



MUHAMMAD KAMRAN<sup>1)</sup>  
 MUHAMMAD TARIQ KHAN<sup>2)</sup>  
 DIYAR KHAN<sup>3)</sup>  
 MOHD ROSLI MOHD HASAN<sup>4)</sup>  
 NOMAN KHAN<sup>5)</sup>  
 MATI ULLAH<sup>6)</sup>

## EXPERIMENTAL EVALUATION OF HOT MIX ASPHALT USING COAL BOTTOM ASH AS PARTIAL FILLER REPLACEMENT

## OCENA DOŚWIADCZALNA MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH PO CZĘŚCIOWYM ZASTĄPIENIU WYPEŁNIACZA POPIOŁAMI DENNYMI Z ELEKTROWNI WĘGLOWEJ

**STRESZCZENIE.** Przedstawione badania miały na celu ocenę mieszanek mineralno-asfaltowych (MMA) wykonanych na gorąco i przygotowanych z zastosowaniem popiołów dennych pochodzących ze spalania węgla w roli alternatywnego dodatku do wypełniacza. Zbadano doświadczalnie, jaki wpływ na koleinowanie, sztywność i trwałość zmęczeniową mieszanek ma zawartość popiołów dennych w typowym wypełniaczu. Zastosowano kombinacje konwencjonalnego wypełniacza (mączki kamiennej) z różnymi udziałami w nim popiołu dennego: 1,5%, 3% oraz 4,5% (v/v). Mieszanki zaprojektowano i zbadano wg metody Marshalla. Zgodnie z instrukcją MS-2 Instytutu Asfaltowego oraz specyfikacjami ogólnymi pakistańskiego Zarządu Dróg Krajowych (NHA) zagęszczono sześćdziesiąt próbek mieszanek. Na podstawie oznaczeń stabilności wykonanych przy różnych zawartościach lepiszcza (3,5%, 4,0%, 4,5%, 5,0% i 5,5%) określono optymalny jego udział w przypadku każdej z rozpatrywanych zawartości popiołów dennych w wypełniaczu. Dla zawartości popiołów dennych w wypełniaczu 0%, 1,5%, 3% i 4,5% uzyskano odpowiednio optymalne udziały objętościowe lepiszcza w mieszance: 4,27%, 4,47%, 4,53% oraz 5,0%. Uzyskane w wyniku tej analizy wartości zastosowano następnie we wszystkich dalszych badaniach mieszanek. Dla każdego z czterech rozpatrywanych udziałów popiołu dennego w wypełniaczu przygotowano po trzy próbki mieszanki o optymalnej zawartości lepiszcza. Badanie odkształceń trwałych w koleinomerzu wykonano na 12 próbkach. Również badanie modułu dynamicznego przeprowadzono na 12 próbkach. W oparciu o uzyskane w badaniu metodą Marshalla parametry stabilności i osiadania wykazano, że próbki mieszanek zawierające 3% popiołów dennych w wypełniaczu przy optymalnej zawartości lepiszcza 4,53% spełniały wymogi NHA przeznaczone dla nawierzchni podatnych. Stwierdzono, że dodatek popiołów dennych w wypełniaczu znacznie poprawił odporność mieszanek na koleinowanie oraz ich sztywność. Wpłynął również na wzrost trwałości zmęczeniowej. Dodatek popiołów dennych w ilości do 3% (v/v) w stosunku do mączki kamiennej może zatem zminimalizować jej zużycie jako wypełniacza do mieszanek i jednocześnie zapewnić odpowiednią metodę wykorzystania popiołów pochodzących ze spalania węgla kamiennego.

**SŁOWA KLUCZOWE:** badanie Marshalla, deformacje trwałe, odpady, przemysłowe produkty uboczne, trwałość nawierzchni, trwałość zmęczeniowa.

**ABSTRACT.** The purpose of this study is to evaluate the performance of hot mix asphalt (HMA) prepared with coal bottom ash (CBA) as an alternative mineral filler. In this study, the effect of CBA on rutting, stiffness and fatigue resistance was experimentally evaluated. Combinations of conventional filler (stone dust) with different percentages of CBA (at 1.5%, 3%, and 4.5% by volume) were adopted. The HMA samples were prepared and tested using the Marshall mix design method. Following the Asphalt Institute MS-2 and the Pakistani National Highway Authority (NHA) General Specifications, sixty samples of HMA were compacted; stability tests at varying bitumen contents (3.5%, 4.0%, 4.5%, 5.0%, and 5.5%) were used to determine the optimum bitumen content (OBC) in the mixture for each percentage of CBA in the filler. For 0%, 1.5%, 3%, and 4.5% CBA, the optimum bitumen contents of 4.27%, 4.47%, 4.53%, and 5.0% were obtained, respectively. They were used throughout the study. Three samples with the optimum binder content were made for each of the four analysed CBA proportions. The wheel tracker test was run on 12 OBC samples, and the dynamic modulus test was run on 12 OBC samples. The Marshall stability and flow test results showed that the samples prepared with 3% CBA as filler and an OBC of 4.53% satisfied the NHA requirements for flexible pavement. It was noted that CBA greatly improves the rutting resistance and stiffness of asphalt mixtures. It also improved the fatigue life. Therefore, adding up to 3% CBA by volume to stone dust used as filler in asphalt concrete can minimize the need for stone dust and provide a suitable method of CBA disposal.

DOI: 10.7409/rabdim.023.008

**KEYWORDS:** durability, fatigue life, industrial by-product, Marshall properties, permanent deformation, waste materials.

<sup>1)</sup> University of Engineering and Technology, Department of Civil Engineering, Peshawar, Pakistan; mkamran92@outlook.com

<sup>2)</sup> University of Engineering and Technology, Department of Civil Engineering, Peshawar, Pakistan; drtariq@uetpeshawar.edu.pk

<sup>3)</sup> Silesian University of Technology, Faculty of Transport and Aviation Engineering, Department of Road Transport, 8 Krasieńskiego St., 40-019 Katowice; diyar.khan@polsl.pl (✉)

<sup>4)</sup> University Sains Malaysia (Engineering Campus), School of Civil Engineering, 14300 Nibong Tebal, Penang, Malaysia; cerosli@usm.my

<sup>5)</sup> Sarhad University of Science and Information Technology Ring Road Campus, Department of Civil Engineering, Peshawar, KPK, Pakistan; nomi38899@gmail.com

<sup>6)</sup> University of Engineering and Technology, Department of Civil Engineering, Taxila, Punjab, Pakistan; matiullah@students.uettaxila.edu.pk

## 1. WSTĘP

Znaczne ilości popiołów pochodzących ze spalania węgla przechowywane są na składowiskach w pobliżu elektrowni [1]. W ramach zrównoważonego rozwoju utworzono ważne i przyjazne dla środowiska rozwiązania polegające na recyklingu popiołów dennych w materiałach drogowych. Popioły denne mogą być stosowane do zastąpienia kruszywa drobnego i grubego – zarówno osobno, jak i równolegle. W różnorodnych badaniach stosowano popioły denne zamiast kruszywa drobnego w mieszankach betonowych. W niniejszym badaniu podjęto próbę częściowego zastąpienia popiołami dennymi wypełniacza w mieszance mineralno-asfaltowej (MMA). Popioły denne ze spalania węgla są bardzo niebezpieczne i stanowią znaczące zagrożenie dla środowiska. Dzięki ponownemu zastosowaniu tego odpadu w produkcji betonu asfaltowego możliwe jest zredukowanie jego negatywnego wpływu na środowisko. Rozwiązanie polegające na zastępowaniu odpadami wypełniacza w MMA odgrywa znaczącą rolę w rozwoju infrastruktury – zwłaszcza drogowej – i ma pozytywny wpływ na zdrowie publiczne oraz środowisko.

