



MARCIN GAJEWSKI<sup>1)</sup>  
RENATA HORODECKA<sup>2)</sup>  
WOJCIECH BAŃKOWSKI<sup>3)</sup>  
ALEKSANDRA GRZEGÓRSKA<sup>4)</sup>  
MACIEJ KŁOPOCIŃSKI<sup>5)</sup>

## EVALUATION OF THE EFFECT OF PROCESSED PLASTIC ADDITIVES ON THE PROPERTIES OF PAVING GRADE BITUMEN

### OCENA WPŁYWU DODATKÓW Z PRZETWORZONYCH TWORZYW SZTUCZNYCH NA WŁAŚCIWOŚCI ASFALTÓW DROGOWYCH

**STRESZCZENIE.** Asfalty modyfikowane są powszechnie stosowane w budownictwie drogowym. Znane są różne metody modyfikacji, a za najlepszą i najczęściej stosowaną uznaje się modyfikację polimerem SBS. W artykule zaprezentowano wyniki badań nad możliwością modyfikacji zwykłych lepiszczy drogowych w inny sposób, tj. przy wykorzystaniu przetworzonych tworzyw sztucznych pochodzących z recyklingu. Warunkiem wyjściowym dla tego typu modyfikacji jest zapewnienie stabilności wytworzonego materiału oraz nie pogorszenie jego właściwości funkcjonalnych w porównaniu do lepiszcza bazowego. W pracy zaprezentowano wybrane wyniki badań doświadczalnych przeprowadzonych na materiałach uzyskanych ze zmieszania konwencjonalnych asfaltów drogowych 50/70 oraz 70/100 z dodatkami wytworzonymi z PP, PS, LDPE, HDPE (oraz ich mieszankami). Dodatki te uzyskano w procesie pirolizy przy różnych technologiach wytwarzania z uwzględnieniem różnych wartości temperatury i czasu przetwarzania. Przeprowadzono badania podstawowe na 56 różnych kompozycjach asfaltu i dodatku w celu wyłonienia potencjalnie najlepszych wariantów do dalszej poszerzonej analizy. Zaproponowano metodę obiektywnego wyboru najlepszych mieszanin asfaltów z dodatkiem. Nie jest to klasyczna metoda rankingowa (przyznawanie punktów), a metoda bazująca na funkcji celu będącej sumą trzech funkcji składowych odpowiadających poszczególnym parametrom z odpowiednimi wagami. Metoda ta może być dość swobodnie kształtowana poprzez dobór wag albo odmienne propozycje funkcji składowych. Na tej podstawie wyłoniono dodatki, które mają najkorzystniejsze właściwości pod względem zastosowania do produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych.

**SŁOWA KLUCZOWE:** asfalt drogowy, HDPE, LDPE, PP, PS, recykling, tworzywa sztuczne, właściwości funkcjonalne.

**ABSTRACT.** Modified bituminous binders are widely used in road construction. Various types of modification are known; SBS polymer modification is considered the most advantageous and popular. The article presents the results of research focused on the possibility of modification of paving grade binders in a different manner, i.e. by using processed recycled plastics. The basic requirement in the case of this type of modification is that storage stability of the obtained material is ensured and that performance properties of the material do not deteriorate in comparison to those of the base binder. The work presents chosen test results of materials obtained by blending conventional paving grade bitumen 50/70 and 70/100 with additives produced from PP, PS, LDPE, HDPE (and their combinations). The additives were obtained in the process of pyrolysis, using different production parameters – processing temperature and time. Basic tests were performed on 56 different bitumen-additive blends in order to identify the most promising variants for further wider analysis. A method for objective selection of the best bitumen-additive blends was proposed. The proposed method is not a classic ranking method (attribution of points); it is based on an objective function composed of three component functions, which correspond to individual blend parameters and are assigned adequate weights. The method may be adjusted by selection of weights or use of different component functions. Based on the adopted method, additives with the most advantageous properties in terms of use in asphalt mixture production were identified.

**KEYWORDS:** HDPE, LDPE, paving grade bitumen, performance properties, plastics, PP, PS, recycling.

DOI: 10.7409/rabdim.023.015

<sup>1)</sup> Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa; mgajewski@ibdim.edu.pl

<sup>2)</sup> Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa; rhorodecka@ibdim.edu.pl

<sup>3)</sup> Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa; wbankowski@ibdim.edu.pl

<sup>4)</sup> Green Park VI, Sp. z o.o., ul. J. Słowackiego 59, 87-700 Aleksandrów Kujawski; a.grzegorska@greencapitalsa.com

<sup>5)</sup> Green Park VI, Sp. z o.o., ul. J. Słowackiego 59, 87-700 Aleksandrów Kujawski; maciej@klopocinski.pl

## 1. WSTĘP

Ochrona środowiska i zasobów naturalnych w ostatnich dziesięcioleciach stała się priorytetem w wielu gałęziach gospodarki. Recykling i powtórne wykorzystanie materiałów do tych samych zastosowań wydaje się zagadnieniem łatwiejszym do opanowania niż wykorzystanie materiałów odzyskanych w nowej formie lub innowacyjnych zastosowaniach. W budowie dróg bardzo wskazane i uzasadnione jest powtórne wykorzystanie materiałów z rozbiórki nawierzchni. Z rozbiórki warstw asfaltowych powstaje destrukta asfaltowy, który może być wykorzystany na kilka sposobów [1]. Najkorzystniejszym zastosowaniem jest wykorzystanie destrukta jako składnika nowych mieszanek asfaltowych w technologii z dozowaniem na gorąco lub ewentualnie na zimno. Innym sposobem jest wykorzystanie destrukta do wykonania podbudowy w technologii recyklingu głębokiego MCE [2, 3] lub MCAS [4]. Osobnym zagadnieniem jest wykorzystanie w budowie nawierzchni odpadów powstających w innych gałęziach przemysłu. Przykładem może być zastosowanie włókien [5, 6], pyłu gumowego [7-9], granulatu gumowego [10, 11] i innych [12, 13].

Do tej grupy należy również zagadnienie wykorzystania materiałów odpadowych – takich jak polipropylen (PP), niskiej i wysokiej gęstości polietylen (odpowiednio LDPE [14] i HDPE [15, 16]), poliuretan [13] oraz polistyren (PS) – jako dodatku do lepiszczy asfaltowych, który może modyfikować ich właściwości chemiczne i fizyczne [17-19]. W przypadku lepiszczy asfaltowych modyfikowanych dostępnych na rynku krajowym i zagranicznym dominują lepiszcza modyfikowane kopolimerem styren-butadien-styren (SBS), których właściwości są istotnie lepsze niż asfaltów drogowych [20]. Osiągnięcia ostatnich lat to zwiększenie stopnia modyfikacji polimerem SBS i rozpowszechnienie stosowania asfaltów wysokomodyfikowanych. Są to lepiszcza do stosowania przede wszystkim na drogach o dużym obciążeniu ruchem i o niekorzystnych warunkach eksploatacji. Wyniki badań i obserwacje terenowe wskazują, że stosowanie asfaltów wysokomodyfikowanych gwarantuje bardzo wysoką trwałość zmęczeniową [21, 22] oraz znakomitą odporność na pękanie niskotemperaturowe [23, 24]. Jediną wadą tego rozwiązania jest oczywiście istotnie wyższa cena produktu wynikająca z wysokich kosztów polimeru. Wobec tych faktów naturalnym kierunkiem wydaje się próba zastosowania materiałów z recyklingu tworzyw sztucznych, których dodatek do asfaltu powinien poprawiać jego właściwości, jednocześnie pozwalając na wykorzystanie materiałów odpadowych. W ostatnich latach kierunek ten jest bardzo widoczny w literaturze światowej [17, 19, 25]. Jej analiza pozwala zauważyć, że artykuły można podzielić na dwie zasadnicze grupy, tj. dotyczące zastosowania plastików w metodzie „na sucho” [26, 27] albo w metodzie „na mokro” [28].

## 1. INTRODUCTION

In the last decades, protection of environment and natural resources has become the priority in many branches of industry. Recycling and reuse of materials in their original applications seems less problematic than reuse of recovered materials in new forms or innovative applications. In road construction, reuse of reclaimed pavement material is highly recommended and justified. When old asphalt courses are milled, the reclaimed asphalt pavement (RAP) material may be used in several ways [1]. The most advantageous application of RAP is its usage in new asphalt mixtures in “hot” or “cold” dosing technology. Another application of RAP is its use in base courses produced in deep recycling technology, incorporating cement and bituminous emulsion [2, 3] or cement and foamed bitumen [4]. Use of waste from other branches of industry in road construction is a different issue, encompassing usage of fibers [5, 6], rubber powder [7-9], crumb rubber [10, 11] and other materials [12, 13].

This group of subjects also includes the problem of usage of waste materials – such as polypropylene (PP), low- and high-density polyethylene (LDPE [14] and HDPE [15, 16]), polyurethane [13] and polystyrene (PS) – as additives to bituminous binders, resulting in modification of their chemical and physical properties [17-19]. Modified bituminous binders available on the national and international markets are dominated by binders containing styrene-butadiene-styrene (SBS) copolymer; their properties are considerably better than those of paving grade bitumen [20]. Advances in the last years consisted in an increase in the level of SBS modification and more common usage of highly-modified binders. These binders are primarily meant for usage on roads subjected to high traffic load and unfavorable service conditions. Test results and field surveys indicate that the use of highly-modified bituminous binders guarantees very high fatigue life [21, 22] and outstanding resistance to low-temperature cracking [23, 24]. Obviously, the only disadvantage of this solution is the considerable price of the product, associated with high costs of the polymer. Therefore, it seems natural to attempt usage of recycled plastic materials, whose addition should improve the properties of bitumen, at the same time enabling reuse of waste. This trend has been very distinct in international literature in the last years [17, 19, 25]. Upon review of the literature, one may note that the articles can be divided into two main groups, i.e. those concerning usage of plastics in “dry” [26, 27] or “wet” methods [28]. In many research projects pertaining to this type of additives, analysis of

Często punktem wyjścia badań dotyczących tego typu dodatków jest analiza wpływu czystych polimerów, a dopiero w dalszej perspektywie – analizowanie dodatków stworzonych na bazie rzeczywistych odpadów. Zastosowanie rzeczywistych odpadów wymusza przygotowanie dodatku (jego obróbkę, rozdrobnienie, przesiewanie w celu oddzielenia poszczególnych frakcji itp.), a więc realizację pewnego procesu technologicznego, który zawsze wymaga dostarczenia energii. W ostatnich latach pojawiają się prace dotyczące dodatków wytworzonych w różnego typu procesach pirolitycznych, choć jest to ciągle rzadkość [29]. Niezależnie od procesu technologicznego, w którym jest wytwarzany/przygotowywany dodatek, warunkiem podstawowym jego zastosowania jest możliwość wprowadzenia go do lepiszcza (wspomniana już metoda „na mokro”) lub do mieszanki mineralno-asfaltowej (metoda „na sucho” [27]) tak, aby finalny produkt miał charakter homogeniczny [30]. Okazuje się, że sama metoda wprowadzenia dodatku (temperatura, sposób, technika i kolejność mieszania) do asfaltu w metodzie „na mokro” ma istotny wpływ na właściwości uzyskiwanej mieszaniny [31]. Kolejnym problemem (w przypadku rozwiązania „na mokro”) jest odporność uzyskiwanej mieszaniny na segregację składników, czyli jej stabilność [17, 32].

W niniejszej pracy przedstawiono proces wyboru mieszanin asfaltów uzyskanych z wykorzystaniem – przetworzonych w wyniku pirolizy – polimerów PP, LDPE, HDPE, PS i PE, które posiadają potencjał poprawy właściwości funkcjonalnych asfaltu bazowego. W artykule autorzy skoncentrowali się na zagadnieniu modyfikacji lepiszczy asfaltowych metodą „na mokro”. Jako że praca ta ma mieć charakter użytkowy, przeanalizowano także wpływ dodatków do asfaltu otrzymanych w wyniku zmieszania polimerów pochodzących z odpadów. W planowanych przyszłych pracach badany będzie dodatkowo wpływ czystości stosowanych odpadów oraz nieznacznych różnic w zawartości poszczególnych rodzajów składników polimerowych w dodatkach mieszanych. Takie podejście do opisanego zagadnienia może ograniczyć koszty związane z segregacją i przygotowaniem wsadu do procesu pirolizy, gwarantując tym samym możliwość wykorzystania w praktyce proponowanych rozwiązań.

