

gdzie: f_r to zredukowana częstotliwość obciążeń w temperaturze referencyjnej, δ to minimalna wartość E^* , $(\delta + \alpha)$ to maksymalna wartość E^* , zaś β i γ to parametry opisujące kształt funkcji sigmoidalnej.

W przeciwieństwie do przypadku ustalania modułu M_r , przy standardowym badaniu modułu dynamicznego nie uwzględnia się okresu odpoczynku między obciążeniami. Niemniej jednak, w warunkach rzeczywistych konstrukcja nawierzchni nie jest poddana naprężeniom cyklicznym pozbawionym przerw. Fakhri i Ghanizadeh [27] stwierdzili, że standardowy test modułu dynamicznego nie charakteryzuje we właściwy sposób mieszanek asfaltowych ze względu na brak okresów odpoczynku między obciążeniami.

W celu zbadania różnej podatności mieszanek asfaltowych na oddziaływania temperatury i przedstawienia koncepcji krzywej wiodącej modułu sztywności sprężystej uwzględniono jednocześnie wpływ temperatury i częstotliwości obciążenia. Taką krzywą wiodącą można również opracowywać na podstawie zasady superpozycji czasowo-temperaturowej. Krzywą wiodącą modułu sztywności sprężystej S modeluje się za pomocą funkcji sigmoidalnej opisaną wzorem (3) [27]:

$$\log|S| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + [\gamma(\log f_r)]}}, \quad (3)$$

gdzie: f_r to zredukowana częstotliwość obciążeń w temperaturze referencyjnej, δ to minimalna wartość S , $(\delta + \alpha)$ to maksymalna wartość S , zaś β i γ to parametry opisujące kształt funkcji sigmoidalnej. Częstotliwość zredukowaną opisuje tutaj następująca zależność:

$$a(T) = \frac{f}{f_r}, \quad (4)$$

gdzie: $a(T)$ to współczynnik przesunięcia jako funkcja temperatury, f to częstotliwość obciążeń w temperaturze badania, f_r jest częstotliwością obciążeń w temperaturze referencyjnej, zaś T to temperatura badania. Według Witczaka i Bariego [22]

at different temperatures (4.4°C, 21.1°C, 37.8°C and 54°C) was shifted relative to the frequency to form a “fit” single master curve:

$$\log|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + [\gamma(\log f_r)]}}, \quad (2)$$

where: f_r is the reduced frequency of loading at the reference temperature, δ is the minimum value of E^* , $(\delta + \alpha)$ is the maximum value of E^* , while β and γ are parameters describing the shape of the sigmoidal function.

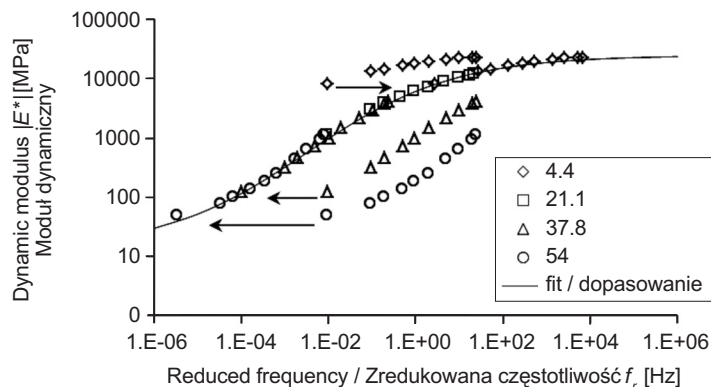


Fig. 1. Development of master curve

Rys. 1. Sposób opracowania krzywej wiodącej

Contrary to the M_r modulus, the rest period within a given loading time is not included in the standard dynamic modulus test protocol. However, traffic loading is not continuously applied to the pavement structure in the field. Fakhri and Ghanizadeh [27] argued that the standard dynamic modulus test protocol is not accurate in characterization of asphalt mixtures due to the lack of consideration of the rest period.

The effects of temperature and loading frequency were combined in order to investigate different susceptibilities of various asphalt mixtures to temperature and represent the concept of a resilient modulus master curve. The resilient modulus master curve for asphalt mixtures is developed based on the time-temperature superposition principle. The master curve for the resilient modulus S is modeled by the sigmoidal function described by eq. (3) [27]:

$$\log|S| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + [\gamma(\log f_r)]}}, \quad (3)$$

where: f_r is the reduced frequency of loading at the reference temperature, δ is the minimum value of S , $(\delta + \alpha)$ is the maximum value of S , while β and γ are parameters describing the shape of the sigmoidal function. The reduced frequency is given by the following relation:

zależność między logarytmem współczynnika przesunięcia a temperaturą opisać można za pomocą wielomianu drugiego stopnia, przedstawionego w równaniu (5):

$$\log a(T_i) = aT_i^2 + bT_i + c, \quad (5)$$

gdzie: $a(T_i)$ to współczynnik przesunięcia jako funkcja temperatury; T_i to temperatura wyrażona w °F, zaś a , b i c to współczynniki wielomianu drugiego stopnia.

Ponadto do opisanja zależności współczynnika przesunięcia od temperatury używa się często wzoru Williamsa-Landela-Ferry'ego (WLF) przedstawionego w postaci równania (6) [28-30] lub (7):

$$\log(a_T) = \frac{-C_1(T - T_r)}{C_2 + (T - T_r)}, \quad (6)$$

$$\frac{1}{\log(a_T)} = \frac{1}{C_1} - \frac{C_2}{C_1(T - T_r)}, \quad (7)$$

gdzie: a_T to współczynnik przesunięcia, C_1 i C_2 to stałe wyznaczane empirycznie, T jest temperaturą wyrażoną w °K, a T_r to temperatura referencyjna w °K.

3. MATERIAŁY I METODY

3.1. MATERIAŁY

W mieszankach asfaltowych opartych na lepiszczu niemodyfikowanym zastosowano asfalt zwykły klasy 170 (Pen 60/80) według normy australijskiej AS-2008 [31]. Na podstawie wcześniejszych badań [32, 33] lepiszcze modyfikowane BRA przygotowano, zastępując 20% asfaltu zwykłego (wg całkowitej masy lepiszcza) lepiszczem naturalnym BRA. Ich specyfikacje przedstawiono w Tabl. 1.

Rys. 2 przedstawia zastosowany dodatek modyfikujący BRA pod postacią granulatu o średnicy od 7 mm do 10 mm. Pobrano potrójne próbki i poddano je procesowi ekstrakcji [34]. Badanie zawartości bitumu w materiale BRA wykazało, że średnio składał się on w 70% z części mineralnej oraz w 30% z bitumu (wagowo). Skład chemiczny części mineralnej oraz lepiszcza naturalnego został zaprezentowany w Tabl. 2. Sumaryczny rozkład średniej wielkości ziaren w części mineralnej był następujący (procentowy udział poniżej danej średnicy): 2,36 mm (100%), 1,18 mm (97%), 0,6 mm (92%), 0,3 mm (81%), 0,15 mm (61%) i 0,075 mm (36%).

W mieszankach zastosowano łamane kruszywa granitowe w taki sposób, aby zarówno mieszanki bez modyfikacji jak i z dodatkiem BRA zawierały typowy szkielet mineralny o ciągłym uziarnieniu, przy maksymalnym rozmiarze ziarna 9,5 mm (DG 10) według australijskiej specyfikacji 504 [35]. Ponadto, zbadano kruszywo grube i drobne, używając odpowiednich sit; stwierdzone właściwości kruszyw podsumowano w Tabl. 3.

$$a(T) = \frac{f}{f_r}, \quad (4)$$

where: $a(T)$ is the shift factor as a function of temperature, f is the loading frequency at the temperature of interest, f_r is the loading frequency at the reference temperature, and T is the temperature of interest. According to Witczak and Bari [22], a second order polynomial can be used to show the relationship between the logarithm of the shift factor and temperature, as shown in eq. (5):

$$\log a(T_i) = aT_i^2 + bT_i + c, \quad (5)$$

where: $a(T_i)$ is the shift factor as a function of temperature T_i , T_i is the temperature of interest (°F), and a , b and c are coefficients of the second order polynomial.

Furthermore, Williams-Landel-Ferry (WLF) equation was also adopted to determine the factor of the temperature shift as shown in eq. (6) [28-30] and the linearized WLF equation is given by the eq. (7), as follows:

$$\log(a_T) = \frac{-C_1(T - T_r)}{C_2 + (T - T_r)}, \quad (6)$$

$$\frac{1}{\log(a_T)} = \frac{1}{C_1} - \frac{C_2}{C_1(T - T_r)}, \quad (7)$$

where: a_T is the shift factor, C_1 and C_2 are empirical factors, T is temperature expressed in °K and T_r is the reference temperature also shown in °K.