Corocznie na świecie zużywa się około 7,4 do 8 mld ton węgla, zaś produkcja popiołów dennych wynosi około 100 milionów ton [2]. Szacuje się więc, że światowa roczna produkcja popiołów pochodzących ze spalania węgla wynosi około 600 milionów ton, przy czym 500 milionów ton stanowią popioły lotne [3]. Biorąc pod uwagę wzrost cen ropy oraz gazu ziemnego, produkcja energii w elektrowniach węglowych stała się bardziej opłacalna ekonomicznie, zwłaszcza w krajach takich jak USA, Chiny i Indie, które dysponują dużymi złożami węgla [4]. W 2012 roku za 50,2% światowego zużycia węgla odpowiadały Chiny; innymi znaczącymi konsumentami były USA i Indie (po 11,7%), Japonia (8,0%), Rosja (3,3%), Afryka Południowa (2,5%), Korea Południowa (2,4%), Niemcy (2,2%), Polska (2,1%), oraz Indonezja (2,1%) [5]. Przewiduje się, że w 2040 r. Australia, Indie i Chiny będą wydobywać 64% światowych zasobów węgla na świecie – prawie o 4% więcej niż w 2012 r. [6]. Ze względu na rosnące zapotrzebowanie na energię elektryczną utrzymywać się będzie również wzrostowy trend w zużyciu węgla. Aktualnie węgiel szybko zyskuje na znaczeniu jako surowiec do produkcji energii [7]. W 2019 za wzrost globalnego zużycia o 0,9% odpowiadała Azja. Przewiduje się, że udział energii produkowanej w wyniku spalania węgla w ogólnej światowej produkcji energii wzrośnie do 47% w 2030 r. [5, 8].

Wzrost zapotrzebowania na węgiel skutkuje wzrostem w ilości powstających odpadów przemysłowych. Popioły lotne stanowią 70-80% popiołów pochodzących ze spalania węgla [9]; pozostała część to popioły denne [5, 6, 10]. Jak podają niektóre źródła (inne niż [2]), roczna produkcja popiołów dennych

## 1. INTRODUCTION

Large amounts of surplus coal bottom ash (CBA) are disposed of in ponds near power plants [1]. To create more environmentally friendly procedures, important and sustainable solutions for recycling or reusing CBA in paving material have been developed. CBA can be used to replace fine and coarse aggregates, either separately or in combination. Various researchers use CBA instead of fine aggregate in concrete mixtures. This study is an attempt to use CBA as partial replacement for the asphalt mixture filler. CBA materials are extremely dangerous and pose a serious environmental risk. Therefore, by reusing this waste in the production of asphalt concrete, its negative impact on the environment can be reduced. Solution consisting in usage of waste as filler for HMA plays an important role in the development of infrastructure, primarily highways, and has a beneficial impact on public health and ecosystems.

Roughly 7.4 to 8.0 billion tonnes of coal are consumed annually worldwide, and CBA production is about 100 million tonnes [2]. The coal ash (CA) output is estimated to reach around 600 million tonnes per year worldwide, with Coal Fly Ash (CFA) accounting for roughly 500 million tonnes [3]. Coal-fired power generation has become more cost-effective as the price of oil and natural gas has increased, especially in nations like US, China, and India, which have large coal deposits [4]. In 2012, China consumed 50.2% of all coal, followed by the US and India (11.7% each), Japan (8.0%), Russia (3.3%), South Africa (2.5%), South Korea (2.4%), Germany (2.2%), Poland (2.1%), and Indonesia (2.1%) [5]. In 2040, Australia, India, and China are expected to contribute 64% of the world coal output, an increase of nearly 4% since 2012 [6]. Because of the increased demand for electricity, the rising trend in coal usage will continue. Coal is quickly gaining prominence as an energy source for generating electricity [7]. Asia drove the 0.9% increase in global coal use in 2019. The share of coal-generated energy in the worldwide energy generation is predicted to grow to 47% by 2030 [5, 8].

The increasing demand for coal has resulted in the increase in the amount of industrial waste generated. Fly ash (FA) makes up 70-80% of total CA wastes [9]; the remaining portion is BA [5, 6, 10]. As reported in some sources (other than [2]), among the millions of tonnes of CA waste produced each year, up to 150 million metric tonnes is BA [10]. Thermal power plants based on coal are still a popular and cheap source of energy in many developing countries. For many years, thermal power plants

pochodzących ze spalania węgla w piecach fluidalnych wynosi nawet około 150 milionów ton [10]. Elektrownie węglowe stanowią wciąż popularne i niedrogi źródło energii w wielu krajach rozwijających się. Od wielu lat są one również ważnym źródłem w Pakistanie [11]. W związku z pogłębianiem się kryzysu energetycznego rząd Pakistanu zamierza do 2035 r. zwiększyć dostępną moc do 22000 MW, korzystając z elektrowni węglowych. Szacuje się, że całkowite złoża węgla dostępne w Pakistanie to 185 miliardów ton, przy czym 175 miliardów ton znajduje się w dystrykcie Tharparkar o powierzchni około 10000 kilometrów kwadratowych [12].

Badano podobieństwa chemiczne między popiołami dennymi a innymi składnikami stosowanymi w cementach powszechnego użytku. Popioły lotne i denne z jednej elektrowni węglowej wykazały odpowiednią wytrzymałość na ściskanie i skład chemiczny, wspomagając wypełnienie kapilar w zaprawie materiałem reaktywnym oraz wywołując zmianę dystrybucji wielkości porów [13]. Badano również wpływ wypełniaczy mineralnych na kohezję zapraw asfaltowych w niskich temperaturach. Wpływ różnych proporcji wypełniacza do lepiszcza na właściwości zaprawy i uzyskane mechanizmy ustalano metodami ilościowymi [14].

Oceniano także wpływ właściwości wypełniacza na właściwości asfaltu lanego w wysokich i średnich wartościach temperatury. Wypełniacz to kluczowy składnik mieszanki asfaltowej; właściwości mieszanki skorelowane są z jego właściwościami. W ramach badań tych korelacji przygotowano mieszanki mineralno-asfaltowe na gorąco z czterema różnymi wypełniaczami [15]. Na podstawie porównania właściwości chemicznych i fizycznych naturalnego piasku rzeczno- i popiołów dennych stwierdzono, że oba te materiały mogą być stosowane w zastępstwie kruszywa drobnego ze względu na podobieństwo ich właściwości [16]. Badano właściwości mieszanek asfaltowych z popiołami uzyskanymi ze spalania osadów ściekowych. W ramach oceny właściwości eksploatacyjnych mieszanek badano ich moduł sztywności sprężystej, odporność na deformacje trwałe, odporność na oddziaływanie wody oraz wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [17].

Badano również wpływ zastosowania popiołu dennego w betonie cementowym jako mikrowypełniacza o właściwościach pucolanowych. Badanie wykazało możliwość redukcji emisji CO<sub>2</sub> o 0,7-1,2 tony na tonę cementu (do 22,9%). Co więcej, wyniki wskazywały na możliwość obniżenia cen betonu nawet o 10% [18]. Badanie wpływu zastosowania popiołów dennych na właściwości betonu wykazało, że jest to odpowiedni dodatek z punktu widzenia trwałości betonu [19].

Analizowano wpływ rozmiarów cząstek oraz rodzaju popiołu na właściwości lepiszczy. Po dodaniu wypełniacza do lepisz-

have been a prominent source of power generation in Pakistan [11]. As the energy crisis becomes worse day by day, the Pakistani government intends to raise power generation capacity to 22000 MW by 2035 using coal-fired thermal power plants. The total coal reserves in Pakistan are believed to be 185 billion tonnes, with 175 billion tonnes located in the district of Tharparkar, which covers 10,000 square kilometres [12].

Chemical similarities between CBA and supplementary cement-based materials were examined. Fly ash and bottom ash from the same coal-fired power plant both have compressive strengths and chemical compositions that help to fill the capillary pores of the mortar with reactive material, causing pore size redistribution [13]. The effects of mineral fillers on the low-temperature cohesive strength of asphalt mortar were studied. The effects of various filler-bitumen ratios on asphalt mortar and the obtained mechanisms were investigated using quantitative test methods [14].

The influence of filler properties on mastic asphalt properties at high and medium temperatures was evaluated. Filler is a key component of HMA and its properties are correlated with HMA results. To study the connection between filler properties and HMA performance, four types of filler were selected to make conforming HMA [15]. Based on comparison of the chemical and physical properties of natural river sand and CBA, it was noted that these materials may be utilized in place of fine aggregate because of their similar properties [16]. Performance of a bituminous blend created with sewage slush ash (SSA) as mineral filler was evaluated. Resilient modulus, permanent deformation, water sensitivity, and indirect tensile strength tests were used to evaluate the performance of those blends [17].

The effects of CBA used in concrete as a microfiller with pozzolanic properties were studied. The study revealed that CO<sub>2</sub> emissions are reduced by 0.7-1.2 tonnes per tonne of cement (up to 22.9%). Moreover, the results showed that concrete prices can also be decreased by up to 10% [18]. Study of the influence of CBA on concrete characteristics indicated that CBA is a suitable fine material for creating long-lasting concrete [19].