W artykule zaprezentowano zestaw wyników badań podstawowych przeprowadzonych na 56 kompozycjach asfaltów drogowych i modyfikowanych z dodatkami przetworzonych tworzyw sztucznych PP, LDPE, HDPE, PS i PE.

the influence of virgin polymers is the starting point, and additives produced from real waste are analyzed only in further stages. Use of real waste material engenders the need for adequate preparation of the additive (its processing, fragmentation, sieving in order to extract individual fractions etc.); therefore, a certain technological process must be realized, which is always associated with energy demand. In the recent years, research works on additives produced in various pyrolytic processes started appearing, but they are still rare [29]. Regardless of the technological process of additive production/preparation, the fundamental requirement is that it should be possible to successfully introduce the additive into the binder (“wet” method) or asphalt mixture (“dry” method [27]) in order to obtain a homogeneous final product [30]. Apparently, the method of introduction of the additive into the binder (temperature, manner, technology and order of mixing) in the “wet” method has significant influence on the properties of the obtained blend [31]. Another problem (in the case of the “wet” method) is the resistance of the obtained blend to segregation, i.e. its storage stability [17, 32].

This paper presents the selection process of blends of bitumens with pyrolyzed polymers (PP, LDPE, HDPE, PS and PE) that may potentially improve performance properties of the base bitumen. In this work, the authors focused on the issue of bituminous binder modification using the “wet” method. Since this work is primarily meant to contribute to practical solutions, it will also encompass the analysis of additives composed of mixed polymer types originating from waste. The planned future works will include the influence of purity of waste as well as slight variations in the content of individual polymer types in mixed-polymer additives. This approach may reduce the costs related to segregation and preparation of waste material for pyrolysis, thus guaranteeing practical feasibility of the presented solutions.

This work encompasses a set of results from basic tests performed on 56 different blends of paving grade bitumen with additives produced from processed PP, LDPE, HDPE, PS and PE.

## 2. GENERAL DESCRIPTION OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF ADDITIVE PREPARATION

The developed process of preparation of additives for asphalt mixtures and binders consists in thermal processing of polymer waste materials in a closed pyrolysis reactor,

## **2. OGÓLNY OPIS PROCESU TECHNOLOGICZNEGO PRZYGOTOWANIA DODATKÓW DO ASFALTÓW**

Opracowany sposób wytworzenia dodatku do mieszanek mineralno-asfaltowych i asfaltów polega na termicznym przetwarzaniu zawartych w odpadach materiałów polimerowych w zamkniętym reaktorze pirolitycznym z odseparowaniem olejowych frakcji ciekłych węglowodorów i pochodnych, co nadaje uzyskiwanemu materiałowi pożądanych właściwości mechanicznych i adhezyjno-emulgujących.

Proces prowadzony jest w czterech następujących po sobie i łączących się ze sobą etapach, realizowanych w stożkowo-cylindrycznym obrotowym reaktorze pirolitycznym. Każdy etap prowadzony jest z zachowaniem parametrów (temperatura, stopień nagrzewania i czas przetwarzania) dostosowanych do stopnia zaawansowania procesu i optymalnych dla wydzielenia poszczególnych frakcji węglowodorowych. Odbierane ciekłe frakcje olejowe są gromadzone i wykorzystane w kolejnym cyklu produkcyjnym, natomiast niekondensujące frakcje są spalane w palniku technologicznym. Maksymalna temperatura wewnątrz reaktora w trakcie procesu wynosi 450°C.

Po zakończeniu procesu masę reakcyjną schładza się do temperatury około 250°C, a przetworzony materiał za pomocą naczynia technologicznego zlewa do odkrytej metalowej kувety w celu uzyskania cienkiej warstwy o grubości 5-10 mm. Zastygniętą, schłodzoną masę rozkrusza się na łupki i poddaje rozdrobieniu na granulaty o rozmiarach 3-5 mm.

## **3. PRZYGOTOWANIE PRÓBEK DO BADAŃ**

### **3.1. OKREŚLENIE ILOŚCI DODATKU I METODY JEGO WPROWADZANIA DO ASFALTU WYJŚCIOWEGO**

W celu określenia metodologii przygotowania próbek do badań przeprowadzone zostały próby wprowadzania dodatku do asfaltu drogowego 50/70 i 70/100. Na podstawie oceny konsystencji uzyskanych kompozycji przewidziano zakres ilości dodatku od 2,5% do 10% (m/m) w stosunku do asfaltu drogowego 50/70 i 70/100. Dopracowana została laboratoryjna metoda wprowadzania dodatku do asfaltu wyjściowego. Podstawowym elementem było wstępne rozdrobnienie dodatku. Następnie przygotowane zostały mieszanki asfaltu drogowego 50/70 i 70/100 z dodatkiem w różnych proporcjach i poddane badaniom penetracji w 25°C oraz temperatury mięknięcia *PiK*.

with separation of oily liquid fractions of hydrocarbons and their derivatives, which gives the obtained material the desired mechanical and adhesive-emulgative properties.

The process is performed in four successive and interconnected stages, carried out in a conical-cylindrical rotary pyrolysis reactor. Each stage is realized at a determined set of parameters (temperature, heating degree and processing time), selected according to the progress of the process and with optimum conditions for extraction of individual hydrocarbon fractions in mind. The extracted liquid oily fractions are collected and used in subsequent production cycle, while non-condensing fractions are burnt. The maximum temperature in the reactor during the process is 450°C.

When the process is finished, the reactive mass is cooled to approx. 250°C, and the processed material is poured into a metal tray in order to obtain a thin 5-10 mm layer. Cooled solidified mass is later broken into fragments and granulated to particle size of 3-5 mm.

## **3. PREPARATION OF TEST SPECIMENS**

### **3.1. DETERMINATION OF THE QUANTITY OF ADDITIVE AND THE METHOD OF ITS INTRODUCTION INTO THE BASE BITUMEN**

In order to determine the methodology of test specimen preparation, preliminary trials were performed, which consisted in introduction of additive into 50/70 and 70/100 paving grade bitumen. Based on evaluation of the consistency of the obtained preliminary blends, the authors adopted the range of additive quantity relative to bitumen quantity (by mass) of 2.5% to 10%. Laboratory method for introduction of additives into the base bitumen was revised. Firstly, the additive was subjected to fragmentation. Then the blends of 50/70 and 70/100 paving grade bitumen with various additive content were prepared and subjected to testing of penetration at 25°C and ring-and-ball softening point. In the case of the initial specimens, their temperature was increased until a homogeneous mixture was obtained. Based on the performed trials, it was established that in terms of adequate blend homogeneity in laboratory conditions one may assume 5% and 10% as the optimum additive quantity (relative to bitumen, by mass) for paving grade bitumen 50/70 and 70/100, respectively.

Uniform conditions of specimen preparation were adopted. Mixing time was adjusted in order to obtain fully homogeneous blends; in most cases it equaled approx. 3 min. Blending temperatures ranged from 160°C to 180°C and

Temperatura pierwszych przygotowywanych próbek była podnoszona do momentu uzyskania jednorodnej mieszanki. Na podstawie wykonanych prób ustalono, że do uzyskania jednorodnej mieszanki w warunkach laboratoryjnych można przyjąć jako optymalną ilość dodatków 5% w stosunku do asfaltu drogowego 50/70, natomiast do asfaltu 70/100 jako optymalną ilość przyjęto 10% dodatku w stosunku masowym do asfaltu.

Warunki przygotowania próbek asfaltów z dodatkami zostały ujednolicone. Czas mieszania był dostosowany do możliwości uzyskania jednorodnej mieszanki i w większości wynosił około 3 min. Natomiast temperatury mieszania zawierały się w przedziale od 160°C do 180°C i były dostosowane do właściwości poszczególnych dodatków. Ostatecznie przyjęto następujące warunki wprowadzania dodatków do asfaltu:

- mieszanie mechaniczne (mieszadło szybkoobrotowe),
- temperatury wygrzewania od 160°C do 180°C,
- czas wygrzewania: 1h,
- czas mieszania 3 min (tylko w przypadku PP wystarcza 1 min).



Fig. 2. Properly prepared blend specimens

Rys. 2. Prawidłowo przygotowane próbki mieszanki do badań

were adjusted to the properties of individual additives. Ultimately, the following conditions were adopted for introduction of additives into bitumen:

- mechanical mixing (high-speed rotary mixer),
- preheating temperatures between 160°C and 180°C,
- preheating time: 1h,
- mixing time: 3 min (1 min was sufficient only in the case of PP).



Fig. 1. Improperly prepared trial blends (excess of additive)

Rys. 1. Mieszanki do badań niewłaściwie przygotowane (za dużo dodatku)

### 3.2. RODZAJE ANALIZOWANYCH MIESZANIN

Dodatki do lepiszczy asfaltowych zostały wyprodukowane w procesie, który opisano w pkt. 2. korzystając z tak przygotowanych materiałów, przygotowano 56 rodzajów mieszanki (Tabl. 1), z uwzględnieniem podziału według różnych rodzajów dodatków, parametrów procesu (czasu przetwarzania i temperatury przetwarzania), stosunku procentowego dodatku do asfaltu i rodzaju lepiszcza bazowego (dwa asfalty drogowe 50/70 i 70/100). Zastosowano dodatki z przetworzonych

### 3.2. TYPES OF ANALYZED BLENDS

Additives for bituminous binders were produced in the process described in section 2. Using the materials prepared in this manner, 56 types of blends were produced (Table 1), taking into account various additive types, processing parameters (processing time and temperature), additive quantities and types of base bitumen (two paving grade bitumens: 50/70 and 70/100). Additives consisted of processed plastics (PP, LDPE, HDPE, PS and PE) or their combinations (GP MIX 1, GP MIX 2, PP\_HOMO, GP LDPE).

tworzyw sztucznych PP, LDPE, HDPE, PS i PE oraz ich mieszaniny (GP MIX 1, GP MIX 2, PP\_HOMO, GP LDPE).

Table 1. Tested blend compositions  
Tablica 1. Kompozycje mieszanin poddanych badaniom

No. Lp.	Additive No. Nr dodatku	Specimen No. Nr próbki	Additive type Rodzaj dodatku	$T$ [°C]	$t$ [h]	Base bitumen Rodzaj lepiszcza wyjściowego	Additive quantity relative to bitumen (by mass) [%] Ilość dodatku w stosunku do asfaltu (m/m) [%]
1	1	1.1	HDPE	370	nd / bd *)	50/70	5.0
2		1.2		370	nd / bd *)	50/70	10.0
3	2	2.1		380	2.00	50/70	5.0
4	3	3.1		435	4.00	50/70	5.0
5		3.2		435	4.00	50/70	10.0
6	4	4.1	PP	250	1.20	50/70	5.0
7	5	5.1		300	2.00	50/70	5.0
8		5.2		300	2.00	50/70	3.0
9		5.3		300	2.00	50/70	4.0
10		5.4		300	2.00	50/70	4.0
11	6	6.1		350	2.25	50/70	5.0
12		6.2		350	2.25	50/70	3.0
13		6.3		350	2.25	70/100	5.0
14	7	7.1		350	3.37	50/70	5.0
15		7.2		350	3.37	50/70	2.5
16	8	8.1		320	4.25	50/70	5.0
17		8.2		320	4.25	50/70	8.0
18		8.3		320	4.25	50/70	8.0
19		8.4		320	4.25	50/70	10.0
20		8.5		320	4.25	70/100	10.0
21	9	9.1	PS	200	1.20	50/70	5.0
22	10	10.1		250	1.40	50/70	5.0
23	11	11.1		300	2.00	50/70	5.0
24	12	12.1		350	2.30	50/70	5.0
25	13	13.1		350	3.15	50/70	5.0
26	14	14.1		355	3.30	50/70	5.0
27	15	15.1		240	2.20	50/70	5.0
28	16	16.1	300	2.50	50/70	5.0	
29	17	17.1	350	3.20	50/70	5.0	
30	18	18.1	350	3.20	50/70	5.0	
31	19	19.1	400	3.35	50/70	5.0	
32	20	20.1	427	3.50	50/70	5.0	
33		20.2	427	3.50	70/100	10.0	
34	21	21.1	428	4.10	50/70	5.0	
35	22	22.1	320	5.00	50/70	5.0	
36		22.2	320	5.00	50/70	10.0	
37		22.3	320	5.00	70/100	10.0	

Table 1 (continued). Tested blend compositions  
 Tablica 1 (ciąg dalszy). Kompozycje mieszanin poddanych badaniom

No. Lp.	Additive No. Nr dodatku	Specimen No. Nr próbki	Additive type Rodzaj dodatku	$T$ [°C]	$t$ [h]	Base bitumen Rodzaj lepiszcza wyjściowego	Additive quantity relative to bitumen (by mass) [%] Ilość dodatku w stosunku do asfaltu (m/m) [%]
38	23	23.1	GP MIX_1	325	3.20	50/70	5.0
39	24	24.1		350	4.00	50/70	5.0
40	25	25.1		375	4.12	50/70	5.0
41	26	26.1		400	4.25	50/70	5.0
42	27	27.1		412	4.50	50/70	5.0
43	28	28.1		430	5.15	50/70	5.0
44	29	29.1		430	6.00	50/70	5.0
45	30	30.1		400	6.30	50/70	5.0
46	31	31.1		400	4.00	50/70	5.0
47	32	32.1		325	2.40	50/70	5.0
48	33	33.1		PP_HOMO	350	3.00	50/70
49	34	34.1	GP MIX_2	375	3.20	50/70	5.0
50	35	35.1		400	3.35	50/70	5.0
51	36	36.1		412	3.52	50/70	5.0
52	37	37.1		430	4.07	50/70	5.0
53	38	38.1		433	4.25	50/70	5.0
54	39	39.1		415	4.55	50/70	5.0
55	40	40.1		320	6.00	50/70	5.0
56	41	41.1	GP LDPE	412	4.50	50/70	5.0

\*) nd – no data / bd – brak danych

## 4. PREZENTACJA I ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ PODSTAWOWYCH

### 4.1. OKREŚLENIE PODSTAWOWYCH WŁAŚCIWOŚCI FUNKCJONALNYCH

W celu weryfikacji przydatności przygotowanych mieszanin przeprowadzono na nich podstawowe badania eksperymentalne, tj. wyznaczono penetrację w temperaturze 25°C, temperaturę mięknięcia  $PiK$ , temperaturę łamliwości Fraassa oraz przedział plastyczności  $PrP$ . W Tabl. 2 zamieszczono wyniki badań dla lepiszczy asfaltowych bez dodatków, które będą stanowiły poziom odniesienia dla wyników uzyskiwanych dla poszczególnych mieszanin.