3. MATERIALS AND METHODS

3.1. MATERIALS

Class-170 (Pen 60/80) base asphalt binder was used for the unmodified asphalt mixtures and classified according to the Australian Standard AS-2008 [31]. Based on previous research [32, 33], the BRA-modified binder used was made by replacing 20% of the base asphalt binder (by total weight of the binder) with BRA natural binder. Their specifications are presented in Table 1.

Fig. 2 shows the used granular BRA modifier binder in the form of pellets with the diameter ranging between 7 mm and 10 mm. Triplicate portions were subjected to extraction process [34]. Moreover, the bitumen content test showed that on average it consisted of 70% mineral part and 30% binder by total weight of the material. The chemical compositions of the mineral part and the natural binder are presented in Table 2. The mean particle size distribution for the mineral part was as follows (passing): 2.36 mm (100%), 1.18 mm (97%), 0.6 mm (92%), 0.3 mm (81%), 0.15 mm (61%) and 0.075 mm (36%).

Table 1. Properties of tested bitumen
Tablica 1. Właściwości badanego asfaltu

Bitumen property Właściwość	Standard Norma	Value / Wartość	
		Base binder Asfalt zwykły	BRA modified binder Asfalt modyfikowany dodatkiem BRA
Penetration (25°C) [0.1 mm] Penetracja (25°C)	ASTM-D5	67	59
Softening points [°C] Temperatura mięknięcia	ASTM-D36	48	52.8
Ductility (25°C) [cm] Ciężkość (25°C)	ASTM-D113	> 100	> 100
Mass loss [%] Zmiana masy	ASTM-D1754	0.19	0.09
Ductility after TFOT (25°C) [cm] Ciężkość po starzeniu TFOT (25°C)	ASTM-D113	> 100	> 100

Crushed granite aggregates were used, such that both the unmodified and BRA-modified asphalt mixtures included a typical dense-graded aggregate with a maximum size of 9.5 mm (DG 10) based on the Australian Specification 504 [35]. Moreover, the coarse and fine aggregates required were obtained using relative sieve diameters; the determined aggregate properties are summarized in Table 3.



Fig. 2. Pellets of granular BRA modifier binder
Rys. 2. Granulat dodatku modyfikującego lepiszcze (BRA)

Table 2. Chemical properties of natural binder and mineral [44]
Tablica 2. Skład chemiczny lepiszcza naturalnego oraz części mineralnej [44]

Binder / Lepiszczce		Mineral / Część mineralna	
Chemical component*) Składnik chemiczny*)	Content [%] Wartość	Chemical component Składnik chemiczny	Content [%] Zawartość
Nitrogen bases (N) [%] Związki polarne (N)	29.04	CaCO ₃	86.66
Acidaffins (A1) [%] Węglowodory nienasycone grupa I) (A1)	6.6	MgCO ₃	1.43
Acidaffins (A2) [%] Węglowodory nienasycone grupa II) (A2)	8.43	CaSO ₄	1.11
Paraffin (P) [%] Węglowodory nasycone (P)	8.86	CaS	0.36
Maltene parameter [-] Współczynnik maltenowy (N+A1)/(A2+P)	2.06	H ₂ O	0.99
Nitrogen/Paraffin (N/P) [-] Stosunek zawartości (N/P)	3.28	SiO ₂	5.64
Asphaltene content [%] Zawartość asfaltenów	46.92	Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	1.52
		Residu / Osad	0.96

*) Composition of asphalt according to the ASTM D2006 method, consisting in chemical precipitation of maltenes (asphalt components remaining after separation of asphaltenes) with sulfuric acid H₂SO₄ of increasing concentration. The following fractions are obtained: N, A1, A2 and P. Skład asfaltu według metody ASTM D2006, polegającej na chemicznym wytrąceniu maltenów (składników asfaltu pozostałych po oddzieleniu asfaltenów) za pomocą kwasu siarkowego H₂SO₄ o wzrastającym stężeniu. Uzyskane tym sposobem grupy frakcyjne to: N, A1, A2 oraz P.

Table 3. Properties of aggregates
Tablica 3. Właściwości kruszyw

Properties Właściwość	Standard Norma	Value Wartość
Los Angeles value [%] Ścieralność w bębnie Los Angeles	AS 1141.23-1995	21.8
Flakiness index [%] Wskaźnik płaskości	AS 1141.15-1999	14.14
Apparent coarse aggregate density [t/m ³] Gęstość nasypowa kruszywa grubego	AS 1141.5-2000	2.63
Apparent fine aggregate density [t/m ³] Gęstość nasypowa kruszywa drobnego	AS 1141.5-2000	2.60

3.2. PROJEKTOWANIE MIESZANKI I PRZYGOTOWANIE PRÓBEK

Optymalną zawartość asfaltu w mieszankach bez modyfikacji określono na podstawie badania Marshalla, zgodnie z [35]. Dla różnych zawartości lepiszcza zagęszczono po trzy próbki o średnicy 101 mm i wysokości 63,5 mm, po 75 uderzeń automatycznego ubijaka Marshalla na stronę. Na podstawie wyników wybrano zawartość wolnych przestrzeni 5%, uzyskując optymalną zawartość lepiszcza 5,4% (wagowo). Mieszanki zawierające dodatek modyfikujący BRA zostały zaprojektowane tak, aby mogły uwidocznić się korzyści związane z zastosowaniem BRA w mieszance. Dla mieszanek z dodatkiem BRA utrzymano tę samą zawartość lepiszcza co dla niemodyfikowanych, tak, aby oba rodzaje mieszanek podlegały porównaniom. Zatem mieszanki z BRA również zawierały 5,4% lepiszcza (wagowo). Aby skupić się na wpływie dodatku modyfikującego BRA, zastosowano zastąpienie 20% asfaltu zwykłego lepiszczem naturalnym pochodzącym z granulatu BRA, zachowując ten sam projekt mieszanki, co pozwoliło na uzyskanie nominalnie identycznych mieszanek. Tabl. 4 pokazuje, że zastąpienie części asfaltu wywołało zmianę proporcji drobnych ziaren przechodzących przez sito 2,36 mm. W związku z tym, w celu zniwelowania różnic w uziarnieniu, zmniejszono całkowitą masę zastosowanego kruszywa drobnego, które zostało zastąpione przez część mineralną pochodzącą z granulatu BRA.

Table 4. Final crushed aggregate gradation used [% passing]

Tablica 4. Zastosowane uziarnienie kruszywa łamanego [% przechodzący przez sito]

Sieve size Rozmiar sita [mm]	BRA modifier content / Udział lepiszcza z dodatku BRA			Limit values Wartości graniczne
	0%	20%	BRA mineral Część mineralna	
	Crushed aggregate Kruszywo łamane			
13.20	100	100		100
9.50	97.5	97.5		95-100
6.70	83.0	83.0		78-88
4.75	68.0	68.0		63-73
2.36	44.0	44.0	100	40-48
1.18	28.5	28.6	99.9	25-32
0.60	21.0	21.2	99.8	18-24
0.30	14.5	15.0	99.5	12-17
0.15	10.0	11.0	99.0	8-12
0.075	4.0	5.7	98.3	3-5

Tabl. 5 pokazuje proporcje asfaltu zwykłego oraz bitumu pochodzącego z dodatku modyfikującego BRA w mieszankach

3.2. MIX DESIGN AND SPECIMEN PREPARATION

The Marshall mix design was used to determine the optimum bitumen content (OBC) for the unmodified asphalt mixtures based on [35]. For different contents of asphalt binder, specimens in triplicate with diameter of 101 mm and height of 63.5 mm were compacted by applying 75 blows to each side of the specimen using an automatic Marshall compactor. Based on the results, air void content of 5% was selected to obtain the binder content of 5.4% as the optimum bitumen content (OBC) (by mass of asphalt mixture). Moreover, the BRA-modified asphalt mixtures were designed to exhibit the benefits related to the use of granular BRA modifier binder in the asphalt mixtures. The same binder content as in the unmodified asphalt mixtures was also applied in the BRA-modified asphalt mixtures, in order to maintain consistency for comparative purposes. Therefore, the 5.4% OBC by weight of the total mixture was also used for the BRA-modified asphalt mixture. Furthermore, in order to focus on the contribution of the granular BRA modifier binder, 20 percent of base binder substitution was used in a single mix composition to produce nominally identical mixture. Table 4 shows the substitution of base asphalt binder called for adjustment of the proportion of fines passing the 2.36 mm sieve. Therefore, the total mass of the crushed fine aggregate was decreased and replaced with the mineral part contained in the granular BRA modifier to minimize the variance in the aggregate gradation.