The effects of the size and nature of the dust on the properties of binders were analysed. When filler is combined with binder, thin layers of bitumen form around round aggregate particles, thus increasing the resistance of the mixture to permanent deformation. The percentage of the filler that passes through sieve No. 200 has greater impact



cza asfalt pokrywa cienką warstwą okrągłe ziarna kruszywa, zwiększając odporność mieszanki na deformacje trwałe. Znaczny wpływ na właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych ma udział wagowy wypełniacza przechodzącego przez sito nr 200 (75  $\mu\text{m}$ ). Co najmniej 70% wypełniacza (wagowo) powinno przechodzić przez sito 75  $\mu\text{m}$ ; ma to wpływ na wyniki mieszanki w badaniu Marshalla [20].

Przeprowadzony został program badawczy, w którym wpływ wypełniaczy na właściwości mechaniczne MMA oceniano na podstawie wytrzymałości na pośrednie rozciąganie. Badania laboratoryjne wykazały, że możliwość zastosowania mieszanek jest znacznie ograniczona przez przyczepność lepiszcza do kruszywa. Ponadto zastosowanie wypełniacza wpływa na konsystencję mieszanki. Mastyks lepiszcze-wypełniacz tworzy grubą otoczkę wokół ziaren kruszywa, zwiększając odporność mieszanki na oddziaływanie wody i czynniki atmosferyczne [21].

Przegląd bibliografii uwzględnia dostępną w bazach literaturę związaną z tematem badania. W literaturze znaleźć można omówienia różnych wypełniaczy stosowanych na całym świecie. Jako że popioły z elektrowni węglowych stanowią odpad zawierający składniki toksyczne, kwasowe i radioaktywne, istotne jest zbadanie alternatywnych metod ich recyklingu. Przeprowadzono szczegółową analizę wpływu wypełniaczy zawierających popioły denne na poprawę właściwości MMA, takich jak: moduł dynamiczny i koleinowanie.

## 2. MATERIAŁY I METODY BADAWCZE

Do najważniejszych materiałów wykorzystanych w przeprowadzonym badaniu należą: asfalt 60/70, wapienie i popioły denne (Rys. 1). Kruszywa użyte w badaniu pozyskano z rejonu Wzgórz Margalla. Podobnie jak większość kruszyw drogowych stosowanych w Pakistanie, kruszywa te pochodzą ze skał wapiennych zawierających węglany, głównie kalcyt [22]. Uziarnienie kruszywa (Rys. 2) przyjęto zgodnie z wymogami dla surowca klasy B wg wytycznych pakistańskiego Zarządu Dróg Krajowych (NHA). Próbkę MMA przygotowano, stosując różny udział procentowy popiołu dennego w wypełniaczu (1,5%, 3% oraz 4,5% (v/v)). Ich właściwości porównano z parametrami próbek zawierających jako wypełniacz wyłącznie mączkę kamienną (0% popiołu). Schemat badania przedstawiono na Rys. 1. Badania laboratoryjne przeprowadzono na Wydziale Inżynierii i Technologii Uniwersytetu Technicznego w Taksili w Pakistanie. Popiołów dennych dostarczyła elektrownia węglowa zlokalizowana w dystrykcie Jamshoro w prowincji Sindh w Pakistanie.

on HMA properties. To enhance the Marshall design properties of HMA, it is recommended that at least 70% of the weight of the filler should pass through the sieve (No. 200) [20].

An experimental program was carried out by using an indirect tensile strength test to evaluate the influence of fillers on the tensile characteristics of asphalt mixtures. Laboratory tests have revealed that the use of asphalt mixtures is significantly limited by the affinity of the binder to aggregate. In addition, the use of filler controls the thickening of mixtures. Bitumen-filler mastic provides thick asphalt layers around the aggregate particles, thus increasing the resistance to weather conditions and moisture damage [21].

The references review focuses on the available literature related to the research topics. Various fillers from all over the world were described in the literature. Since CA is a pollutant and contains toxic, acidic, and radioactive constituents, it is necessary to investigate alternative ways of recycling and using CBA. A detailed study of the effects of filler materials on improving asphalt properties was conducted. Major performance tests such as dynamic modulus and rutting were also performed.

## 2. MATERIALS AND RESEARCH METHODS

The primary materials adopted for this study were: 60/70 bitumen, limestone, and CBA (Fig. 1). The aggregates used in this study were collected from the Margalla Hills. Margalla aggregates are composed of limestone (calcite and carbonate) [22], which is the predominant stone used in Pakistan's pavement industry. Aggregate gradation according to the National Highway Authority (NHA) Class B was employed, as indicated in Fig. 2. Marshall moulds of HMA were prepared using different percentages of CBA (1.5%, 3%, and 4.5%) in filler and their properties were compared with those of HMA prepared using only stone dust as filler (0% of bottom ash). Fig. 1 shows a scheme of the experimental program. Laboratory studies were done at the University of Engineering and Technology in Taxila, with CBA provided from a coal-fired power plant in the Jamshoro district of the Sindh province, Pakistan.

### 2.1. COAL BOTTOM ASH

#### 2.1.1. Physical properties

Coal bottom ash (CBA) was collected from the LAKHRA coal power plant in the Sindh province of Pakistan. The BA material contains angular particles of porous texture, with sand and gravel particles of various sizes, as well as