## 4. PRESENTATION AND ANALYSIS OF THE RESULTS OF BASIC TESTS

### 4.1. DETERMINATION OF BASIC PERFORMANCE PROPERTIES

In order to verify the usability of the prepared blends, basic laboratory tests were performed, i.e.: penetration at 25°C, ring-and-ball softening point, Fraass breaking point and plasticity range  $PrP$ . Table 2 presents basic test results obtained for bituminous binders without additives; they will serve as reference for the results obtained for the analyzed blends.

Table 2. Basic properties of the two base bitumens  
 Tablica 2. Właściwości podstawowe asfaltów bazowych

Type of base bitumen Rodzaj lepiszcza wyjściowego	Penetration at 25°C [0.1 mm] Penetracja w temperaturze 25°C	R&B softening point [°C] Temperatura mięknięcia $PiK$	Fraass breaking point [°C] Temperatura łamliwości wg Fraassa	Plasticity range $PrP$ ( $T_{PiK} - T_{Fraass}$ ) [°C] Przedział plastyczności $PrP$ ( $T_{PiK} - T_{Fraass}$ )
50/70	63	48.4	-16	64.4
70/100	87	44.6	-17	61.6

Na Rys. 3-6 w formie wykresów kolumnowych przedstawiono wyniki badań (penetracja, temperatura mięknięcia, temperatura łamliwości Fraassa, przedział plastyczności) przeprowadzonych na 56 mieszaniach. Na wykresach tych poziomymi liniami zaznaczono poziomy odniesienia dla asfaltów bazowych (kolor niebieski – asfalt 50/70, kolor zielony – asfalt 70/100). Wyniki penetracji (Rys. 3) dla mieszanych na bazie asfaltu 70/100 są zbliżone do penetracji asfaltu wyjściowego lub istotnie od niej niższe, za wyjątkiem mieszanki 22.3, której penetracja była 50% wyższa niż w przypadku asfaltu bazowego. Mieszanki utworzone na bazie asfaltu 50/70 w większości przypadków wykazują analogiczne zachowanie, chociaż również są wyjątki (mieszanki: 22.2, 28.1, 29.1, 30.1, 32.1).

Figs 3-6 show bar charts of the results of basic tests (penetration, softening point, Fraass breaking point, plasticity range) performed on 56 blends. Horizontal lines on the charts represent reference levels obtained for the two base bitumens (blue line – 50/70 bitumen, green line – 70/100 bitumen). Penetration results (Fig. 3) for blends based on 70/100 bitumen are either comparable to penetration of the base bitumen or significantly lower; the only exception is blend 22.3, whose penetration is greater by 50% than that of the base bitumen. While blends produced using 50/70 bitumen display similar relationships, there are some exceptions as well (blends: 22.2, 28.1, 29.1, 30.1, 32.1).

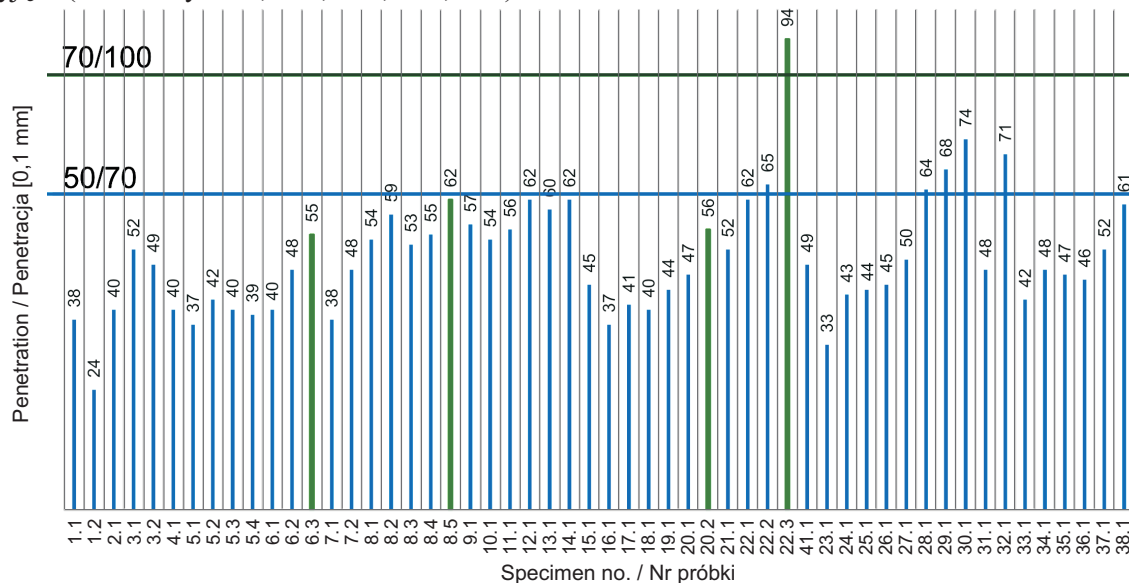


Fig. 3. Penetration of blends (cf. Table 1) compared to reference penetration of paving grade bitumen (blue line – 50/70 bitumen; green line – 70/100 bitumen)

Rys. 3. Wartości penetracji dla mieszanych (jak w Tabl.1) w odniesieniu do penetracji czystego asfaltu (niebieska linia – 50/70; zielona linia – 70/100)

Analizując wyniki dotyczące temperatury mięknięcia (Rys. 4) zauważyć można, że dodatki w postaci przetworzonych tworzyw sztucznych wpływają na jej wzrost niezależnie od rodzaju asfaltu bazowego. Tylko w przypadku mieszanki 30.1 i 32.1 następuje nieznaczny jej spadek (w obydwu przypadkach mamy do czynienia z dodatkiem powstałym ze zmieszania różnych tworzyw sztucznych).

Kolejnym analizowanym parametrem jest temperatura łamliwości wg Fraassa, która charakteryzuje właściwości lepizsca asfaltowego w niskich temperaturach, tj. podatność lepizsca na kruche pęknięcie w ujemnych temperaturach. Analizując wyniki zamieszczone na Rys. 5 można stwierdzić, że parametr ten będzie miał znaczny wpływ na wybór mieszanych do dalszych badań. Widać, że dodatki mogą podnieść temperaturę łamliwości z  $-16^{\circ}\text{C}$  nawet do  $-5^{\circ}\text{C}$ , co jest wyjątkowo niekorzystne. Obniżenie temperatury łamliwości Fraassa uzyskano dla

Analysis of the softening point test results (Fig. 4) indicates that addition of processed plastic leads to an increase in softening point, regardless of the base bitumen type. Only blends 30.1 and 32.1 caused a minor decrease in this value (both blends contained additives obtained from a combination of different plastics).

Another analyzed parameter was the Fraass breaking point, which characterizes low-temperature properties of the bituminous binder, i.e. its susceptibility to brittle fracture at negative temperatures. Results shown in Fig. 5 indicate that this parameter will be an important factor in selection of blends for further testing. It is visible that some additives may increase the breaking point, even from  $-16^{\circ}\text{C}$  to  $-5^{\circ}\text{C}$ , which is extremely disadvantageous. A decrease in the Fraass breaking point was provided by 14 blends with 50/70 bitumen (out of 52) and 2 blends with



14 mieszanin z asfaltem 50/70 (na 52) i 2 mieszanin z asfaltem 70/100 (na 4). Na wykresie słupkowym zamieszczonym na Rys. 6 porównano wartości tzw. przedziału plastyczności tj. różnicy temperatury mięknięcia i temperatury łamliwości. Parametr ten jest pochodną dwóch poprzednich i dlatego nie powinien być analizowany niezależnie.

70/100 bitumen (out of 4). Bar chart in Fig. 6 presents values of the so-called plasticity range, i.e. the difference between softening and breaking points. Since this parameter is based on the two previous parameters, it will not be analyzed separately.

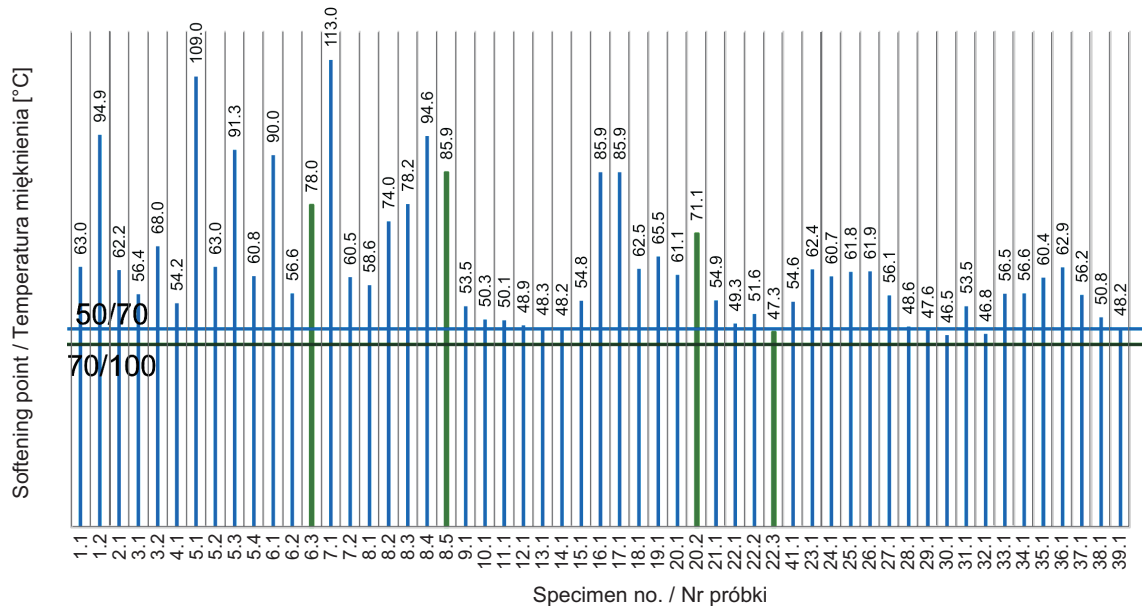


Fig. 4. Softening points of blends (cf. Table 1) compared to reference softening points of paving grade bitumen (blue line – 50/70 bitumen; green line – 70/100 bitumen)

Rys. 4. Wartości temperatury mięknięcia dla mieszanin jak w Tabl. 1 w odniesieniu do temperatury mięknięcia czystego asfaltu (niebieska linia – 50/70; zielona linia – 70/100)

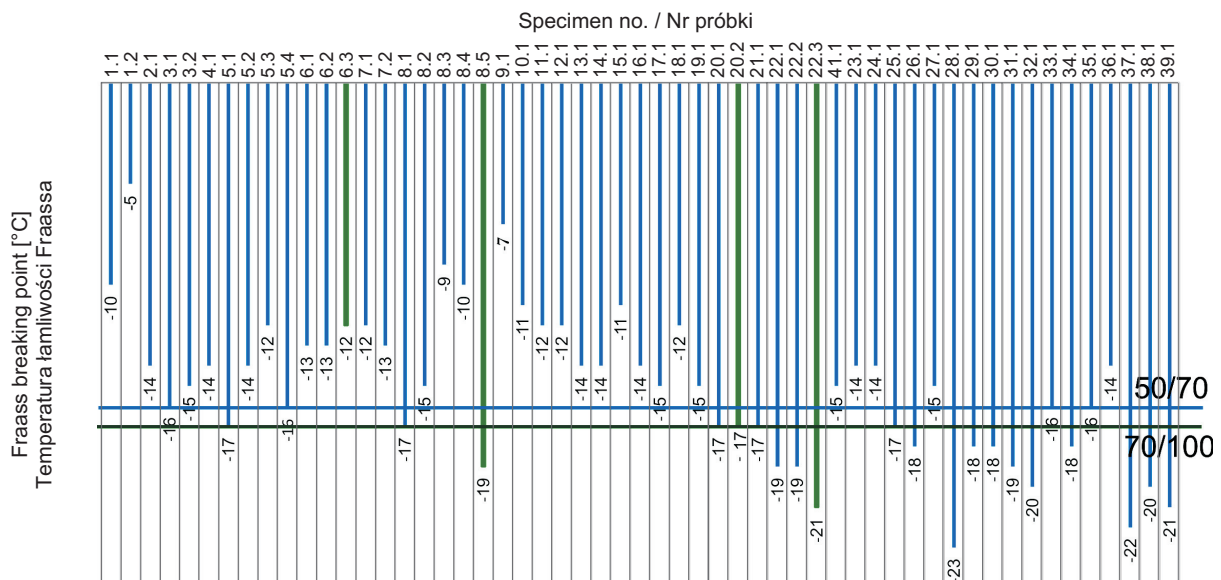


Fig. 5. Fraass breaking points of blends (cf. Table 1) compared to reference breaking points of paving grade bitumen (blue line – 50/70 bitumen; green line – 70/100 bitumen)