Table 5 shows the proportion of the base asphalt binder and BRA modifier binder in unmodified and BRA-modified

niemodyfikowanych i modyfikowanych BRA, jak również całościowy udział domieszanego granulatu BRA. Przygotowanie mieszanki rozpoczynano od odważenia kruszywa łamanego według rozmiarów ziaren, ręcznego zmieszania kruszywa i nagrzewania w piecu w temperaturze 105°C przez 24 godziny. Następnie nagrzewano kruszywo w tym samym piecu w temperaturze 150°C przez dwie godziny, po czym mieszano z lepiszczem. Lepiszczce przygotowywano, umieszczając w jednej misie asfalt zwykły oraz granulowany dodatek modyfikujący BRA, a następnie grzejąc je w piecu w temperaturze $150 \pm 5^\circ\text{C}$ przez 30-60 minut i często mieszając, aby połączyć oba materiały w jedno lepiszcze modyfikowane. Następnie umieszczano wcześniej podgrzane kruszywo w tej samej misie i mieszano z lepiszczem przez 1,5 minuty. W dalszym etapie przygotowywano cylindryczne próbki o średnicy 100 ± 2 mm oraz wysokości 35-70 mm, zgodnie z normą australijską AS2891.13.1-1995 i zagęszczano je w prasie żyratowej zgodnie z normą AS2891.2.2-1995. W związku z przygotowaniem trzech próbek dla każdej z założonych wartości temperatury badania, powstało piętnaście próbek mieszanki asfaltowej bez modyfikacji oraz piętnaście próbek mieszanki asfaltowej z BRA.

Table 5. Proportion of materials used in asphalt mixtures
Tablica 5. Proporcjonalny udział materiałów zastosowanych w mieszankach asfaltowych

Materials Materiał	Percentage by total weight of mixtures [%] Procentowy udział w mieszance (wagowo)	BRA modifier content Udział lepiszcza z dodatku BRA	
		0%	20%
		1.	Total binder content: Zawartość lepiszcza łącznie:
	a) Base binder Asfalt zwykły	5.40	4.30
	b) BRA modifier binder Lepiszczce z dodatkiem BRA	0.00	1.10
2.	Total aggregate content: Zawartość kruszywa łącznie:	94.60	94.60
	a) Crushed rock Kruszywo łamane	94.60	92.10
	b) BRA mineral Część mineralna z dodatkiem BRA	0.00	2.50
3.	Granular BRA modifier binder Granulowany dodatek modyfikujący BRA	0.00	3.60

asphalt mixtures, as well as the proportion of granular BRA (pellets) mixed. Furthermore, after crushed aggregates had been weighed according to grain size, they were blended manually in a pan and heated in an oven at the temperature of 105°C for 24 hours. This was followed by heating the blended aggregates for approximately two hours in the same oven at 150°C before mixing with asphalt binder. Meanwhile, the base asphalt and granular BRA modifier binder (pellets) were placed in one bowl and the mixture was later placed in an oven at the temperature of $150 \pm 5^\circ\text{C}$ for 30 to 60 minutes with frequent manual stirring to blend and incorporate the two as one BRA-modified binder. This was followed by placement of the previously blended aggregates in the same bowl with the BRA-modified binder and mixing using equipment for 1.5 minutes. The cylindrical specimens with 100 ± 2 mm diameter and 35-70 mm height were prepared according to the Australian standard AS2891.13.1-1995, and a gyratory machine was used to compact the specimens in accordance with the Australian standard AS2891.2.2-1995. Therefore, fifteen specimens for unmodified asphalt mixtures and fifteen for BRA-modified asphalt mixtures were prepared in this study due to triplication of the specimens for each test temperature.

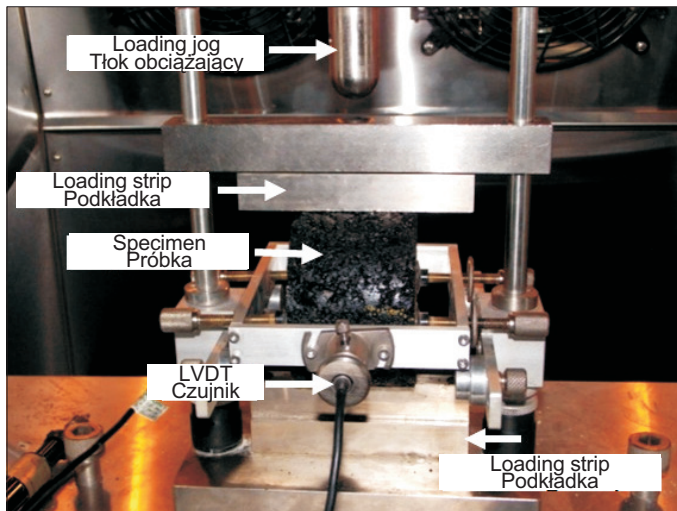
3.3. INDIRECT TENSILE RESILIENT MODULUS TEST

The laboratory evaluation of resilient modulus was conducted in accordance with the Australian standard AS2891.13.1-1995 [36] on universal testing equipment (UTM25) under ITSM test procedure. The tests were performed under the test conditions presented in Table 6. The load pulse was applied vertically to the side surface of a cylindrical specimen through a curved loading strip. The resulting horizontal deformation was measured by two linear variable differential transformers (LVDT) attached on both ends of the horizontal diameter, as shown in Fig. 3. Initially, the test specimens were conditioned through application of five load pulses with the specified rise time to the peak load at the specified pulse repetition period. The modulus calculation was based on the average from five further load pulses.

The target density was 95% of theoretical maximum, corresponding to 5% of air voids. Therefore, any specimen with a significant difference ($> 0.5\%$) in air voids from the desired value was rejected. Before each test the specimen was placed inside the device chamber for two hours to ensure its temperature was maintained during testing.

3.3. BADANIE MODUŁU SZTYWNOŚCI METODĄ POŚREDNIEGO ROZCIĄGANIA

Ocenę laboratoryjną modułu sztywności sprężystej przeprowadzono w oparciu o schemat pośredniego rozciągania, zgodnie z australijską normą AS2891.13.1-1995 [36] na aparacie UTM25 wg procedury ITSM. Warunki, w których przeprowadzono badania, zestawione zostały w Tabl. 6. Obciążenie przykładano w pionie do poboczniczy próbek cylindrycznych przez zakrzywione nakładki. Wywołane przemieszczenia poziome mierzono dwoma czujnikami LVDT zamocowanymi w osi prostopadłej do osi obciążeń, jak pokazano na Rys. 3. Badane próbki poddane były obciążeniom wstępnym, składającym się z pięciu impulsów o zadanym czasie przyrostu obciążenia oraz okresie powtórzenia impulsu. Obliczeń modułu dokonywano na podstawie średniej uzyskanej z pięciu kolejnych impulsów obciążeń.



Docelową gęstością objętościową było teoretyczne maksimum (95% gęstości), odpowiadające 5% wolnych przestrzeni. W związku z tym każda próbka wykazująca znaczne odchylenie (> 0.5%) zawartości wolnych przestrzeni była odrzucana. Przed każdym badaniem próbka była umieszczana w komorze urządzenia na dwie godziny, aby zapewnić podczas badania stałą temperaturę.

4. WYNIKI I DYSKUSJA

4.1. WPŁYW DODATKU GRANULATU BRA NA MODUŁ SZTYWNOŚCI SPRĘŻYSTEJ MIESZANEK ASFALTOWYCH

Jak pokazały wcześniejsze badania, gęstość i zawartość wolnych przestrzeni mają wpływ na sztywność mieszanek asfaltowych. Harvey [37] stwierdził, że zawartość wolnych przestrzeni ma istotny wpływ na sztywność mieszanek. Mogawer

Table 6. Conditions of the ITSM test procedure
Tablica 6. Warunki badania modułu metodą ITSM

Parameters Parametr	Conditions Warunki
Test temperature [°C] Temperatura badania	5, 15, 25, 40, 60 ± 0.5
Rise time t_u (10% to 90%) [ms] Czas przyrostu obciążenia t_u (od 10% do 90%)	40, 60, 80 ± 5
Pulse repetition period (10% to 10%) [ms] Okres między obciążeniami (od 10% do 10%)	1000, 2000, 3000 ± 5
Recovered horizontal strain [μɛ] Odwracalne odkształcenie poziome	50 ± 20
Air voids [%] Zawartość wolnych przestrzeni	5 ± 0.5
Content of BRA modifier binder [%] Udział lepiszcza z dodatku BRA	0, 20
Type of gradation Typ uziarnienia	DG10