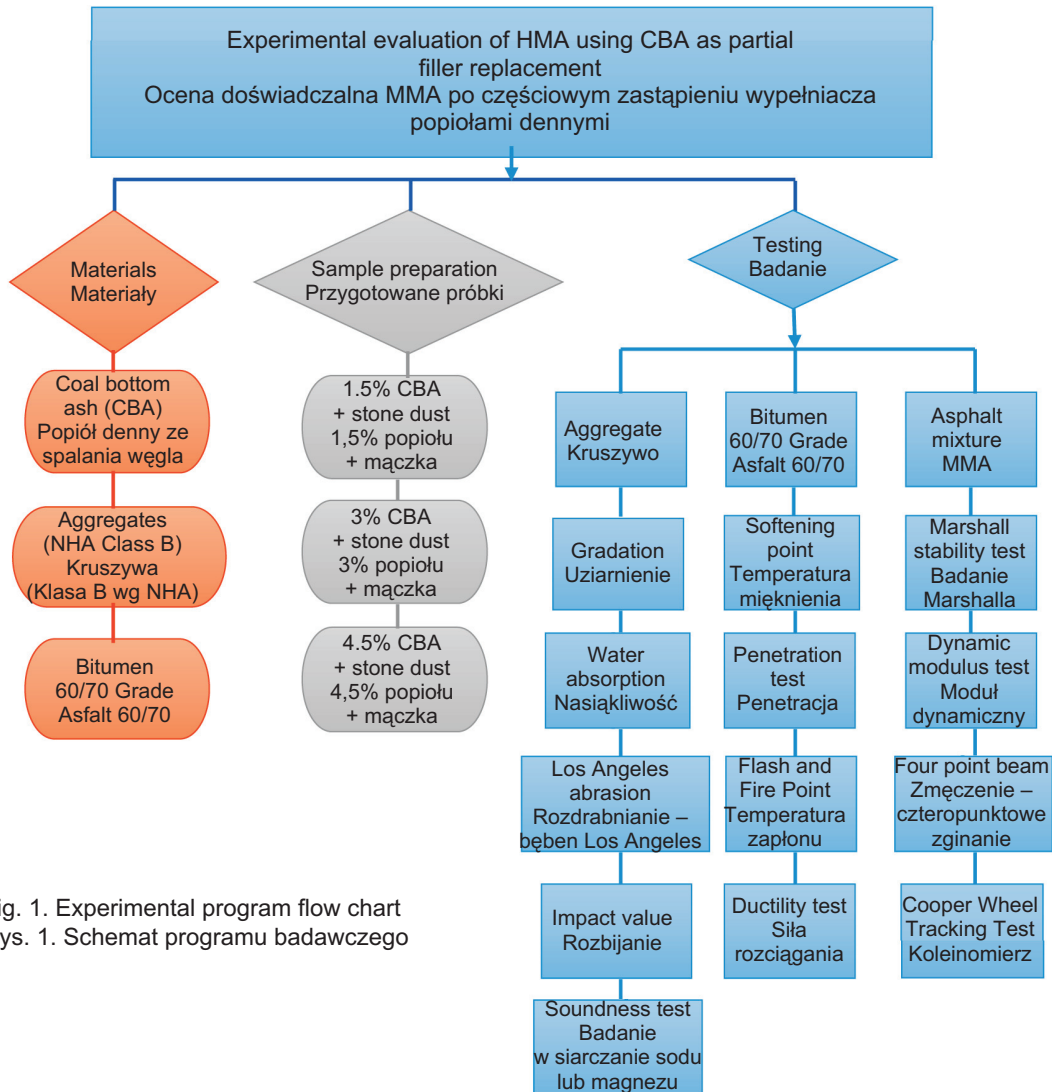


Fig. 1. Experimental program flow chart  
Rys. 1. Schemat programu badawczego

## 2.1. POPIÓŁ DENNY ZE SPALANIA WĘGLA

### 2.1.1. Właściwości fizyczne

Popiół denny pozyskano z elektrowni węglowej LAKHRA w prowincji Sindh w Pakistanie. Materiał ten zawiera kanciaste cząstki o porowatej strukturze, w tym ziarna piasku i żwiru różnej wielkości, jak również niewielkie ilości cząstek pylasto-ila-nych [23, 24]. Cząstki drobne stanowią 50-90% popiołów dennych. Gęstość względna popiołów waha się między 1,39 a 2,41, zależnie od ich właściwości chemicznych [25, 26]. Według systemów klasyfikacji AASHTO i USCS popiół denne należą do klasy A-1-a oraz grupy dobrze uziarnionych piasków [27]. Przed użyciem usunięto z popiołu niepożądane składniki takie jak piryt. Aby zachować odpowiednie uziarnienie, należało również oczyścić popiół denny z pyłu. Popiół

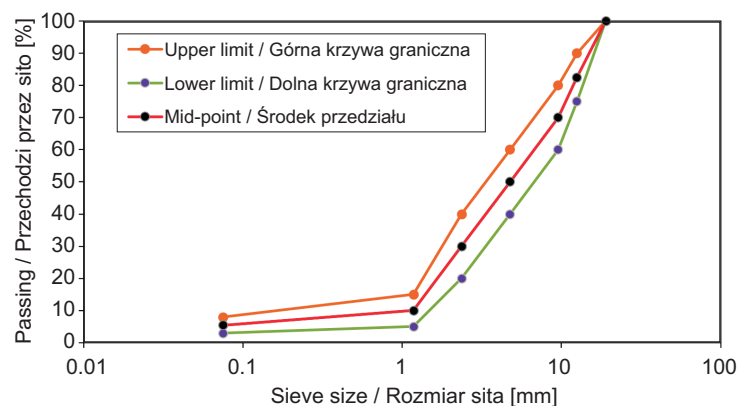


Fig. 2. NHA class-B gradation  
Rys. 2. Uziarnienie kruszywa klasy B wg wytycznych NHA

poddano także osuszeniu, gdyż nadmierna wilgotność mogłaby wpłynąć na poprawność uzyskanych parametrów MMA [28]. W Tabl. 1 zestawiono właściwości fizyczne zastosowanego popiołu dennego.

Table 1. Physical properties of CBA  
Tablica 1. Właściwości fizyczne popiołu dennego

Property / Cecha	Value / Wartość
Range of particle size Zakres uziarnienia [ $\mu\text{m}$ ] [ $\mu\text{m}$ ]	3.65 – 50.45
Specific surface area Powierzchnia właściwa [ $\text{cm}^2/\text{g}$ ]	3835.75
Specific density Gęstość względna [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	2.41
Colour / Barwa	Dark grey / Ciemnoszara

### 2.1.2. WŁAŚCIWOŚCI CHEMICZNE

Główne składniki popiołu dennego stanowią tlenki krzemu, glinu, żelaza, wapnia, magnezu i siarki. Skład chemiczny popiołu zależy oczywiście od rodzaju spalane go węgla. W Tabl. 2 przedstawiono skład chemiczny zastosowanego w badaniach popiołu dennego jako dodatku do wypełniacza w MMA.

Chemical compounds Związek chemiczny	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	LOI / Strata prażenia [%]
Composition [%] Zawartość	0.53	0.51	12.13	17.64	0.04	11.74	0.32	18.08	1.08	0.07	28.2	10.38

### 2.2. PROJEKTOWANIE MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH DO BADAŃ

Zgodnie z zaleceniami instrukcji MS-2 Instytutu Asfaltowego [30], MMA zaprojektowano metodą Marshalla. Metoda ta jest również zgodna z wytycznymi AASHTO T245 [31]. Próbkę laboratoryjną przygotowano więc według zaleceń normy AASHTO T245 oraz z uwzględnieniem specyfikacji ogólnych NHA [32]. W Tabl. 3 przedstawiono wymagania zawarte w specyfikacjach ogólnych NHA.

Wykorzystując metodę Marshalla przygotowano do badań łącznie 72 różne próbki z mieszanką mineralno-asfaltową. Optymalną zawartość lepiszcza w mieszance określono metodą opisaną w instrukcji MS-2 Instytutu Asfaltowego. W pracy [33] wykazano, że zapotrzebowanie na asfalt zależy od powierzchni właściwej mieszanki, a optymalna zawartość lepiszcza wzrasta wraz ze stopniem zastąpienia wypełniacza popiołem dennym. Próbkę betonu asfaltowego przygotowano, uwzględniając założone wcześniej uziarnienie. Przygotowano próbki z czterema optymalnymi zawartościami asfaltu: (4,27%, 4,47% – oznacz. A, 4,53% – oznacz. B i 5,00% – oznacz. C oraz trzema różnymi zawartościami popiołu dennego w wypełniaczu (1,5%, 3% i 4,5%) – Rys. 3. Dla każdej

a small amount of silt-clay particles [23, 24]. Fine particles make up 50-90% of BA. Specific density of the BA material varies between 1.39 and 2.41, depending on its chemical properties [25, 26]. According to the AASHTO and USCS classification systems, CBA belongs to the A-1-a class and well-graded sand groups [27]. Before usage, unwanted elements like pyrite are removed from the BA material. To maintain proper grain size distribution, BA should also be free of dust. Finally, the BA material is dried to remove moisture, which might affect the reliability of mixture properties [28]. Table 1 shows the physical parameters of the CBA material used.

### 2.1.2. CHEMICAL PROPERTIES

Silica, alumina, iron, and a trace of calcium, magnesium, and sulphate make up the majority of bottom ash. The coal source determines its chemical makeup. The chemical composition of CBA is shown in Table 2.

Table 2. Chemical composition of CBA determined by means of X-ray fluorescence (XRF) [29]  
Tablica 2. Skład chemiczny popiołu dennego określony z użyciem metody fluorescencji rentgenowskiej (XRF) [29]

### 2.2. MIX DESIGN METHOD FOR ASPHALT SAMPLE PREPARATION

The Marshall mix design approach was employed in this investigation, in accordance with the MS-2 manual by the Asphalt Institute [30]. The Marshall mix design method is also compatible with AASHTO T245 [31]. The AASHTO T245 and NHA General Specification's [32] test procedures were used to prepare laboratory specimens. Table 3 shows the NHA General Specification.

Table 3. NHA General Specifications [31]  
Tablica 3. Specyfikacje ogólne NHA [31]

Description Opis	NHA General Specification 1998 Specyfikacje ogólne NHA 1998
Compaction (blows) Zagęszczenie (liczba uderzeń)	75
Stability / Stabilność [kg]	1000 (min)
Flow [0.25 mm] Osiedlenie [0,25 mm]	8 – 14

The Marshall mix design method was used to make a total of 72 mixes. The Asphalt Institute mix design method (MS-2) was used to determine the optimum binder content (OBC).

z wymienionych powyżej zawartości popiołu w wypełniaczu przygotowano 12 próbek z MMA. Próbki o zastąpieniu 1,5% (v/v) typowego wypełniacza popiołem i o różnych zawartościach asfaltu oznaczono więc odpowiednio „1.5A”, „1.5B” i „1.5C”; próbki o zastąpieniu 3% (v/v) typowego wypełniacza popiołem oznaczono jako: „3A”, „3B” i „3C”, zaś próbki o zawartości 4,5% (v/v) popiołu dennego w wypełniaczu: „4.5A”, „4.5B” i „4.5C”. W przygotowanych do badań próbkach popiół denny (Rys. 3) zastępował zatem tradycyjny wypełniacz, tj. maczkę kamienną odpowiednio w proporcji 1,5%, 3% i 4,5% (v/v).