Rys. 5. Wartości temperatury łamliwości Fraassa dla mieszanin jak w Tabl.1 w odniesieniu do temperatury łamliwości czystego asfaltu (niebieska linia – 50/70; zielona linia – 70/100)

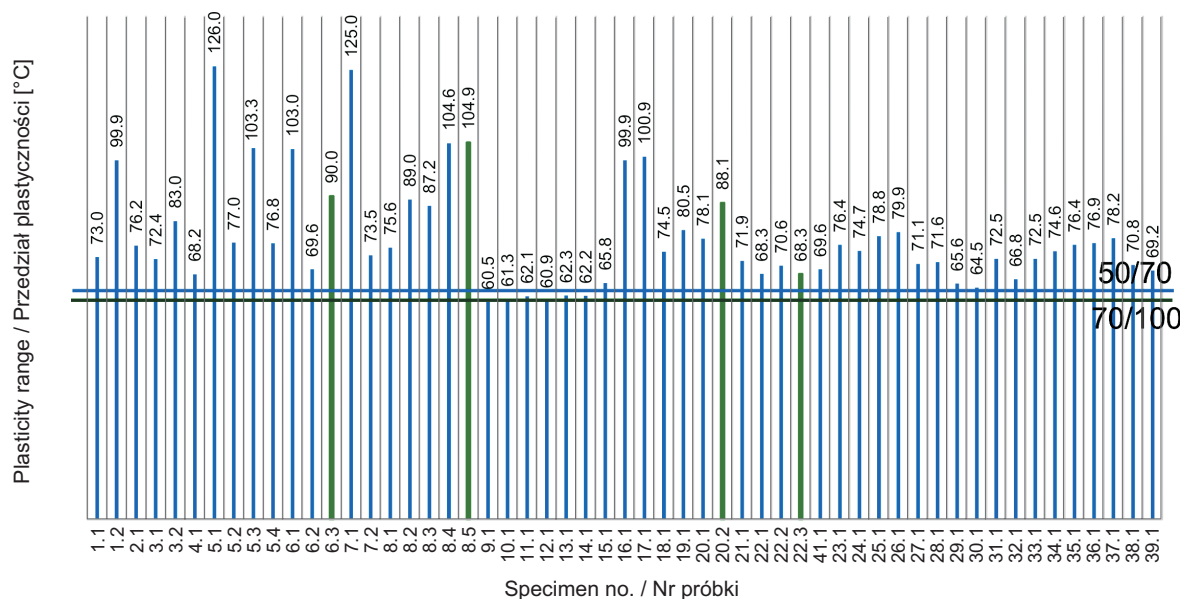


Fig. 6. Plasticity range values of blends (cf. Table 1) compared to reference plasticity ranges of paving grade bitumen (blue line – 50/70 bitumen; green line – 70/100 bitumen)

Rys. 6. Wartości przedziału plastyczności dla mieszanin jak w Tabl.1 w odniesieniu do przedziału plastyczności czystego asfaltu (niebieska linia – 50/70; zielona linia – 70/100)

#### 4.2. POSZUKIWANIE MOŻLIWYCH ZALEŻNOŚCI MIĘDZY PARAMETRAMI PROCESU PRZETWARZANIA TWORZYW SZTUCZNYCH A WŁAŚCIWOŚCIAMI OTRZYMYWANYCH MIESZANIN NA PRZYKŁADZIE PS I LDPE

Na Rys. 7-10 zamieszczono zależności pomiędzy poszczególnymi wyznaczanymi eksperymentalnie parametrami a temperaturą przetwarzania w przypadku mieszanin z udziałem PS i LDPE. We wszystkich przypadkach współczynnik determinacji ma większą wartość dla mieszaniny z udziałem PS. Wartość penetracji w obydwu przypadkach (PS i LDPE) wykazuje trend wzrostowy w funkcji wzrastającej temperatury (Rys. 7).

Na Rys. 8 widoczna jest zależność temperatury mięknięcia w funkcji temperatury przetwarzania. W przypadku mieszaniny z dodatkiem PS współczynnik determinacji ma bardzo wysoką wartość, podczas gdy w przypadku dodatku LDPE nie można mówić o istnieniu korelacji. Na Rys. 9 przedstawiono natomiast zależność między temperaturą łamliwości Fraassa a temperaturą przetwarzania. Widać tutaj wyraźny trend spadkowy, zarówno dla mieszaniny z dodatkiem PS, jak i mieszaniny z dodatkiem LDPE. Oznacza to, że wyższa temperatura przetwarzania korzystnie wpływa na właściwości otrzymanej mieszaniny pod względem pęknięcia niskotemperaturowego. Na Rys. 10 zobrazowano zależności wyznaczonego przedziału

#### 4.2. SEARCH FOR POSSIBLE RELATIONSHIPS BETWEEN PLASTIC PROCESSING PARAMETERS AND PROPERTIES OF THE OBTAINED BLENDS – EXAMPLES OF PS AND LDPE

Figs 7-10 present relationships between the tested parameters and plastic processing temperature for blends containing PS and LDPE. For all the presented parameters, coefficient of determination is greater for the blend with PS. Penetration values of both blends (with PS and LDPE) display a rising trend with an increase in plastic processing temperature (Fig. 7).

Fig. 8 shows the relationship between softening point and processing temperature. In the case of blend with PS the coefficient of determination is very high. In contrast, in the case of blend with LDPE there is no correlation. Fig. 9 shows the relationship between breaking point and processing temperature. Here a declining trend is apparent for both blends – with PS and LDPE. It means that higher plastic processing temperature has favorable influence on low-temperature properties of the obtained blend. Fig. 10 shows the relationship between the determined plasticity range and processing temperature. In this case there are no observable correlations, which is interesting in the light of the fact that correlations were noted for softening point and breaking point, which serve as the basis for plasticity range calculations.

plastyczności i temperatury przetwarzania. W tym przypadku nie można zaobserwować żadnej korelacji. Jest to o tyle ciekawe, że zaobserwowano istnienie korelacji dla temperatury mięknięcia oraz temperatury łamliwości Fraassa, które stanowią bazę do wyznaczenia przedziału plastyczności.

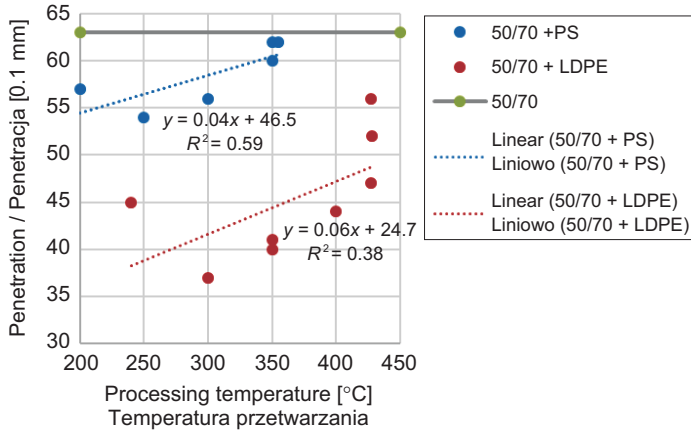


Fig. 7. Relationship between penetration and processing temperature for blends of 50/70 bitumen with PS and LDPE (constant additive quantity relative to bitumen quantity: 5%)  
Rys. 7. Zależność między wartością penetracji a wartością temperatury przetwarzania dla mieszanin asfaltu 50/70 z PS i LDPE (stały stosunek procentowy dodatku do asfaltu: 5%)

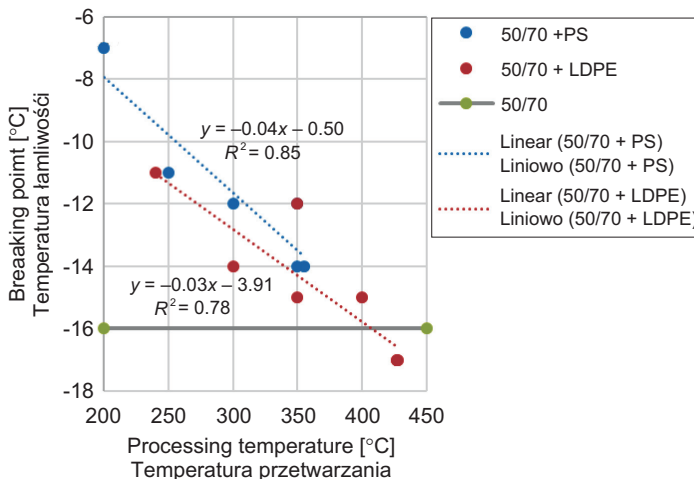


Fig. 9. Relationship between Fraass breaking point and processing temperature for blends of 50/70 bitumen with PS and LDPE (constant additive quantity relative to bitumen quantity: 5%)  
Rys. 9. Zależność między temperaturą łamliwości Fraassa a wartością temperatury przetwarzania dla mieszanin asfaltu 50/70 z PS i LDPE (stały stosunek procentowy dodatku do asfaltu: 5%)

Na Rys. 7-10 przedstawiono wyniki dotyczące poszukiwania korelacji pomiędzy poszczególnymi parametrami funkcjonalnymi a temperaturą przetwarzania. Analogiczne zadanie

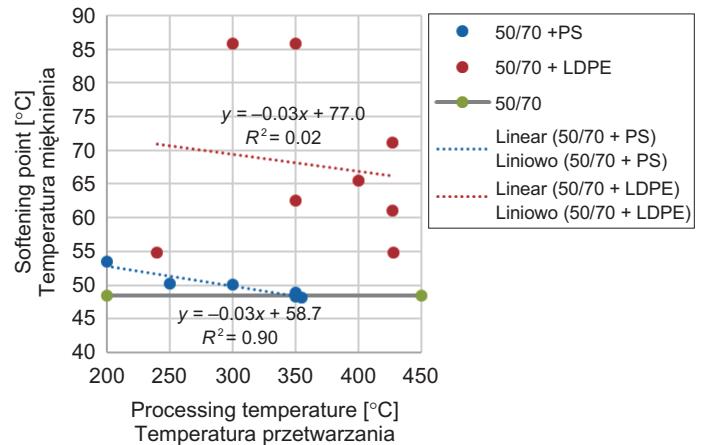


Fig. 8. Relationship between softening point and processing temperature for blends of 50/70 bitumen with PS and LDPE (constant additive quantity relative to bitumen quantity: 5%)  
Rys. 8. Zależność między temperaturą mięknięcia a wartością temperatury przetwarzania dla mieszanin asfaltu 50/70 z PS i LDPE (stały stosunek procentowy dodatku do asfaltu: 5%)

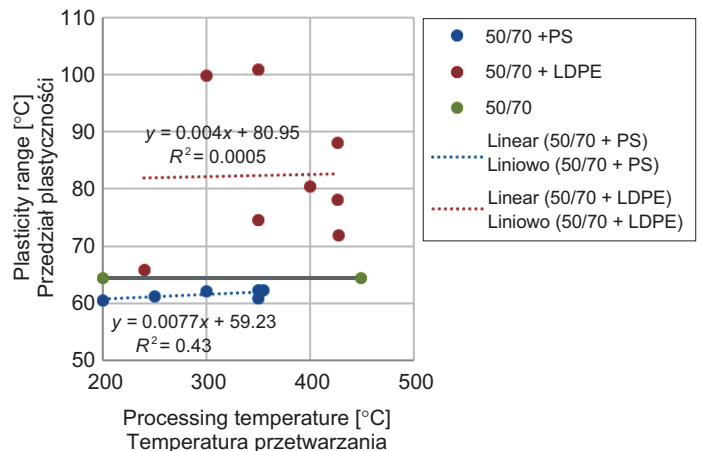


Fig. 10. Relationship between plasticity range and processing temperature for blends of 50/70 bitumen with PS and LDPE (constant additive quantity relative to bitumen quantity: 5%)  
Rys. 10. Zależność między wartością przedziału plastyczności a wartością temperatury przetwarzania dla mieszanin asfaltu 50/70 z PS i LDPE (stały stosunek procentowy dodatku do asfaltu: 5%)

Results shown in Figs 7-10 pertain to the search for correlations between individual performance parameters and processing temperature. Analogous analysis was performed for potential correlations with processing time, and the obtained results were very similar. Therefore, as a linear relationship between processing temperature and time is assumed, the results pertaining to processing time will not be presented herein.

rozwiązano, poszukując korelacji z czasem przetwarzania, a otrzymane wyniki były bardzo zbliżone. W związku z tym wyników dotyczących czasu przetwarzania nie zaprezentowano, zakładając, że między czasem a temperaturą przetwarzania zachodzi zależność liniowa.