Fig. 3. Set-up of ITSM test
Rys. 3. Badanie modułu metodą pośredniego rozciągania ITSM

4. RESULTS AND DISCUSSION

4.1. EFFECT OF GRANULAR BRA MODIFIER BINDER ON RESILIENT MODULUS OF ASPHALT MIXTURES

Previous studies have shown that density or air voids affect the stiffness of asphalt mixtures. Harvey [37] concluded that air void content significantly influenced the stiffness of asphalt mixtures. Mogawer et al. [38] also focused on the density of asphalt mixtures as a factor related to their stiffness, while Hartman et al. [39] reported the degree of compaction (air void content) achieved in the mix to have affected the stiffness. Walubita et al. [40] also suggested variables and test parameters such as air voids need to be considered to improve the robustness and repeatability of the test.

i in. [38] również skupili się na gęstości objętościowej mieszanki asfaltowych jako na czynniku związanym z ich sztywnością, natomiast Hartman i in. [39] stwierdzili, że osiągnięty wskaźnik zagęszczenia (zawartość wolnych przestrzeni) wpływa na sztywność mieszanki. Walubita i in. [40] również zasugerowali, że zmienne i parametry takie jak zawartość wolnych przestrzeni muszą być brane pod uwagę w celu poprawy wiarygodności i powtarzalności testów.

Próbki zastosowane w testach ITSM w niniejszym badaniu miały statystycznie identyczną gęstość objętościową, co miało zmniejszyć wpływ tego czynnika na moduł sztywności sprężystej. Średnia zawartość wolnych przestrzeni mieściła się w zakresie $5,0 \pm 0,5\%$. Średnie odchylenie standardowe (SD) oraz współczynnik zmienności (CoV) zawartości wolnych przestrzeni dla mieszank z lepiszczem zwykłym oraz z dodatkiem BRA przedstawiono w Tabl. 7. Powtarzalność zawartości wolnych przestrzeni uznano za doskonałą, zaś współczynnik zmienności wyniósł maksymalnie 3,04%. Ponadto zastosowano test t dla prób zależnych na poziomie ufności 95%, aby przeanalizować statystycznie zarówno zawartość wolnych przestrzeni, jak i moduły sztywności sprężystej. Nie stwierdzono istotnych statystycznie różnic w zawartościach wolnych przestrzeni między mieszankami niemodyfikowanymi oraz modyfikowanymi BRA (wartość $p > 0.05$).

Wyniki średnich wartości modułu dla trzech próbek badanych w każdej kombinacji temperatury, czasu przyrostu obciążenia oraz okresu między powtórzeniami obciążeń przedstawiono w Tabl. 8 i 9. Porównanie modułów uzyskanych w tej samej temperaturze dla obu mieszank wskazuje, że moduł mieszank z dodatkiem modyfikującym BRA był statystycznie istotnie wyższy niż moduł mieszank bez modyfikacji ($p < 0.05$).

Ponadto wyniki potwierdziły, że moduł dla obu typów mieszank zmniejszał się wraz ze wzrostem temperatury w każdej kombinacji czasu przyrostu obciążenia i okresu powtórzenia impulsu. Wartości modułu mieszank z BRA były istotnie wyższe od modułów mieszank bez BRA w każdej kombinacji temperatury, czasu przyrostu obciążenia i okresu powtórzenia impulsu. Można zatem wyciągnąć wniosek, że zachowanie mieszank z BRA przy danej temperaturze, czasie przyrostu obciążenia i okresie obciążeń było bardziej sprężyste. Sztywność i charakter mieszank zawierających BRA wpłynęły na wielkość odkształcenia [41]. Do tych samych wniosków doszli Some i in. [42]. Lepsze wyniki modułu sztywności sprężystej mieszank z BRA przypisać należy unikalnej kombinacji asfaltu zwykłego oraz dodatku modyfikującego BRA. De Mello i in. [43] stwierdzili, że lepiszcze jest ważnym czynnikiem wpływającym na wysokość modułu sztywności sprężystej mieszank zawierających dodatek BRA.

The ITSM samples in this study were provided with statistically identical density in order to limit its effect on resilient modulus, while the mean air voids were within the range of $5.0 \pm 0.5\%$. The mean standard deviation (SD) and coefficient of variation (CoV) for air voids for both unmodified and BRA-modified asphalt mixtures are presented in Table 7. The repeatability of air voids was considered to be excellent, while the coefficient of variation equaled 3.04% at maximum. Moreover, a paired sample t-test method with a 95% confidence level was used to statistically analyze both the air void content and the resilient modulus. There was no significant difference in voids for both unmodified and BRA-modified asphalt mixtures (p -value > 0.05).

Table 7. Average air void content of asphalt mixtures [%]
Tablica 7. Średnia zawartość wolnych przestrzeni w mieszance asfaltowej [%]

Test temperature Temperatura badania [°C]	Asphalt mixtures / Mieszanka asfaltowa					
	Unmodified Bez dodatku			BRA modified Z dodatkiem BRA		
	Mean Średnia	SD	CoV	Mean Średnia	SD	CoV
5	4.9	0.06	1.17	5.0	0.06	1.15
15	5.1	0.06	1.14	5.0	0.10	2.00
25	5.0	0.15	3.04	5.1	0.06	1.14
40	5.1	0.10	1.96	5.2	0.11	2.23
60	5.1	0.10	1.96	5.2	0.11	2.23

SD – Standard deviation / Odchylenie standardowe
CoV – Coefficient of variation / Współczynnik zmienności

The results for the mean resilient modulus for three specimens tested at each set of temperature, rise time and pulse repetition period for each mixture are shown in Tables 8 and 9. Comparing the resilient modulus at the same testing temperature indicates the resilient modulus for the BRA-modified mixtures was statistically significantly higher than for the unmodified ones (p -value < 0.05).

Furthermore, the results confirmed the resilient modulus for unmodified and BRA-modified asphalt mixtures decreased with an increase in temperature at each set of rise time and pulse repetition period. The resilient modulus values for BRA-modified mixtures were significantly higher at each set of temperature, rise time and pulse repetition period compared to unmodified mixtures. It can, therefore, be concluded that the behavior of the BRA-modified mixtures at a given temperature, rise time and pulse repetition period was more elastic. The stiffness and nature of the BRA-modified asphalt mixtures

Table 8. Resilient modulus values for unmodified asphalt mixtures [MPa]

Tablica 8. Wartości modułu sztywności sprężystej mieszanek bez modyfikacji dodatkiem [MPa]

Rise time Czas przyrostu obciążenia [ms]	Pulse repetition period Okres między obciążeniami [ms]	Temperature / Temperatura [°C]				
		5	15	35	40	60
40	1000	15633	9487	3990	637	154
40	2000	15729	9091	3485	564	148
40	3000	16369	9005	3377	544	143
60	1000	14681	8681	3386	519	141
60	2000	14933	8281	2993	477	134
60	3000	15769	8173	2879	465	127
80	1000	14040	8151	3013	448	132
80	2000	14393	7751	2687	424	124
80	3000	15357	7630	2571	416	117

4.2. KRZYWA WIODĄCA MODUŁU SZTYWNOŚCI SPRĘŻYSTEJ

Wyniki laboratoryjne badania modułu sztywności sprężystej uzyskane dla mieszanek w przypadku pięciu wartości temperatury (5°C, 15°C, 25°C, 40°C i 60°C) oraz trzech częstotliwości obciążenia (0,33 Hz, 0,5 Hz i 1,0 Hz) zestawiono na wykresie celem utworzenia krzywej wiodącej. Wykorzystano przy tym wzór (3), przyjmując temperaturę referencyjną 21°C. Otrzymane wyniki modułu połączono w jedną krzywą wiodącą, określając jednocześnie wartości współczynników przesunięcia. Rys. 4 przedstawia związek między logarytmem współczynnika przesunięcia $\log a(T_i)$ a temperaturą badania dla każdej z mieszanek. Stwierdzono, że współczynniki przesunięcia dla obu mieszanek są podobne. Wszystkie współczynniki przesunięcia odpowiadają wielomianowi drugiego stopnia w funkcji temperatury. Siedem parametrów stosowanych we wzorach (3) i (5) zaprezentowano w Tabl. 10. Wykorzystano je do obliczeń modułu sztywności sprężystej obu mieszanek w zakresie wartości temperatury i częstotliwości zastosowanych w badaniu.