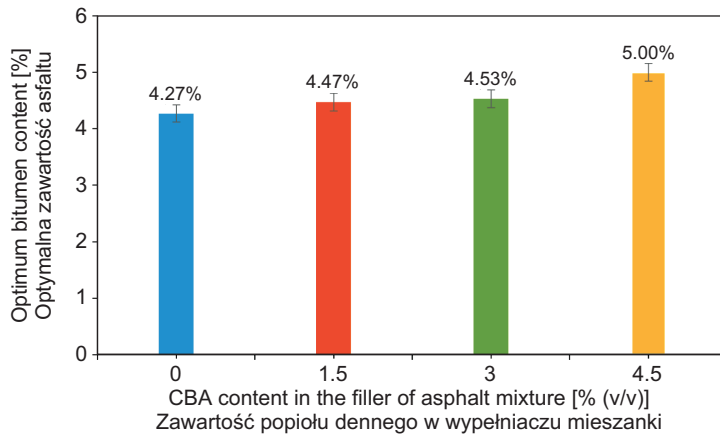


Fig. 3. Optimum bitumen content obtained using different CBA contents in filler

Rys. 3. Optymalna zawartość asfaltu w mieszance dla różnych zawartości procentowych popiołu dennego w wypełniaczu

## 3. WYNIKI BADAŃ I Dyskusja

### 3.1. OGÓLNY CEL BADAŃ

Przeprowadzone badania miały na celu ocenę mieszanek w których częściowo zastąpiono wypełniacz różną zawartością popiołu dennego jako surowowca o alternatywnym – w stosunku do niego – zastosowaniu. Parametry mieszanki oceniono na podstawie pomiarów koleinowania, trwałości zmęczeniowej i modułu dynamicznego otrzymanych w wyniku badań próbek metodą Marshalla.

### 3.2. ANALIZA STABILNOŚCI MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH

#### 3.2.1. Stabilność wg Marshalla

Zgodnie z wymaganiami normy ASTM D 6927 [34], stabilność i osiadanie zbadano w prasie Marshalla z automatycznym zapisem wyników i stałym przyrostem przemieszczenia 50 mm/min. Wyniki wskazują, że początkowo wraz ze wzrostem zawartości lepszycza stabilność wzrasta, a po osiągnięciu optymalnej zawartości asfaltu stabilność próbki zaczyna

Higher absorption of bituminous binder results from higher specific surface. Therefore, the optimum bituminous binder content increases with BA replacement ratio [33]. Asphalt concrete samples were prepared keeping in view the gradation that was selected. Four different bitumen contents: 4.27%, 4.47% (labelled A), 4.53% (B), and 5.00% (C), and three different contents of CBA in filler (1.5%, 3%, and 4.5% by volume) were used to prepare the samples (Fig. 3). For each CBA content in filler, 12 asphalt mix samples were prepared. Blended Gradation-1 samples were labelled “1.5A”, “1.5B”, and “1.5C”. Blended Gradation-2 samples were labelled “3A”, “3B”, and “3C”, and Blended Gradation-3 samples were labelled “4.5A”, “4.5B”, and “4.5C”. CBA partially replaces (1.5%, 3% and 4.5%) the traditional filler material, stone dust (SD).

## 3. RESEARCH RESULTS AND DISCUSSIONS

### 3.1. THE GENERAL AIM OF TESTS

The purpose of the conducted tests was to evaluate the performance of HMA mixtures with using coal bottom ash as partial filler replacement. Performance tests such as stability, rutting, fatigue, and dynamic modulus were used to evaluate the mixtures.

### 3.2. STABILITY ANALYSIS OF ASPHALT MIXTURES

#### 3.2.1. Marshall stability

According to ASTM D 6927 [34], a compression machine with an automatic data recorder and a deformation rate of 50 mm/min was used to evaluate the Marshall stability and flow of asphalt mixtures. The results indicate that with an increase in bitumen content, the stability initially increases; when bitumen content reaches the OBC, stability starts to decrease, as shown in Fig. 4. Mixtures with CBA in the filler displayed relatively better stability than the one with crushed SD only. At bitumen contents of 4.27%, 4.47%, 4.53% and 5.00%, the stability values of the mixes containing CBA and SD as filler were 17.56 kN, 17.99 kN, 19.92 kN and 15.33 kN, respectively (Fig. 4). AASHTO specifications (minimum of 3.5 kN) were met for stability values for both combinations. The results reveal that an asphalt mixture containing CBA is more stable than an asphalt mixture with crushed SD. Better adhesion between the aggregate and the bitumen results in increased stability. Results of a different published study [35] showed that using rice husk ash (RHA) in place of conventional filler stiffens the binder, increases bitumen



spadać (Rys. 4). Mieszanki zawierające popioły denne w wypełniaczu wykazywały wyższą stabilność niż mieszanka zawierająca jako wypełniacz samą mączkę kamienną. Przy zawartościach asfaltu 4,27%, 4,47%, 4,53% oraz 5,00%, wartości stabilności mieszanek zawierających w wypełniaczu popiół denne i mączkę kamienną wyniosły odpowiednio 17,56 kN, 17,99 kN, 19,92 kN i 15,33 kN (Rys. 4). Zarówno mieszanki z częściowym zastąpieniem tradycyjnego wypełniacza popiołami, jak i bez udziału popiołu spełniły wymogi specyfikacji AASHTO w zakresie stabilności (minimum 3,5 kN). Wyniki badań wykazały, że stabilność mieszanek MMA z popiołami dennymi w wypełniaczu jest wyższa od stabilności mieszanek z tradycyjnym wypełniaczem w postaci mączki kamiennej. Lepsza adhezja między kruszywem a lepiszczem przekłada się zatem na wzrost stabilności. Wyniki innych opublikowanych badań [35] wykazały także, że zastosowanie innego popiołu uzyskanego ze spalania przetworzonej łuski ryżowej w konwencjonalnym wypełniaczu zwiększa sztywność mieszanki, kohezję lepiszcza oraz adhezję lepiszcza do kruszywa. W przyszłości – w celu zweryfikowania tych obserwacji – planowane jest przeprowadzenie dalszych badań mieszanek, np. zmęczeniowych w zakresie pośredniego rozciągania.

### 3.2.2. Osiadanie w badaniu Marshalla

Na Rys. 5 przedstawiono wyniki badań osiadania mieszanki uzyskane w przypadku zastosowania różnych zawartości popiołów dennych w wypełniaczu. Zamieszczone dane sugerują, że osiadanie asfaltu wzrasta wraz ze wzrostem zawartości popiołu dennego w wypełniaczu. Osiadanie mieszanki z największą zawartością popiołu dennego w wypełniaczu wyniosło 13,33 mm, natomiast osiadanie mieszanki z mączką kamienną jako wypełniaczem (0% zastąpienia popiołem) wyniosło 10,56 mm, przy optymalnych zawartościach asfaltu odpowiednio 5,00% i 4,27%. Prawdopodobnie lekki wzrost wartości osiadania asfaltu jest związany z zawartością popiołu dennego w wypełniaczu mieszanki. Niemniej jednak, wszystkie mieszanki spełniły wymogi NHA w zakresie osiadania. Należy mieć na uwadze, że wartość parametru osiadania w badaniu Marshalla nie odzwierciedla odporności MMA na deformacje trwałe.

### 3.3. KOLEINOWANIE MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH

Badanie przeprowadzono zgodnie z normą AASHTO T 324 [36]. Głębokość koleiny zmierzono, a następnie przedstawiono jako funkcję liczby przejeżdżających koła w koleinomierzu Cooper (Rys. 6). Jako temperaturę badania przyjęto 58°C, ponieważ jest to najwyższa temperatura letnia, jaką odnotowana w Pakistanie.

cohesion, and improves adhesion of bitumen to the aggregate. Further tests (for instance, the indirect tensile fatigue test) will be carried out in future studies to authenticate this principle.