### 4.3. WPŁYW STOSUNKU PROCENTOWEGO DODATKU DO ASFALTU NA WŁAŚCIWOŚCI UZYSKANEJ MIESZANINY NA PRZYKŁADZIE PP

Poniżej przedstawiono wpływ ilości dodatku powstałego na bazie PP (asfalt bazowy 50/70, temperatura przetwarzania 300°C) na właściwości takie jak penetracja, przedział plastyczności, temperatura łamliwości i temperatura mięknięcia. Zaprezentowano wyniki dla stosunków procentowych dodatk/asfalt (m/m) 3%, 4% i 5%. Wyniki dla stosunku procentowego 4% są pokazane dla dwóch próbek, co umożliwia ocenę rozrzutu uzyskiwanych wyników już w tej wstępnej fazie. Na podstawie wykresów słupkowych można stwierdzić, że zwiększająca się ilość dodatku PP redukuje wartość penetracji, zwiększa wartość przedziału plastyczności, obniża temperaturę łamliwości Fraassa i zwiększa temperaturę mięknięcia (Rys. 11-12).

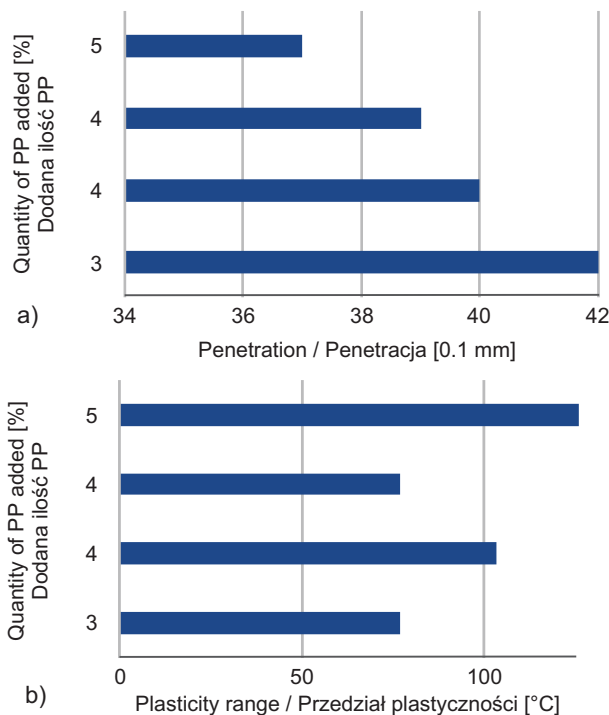


Fig. 11. Influence of the quantity of PP additive (relative to paving grade bitumen, by mass) on the values of: a) penetration, b) plasticity range; (with constant processing temperature of 300°C)  
Rys. 11. Wpływ stosunku procentowego dodatku PP do asfaltu (m/m) na wartości: a) penetracji, b) przedziału plastyczności; (przy stałej temperaturze przetwarzania 300°C)

### 4.3. INFLUENCE OF ADDITIVE QUANTITY ON THE PROPERTIES OF THE OBTAINED BLEND – EXAMPLE OF PP

The influence of the quantity of PP-based additive (base bitumen 50/70, processing temperature of 300°C) on such blend properties as penetration, plasticity range, breaking point and softening point is shown below. The presented results were obtained for additive quantities (relative to paving grade bitumen, by mass) of 3%, 4% and 5%. The results for 4% are presented for two specimens, in order to provide an illustration of their scatter, even at this early stage of analysis. The presented bar charts indicate that an increase in the quantity of PP additive reduces penetration, increases plasticity range, reduces Fraass breaking point and increases softening point (Figs 11-12).

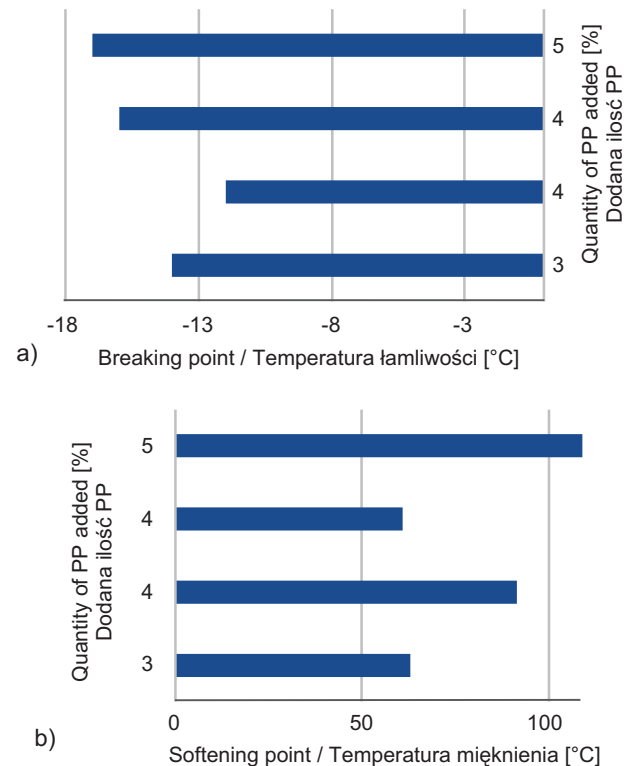


Fig. 12. Influence of the quantity of PP additive (relative to paving grade bitumen, by mass) on the values of: a) breaking point, b) softening point; (with constant processing temperature of 300°C)  
Rys. 12. Wpływ stosunku procentowego dodatku PP do asfaltu (m/m) na wartości: a) temperatury łamliwości, b) temperatury mięknięcia; (przy stałej temperaturze przetwarzania 300°C)

### 4.4. SELECTION OF THE BEST BLENDS

After determination of performance parameters for every blend, the authors performed selection of blends with the most advantageous properties in terms of their use in road

#### 4.4. WYBÓR NAJLEPSZYCH MIESZANIN

Po wyznaczeniu parametrów funkcjonalnych dla każdej z mieszanin przystąpiono do wyboru tych, które są najlepsze z punktu widzenia zastosowań w drogownictwie. Wyboru dokonano na podstawie wartości funkcji celu  $F(Pen25, T_{PiK}, T_{Fraass})$ , która zależy od trzech z wyznaczonych parametrów funkcjonalnych, tj. penetracji w 25°C  $Pen25$ , temperatury mięknięcia  $T_{PiK}$  oraz temperatury łamliwości Fraassa  $T_{Fraass}$ . Funkcja celu (1) jest złożona z sumy przemnożonych przez odpowiednie wagi ( $\omega_1 - \omega_3$ ) wartości funkcji określonych dla poszczególnych parametrów funkcjonalnych (2)-(4):

$$F(Pen25, T_{PiK}, T_{Fraass}) = \frac{1}{3}(\omega_1 f_1(Pen25) + \omega_2 f_2(T_{PiK}) + \omega_3 f_3(T_{Fraass})) \cdot 100. \quad (1)$$

Jako że zarówno zbyt duża, jak i zbyt mała penetracja nie jest korzystna, funkcję  $f_1(Pen25)$  przyjęto w następującej formie:

$$f_1(Pen25) = \text{Max}[0; 1 - 0,04 \cdot |Pen25 - Pen25opt|]. \quad (2)$$

We wzorze (2)  $Pen25opt$  oznacza tzw. penetrację optymalną. Na podstawie zgromadzonych wyników przeprowadzono analizę zmienności przebadanych parametrów wszystkich analizowanych wariantów pod kątem wytworzenia optymalnego lepiszcza „miękkiego” do warstwy ścieralnej oraz „twardego” do warstwy wiążącej i podbudowy. Za optymalny poziom penetracji asfaltu „twardego” przyjęto 45 j.p., natomiast miękkiego – 60 j.p.

W funkcji (2) operator  $| \cdot |$  oznacza wartość bezwzględną. Dodatkowo funkcja ta wybiera maximum ze zbioru, do którego należą 0 i wartość funkcji  $1 - 0,04 \cdot |Pen25 - Pen25opt|$ . Zabię ten wprowadzono, aby uniknąć ujemnych wartości, które w szczególnych przypadkach może wygenerować wspomniana wcześniej funkcja. W przypadku temperatury mięknięcia przyjęto funkcję o postaci:

$$f_2(T_{PiK}) = \frac{T_{PiK}}{T_{PiKab}}, \quad (3)$$

która stanowi iloraz temperatury mięknięcia mieszanki i temperatury mięknięcia asfaltu bazowego. Funkcja ta w ogólności promuje mieszanki o wyższej temperaturze mięknięcia. Takie założenie ma oczywiście wady (brak ograniczenia od góry), ale fakt, że funkcja ta wchodzi do (1) w sumie z funkcją:

$$f_3(T_{Fraass}) = \frac{T_{Fraass}}{T_{Fraassab}}, \quad (4)$$

promującą na tej samej zasadzie mieszanki o niższej temperaturze łamliwości Fraassa, pozwala na ich niwelację. W przypadku temperatury łamliwości Fraassa nie ma ograniczenia od dołu, ale w tym przypadku takie ograniczenie jest zbędne z praktycznego punktu widzenia. Wartości poszczególnych

construction. Selection was based on the adopted objective function  $F(Pen25, T_{PiK}, T_{Fraass})$ , whose value depends on three performance parameters, i.e.: penetration at 25°C  $Pen25$ , softening point  $T_{PiK}$  and Fraass breaking point  $T_{Fraass}$ . The objective function (1) includes three component functions (2)-(4); each is dependent on one performance parameter and is assigned its respective weight ( $\omega_1 - \omega_3$ ):

$$F(Pen25, T_{PiK}, T_{Fraass}) = \frac{1}{3}(\omega_1 f_1(Pen25) + \omega_2 f_2(T_{PiK}) + \omega_3 f_3(T_{Fraass})) \cdot 100. \quad (1)$$

Since overly low as well as overly high penetration is disadvantageous, function  $f_1(Pen25)$  was adopted in the following form:

$$f_1(Pen25) = \text{Max}[0; 1 - 0.04 \cdot |Pen25 - Pen25opt|]. \quad (2)$$

The value  $Pen25opt$  in equation (2) will be referred to as the “optimum penetration”. Based on the collected results, variability of the tested parameters of all the blend variants was analyzed in terms of production of the optimum “soft” binder (for wearing courses) and “hard” binder (for binder and base courses). The optimum levels of penetration were assumed: 45 p.u. for the “hard” binder and 60 p.u. for the “soft” binder.

The operator  $| \cdot |$  in equation (2) represents absolute value. Function  $f_1$  assumes the greater value out of the set of two values: 0 and  $1 - 0.04 \cdot |Pen25 - Pen25opt|$ . This solution was introduced to avoid negative values, which could have occurred in special cases. For the softening point, the following function was adopted:

$$f_2(T_{PiK}) = \frac{T_{PiK}}{T_{PiKab}}. \quad (3)$$

It represents the ratio of the softening point of the blend to the softening point of base bitumen. This function generally promotes blends with higher softening point. Obviously, this assumption has certain disadvantages (lack of capping value), but this drawback is compensated by the fact that another function in (1) equation:

$$f_3(T_{Fraass}) = \frac{T_{Fraass}}{T_{Fraassab}}, \quad (4)$$

analogously promotes blends with lower Fraass breaking point. In the case of Fraass breaking point, there is no lower bound, but in this particular case such restriction is practically unnecessary. Values of the three individual component functions across the entire set of test results (for blends with base bitumen 50/70) fall into the following ranges:

funkcji dla całego zbioru wyników badań doświadczalnych (dotyczy mieszanin z asfaltem bazowym 50/70) zawierają się w następujących przedziałach:

$$f_1(Pen25) \in [0; 1,00] \forall Pen25 \in \text{zbiór wyników}, \quad (5)$$

$$f_2(T_{PiK}) \in [0,92; 2,33] \forall T_{PiK} \in \text{zbiór wyników}, \quad (6)$$

$$f_3(T_{Fraass}) \in [0,31; 1,44] \forall T_{Fraass} \in \text{zbiór wyników}. \quad (7)$$

Wagi w funkcji (1) wyskalowano w taki sposób, aby wyrównać wpływy poszczególnych parametrów funkcjonalnych i uzyskać maksymalną wartość funkcji celu (1)  $F(Pen25, T_{PiK}, T_{Fraass}) = 100$ . W związku z tym przyjęto  $\omega_1 = 1,00$ ,  $\omega_2 = 0,43$ ,  $\omega_3 = 0,70$ . Podobny charakter do wag ma także mnożnik o wartości 0,04 w funkcji (2). Oczywiście tego typu podejście do oceny mieszanin może być dostosowywane do szczególnych preferencji poprzez odpowiednie korygowanie wag w funkcji celu (1). Wybrane najlepsze warianty w kategoriach „lepiszczki miękkie” i „lepiszczki twarde” zamieszczono w Tabl. 3.

$$f_1(Pen25) \in [0; 1.00] \forall Pen25 \in \text{set of test results}, \quad (5)$$

$$f_2(T_{PiK}) \in [0.92; 2.33] \forall T_{PiK} \in \text{set of test results}, \quad (6)$$

$$f_3(T_{Fraass}) \in [0.31; 1.44] \forall T_{Fraass} \in \text{set of test results}. \quad (7)$$

The weights in equation (1) were scaled in a manner so as to level the influence of individual performance parameters and set the maximum value of the objective function (1) to  $F(Pen25, T_{PiK}, T_{Fraass}) = 100$ . Therefore, the following weights were adopted:  $\omega_1 = 1.00$ ,  $\omega_2 = 0.43$ ,  $\omega_3 = 0.70$ . The role of the 0.04 multiplier in equation (2) is similar to that of the three weights. Obviously, this approach to blend evaluation may be adjusted to special preferences through adequate modification of the weights in equation (1). The selected best variants of blends (in the “soft binder” and “hard binder” categories) are presented in Table 3.