Dopasowane krzywe wiodące przedstawiono w skali logarytmicznej na Rys. 5. Moduły uzyskane z pomiarów oraz z krzywych wiodących zostały poddane porównaniu w celu weryfikacji dokładności i oceny skuteczności zastosowanej procedury. Moduły sztywności sprężystej pochodzące z krzywej wiodącej $S_{master\ curve}$ oraz uzyskane w laboratorium S_{lab} dla obu mieszanek asfaltowych zostały przedstawione na wykresach Rys. 6. Jak widać, wartości modułów otrzymane z krzywej wiodącej są dla obu mieszanek niemal identyczne jak wyniki laboratoryjne.

affected the magnitude of the strain [41]. The same conclusion was established by Some et al. [42]. Better resilient modulus performance of BRA-modified asphalt mixtures compared to the unmodified mixtures should be attributed to the unique combination of base asphalt and BRA modifier binder. De Mello et al. [43] indicated binder is an important factor for higher resilient modulus performance in BRA-modified asphalt mixtures.

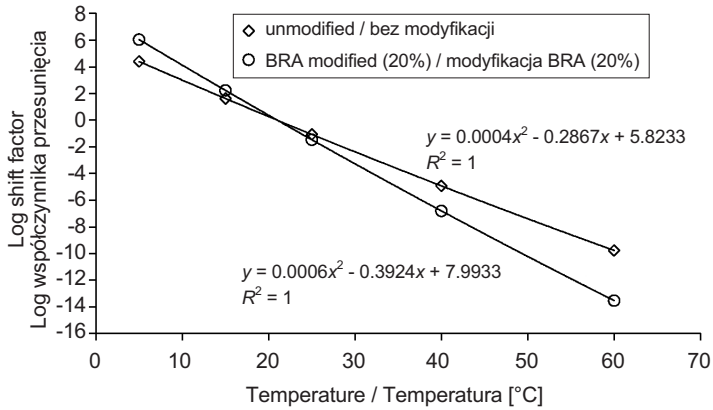
Table 9. Resilient modulus values for BRA modified asphalt mixtures [MPa]

Tablica 9. Wartości modułu sztywności sprężystej mieszanek modyfikowanych dodatkiem BRA [MPa]

Rise time Czas przyrostu obciążenia [ms]	Pulse repetition period Okres między obciążeniami [ms]	Temperature / Temperatura [°C]				
		5	15	35	40	60
40	1000	21558	13131	6595	1371	318
40	2000	21813	12861	6176	1221	303
40	3000	22600	12951	6008	1183	287
60	1000	20467	12217	5868	1148	287
60	2000	20954	11956	5433	1033	275
60	3000	21879	12010	5260	1004	261
80	1000	19727	11607	5401	1012	266
80	2000	20366	11352	4961	918	257
80	3000	21381	11385	4786	894	244

4.2. RESILIENT MODULUS MASTER CURVE

The laboratory resilient modulus data for the five testing temperatures (5°C, 15°C, 25°C, 40°C and 60°C) and three frequencies (0.33 Hz, 0.5 Hz and 1.0 Hz) were combined for each asphalt mixture to construct its resilient modulus master curve. Eq. (3) was used to construct such a master curve for the reference temperature of 21°C for all asphalt mixtures. The resilient modulus data were then shifted into a master curve for the analysis of the performance of asphalt mixtures by simultaneously solving shift parameters. Fig. 4 shows the relationship between the logarithm of the shift factors $\log a(T_i)$ and test temperature for each mixture. The shift factor for unmodified and BRA-modified asphalt mixtures was found to be similar. All of the shift factors followed a second order polynomial with respect to temperature. The seven parameters used in equations (3) and (5) are presented in Table 10. They were used to calculate the resilient modulus for unmodified and BRA-modified asphalt mixtures over the range of temperatures and loading frequencies used in the tests.



Fitted master curves for asphalt mixtures are shown in Fig. 5, plotted on a log-log scale. The resilient moduli obtained from the measurements and from the master curves were then compared in order to verify the accuracy and effectiveness of the procedure. The master curve resilient modulus $S_{master\ curve}$ and the laboratory resilient modulus S_{lab} for unmodified and BRA-modified asphalt mixtures are plotted in Fig. 6. It can be seen that the resilient modulus results obtained from the master curve for both asphalt mixtures are almost identical to laboratory resilient modulus results.

Fig. 4. Shift factor for unmodified and BRA-modified asphalt mixtures
Rys. 4. Współczynnik przesunięcia dla mieszanek bez modyfikacji oraz modyfikowanych BRA

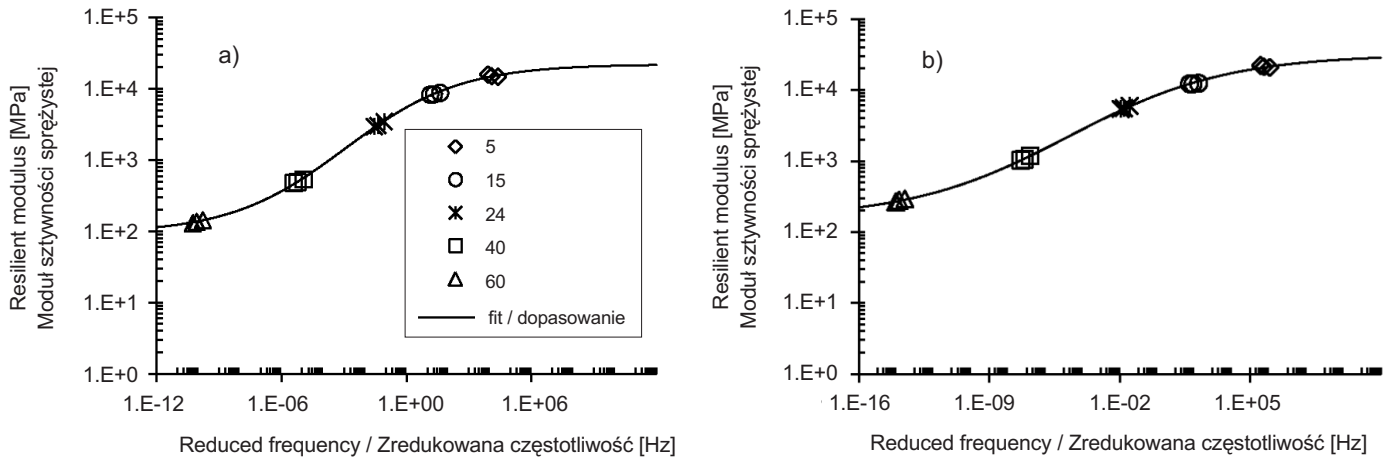


Fig. 5. Fitted resilient modulus master curves of asphalt mixtures: a) unmodified, b) BRA modified (20%)
Rys. 5. Dopasowane krzywe wiodące modułu sztywności sprężystej mieszanek asfaltowych: a) bez modyfikacji, b) z modyfikacją BRA (20%)

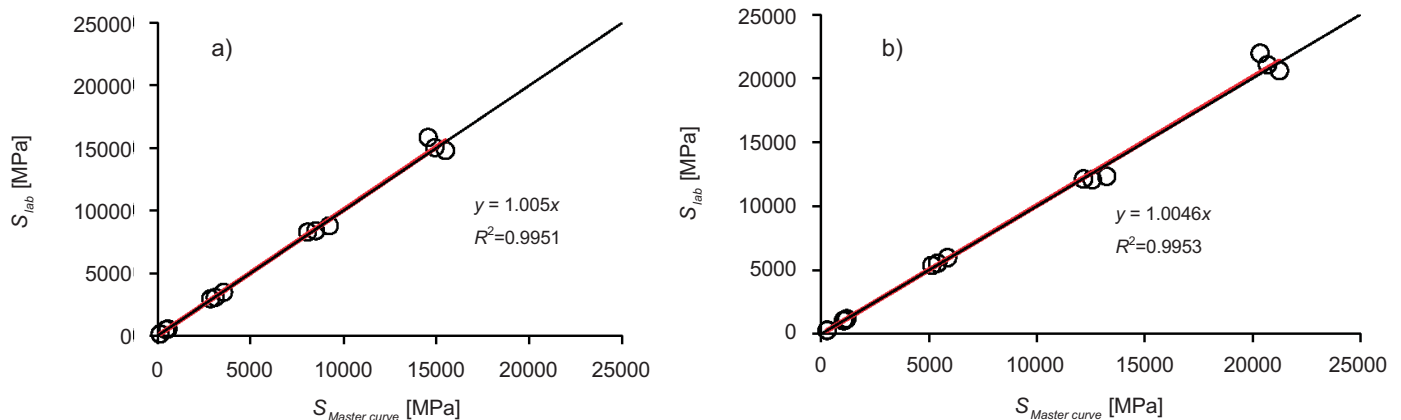


Fig. 6. Comparison between the resilient modulus values obtained from the measurements and from the master curve of asphalt mixtures: a) unmodified, b) BRA modified (20%)
Rys. 6. Porównanie wartości modułu sztywności sprężystej uzyskanych z pomiarów oraz z krzywej wiodącej w przypadku mieszanek asfaltowych: a) bez modyfikacji, b) z modyfikacją BRA (20%)