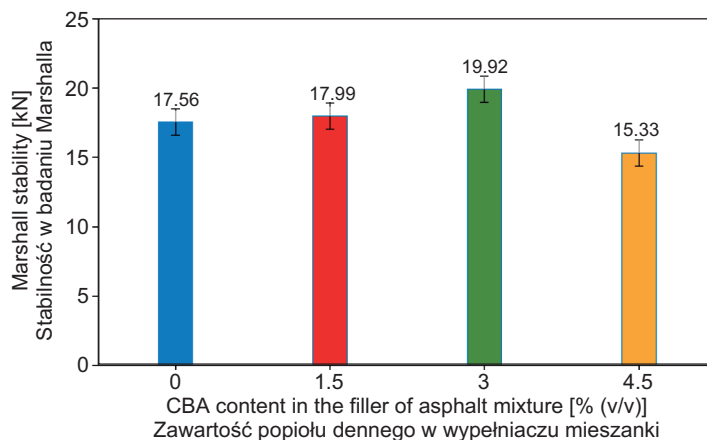


Fig. 4. Marshall stability vs. mix type (percentage of CBA in filler, by volume)

Rys. 4. Stabilność mieszanki w badaniu Marshalla w zależności od procentowej zawartości (v/v) popiołu dennego w wypełniaczu

### 3.2.2. Marshall flow

Fig. 5 shows the flow values of the asphalt mixtures versus CBA content in filler. The data suggests that flow increases with an increase in bitumen content. The flow value of the mix with CBA was 13.33 mm, whereas the flow value of the mix with crushed SD was 10.56 mm at the OBC of 5.00% and 4.27%, respectively. It is likely that the modest increase in flow value is due to the amount of CBA employed in the mixture. However, both combinations met the requirements of the NHA road specifications. It is necessary to mention that the flow value does not accurately reflect the permanent deformation resistance of an asphalt mixture.

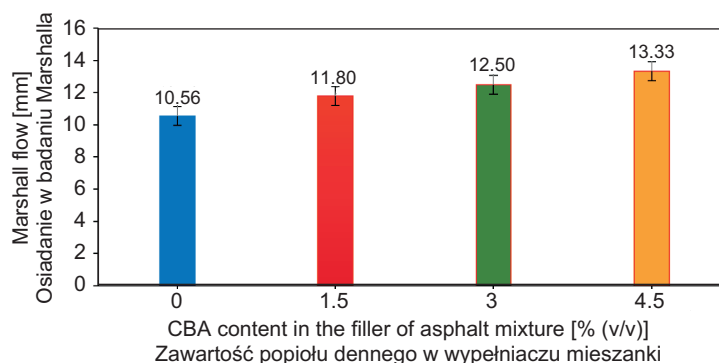


Fig. 5. Marshall flow vs. mix type (percentage of CBA in filler, by volume)

Rys. 5. Osiadanie mieszanki w badaniu Marshalla w zależności od procentowej zawartości (v/v) popiołu dennego w wypełniaczu



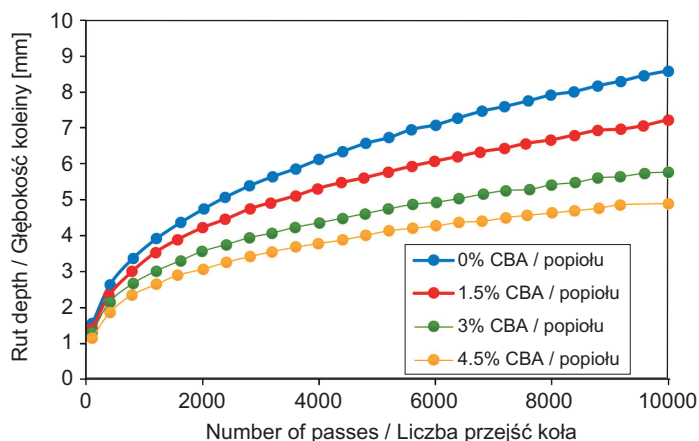


Fig. 6. Influence of CBA content in filler on rut depth of asphalt mixtures caused by the number of passes

Rys. 6. Wpływ zawartości popiołu dennego w wypełniaczu mieszanki na głębokość koleiny spowodowanej liczbą przejeżdżonej koła

Wraz ze wzrostem zawartości procentowej popiołu dennego w wypełniaczu następowało zmniejszenie głębokości koleiny w mieszance – najwyższą jej głębokość zaobserwowano dla konwencjonalnej (typowej) MMA bez zawartości popiołu. Po 10.000 przejeżdżonej koła mieszanka MMA z 4,5% (v/v) udziałem popiołu w wypełniaczu wykazywała najniższą głębokość koleiny. W porównaniu z głębokością koleiny zmierzoną odpowiednio w przypadku konwencjonalnej MMA nie zawierającej popiołu dennego wartość ta była o około 42% niższa. Spadek głębokości koleiny jest zatem spowodowany częściowym zastąpieniem wypełniacza popiołem, co sprawia, że mieszanka staje się sztywniejsza i bardziej sprężysta.

### 3.4. ANALIZA MODUŁU DYNAMICZNEGO MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH

Badanie przeprowadzono zgodnie z normą AASHTO T 342 [37]. Celem badania była ocena odporności MMA na deformacje trwałe. Wyniki analizy przedstawiono na Rys. 7. Mieszanka ma wysoką odporność na deformacje trwałe, jeśli uzyskane wartości modułu dynamicznego są wysokie [38, 39]. Porównanie otrzymanych wyników badań pokazuje, że wartość modułu dynamicznego mieszanki z udziałem popiołu dennego uległa istotnej poprawie w wyniku częściowego zastąpienia typowego wypełniacza popiołem. Wyniki na Rys. 7 wskazują, że moduł dynamiczny mieszanki MMA wzrasta wraz z częstotliwością obciążenia i spada ze wzrostem zawartości popiołu w wypełniaczu oraz – jak dowodzą autorzy w [40] – maleje wraz ze wzrostem temperatury. Ze względu na charakter odpowiedzi materiału mieszanki na obciążenia dynamiczne wartości modułu dynamicznego zarejestrowane przy danym obciążeniu będą więc różne przy różnych częstotliwościach oddziaływania.

### 3.3. RUTTING ANALYSIS OF ASPHALT MIXTURES

The test was conducted in accordance with AASHTO T 324 [36]. Rut depth was measured in a Cooper wheel tracker and presented as a function of the number of passes (Fig. 6). Test temperature of 58°C was chosen because it is the highest temperature in Pakistan during the summer season.

With increasing CBA content in filler (by volume), rut depth for a given number of wheel passes was reduced; the maximum rut depth was observed for the conventional asphalt without CBA. For 10,000 passes the asphalt mixture with 4.5% CBA in filler has the lowest rut depth. When compared to the conventional asphalt mixture containing 0% CBA, rut depth of the asphalt mixture with 4.5% CBA in filler was reduced by approximately 42%. Rut depth is reduced due to the addition of CBA, which makes the asphalt mixture stiff and elastic.

### 3.4. DYNAMIC MODULUS ANALYSIS OF ASPHALT MIXTURES

The test was conducted in accordance with AASHTO T 342 [37]. This test is used to assess the resistance of asphalt mixture against permanent deformation. The results are displayed in Fig. 7. An asphalt mixture will have good permanent deformation resistance if the dynamic modulus values are high [38, 39]. As the comparison shows, the dynamic modulus of samples containing CBA is improved (Fig. 7). The results shown in Fig. 7 indicate that the dynamic modulus of an asphalt mixture increases with an increase in loading frequency and decreases with an increase in the test temperature [40]. The dynamic modulus would be affected by the dynamic deformation response, which would alter with loading frequency under the same load.

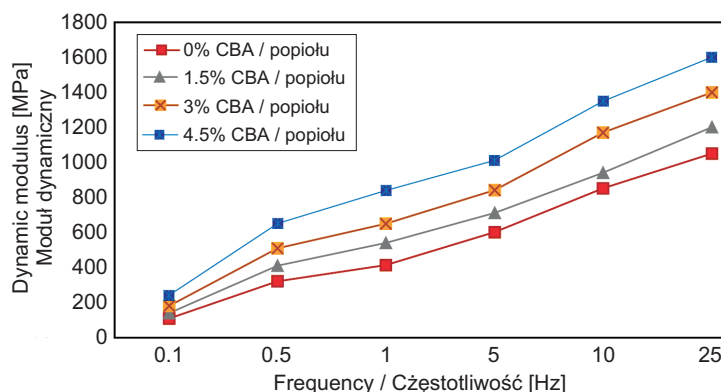


Fig. 7. Comparison of dynamic modulus values obtained for different CBA contents in filler by volume

Rys. 7. Porównanie wartości modułów dynamicznych mieszanki w funkcji częstotliwości obciążenia przy różnych zawartościach procentowych (v/v) popiołów dennych w wypełniaczu

### 3.5. ANALIZA TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ MIESZANKI MINERALNO-ASFALTOWEJ

Trwałość zmęczeniową mieszanki oceniono z zastosowaniem procedury AASHTO T321 [41]. Badanie przeprowadzono w temperaturze 20°C. Spękania zmęczeniowe stanowią częste uszkodzenie nawierzchni podatnych [42]. Aby ocenić trwałość zmęczeniową próbek wyrażoną jako liczba cykli obciążeń prowadząca do uszkodzenia, przeprowadzono badanie w schemacie belki czteropunktowo zginanej [43].