Table 3. The selected best “soft” and “hard” blends  
Tablica 3. Najlepsze wybrane mieszaniny asfaltu „miękkiego” i „twardego”

No. Lp.	Additive no. Nr dodatku	Blend no. Oznakowanie mieszaniny	Additive description Opis dodatku	Base bitumen Rodzaj lepiszcza wyjściowego	Additive quantity relative to bitumen [%] (by mass) Ilość dodatku w stosunku do asfaltu [%] (m/m)	Objective function value Wartość funkcji celu
“Soft” binder / Lepiszczki „miękkie”						
1	8	8.5	PP, 320°C, 4.25 h	70/100	10	85
2	20	20.2	LDPE_5, 427°C, 3.5 h	70/100	10	84
3	37	37.1	GP MIX_1, 430°C, 4.07 h	50/70	5	84
4	22	22.2	LDPE_7, 320°C, 5.0 h	50/70	10	83
“Hard” binder / Lepiszczki „twarde”						
1	5	5.1	PP, 300°C, 2 h	50/70	5	100
2	7	7.1	PP, 350°C, 3.37 h	50/70	5	96
3	26	26.1	GP MIX_1, 400°C, 4.25 h	50/70	5	87
4	17	17.1	LDPE_3, 350°C, 3.2 h	50/70	5	91
5	3	3.2	HDPE, 4 h	50/70	10	83

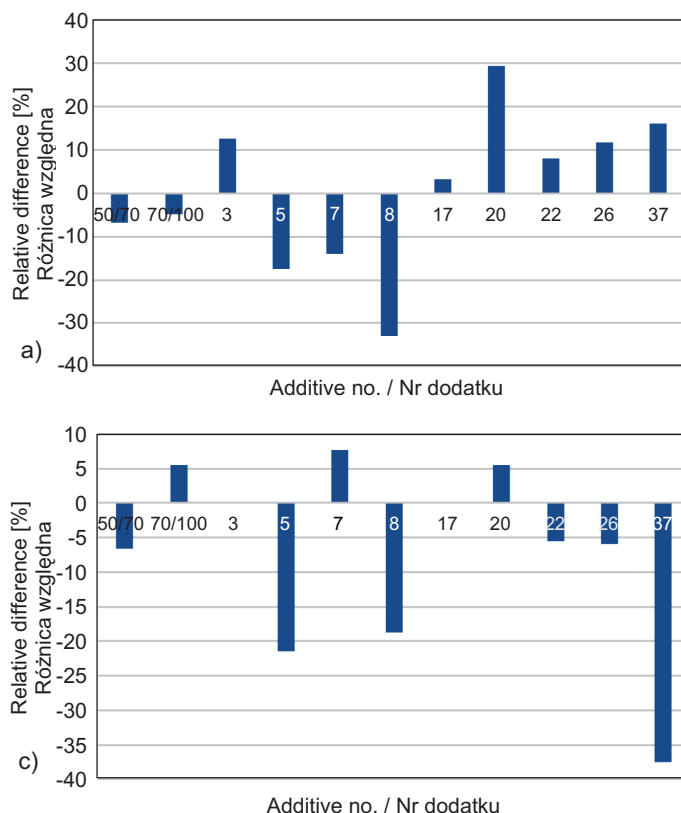
## 5. BADANIA ROZSZERZONE WYBRANYCH MIESZANIN

Mieszaniny wybrane zgodnie z metodologią zaprezentowaną w pkt. 4.4 zostały poddane rozszerzonym badaniom. Niemniej jednak, najpierw wykonano powtórnie badania podstawowe w celu sprawdzenia, jak na ich wyniki wpłynął fakt, że dodatki i mieszaniny zostały wyprodukowane powtórnie. Na Rys. 13 przedstawiono różnice procentowe między wynikami penetracji, temperatury mięknięcia i temperatury łamliwości uzyskanymi przy pierwszej i drugiej produkcji wybranych dodatków. Na wykresach tych widać wyraźnie, że wyniki dla mieszanin

## 5. BROADENED TESTING OF SELECTED BLENDS

Blends selected according to the methodology presented in section 4.4 were subjected to wider tests. However, the extended tests were preceded with a second round of basic tests in order to verify the degree to which their results would change after a repetition of production of the additives and blends. Fig. 13 presents the relative difference in penetration, softening point and breaking point results obtained between the first and second batch of selected additives, which were produced independently in two separate

są odtwarzane z większym błędem niż w przypadku asfaltów bazowych (choć ten wniosek powinien być potwierdzony na podstawie badań przeprowadzanych w takiej liczbie, aby możliwa była weryfikacja statystyczna). W przypadku asfaltów bazowych błąd nie przekracza 7%, podczas gdy dla mieszanin największy błąd, jaki uzyskano, wyniósł ponad 40%.



processes. The charts clearly show that the results for blends are repeated with greater error than for the base bitumens (however, this conclusion should be confirmed based on sufficient number of repetitions to enable statistical verification). While in the case of base bitumens the error does not exceed 7%, the highest observed repetition error for a blend exceeded 40%.

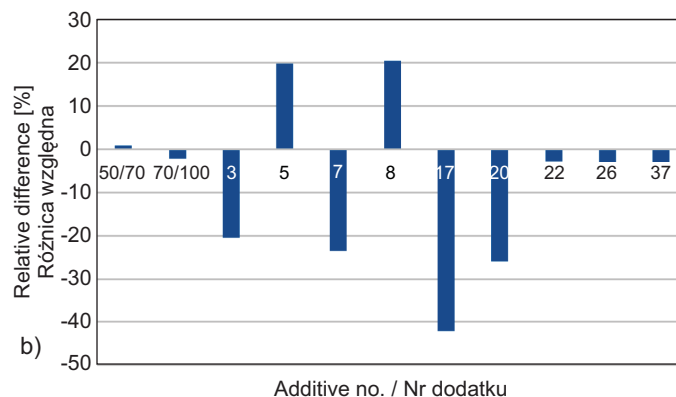


Fig. 13. Error of repetition (relative difference between test results) of tests performed on blends containing additives produced in two independent processes: a) penetration, b) softening point, c) breaking point

Rys. 13. Procentowy błąd odtworzenia wyników (tj. procentowa różnica) badań mieszanin z dodatkami wyprodukowanymi w dwóch odrębnych procesach: a) penetracji, b) temperatury mięknięcia, c) temperatury łamliwości

Tak jak wspomniano na początku niniejszego podpunktu, dla wybranych mieszanin wykonano badania rozszerzone. Na Rys. 14 zamieszczono wyniki badania nawrotu sprężystego. We wszystkich przypadkach nawrót sprężysty wynosi ponad 5%, a w przypadku mieszaniny 8 dochodzi do 15%. Wartości wymagane dla polimeroasfaltów wg normy PN-EN 14023 wynoszą, w zależności od stopnia modyfikacji, od 50% do 70%. Na Rys. 15 przedstawiono z kolei wyniki dotyczące temperatury zapłonu mieszanin w odniesieniu do asfaltów bazowych. Widać, że w większości przypadków dodatki obniżają temperaturę zapłonu, jednak w bardzo ograniczonym zakresie. Na Rys. 16 przedstawiono wyniki oceny stabilności mieszanin uzyskane przy zastosowaniu metody tubowej. Dla większości próbek stabilność jest bardzo dobra, jednak w przypadku mieszaniny 17 widać wyraźne rozsegregowanie mieszaniny, potwierdzone zarówno w teście penetracji, jak i temperatury mięknięcia.

As mentioned above, selected blends were subjected to broader testing. Fig. 14 presents the results of elastic recovery. In all the tested cases, elastic recovery exceeds 5%; it reaches 15% in the case of blend no. 8. Nevertheless, the values required for polymer-modified bitumens according to PN-EN 14023 range from 50% to 70%, depending on the level of modification. Fig. 15 shows a comparison of flash point results obtained for blends and base bitumens. It is visible that the additives decrease the flash point in most cases, but to a very limited degree. Fig. 16 presents the results of storage stability of the chosen blends evaluated using the tube method. Storage stability is very good for the majority of specimens; however, in the case of blend no. 17 separation is obvious, as confirmed by the differences in penetration and softening point.

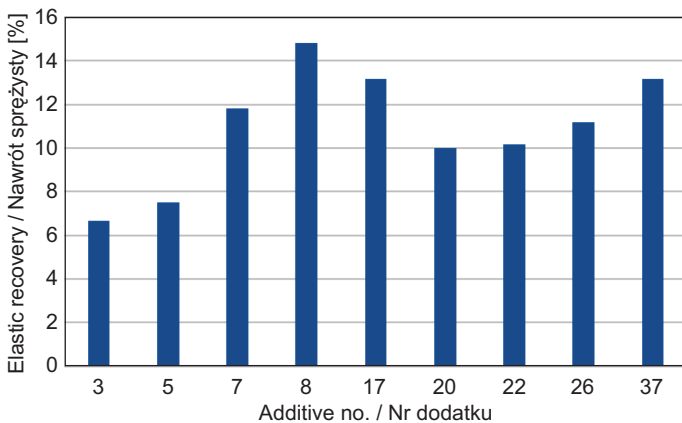


Fig. 14. Elastic recovery of selected blends  
Rys. 14. Nawrót sprężysty w przypadku wybranych mieszanin

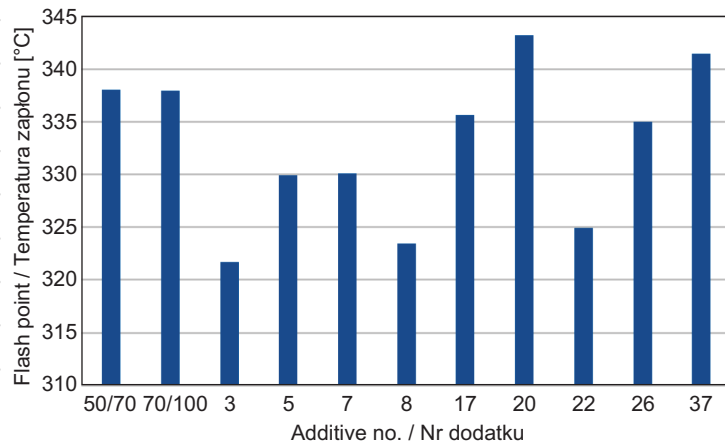


Fig. 15. Flash point of base bitumens and selected blends  
Rys. 15. Temperatura zapłonu asfaltów bazowych i wybranych mieszanin

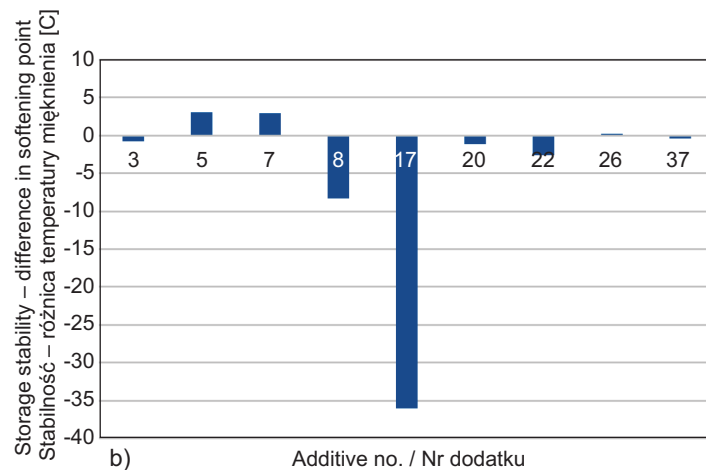
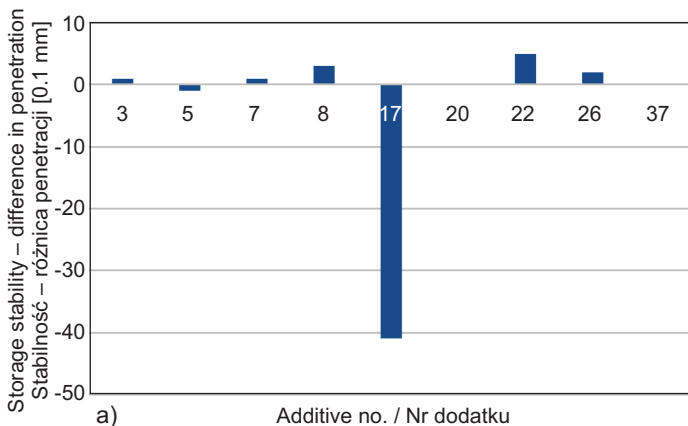