Table 10. Parameters for determination of master curve shape and shift factors
 Tablica 10. Parametry kształtu krzywej wiodącej oraz współczynnika przesunięcia

Asphalt mixtures Mieszanka asfaltowa	Resilient modulus parameter Parametr kształtu krzywej wiodącej				Shift parameter Parametr do wyznaczenia współczynnika przesunięcia			
	δ	α	β	γ	a	b	c	R^2
Unmodified Bez modyfikacji	1.129	2.376	-1.076	-0.362	0.0004	-0.287	5.823	1.0

Krzywe wiodące modułu sztywności sprężystej mieszanek asfaltowych bez modyfikacji oraz z dodatkiem modyfikującym BRA w temperaturze referencyjnej 21°C przedstawiono na Rys. 7. Wykres ten pokazuje porównanie wpływu dodatku modyfikującego BRA na moduł mieszanek w temperaturze referencyjnej i przy różnych częstotliwościach obciążeń. Rys. 8 przedstawia zależność liniową między $1/\log(a_T)$ oraz $1/(T - T_r)$ w oparciu o równanie (7). Parametry empiryczne C_1 i C_2 wyniosły około 158.7°K i 592.6°K dla mieszanki bez modyfikacji oraz 238.1°K i 645.6°K dla mieszanki z dodatkiem BRA. Rys. 9 przedstawia krzywą wiodącą modułu sztywności sprężystej uzyskaną metodą WLF.

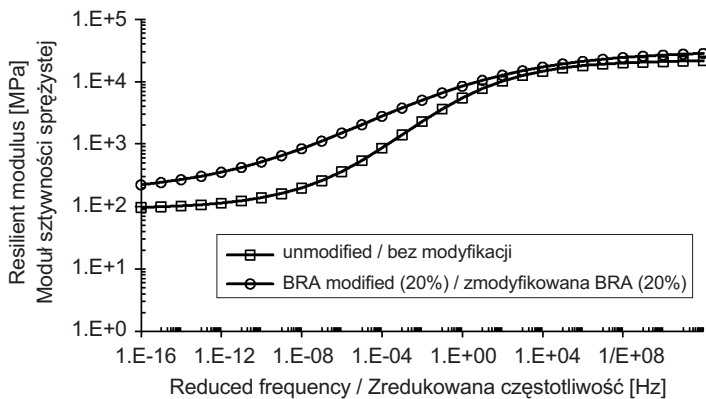


Fig. 7. Resilient modulus master curve for unmodified and BRA-modified asphalt mixtures

Rys. 7. Krzywe wiodące modułu sztywności sprężystej dla mieszanek bez modyfikacji oraz modyfikowanych BRA

Stwierdzono, że wartości modułu mieszanki z dodatkiem BRA są wyższe niż dla mieszanki bez modyfikacji, szczególnie w zakresie średnich i wysokich temperatur oraz niskich częstotliwości. Należy się zatem spodziewać, że zastosowanie dodatku modyfikującego BRA znacznie poprawi przyczepność asfaltu do kruszywa. Zachowanie lepkosprężyste mieszanki asfaltowej, w której 20% asfaltu zastąpiono bitumem naturalnym pochodzącym z dodatku BRA, było wyraźniejsze niż w przypadku mieszanki bez modyfikacji. Z modułem sztywności sprężystej związana jest zdolność warstwy do rozkładania obciążeń [24]. Mieszanki asfaltowe z wysokim

The resilient modulus master curves for unmodified and BRA-modified asphalt mixtures at the reference temperature of 21°C are plotted in Fig. 7. This figure illustrates the comparison of the effect of granular BRA modifier binder on the resilient modulus of asphalt mixtures at the reference temperature and various loading frequencies. Fig. 8 shows the linear relationship between $1/\log(a_T)$ and $1/(T - T_r)$ based on equation (7), and hence the empirical factors of C_1 and C_2 were about 158.7°K and 592.6°K for the unmodified and 238.1°K and 645.6°K for the BRA-modified asphalt mixture, respectively. Fig. 9 shows the master curve of the resilient modulus obtained using WLF method.

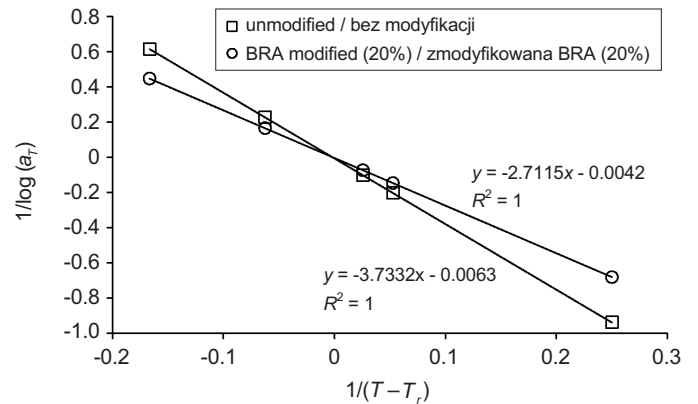


Fig. 8. Linearized WLF equation

Rys. 8. Zależność liniowa oparta na równaniu WLF

The resilient modulus for BRA-modified asphalt mixtures was observed to be higher than for unmodified mixtures, especially in the high-intermediate temperature range and at low frequencies. Thus, addition of BRA modifier binder can be expected to considerably improve the bonding interaction between asphalt binder and aggregate. Therefore, the viscoelastic behavior of BRA-modified asphalt mixtures containing 20% of BRA modifier binder was more pronounced than for unmodified asphalt mixtures. The resilient modulus is related to the load spreading capacity [24]. Asphalt mixtures with a high resilient modulus will distribute loads over a wider area. It is expected

modułem będą przekazywać obciążenia na większą powierzchnię. Należy się spodziewać, że mieszanki asfaltowe z BRA, wykazujące wysoki moduł sztywności sprężystej, będą miały większą maksymalną wartość krytycznych odkształceń oraz podwyższoną odporność na pęknięcia.

4.3. ANALIZA STATYSTYCZNA

Wyniki modułu sztywności sprężystej uzyskane dla mieszanek asfaltowych poddano również analizie statystycznej z zastosowaniem metody analizy kowariancji (ANCOVA). Celem analizy statystycznej było stwierdzenie, czy wpływ zastosowania dodatku modyfikującego BRA będzie widoczny również wtedy, gdy kontrolowane będą parametry zmienności takie jak temperatura badania, czas przyrostu obciążenia oraz okres powtórzenia impulsu.

Zmienną objaśnianą był moduł sztywności sprężystej mieszanek asfaltowych. Zmiennymi objaśniającymi były: rodzaj mieszanki jako czynnik (niemodyfikowana lub modyfikowana BRA) oraz trzy zmienne testowe jako zmienne towarzyszące (temperatura, czas przyrostu obciążenia i okres powtórzenia impulsu). Wyniki analizy ANCOVA zostały opisane i podsumowane w Tabl. 11, zawierającej dane o tym, które zmienne miały statystycznie istotny wpływ na moduł przy założonym poziomie istotności 0,05.

Table 11. Statistically significant effect of variables in the ITSM test

Tablica 11. Istotność statystyczna wpływu zmiennych w badaniu ITSM

Variables Zmienna	Effect on resilient modulus Wpływ na moduł sztywności
Asphalt mixtures Rodzaj mieszanki	Yes / Tak
Temperatures Temperatura	Yes / Tak
Rise time Czas przyrostu obciążenia	No / Nie
Pulse repetition period Okres między obciążeniami	No / Nie

Wyniki testu Levene'a przy uwzględnieniu w modelu temperatury, czasu przyrostu obciążenia i okresu między obciążeniami jako zmiennych towarzyszących wskazują na to, że zróżnicowanie jest statystycznie nieistotne. Na tej podstawie można wnioskować o równości wariancji (a zatem założenie o homogeniczności wariancji jest spełnione). Jest jasne, że zmienne towarzyszące (temperatura, czas przyrostu obciążenia i okres między obciążeniami) w sposób istotny statystycznie przewidują zmienną zależną (moduł sztywności sprężystej).

that BRA-modified asphalt mixtures with higher resilient modulus would have greater tensile strain limit and resistance to cracking.