Jak pokazano na Rys. 8, trwałość zmęczeniowa mieszanki wzrosła wraz ze wzrostem zawartości popiołu dennego w wypełniaczu. Poprawę tego parametru mieszanki można przypisać m.in. wzrostowi zawartości lepiszcza, następującemu wraz ze wzrostem zawartości popiołów dennych w wypełniaczu. W połączeniu z lepszą kohezją w układzie kruszywo-lepiszcze mogło to przyczynić się do wzrostu trwałości zmęczeniowej MMA. Dodatek popiołu dennego do wypełniacza (poprzez jego częściowe zastąpienie) wiązał się zatem z wyraźnym wzrostem trwałości zmęczeniowej MMA w porównaniu do konwencjonalnej mieszanki, tj. bez udziału tego składnika w wypełniaczu.

## 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Celem niniejszego badania było określenie wpływu popiołów dennych, zastosowanych jako alternatywny wypełniacz, na parametry wytrzymałościowe mieszanki mineralno-asfaltowej. Przygotowano próbki MMA, w których zdefiniowano procent (v/v) częściowego zastąpienia wypełniacza popiołem. W celu ustalenia parametrów wytrzymałościowych mieszanki przeprowadzono badanie Marshalla, badanie koleinowania, badanie modułu dynamicznego oraz badanie trwałości zmęczeniowej w schemacie czteropunktowego zginania. Na podstawie otrzymanych wyników badań sformułowano następujące wnioski:

1. Stabilność mieszanki mineralno-asfaltowej określona wg metody Marshalla wzrasta po zastosowaniu popiołów dennych w wypełniaczu; w przeprowadzonych badaniach dodatek popiołów dennych początkowo skutkowało wzrostem stabilności MMA, lecz po przekroczeniu zawartości 3% (v/v) popiołu w wypełniaczu zaobserwowano spadek wartości tego parametru.
2. Badanie próbek w koleinomierzu wykazało, że zastosowanie popiołów dennych w wypełniaczu prowadziło do wzrostu odporności MMA na koleinowanie tj. do zmniejszenia deformacji trwałych. Może być to związane z faktem, że zawartość popiołów dennych w wypełniaczu zmniejsza wrażliwość mieszanki na zmiany temperatury i powoduje wzrost modułu sztywności.

### 3.5. FATIGUE ANALYSIS OF ASPHALT MIXTURES

The AASHTO T321 [41] procedure is used to evaluate the fatigue life of asphalt mixtures. The test was carried out at the temperature of 20°C. Flexible asphalt pavements are often affected by this type of distress [42]. The four-point bending beam fatigue test was used to evaluate the fatigue resistance in terms of loading cycles to failure [43].

As visible in Fig. 8, the number of loading cycles to failure increases as the CBA percentage in filler increases. This improvement can be credited to an increase in binder content with increased CBA percentage, which may have improved the bond between aggregate and binder, resulting in greater fatigue life of the asphalt mixture. Based on comparison with the control mixture, fatigue life can be significantly increased by adding CBA to conventional filler in asphalt mixtures.

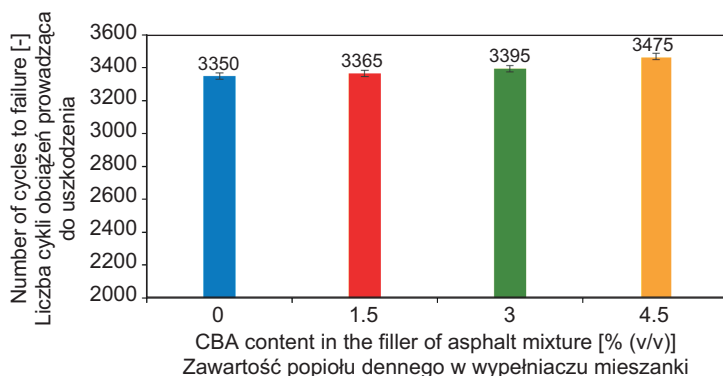


Fig. 8. Relationship between the number of cycles to failure and CBA content in the filler by percentage volume  
Rys. 8. Zależność liczby cykli obciążeń prowadzących do uszkodzenia mieszanki od zawartości procentowej (v/v) popiołu dennego w wypełniaczu

## 4. SUMMARY AND CONCLUSIONS

The purpose of this study was to investigate the influence of CBA used as partial replacement of traditional filler on mixture performance. To this end, tests such as Marshall stability test, wheel tractor test, dynamic modulus test, and four-point beam fatigue test were carried out on asphalt mixtures to evaluate their properties. The following conclusions were drawn on the basis of the experimental programme performed in this study:

1. Marshall stability is increased by introducing CBA as filler in HMA. The Marshall test results showed that adding CBA to filler initially increased the Marshall stability of the mixture, while adding more than 3% of CBA (by volume of filler) caused the Marshall stability to decrease.

3. W przypadku wszystkich zastosowanych częstotliwości obciążenia próbek wartości modułów dynamicznych dla mieszanek zawierających popioły denne w wypełniaczu były wyraźnie wyższe od modułów MMA zawierających wyłącznie konwencjonalny wypełniacz. Najwyższe wartości modułu zaobserwowano przy zawartości popiołów dennych 4,5% (v/v) w wypełniaczu. Miało to związek ze wzrostem sztywności lepszca.
4. Dodatek popiołów dennych do wypełniacza w celu jego częściowego zastąpienia poprawił także odporność MMA na zmęczenie; w ten sposób możliwe stało się osiągnięcie wzrostu trwałości zmęczeniowej mieszanki o około 3,73%. Mieszanka zawierająca 4,5% (v/v) popiołów dennych w składzie wypełniacza wykazała najwyższą liczbę cykli obciążeń do wystąpienia uszkodzenia.
5. Stwierdzono, że dodatek popiołów dennych do wypełniacza w MMA może poprawić jej wytrzymałość na uszkodzenia, jednakże dla szerszego ich stosowania niezbędne są dalsze modyfikacje przyjmowanych procedur badawczych. Zagospodarowanie popiołów dennych w większych ilościach miałyby także pozytywny wpływ na środowisko naturalne. Zwiększenie zastosowania popiołów dennych w mieszankach MMA wymaga więc prowadzenia dalszych badań w tym zakresie.
2. Results of the wheel tracking test showed that introduction of CBA increased the specimens' resistance to rutting and decreased their permanent deformation. This may be due to the fact that CBA makes specimens more resistant to temperature changes and improves their stiffness modulus.
3. Dynamic modulus values of asphalt mixtures containing CBA in filler were considerably higher than those of conventional asphalt at all measured temperatures and frequencies, with the highest values obtained with 4.5% CBA in filler (by volume). This is due to the stiffening of the binder.
4. Addition of CBA to conventional filler in asphalt mixtures improved their fatigue resistance; it may increase fatigue life by up to 3.73%. Asphalt mixture containing 4.5% (v/v) CBA in filler withstood the highest number of load cycles to failure.
5. It can be noted that CBA may improve the structural properties of pavements, although some modifications are further required to enable its wider use. If CBA is used in large quantities, its wider recycling will have a very positive impact on the environment. More research is needed to maximize the usage of CBA in asphalt mixtures.

## BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Joshi R.C., Lohita R.P.*: Fly Ash in Concrete: Production, Properties and Uses. Gordon and Breach, Amsterdam, 1997
- [2] *Wang N., Sun X., Zhao Q., Yang Y., Wang P.*: Leachability and adverse effects of coal fly ash: A review. *Journal of Hazardous Materials*, **396**, 2020, ID article: 122725, DOI: 10.1016/J.JHAZMAT.2020.122725
- [3] *Ahmaruzzaman M.*: A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science*, **36**, 3, 2010, 327-363, DOI: 10.1016/J.PECS.2009.11.003
- [4] *Lior N.*: Sustainable energy development: The present (2009) situation and possible paths to the future. *Energy*, **35**, 10, 2010, 3976-3994, DOI: 10.1016/J.ENERGY.2010.03.034
- [5] *Yao Z.T., Ji X.S., Sarker P.K., Tang J.H., Ge L.Q., Xia M.S., Xi Y.Q.*: A comprehensive review on the applications of coal fly ash. *Earth-Science Reviews*, **141**, 2015, 105-121, DOI: 10.1016/J.EARSCIREV.2014.11.016
- [6] *Rafieizonooz M., Mirza J., Salim M.R., Hussin M.W., Khankhaje E.*: Investigation of coal bottom ash and fly ash in concrete as replacement for sand and cement. *Construction and Building Materials*, **116**, 2016, 15-24, DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.04.080
- [7] *Abubakar A.U., Baharudin K.S.*: Tanjung Bin Coal Bottom Ash: From Waste to Concrete Material. *Advanced Materials Research*, **705**, 2013, 163-168, DOI: 10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMR.705.163
- [8] *Muthusamy K., Rasid M.H., Jokhio G.A., Mokhtar Albshir Budiea A., Hussin M.W., Mirza J.*: Coal bottom ash as sand replacement in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, **236**, 2020, ID article: 117507, DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.117507
- [9] *Rostami R., Klemm A.J.*: Influence of superabsorbent polymers on properties of fiber reinforced mortars containing fly ashes. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **19**, 2, 2020, 149-163, DOI: 10.7409/rabd.020.010
- [10] *Singh N., Shehnazdeep Bhardwaj A.*: Reviewing the role of coal bottom ash as an alternative of cement. *Construction and Building Materials*, **233**, 2020, ID article: 117276, DOI: 10.1016/j.conbuilmat.2019.117276
- [11] *Raza M.A., Khatri K.L., Memon M.A., Rafique K., Haque M.I.U., Mirjat N.H.*: Exploitation of Thar coal field for power generation in Pakistan: A way forward to sustainable energy future. *Energy Exploration & Exploitation*, **40**, 4, 2022, 1173-1196, DOI: 10.1177/01445987221082190



- [12] Pakistan's Thar Coal Power Generation Potential, Private Power & Infrastructure Board. NEPRA, Pakistan, 2008
- [13] *Argiz C., Sanjuán M.Á., Menéndez E.*: Coal Bottom Ash for Portland Cement Production. *Advances in Materials Science and Engineering*, **2017**, 2017, ID article: 6068286, DOI: 10.1155/2017/6068286
- [14] *Chuanfeng Z., Yupeng F., Zhuang M., Xue Y.*: Influence of mineral filler on the low-temperature cohesive strength of asphalt mortar. *Cold Regions Science and Technology*, **133**, 2017, 1-6, DOI: 10.1016/J.COLDREGIONS.2016.10.006
- [15] *Cheng Y., Tao J., Jiao Y., Tan G., Guo Q., Wang S., Ni P.*: Influence of the properties of filler on high and medium temperature performances of asphalt mastic. *Construction and Building Materials*, **118**, 2016, 268-275, DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.05.041
- [16] *Ramzi N.I.R., Shahidan S., Maarof M.Z., Ali N.*: Physical and Chemical Properties of Coal Bottom Ash (CBA) from Tanjung Bin Power Plant. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, **160**, 1, 2016, ID article: 012056, DOI: 10.1088/1757-899X/160/1/012056
- [17] *Tenza-Abril A., Saval J., Cuenca A.*: Using sewage-sludge ash as filler in bituminous mixes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **27**, 4, 2015, DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001087
- [18] *Bajare D., Bumanis G., Upeniece L.*: Coal combustion bottom ash as microfiller with pozzolanic properties for traditional concrete. *Procedia Engineering*, **57**, 2013, 149-158, DOI: 10.1016/j.proeng.2013.04.022
- [19] *Singh M., Siddique R.*: Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on properties of concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, **72**, 2013, 20-32, DOI: 10.1016/J.RESCONREC.2012.12.006
- [20] *Muniandy R., Aburkaba E.E.*: The effect of type and particle size of industrial wastes filler on indirect tensile stiffness and fatigue performance of stone mastic asphalt mixtures. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, **5**, 11, 2011, 297-308
- [21] *Zulkati A., Diew W.Y., Delai D.S.*: Effects of fillers on properties of asphalt-concrete mixture. *Journal of Transportation Engineering*, **138**, 7, 2012, 902-910, DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000395
- [22] *Ghaffar A., Siddiqi Z.A., Ahmed K.*: Assessing Suitability of Margalla Crush for Ultra High Strength Concrete. *Pakistan Journal of Engineering and Applied Sciences*, **7**, 2010, 38-46
- [23] *El Moudni El Alami S., Moussaoui R., Monkade M., Lahlou K., Hasheminejad N., Margaritis A., Van den Bergh W., Vuye C.*: Lime Treatment of Coal Bottom Ash for Use in Road Pavements: Application to El Jadida Zone in Morocco. *Materials*, **12**, 17, 2019, 2674, DOI: 10.3390/ma12172674
- [24] *Lokeshappa B., Dikshit A.K.*: Behaviour of Metals in Coal Fly Ash Ponds. *APCBEE Procedia*, **1**, 2012, 34-39, DOI: 10.1016/j.apcbee.2012.03.007
- [25] *Baite E., Messan A., Hannawi K., Tsobnang F., Prince W.*: Physical and transfer properties of mortar containing coal bottom ash aggregates from Tefereyre (Niger). *Construction and Building Materials*, **125**, 2016, 919-926, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.117
- [26] *Jarusiripot C.*: Removal of reactive dye by adsorption over chemical pretreatment coal based bottom ash. *Procedia Chemistry*, **9**, 2014, 121-130, DOI: 10.1016/j.proche.2014.05.015
- [27] *Rathnayake M., Julnipitawong P., Tangtermsirikul S., Toochinda P.*: Utilization of coal fly ash and bottom ash as solid sorbents for sulfur dioxide reduction from coal fired power plant: Life cycle assessment and applications. *Journal of Cleaner Production*, **202**, 2018, 934-945, DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.08.204
- [28] *Colonna P., Berloco N., Ranieri V., Shuler S.T.*: Application of Bottom Ash for Pavement Binder Course. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, **53**, 2012, 961-971, DOI: 10.1016/j.sbspro.2012.09.945
- [29] *Khitab A., Bukhari S., Tayyab S.*: Effect of Partial Replacement of Sand by Coal Bottom Ash in Concrete. *Southern Journal of Research*, **2**, 2, 2022, 102-106, DOI: 10.20021/sjr.v2i2.56
- [30] MS-2 Asphalt Mix Design Methods. Asphalt Institute, Pakistan, 2014
- [31] AASHTO T 245 Standard Method of Test for Resistance to Plastic Flow of Asphalt Mixtures Using Marshall Apparatus. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, 2022
- [32] NHA General Specification. National Highway Authority (NHA), Government of Pakistan, 1998
- [33] *Luo H., Chen S., Lin D.F., Cai X.*: Use of incinerator bottom ash in open-graded asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, **149**, 2017, 497-506, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.164
- [34] ASTM D6927 Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures. American Society of Testing and Materials (ASTM), Washington, 2015
- [35] *Ameli A., Babagoli R., Norouzi N., Jalali F., Poorheydari Mamaghani F.*: Laboratory evaluation of the effect of coal waste ash (CWA) and rice husk ash (RHA) on performance of asphalt mastics and Stone matrix asphalt (SMA) mixture. *Construction and Building Materials*, **236**, 2020, ID article: 117557, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117557
- [36] AASHTO T 324 Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Asphalt Mixtures. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, 2019



- [37] AASHTO T 342 Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA). American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, 2019
- [38] *Tang F., Ma T., Zhang J., Guan Y., Chen L.*: Integrating three-dimensional road design and pavement structure analysis based on BIM. *Automation in construction*, **113**, 2020, ID article: 103152, DOI: 10.1016/J.AUTCON.2020.103152
- [39] *Yang J., Li Z., Xu X.*: Preparation and evaluation of cooling asphalt concrete modified with SBS and tourmaline anion powder. *Journal of Cleaner Production*, **289**, 2021, ID article: 125135, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125135
- [40] *Zhang W., Shen S., Faheem A., Basak P., Wu S., Muhammad L.*: Predictive quality of the pavement ME design program for field performance of warm mix asphalt pavements. *Construction and Building Materials*, **131**, 2017, 400-410, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.086
- [41] AASHTO T321 Standard Method of Test for Determining the Fatigue Life of Compacted Hot-Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, 2007
- [42] *Shen S., Zhang W., Shen L., Huang H.*: A statistical based framework for predicting field cracking performance of asphalt pavements: Application to top-down cracking prediction. *Construction and Building Materials*, **116**, 2016, 226-234, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.148
- [43] *Shen S., Zhang W., Wang H., Huang H.*: Numerical evaluation of surface-initiated cracking in flexible pavement overlays with field observations. *Road Materials and Pavement Design*, **18**, 1, 2017, 221-234, DOI: 10.1080/14680629.2016.1138879