Fig. 16. Storage stability of blends evaluated using the tube method: a) difference in penetration (top vs. bottom); b) difference in softening point (top vs. bottom)

Rys. 16. Stabilność mieszanin przy zastosowaniu metody tubowej oznaczona przez: a) penetrację (różnica dół-góra); b) temperaturę mięknięcia (różnica dół-góra)

Na Rys. 17 zamieszczono wykresy charakteryzujące przyczepność poszczególnych mieszanin do wybranych kruszyw (tj. bazaltu, wapienia i granitu) otrzymane przy zastosowaniu metody PN-84/B-06714/22. Widać, że najniższe wartości przyczepności uzyskano w przypadku granitu, lepsze w przypadku wapienia, a najlepsze w przypadku bazaltu. Wyniki przyczepności bez środka adhezyjnego są dość zróżnicowane dla każdego z kruszyw: w przypadku bazaltu w zależności od dodatku wynoszą od 50% do 100%; wapienia – od 28% do 95%; granitu zaś – od 15% do 85%. Na tej podstawie można powiedzieć, że rodzaj dodatku ma istotny wpływ na przyczepność zmodyfikowanego asfaltu do kruszywa. Należy jednak zaznaczyć, że dodatek środka adhezyjnego pozwolił na osiągnięcie 100% przyczepności we wszystkich przypadkach i różnice pomiędzy dodatkami zostały zniwelowane.

Fig. 17 shows charts that characterize adhesion of the blends to chosen aggregates (i.e. basalt, limestone and granite) tested using the PN-84/B-06714/22 method. The lowest values of adhesion were obtained in the case of granite, better in the case of limestone and the best in the case of basalt. The results obtained without adhesive agent vary relatively strongly between individual blends. In the case of basalt, they range from 50% to 100%, depending on the additive; for limestone – from 28% to 95%; for granite – from 15% to 85%. Based on this observation, it may be concluded that the type of the additive has significant influence on adhesion of the obtained blend to aggregate. However, it should be noted that addition of adhesive agent provided 100% adhesion across all the tested cases, thus eliminating the differences between the additives.



Uzyskane wyniki można również odnieść do wyników badań archiwalnych asfaltu 50/70 bez dodatków, które wyniosły odpowiednio 70% dla bazaltu, 40% dla granitu i 50% dla wapienia. Na tej podstawie można ocenić potencjalny wpływ dodatku na przyczepność asfaltu do kruszywa.

The obtained results may also be compared to the archival results of adhesion for the 50/70 bitumen without additives; its adhesion equaled 70%, 40% and 50% for basalt, granite and limestone, respectively. This comparison may enable assessment of the potential influence of the additive on adhesion of binder to aggregate.

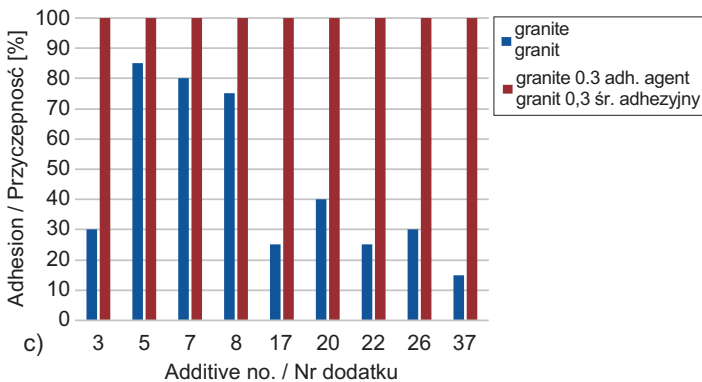
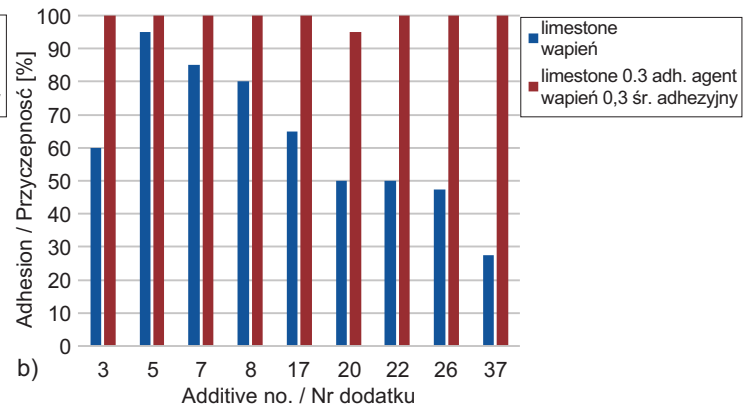
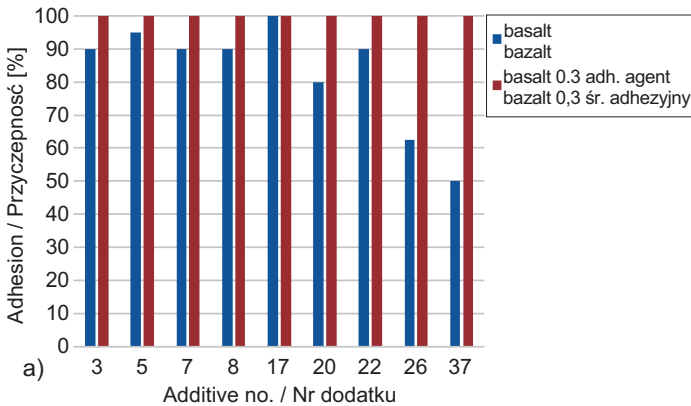


Fig. 17. Adhesion of selected blends to aggregates:

a) basalt, b) limestone, c) granite

Rys. 17. Przyczepność wybranych mieszanin do kruszywa:

a) bazaltu, b) wapienia, c) granitu

## 6. WNIOSKI I PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono szeroką kampanię badawczą dotyczącą możliwości stosowania przetworzonych tworzyw sztucznych – PP, LDPE, HDPE, PS i PE – jako dodatków modyfikujących (poprawiających) właściwości lepiszczy drogowych 50/70 i 70/100. W pracy oprócz prezentacji wyników badań podstawowych (penetracja, temperatury mięknięcia i łamliwości) oraz rozszerzonych (nawrót sprężysty, temperatura zapłonu, stabilność i przyczepność) wybranych mieszanin, przedstawiono również obiektywną metodę wyboru z szerokiej grupy mieszanin tych, które mają najlepsze właściwości. Nie jest to klasyczna metoda rankingowa (przyznawanie punktów), a metoda bazująca na funkcji celu, będącej sumą trzech funkcji składowych odpowiadających poszczególnym parametrom z odpowiednimi wagami. Metoda ta może być dość swobodnie kształtowana poprzez dobór wag albo odmienne propozycje funkcji składowych.

## 6. CONCLUSIONS AND SUMMARY

The article presents a wide research campaign pertaining to the possibility of usage of processed plastics – PP, LDPE, HDPE, PS and PE – as additives modifying (improving) the properties of 50/70 and 70/100 paving grade bitumen. Apart from presentation of basic (penetration, softening point and breaking point) and broadened (elastic recovery, flash point, storage stability and adhesion) tests of chosen blends, an objective method for evaluation and selection of blends with the most advantageous properties was presented. The proposed method is not a classic ranking method (attribution of points); it is based on an objective function composed of three component functions, which correspond to individual blend parameters and are assigned adequate weights. The method may be adjusted by selection of weights or use of different component functions.

Na podstawie wyników badań podstawowych, przeprowadzonych na 56 mieszaninach, można sformułować następujące ogólne wnioski (wnioski szczegółowe zamieszczono w formie komentarzy do prezentowanych wykresów):

- Parametry pirolitycznego procesu przetwarzania tworzyw sztucznych mają istotny wpływ na właściwości podstawowe mieszanin utworzonych na ich podstawie.
- W każdym przypadku istnieje optymalny stosunek masowy dodatku do asfaltu, co wykazano na przykładzie PP. Programu badań nie obejmował jednak tego zagadnienia, nie było więc ono szczegółowo analizowane w niniejszej pracy.
- Spośród analizowanych dodatków do lepiszczy najbardziej pożądane są te będące mieszaninami tworzyw sztucznych (oznaczone jako GP\_MIX), gdyż z punktu widzenia przyszłych zastosowań szczegółowa segregacja tworzyw sztucznych jest kłopotliwa.
- Niestety, spośród 10 najlepszych wariantów mieszanin wybranych zgodnie z ideą przedstawioną w pkt. 4.4, tylko 3 stanowią dodatki oznaczone jako GP\_MIX.
- Wśród wybranych dodatków nie znalazł się żaden dodatek utworzony na bazie PS, ale znalazły się trzy dodatki utworzone na bazie PP, trzy na bazie LDPE i jeden na bazie HDPE.
- Analizując korelacje między wynikami badań podstawowych a parametrami procesu wytwarzania dodatków (temperatura przetwarzania i czas przetwarzania), stwierdzono silny związek między czasem a temperaturą przetwarzania, stąd zaprezentowano korelacje tylko względem jednego parametru, tj. temperatury przetwarzania.
- Dla wybranych typów tworzyw sztucznych (np. PS i LDPE) istnieją dość silne korelacje między temperaturą procesowania a temperaturą łamliwości Fraassa (im wyższa temperatura przetwarzania, tym niższa temperatura łamliwości Fraassa, a więc zachodzi poprawa właściwości niskotemperaturowych).
- W przypadku innych tworzyw czy innych parametrów podstawowych korelacje te są bardzo słabe albo niewidoczne.

Na podstawie wyników badań rozszerzonych, przeprowadzonych na wybranych mieszaninach, można sformułować następujące wnioski:

1. Odtwarzalność dodatków oraz mieszanin na ich bazie wyraźnie zależy od parametrów procesu pirolizy. Największy rozrzut uzyskano dla dodatków nr 17 (LDPE) i 37 (GP\_MIX), najmniejszy rozrzut dla dodatków nr 3 (HDPE), 22 (LDPE) i 26 (GP\_MIX), a więc dla tych samych tworzyw sztucznych uzyskano istotnie różne zachowania.

The following general conclusions may be formulated based on the obtained results of the basic tests performed on 56 different blends (detailed individual conclusions may be found above in the commentary to the presented charts):

- The parameters of pyrolytic processing of plastics significantly affect the basic properties of blends obtained using the produced additives.
- In each case, there does exist the optimum proportion of additive to base bitumen, as shown on the example of PP. Since the research program did not encompass this issue, it was not analyzed in greater detail.
- Among the analyzed additives, the ones comprised of a combination of different plastics (labeled GP\_MIX) seem the most attractive, since they do not require problematic detailed segregation.
- Regrettably, only 3 blends out of the 10 best variants identified according to the method presented in section 4.4 contain the GP\_MIX additives.
- Among the selected best blends, there are no additives based on PS. There are, however, three additives based on PP, three based on LDPE and one based on HDPE.
- Analysis of correlations between the basic test results and the parameters of additive production process (processing temperature and processing time) indicated a strong relationship between processing time and temperature; therefore, correlations pertaining to only one of the two process parameters (temperature) were presented.
- Selected types of plastics (e.g. PS and LDPE) display relatively strong correlations between their processing temperature and blend breaking point (the higher the processing temperature, the lower the breaking point, representing an improvement in low-temperature properties).
- In the case of other plastics and basic parameters, correlations are either weak or unobservable.

Broadened testing performed on selected blends enabled formulation of the following conclusions:

1. Repeatability of additives and blends clearly depends on the parameters of the pyrolysis process. The greatest scatter was observed for additives 17 (LDPE) and 37 (GP\_MIX); the lowest scatter was observed for additives 3 (HDPE), 22 (LDPE) and 26 (GP\_MIX). Therefore, significantly different behavior was observed for the same plastics.
2. Elastic recovery was measured for the produced blends – the greatest value, almost 15%, was noted for the blend with additive no. 8.