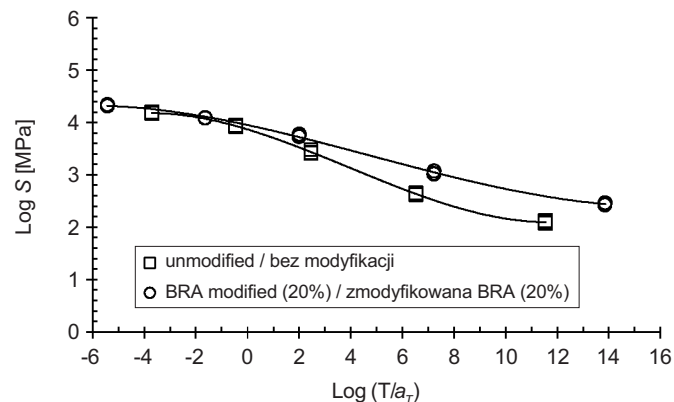


Fig. 9. Master curve according to the WLF method

Rys. 9. Krzywa wiodąca określona metodą WLF

4.3. STATISTICAL ANALYSIS

The resilient modulus results were also analyzed statistically using the analysis of covariance (ANCOVA). The purpose of the statistical analysis was to determine whether granular BRA modifier binder seemed to have an effect on the resilient modulus of asphalt mixtures when the test temperature, rise time and pulse repetition period were controlled.

The response examined was the resilient modulus of the asphalt mixtures. Independent variables included the two asphalt mixtures as fixed factors (unmodified and BRA-modified asphalt mixtures) and three testing variables as covariates (temperature, rise time and pulse repetition period). The results of the ANCOVA are described below and summarized in Table 11, indicating which effects are statistically significant at the 95 percent ($p < 0.05$) probability level.

The results of Levene's test when temperature, rise time and pulse repetition period are included in the model as covariates are non-significant. This indicates that the variances are equal (hence the assumption of the homogeneity of variances has been met). It is clear that the covariates (temperature, rise time and pulse repetition period) significantly predict the dependent variable (resilient modulus).

Looking at the significance values, only the temperature as a covariate significantly predicts the resilient modulus of asphalt mixtures, because the p -value is less than 0.05: $F(1, 175) = 614.724$ and $p = 0.000$. Therefore, the resilient modulus of asphalt mixtures is significantly influenced by the temperature, while rise time and pulse repetition

Na podstawie wartości p można stwierdzić, że spośród zmiennych towarzyszących tylko temperatura w sposób istotny statystycznie przewiduje moduł sztywności sprężystej mieszanek asfaltowych, ponieważ wartość p jest mniejsza od 0,05: $F(1, 175) = 614,724$ i $p = 0,000$. A zatem na moduł sztywności sprężystej mieszanek asfaltowych istotny wpływ ma temperatura, podczas gdy czas przyrostu obciążenia i okres powtórzenia obciążeń zdają się nie mieć istotnego wpływu na moduł. Wartości p dla czasu przyrostu obciążenia oraz okresu między obciążeniami wyniosły odpowiednio 0,161 i 0,939.

Nawet po wyeliminowaniu wpływu temperatury, czasu przyrostu obciążenia i okresu między obciążeniami, wpływ zastosowania dodatku modyfikującego BRA na moduł mieszanek asfaltowych był statystycznie istotny: $F(1, 175) = 27,485$ oraz $p = 0,000$. Model jako całość był nadal statystycznie istotny, a zatem możliwe jest przewidywanie modułu sztywności sprężystej mieszanek asfaltowych w oparciu o wymienione powyżej zmienne (temperaturę, czas przyrostu obciążenia oraz okres powtórzenia impulsu), a wartość p w przypadku skorygowanego modelu była niższa od 0,05 ($p = 0,000$).

Wyniki normalnego testu post hoc wykazały, że zastosowanie granulowanego dodatku modyfikującego BRA w mieszankach asfaltowych ma istotny wpływ na moduł sztywności sprężystej; a w szczególności, że moduł mieszanek z dodatkiem BRA był istotnie wyższy od modułu mieszanek bez modyfikacji.

5. WNIOSKI

W badaniu z zastosowaniem schematu pośredniego rozciągania (ITSM) oceniono różne warunki badania modułu sztywności sprężystej mieszanek asfaltowych zawierających lepsze modyfikowane dodatkiem BRA oraz niemodyfikowane. Ocena uwzględniała wpływ zmienności takich parametrów jak temperatura oraz częstotliwość obciążeń. Moduł mieszanek z dodatkiem BRA był znacznie wyższy od modułu mieszanek bez modyfikacji. Wynika stąd, że częściowe zastąpienie asfaltu zwykłego lepiszczem naturalnym pochodzącym z dodatku modyfikującego BRA prowadzi do poprawy sztywności mieszanki, a zatem i do wzrostu jej odporności na odkształcenia poziome. Temperatura miała istotny wpływ na wartości modułu sztywności sprężystej mieszanek, zarówno z dodatkiem, jak i bez dodatku BRA. Moduł mieszanki zmniejszał się ze wzrostem temperatury. Niemniej jednak, mieszanki zawierające dodatek BRA były mniej wrażliwe na zmiany temperatury niż mieszanki bez modyfikacji. Na podstawie analizy statystycznej ANCOVA stwierdzono, że dwie spośród badanych zmiennych miały najbardziej istotny statystycznie wpływ na moduł – były to temperatura oraz

period seem to have no significant effect on the resilient modulus. The p -values for rise time and pulse repetition period were 0.161 and 0.939, respectively.

Even when the effects of temperature, rise time and pulse repetition period were excluded, the effect of BRA modifier binder on the resilient modulus values of asphalt mixtures was significant, with: $F(1, 175) = 27.485$ and $p = 0.000$. The model as a whole was still significant, therefore it is possible to predict the resilient modulus of asphalt mixtures from these variables (asphalt mixtures, temperature, rise time and pulse repetition period), as the p -value for the corrected model was less than 0.05 ($p = 0.000$).

The results of the normal post hoc test showed that using granular BRA modifier binder in the asphalt mixture had a significant effect on the resilient modulus; specifically, the resilient modulus of the BRA-modified asphalt mixture was significantly higher than the modulus of unmodified asphalt mixture.

5. CONCLUSIONS

Various testing conditions for determining the resilient modulus of unmodified and BRA-modified mixtures were evaluated under the ITSM test. Included in this evaluation was the effect of variation in the test condition variables, such as test temperature and frequency. The resilient modulus of BRA-modified asphalt mixture was significantly higher than that of unmodified asphalt mixture. This indicates that partial substitution of the base binder by the BRA modifier binder improved the resilient modulus of the asphalt mixtures, and thus improved their resistance to horizontal deformation as well. The resilient modulus of unmodified and BRA-modified asphalt mixtures was influenced by temperature. The resilient modulus of asphalt mixtures decreased with an increase in temperature. However, the BRA-modified asphalt mixtures were less sensitive to temperature changes than the unmodified asphalt mixtures. Based on statistical analysis using the analysis of covariance (ANCOVA), two factors – temperature and granular BRA modifier binder – had the greatest and most statistically significant influence on resilient modulus compared to other variables, while the loading time and pulse repetition period seemed to have no statistically significant effect on resilient modulus.