2. Dla wytworzonych mieszanin określono wartość nawrotu sprężystego – była ona największa dla mieszaniny z dodatkiem 8 i wyniosła niemal 15%.
3. W ogólności dodatki tworzyw sztucznych obniżają temperaturę zapłonu mieszaniny w stosunku do temperatury zapłonu asfaltu bazowego. Obniżenie to jednak nie jest zbyt istotnym problemem, gdyż wynosi od kilku do kilkunastu procent i są to wartości cały czas na poziomie bezpiecznym, znacznie powyżej wymaganej granicy 250°C.
4. Wytworzone mieszaniny (za wyjątkiem tej oznaczonej numerem 17) wykazały bardzo dobrą stabilność.
5. Pod względem przyczepności wybrane mieszaniny wykazały zróżnicowane zachowanie, zarówno w kontekście dodatku jak i rodzaju kruszywa. We wszystkich przypadkach dodanie środka adhezyjnego prowadziło do osiągnięcia bardzo dobrej przyczepności.

Przeprowadzone badania podstawowe szerokiego spektrum dodatków wytworzonych w procesie pirolitycznym wskazuje, że ich zastosowanie jako dodatku do asfaltu ma wpływ na jego właściwości. Efekt zależy od rodzaju bazowego tworzywa sztucznego, parametrów procesu przygotowania i ilości dodatku. Dzięki zastosowaniu funkcji optymalizacyjnej, spośród kilkudziesięciu przeanalizowanych wariantów można wybrać warianty o najlepszych właściwościach. Szczególnie pożądane są warianty, w których następuje jednoczesne podniesienie temperatury mięknięcia i obniżenie temperatury łamliwości. Efektem modyfikacji jest zwiększenie przedziału plastyczności. Badania nawrotu sprężystego wykazują, że poziom wyników wymagany dla polimeroasfaltów będzie trudny do osiągnięcia. W dalszej części programu badawczego zaplanowano ocenę badań funkcjonalnych i reologicznych asfaltów oraz szeroki program badań mieszanek z zastosowaniem dodatku dozowanego metodami „na mokro” i „na sucho”.

## INFORMACJE DODATKOWE

Zaprezentowane badania zostały przeprowadzone w ramach Projektu B+R pn.: „Opracowanie Synergicznej Technologii Przetwarzania Odpadów Polimerowych na Komponenty Asfaltów”, realizowanego przez Green Park VI Sp. z o.o. i współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach I Osi priorytetowej: „Wsparcie prowadzenia prac B+R przez przedsiębiorstwa” Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014 - 2020 oraz „Opracowanie wysokosprawnej technologii przetwarzania odpadów (w tym RDF) bogatych w poliolefiny na paliwa płynne oraz komponenty chemiczne w oparciu o innowacyjny układ pre- oraz post-reakcyjny” realizowanego przez Green Park VI Sp. z o.o. i współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach I Osi priorytetowej: „Wsparcie prowadzenia prac B+R przez przedsiębiorstwa” Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój, 2014 - 2020.

3. In general, addition of plastics decreased the flash point of the obtained blends in comparison to base binders. However, the observed decrease does not pose a significant problem; the relative decrease by several percent resulted in values which are still safe and well above the required minimum of 250°C.
4. The produced blends (with the exception of blend no. 17) displayed very good storage stability.
5. In terms of adhesion to aggregate, the obtained blends displayed variable behavior, related both to additive type and aggregate type. Usage of adhesive agent provided very good adhesion across all the analyzed cases.

Basic tests performed on a wide range of various additives produced in pyrolysis process indicate that use of such additives does affect the properties of bitumen. The effect depends on the type of base plastic, preparation process parameters and the quantity added to bitumen. Use of the proposed objective function enables selection of variants that display the most advantageous properties. Variants that simultaneously provide an increase in softening point and a decrease in breaking point are particularly attractive. Modification of binders using the analyzed additives results in widening of their plasticity range. Elastic recovery tests indicate that it will be difficult to achieve the level comparable to that required for polymer-modified bitumen. Further parts of the research program will encompass evaluation of performance and rheological parameters of binders and extensive testing of mixtures with additives, prepared using the “wet” and “dry” production methods.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The presented research was carried out as part of the R&D Project entitled: “Development of Synergistic Technology for Processing Polymer Waste into Bitumen Components”, implemented by Green Park VI Sp. z o.o. and co-financed by the European Union under Priority Axis I: “Support for R&D work by enterprises” of the Smart Growth Operational Program 2014-2020 and “Development of high-efficiency technology for processing waste (including RDF) rich in polyolefins into liquid fuels and chemical components based on an innovative pre- and post-reaction system” implemented by Green Park VI Sp. z o.o. and co-financed by the European Union under Priority Axis I: “Support for R&D work by enterprises” of the Smart Growth Operational Program, 2014-2020.

**BIBLIOGRAFIA / REFERENCES**

- [1] *Bańkowski W., Sybilski D., Król J., Kowalski K., Radziszewski P., Skorek P.*: Wykorzystanie destruktu asfaltowego – konieczność i innowacja. *Budownictwo i Architektura*, **15**, 1, 2016, 157-167, DOI: 10.24358/Bud-Arch\_16\_151\_17
- [2] *Dołżycki B., Jaskuła P.*: Review and evaluation of cold recycling with bitumen emulsion and cement for rehabilitation of old pavements. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, **6**, 4, 2019, 311-323, DOI: 10.1016/j.jtte.2019.02.002.
- [3] *Skotnicki Ł., Kuźniewski J., Szydło A.*: Research on the properties of mineral-cement emulsion mixtures using recycled road pavement materials. *Materials*, **14**, 3, 2021, 563, DOI: 10.3390/ma14030563
- [4] *Buczyński P., Iwański M., Krasowski J.*: Assessment of the impact of hydraulic binder on the properties of the cold recycled mixture with foamed bitumen and bitumen emulsion: Field tests. *Buildings*, **10**, 12, 2020, ID article: 223, DOI: 10.3390/buildings10120223
- [5] *Jaskuła P., Stienss M., Szydłowski C.*: Wpływ zbrojenia polimerowymi włóknami rozproszonymi na wybrane właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych. *Drogownictwo*, **72**, 9, 2017, 275-280
- [6] *Radziszewski P., Sarnowski M., Plewa A., Pokorski P.*: Properties of Asphalt Concrete with Basalt-Polymer Fibers. *Archives of Civil Engineering*, **64**, 4, 2018, 197-209, DOI: 10.2478/ace-2018-0052
- [7] *Kukielka J., Bańkowski W., Mirski K.*: Asphalt-cement concretes with reclaimed asphalt pavement and rubber powder from recycled tire. *Materials*, **14**, 9, 2021, ID article: 2412, DOI: 10.3390/ma14092412
- [8] *Buczyński P., Iwański M., Mazurek G., Krasowski J., Krasowski M.*: Effects of portland cement and polymer powder on the properties of cement-bound road base mixtures. *Materials*, **13**, 19, 2020, 4253, DOI: 10.3390/MA13194253
- [9] *Skotnicki Ł.*: Application of rubber dust in modified asphalts for SMA mixtures. *Przegląd Komunikacyjny*, **76**, 3, 2021, 15-20, DOI: 10.35117/A\_ENG\_21\_03\_02
- [10] *Król J.B., Radziszewski P., Kowalski K.J., Sarnowski M., Czajkowski P.*: Laboratory and Field Investigations of Polymer and Crumb Rubber Modified Bitumen. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, **8**, 10, 2014, 1327-1334
- [11] *Thives L.P., Pais J.C., Pereira P.A.A., Palha C.A.O.F., Trichês G.*: Contribution of Asphalt Rubber Mixtures to Sustainable Pavements by Reducing Pavement Thickness. *Materials*, **15**, 23, 2022, ID article: 8592, DOI: 10.3390/ma15238592
- [12] *Jia X., Huang B., Bowers B.F., Zhao S.*: Infrared spectra and rheological properties of asphalt cement containing waste engine oil residues. *Construction and Building Materials*, **50**, 2014, 683-691, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.10.012
- [13] *Huang G., Yang T., He Z., Yu L., Xiao H.*: Polyurethane as a modifier for road asphalt: A literature review. *Construction and Building Materials*, 356, 2022, ID article: 129058, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129058
- [14] *Filonzi A., Komaragiri S., Lakshmi Roja K., Sreeram A., Bhasin A., Masad E.*: A comprehensive evaluation of mixture and binder properties to explore the use of low-density polyethylene (LDPE) as an asphalt modifier and co-modifier. *International Journal of Pavement Engineering*, 2022, DOI: 10.1080/10298436.2022.2120988
- [15] *da Silva A.J.R., de Figueiredo Lopes Lucena A.E., de Medeiros Melo Neto O., Mendonça A.M.G.D., Costa D.B., de Lima R.K.B.*: Effects of using waste high-density polyethylene on the rheological, mechanical, and thermal performance of asphalt materials. *Environment, Development and Sustainability*, 2023, DOI: 10.1007/s01668-023-03306-w
- [16] *Kakar M.R., Mikhailenko P., Piao Z., Poulikakos L.D.*: High and low temperature performance of polyethylene waste plastic modified low noise asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, **348**, 2022, ID article: 128633, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128633
- [17] *Mehta D., Saboo N., Mariam S., Utikarsh A.*: A review on the use of waste plastics in hot mix asphalt. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 2023, DOI: 10.1007/s11043-023-09622-y
- [18] *Veropalumbo R., Russo F., Oreto C., Buonocore G.G., Verdolotti L., Muiambo H., Biancardo S.A., Viscione N.*: Chemical, thermal, and rheological performance of asphalt binder containing plastic waste. *Sustainability*, **13**, 24, 2021, 13887, DOI: 10.3390/su132413887
- [19] *Noor A., Rehman M.A.U.*: A mini-review on the use of plastic waste as a modifier of the bituminous mix for flexible pavement. *Cleaner Materials*, **4**, 4, 2022, ID article: 100059, DOI: 10.1016/j.clema.2022.100059
- [20] *Yildirim Y.*: Polymer modified asphalt binders. *Construction and Building Materials*, **21**, 1, 2007, 66-72, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2005.07.007
- [21] *Bańkowski W.*: Analysis of fatigue life of asphalt concretes considering different types of mixtures and binders. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **17**, 4, 2018, 253-270, DOI: 10.7409/rabd.018.016
- [22] *Gajewski M., Bańkowski W., Pronk A.C.*: Evaluation of fatigue life of high modulus asphalt concrete with use of three different definitions. *International Journal of Pavement Engineering*, **21**, 14, 2020, 1717-1728, DOI: 10.1080/10298436.2018.1564302

- [23] *Gajewski M., Langlois P.A.*: Prediction of Asphalt Concrete Low-temperature Cracking Resistance on the Basis of Different Constitutive Models. *Procedia Engineering*, **91**, 2014, 81-86, DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.016
- [24] *Bańkowski W., Horodecka R., Gajewski M., Mirski K.*: The extended assessment of warm mix asphalts durability. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **15**, 2, 2016, 157-173, DOI: 10.7409/rabdim.016.010
- [25] *White G., Hall F.*: Comparing asphalt modified with recycled plastic polymers to conventional polymer modified asphalt, in: Hoff I., Mork H., Saba R. (eds.): Eleventh International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, **1**, 2021, 3-17, DOI: 10.1201/9781003222880-1
- [26] *Radeef H.R., Abdul Hassan N., Abidin A.R.Z., Mahmud M.Z.H., Yusoffa N.I.M., Idham Mohd Satar M.K., Warid M.N.M.*: Enhanced Dry Process Method for Modified Asphalt Containing Plastic Waste. *Frontiers in Materials*, **8**, 2021, DOI: 10.3389/fmats.2021.700231
- [27] *Pasetto M., Baliello A., Pasquini E., Poulidakos L.*: Dry Addition of Recycled Waste Polyethylene in Asphalt Mixtures: A Laboratory Study. *Materials*, **15**, 14, 2022, ID articles: 4739, DOI: 10.3390/ma15144739
- [28] *Lu D.X., Enfrin M., Boom Y.J., Giustozzi F.*: Future recyclability of hot mix asphalt containing recycled plastics. *Construction and Building Materials*, **368**, 1, 2023, ID article: 130396, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130396
- [29] *Singh A., Gupta A., Miljković M.*: Intermediate- and high-temperature damage of bitumen modified by HDPE from various sources. *Road Materials and Pavement Design*, **24**, Issue sup1: EATA Gdansk, 2023, 640-653, DOI: 10.1080/14680629.2023.2181017
- [30] *Kakar M.R., Mikhailenko P., Piao Z., Bueno M., Poulidakos L.*: Analysis of waste polyethylene (PE) and its by-products in asphalt binder. *Construction and Building Materials*, **280**, 2021, ID article: 122492, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122492
- [31] *Ren S., Liu X., Jing R., Gao Y., Lin P., Erkens S.*: Investigating the rheological properties and compatibility behaviours of RET/PE and WR/CR/SBS compound-modified bitumen. *Road Materials and Pavement Design*, 2023, DOI: 10.1080/14680629.2023.2221347
- [32] *Al-Abdul Wahhab H.I., Dalhat M.A., Habib M.A.*: Storage stability and high-temperature performance of asphalt binder modified with recycled plastic. *Road Materials and Pavement Design*, **18**, 5, 2017, 1117-1134, DOI: 10.1080/14680629.2016.1207554