zastosowanie granulowanego dodatku modyfikującego BRA. Zarówno czas przyrostu obciążenia jak i okres powtórzenia impulsu nie miały statystycznie istotnego wpływu na moduł.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Słowik M., Bartkowiak M.*: Review of analytical-empirical methods for determining stiffness moduli of asphalt mixtures. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **17**, 1, 2018, 5-22, DOI: 10.7409/rabdim.018.001
- [2] *Kok B.V., Kuloglu N.*: Effects of Two-Phase Mixing Method on Mechanical Properties of Hot Mix Asphalt. *Road Materials and Pavement Design*, **12**, 4, 2011, 721-738, DOI: 10.1080/14680629.2011.9713892
- [3] *Mokhtari A., Moghadas Nejad F.*: Mechanistic approach for fiber and polymer modified SMA mixtures. *Construction and Building Materials*, **36**, 2012, 381-390, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.05.032
- [4] *Tayfur S., Ozen H., Aksoy A.*: Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers. *Construction and Building Materials*, **21**, 2, 2007, 328-337, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2005.08.014
- [5] *Shafabakhsh G., Tanakizadeh A.*: Investigation of loading features effects on resilient modulus of asphalt mixtures using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System. *Construction and Building Materials*, **76**, 2015, 256-263, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.11.069
- [6] *Lee H., Kim S., Choubane B., Upshaw P.*: Construction of dynamic modulus master curves with resilient modulus and creep test data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **2296**, 1, 2012, 1-14, DOI: 10.3141/2296-01
- [7] *Enieb M., Diab A.*: Characteristics of asphalt binder and mixture containing nanosilica. *International Journal of Pavement Research and Technology*, **10**, 2, 2017, 148-157, DOI: 10.1016/j.ijprt.2016.11.009
- [8] *Sarnowski M.*: Rheological properties of road bitumen binders modified with SBS polymer and polyphosphoric acid. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **14**, 1, 2015, 47-65, DOI: 10.7409/rabdim.015.004
- [9] *Bahia H.U.*: Modeling of asphalt binder rheology and its application to modified binders. *Modeling of Asphalt Concrete*. ASCE Press, McGraw-Hill Construction, New York, 2004, 11-64
- [10] *Plewa A.*: Asphalt mixtures with binders fluidized by addition of vegetable origin oil for applications as flexible anti-crack layers. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **18**, 3, 2019, 181-192, DOI: 10.7409/rabdim.019.012
- [11] *Baig M.G., Wahhab H.I.A.*: Mechanistic Evaluation of Hedmanite and Lime Modified Asphalt Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **10**, 3, 1998, 153-160, DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(1998)10:3(153)
- [12] *Sengul C.E., Oruc S., Iskender E., Aksoy A.*: Evaluation of SBS modified stone mastic asphalt pavement performance. *Construction and Building Materials*, **41**, 2013, 777-783, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.12.065
- [13] *Fontes L.P.T.L., Trichês G., Pais J.C., Pereira P.A.A.*: Evaluating permanent deformation in asphalt rubber mixtures. *Construction and Building Materials*, **24**, 7, 2010, 1193-1200, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.12.021
- [14] *Xu T., Wang H., Li Z., Zhao Y.*: Evaluation of permanent deformation of asphalt mixtures using different laboratory performance tests. *Construction and Building Materials*, **53**, 2014, 561-567, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.12.015
- [15] *Dias J.F., Picado-Santos L., Capitão S.*: Mechanical performance of dry process fine crumb rubber asphalt mixtures placed on the Portuguese road network. *Construction and Building Materials*, **73**, 2014, 247-254, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.110
- [16] *Gajewski M., Horodecka R.*: Rheological properties of road bitumens modified by natural asphalt. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **17**, 2, 2018, 93-109, DOI: 10.7409/rabdim.018.006
- [17] *Schwartz C.W.*: Evaluation of the Witczak dynamic modulus prediction model. *Proceedings of the 84th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, DC, 2005, No. 05-2112
- [18] *Yao B., Cheng G., Wang X., Cheng C.*: Characterization of the stiffness of asphalt surfacing materials on orthotropic steel bridge decks using dynamic modulus test and flexural beam test. *Construction and Building Materials*, **44**, 2013, 200-206, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.03.037
- [19] *Apeagyei A.K.*: Rutting as a Function of Dynamic Modulus and Gradation. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **23**, 9, 2011, 1302-1310, DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000309
- [20] *Christensen D.W., Anderson D.A.*: Interpretation of dynamic mechanical test data for paving grade asphalt cements (with discussion). *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **61**, 1992, 67-116
- [21] *Pellinen T., Witczak M.*: Stress dependent master curve construction for dynamic (complex) modulus (with discussion). *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **71**, 2002, 281-309, DOI: 10.1061/40709(257)6
- [22] *Witczak M., Bari J.*: Development of a master curve (E*) database for lime modified asphaltic mixtures. *Arizona State University Research Report*, Tempe, AZ, 2004
- [23] *Apeagyei A.K., Diefenderfer B.K., Diefenderfer S.D.*: Development of dynamic modulus master curves for hot-mix asphalt with abbreviated testing temperatures. *International Journal of Pavement Engineering*, **13**, 2, 2012, 98-109, DOI: 10.1080/10298436.2011.566612
- [24] *Kim Y., Lee H.D., Heitzman M.*: Dynamic modulus and repeated load tests of cold in-place recycling mixtures using foamed asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **21**, 6, 2009, 279-285, DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:6(279)

- [25] *Coffey S., DuBois E., Mehta Y., Nolan A., Purdy C.*: Determining the impact of degree of blending and quality of reclaimed asphalt pavement on predicted pavement performance using pavement ME design. *Construction and Building Materials*, **48**, 2013, 473-478, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.06.012
- [26] *Garcia G., Thompson M.*: HMA dynamic modulus predictive models - a review. Research Report FHWA-ICT-07-005, Illinois Center for Transportation, 2007, 101p
- [27] *Fakhri M., Ghanizadeh A.R.*: An experimental study on the effect of loading history parameters on the resilient modulus of conventional and SBS-modified asphalt mixes. *Construction and Building Materials*, **53**, 2014, 284-293, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.091
- [28] *Yildiz M., Kokini J.*: Determination of Williams-Landel-Ferry constants for a food polymer system: effect of water activity and moisture content. *Journal of Rheology*, **45**, 4, 2001, 903-912, DOI: 10.1122/1.1380425
- [29] *Yusoff N.I.M., Chailleux E., Airey G.D.*: A comparative study of the influence of shift factor equations on master curve construction. *International Journal of Pavement Research and Technology*, **4**, 6, 2011, 324-336
- [30] *Wang H., Zhan S., Liu G.*: The effects of asphalt migration on the dynamic modulus of asphalt mixture. *Applied Sciences*, **9**, 13, 2019, 2747, (17p), DOI: 10.3390/app9132747
- [31] AS2008-1997 Australian Standard: Residual bitumen for pavements. Standards Association of Australia, 1997
- [32] *Karami M., Nikraz H.*: Using Advanced Materials of Granular BRA Modifier Binder to Improve the Flexural Fatigue Performance of Asphalt Mixtures. *Procedia Engineering*, **125**, 2015, 452-460, DOI: 10.1016/j.proeng.2015.11.120
- [33] *Karami M., Nikraz H., Sebayang S., Irianti L.*: Laboratory experiment on resilient modulus of BRA modified asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Research and Technology*, **11**, 12018, 38-46, DOI: 10.1016/j.ijprt.2017.08.005
- [34] Test method WA 730.1-2011 Bitumen content and particle size distribution of asphalt and stabilised soil: centrifuge method. Main Roads Western Australia, 2011, 4p
- [35] Specification 504 Asphalt Wearing Course, Main Road Western Australia, 2010
- [36] Australian Standard AS 2891.13.1-1995 Methods of sampling and testing asphalt - Methods 13.1: Determination of resilient modulus of asphalt - Indirect tensile method
- [37] *Harvey J., Monismith C.L.*: Effects of laboratory asphalt concrete specimen preparation variables on fatigue and permanent deformation test results using strategic highway research program a-003a proposed testing equipment. *Transportation Research Record*, 1417, 1993, 38-48
- [38] *Mogawer W.S., Austerman A.J., Daniel J.S., Zhou F., Bennert T.*: Evaluation of the effects of hot mix asphalt density on mixture fatigue performance, rutting performance and MEPDG distress predictions. *International Journal of Pavement Engineering*, **12**, 2, 2011, 161-175, DOI: 10.1080/10298436.2010.546857
- [39] *Hartman A.M., Gilchrist M.D., Walsh G.*: Effect of Mixture Compaction on Indirect Tensile Stiffness and Fatigue. *Journal of Transportation Engineering*, **127**, 5, 2001, 0370-0378
- [40] *Walubita L.F., Faruk A.N., Das G., Tanvir H.A., Zhang J., Scullion T.*: The overlay tester: a sensitivity study to improve repeatability and minimize variability in the test results. Texas Transportation Institute, FHWA/TX-12/0-6607-1, Texas, USA, 2012
- [41] *Whiteoak D.*: The shell bitumen handbook. 4th edition, Shell Bitumen, Riversdale House, Chertsey, UK, 1990
- [42] *Somé S.C., Fredj M.A., Nguyen M.L., Feeser A., Pavoine A.*: Multi-parametric characterization of mode I fracture toughness of asphalt concrete: Influence of void and RA contents, binder and aggregate types. *International Journal of Pavement Research and Technology*, **11**, 3, 2018, 274-284, DOI: 10.1016/j.ijprt.2017.10.004
- [43] *de Mello L.G.R., de Farias M.M., Kaloush K.E.*: Using damage theory to analyze fatigue of asphalt mixtures on flexural tests. *International Journal of Pavement Research and Technology*, **11**, 6, 2018, 617-626, DOI: 10.1016/j.ijprt.2018.02.003
- [44] *Affandy F.*: The performance of bituminous mixes using Indonesia natural asphalt. Proceedings of the 25th Australian Road Research Board (ARRB) Conference "Shaping the future: Linking policy, research and outcomes", Perth, Western Australia, 2012, 12p