

KONFERENCJA - Nowoczesne nawierzchnie drogowe

Recykling w konstrukcjach nawierzchni drogowych

CONFERENCE - Modern Road Pavements

Recycling in road pavement structures



mrp23.ibdim.edu.pl

Warsaw, 18 October 2023

Prognozowanie nieodwracalnej podatności i
nawrotu sprężystego asfaltów modyfikowanych
plastomerami odpadowymi w badaniu MSCR

MRP'23



Design courtesy of Freepik.com

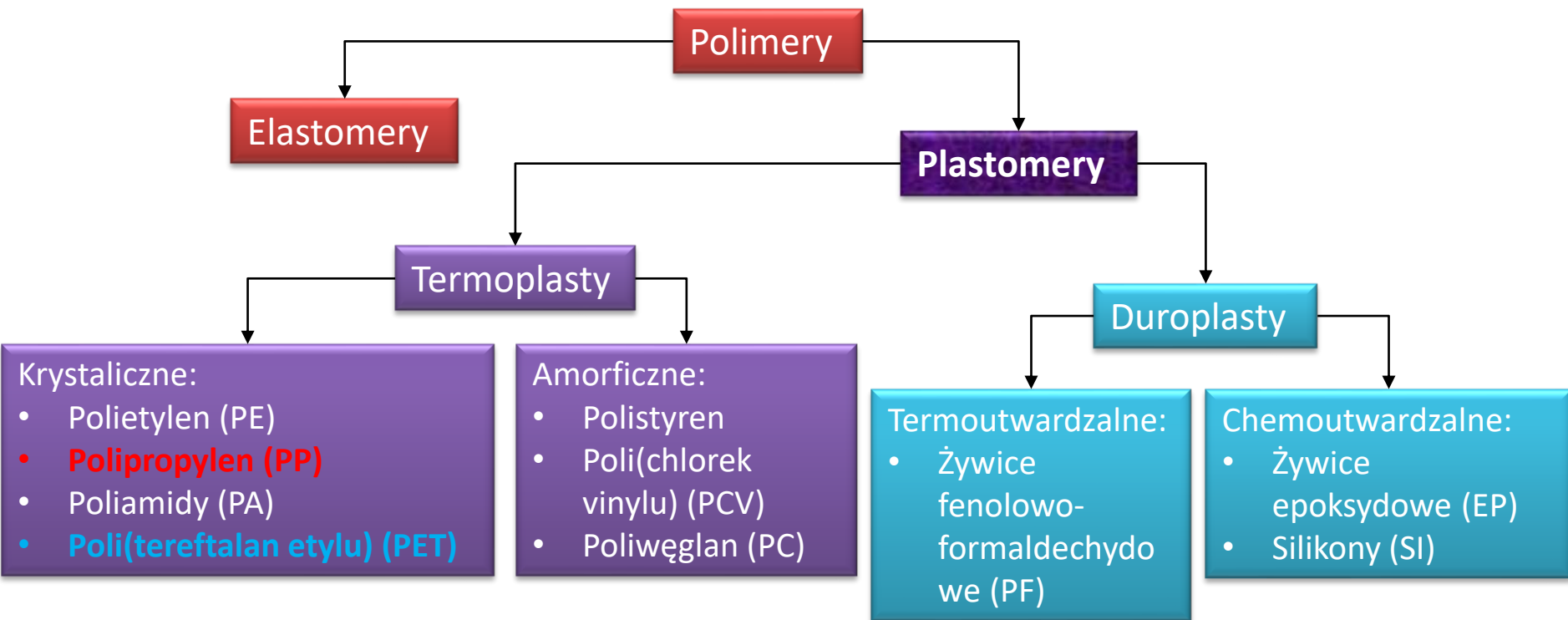
Grzegorz Mazurek
Przemysław Buczyński
Marek Iwański
Artur Kowalczyk
Marcin Podsiadło



Politechnika Świętokrzyska
Kielce University of Technology

Plan prezentacji

- 1. Plastomer jako modyfikator**
- 2. Plan eksperymentu oparty na planie Placketta-Burmana**
- 3. Badanie MSCR**
- 4. Prognozowanie parametrów badania MSCR techniką MARS**
- 5. Rezultaty badań**
- 6. Wnioski**



Plan eksperymentu oparty na planie Placketta-Burmana

Tabela 1. Struktura zmiennych w planie eksperymentu Placketta-Burmana

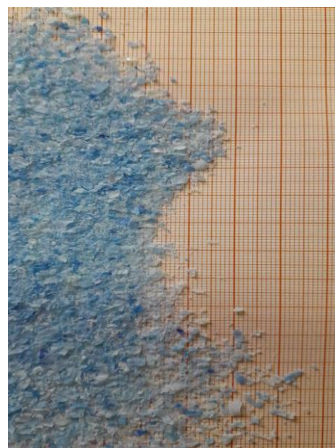
Lp	Zmienna	Rodzaj zmiennej	Jednostka	Kod	Niski poziom	Wysoki poziom
1.	Prędkość mieszania	ilościowa	obr./min ⁻¹	A	120	9500
2.	Temperatura mieszania	ilościowa	°C	B	160	180
3.	Czas mieszania	ilościowa	min.	C	30	180
4.	Zawartość plastomeru	ilościowa	%	D	2	5
5.	Asfalt	jakościowa	-	E	20/30	70/100
6.	Plastomer	jakościowa	-	F	PP	PET
7.	Granulacja	jakościowa	-	G	<5,6mm	>5,6mm

Tabela 2. Przyjęte kombinacje czynników w ramach planu P-B

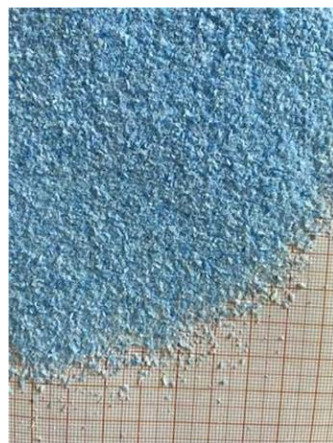
Kombinacja	Kombinacje zmiennych niezależnych						
	A	B	C	D	E	F	G
	obr./min ⁻¹	°C	min	%	-	-	-
1s	120	160	30	5	70/100	PP	<5.6
2s	9500	160	30	2	20/30	PP	>5.6
3s	120	180	30	2	70/100	PET	>5.6
4s	9500	180	30	5	20/30	PET	<5.6
5s	120	160	180	5	20/30	PET	>5.6
6s	9500	160	180	2	70/100	PET	<5.6
7s	120	180	180	2	20/30	PP	<5.6
8s	9500	180	180	5	70/100	PP	>5.6

Wybrane właściwości plastomerów

Granulacja >5,6 mm



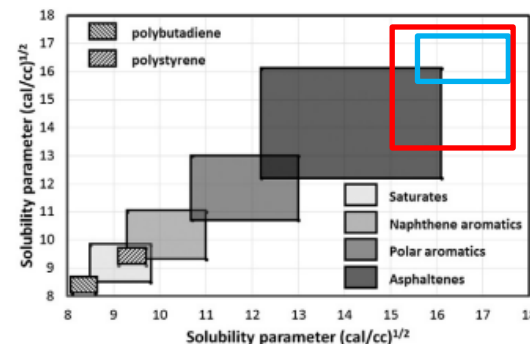
Granulacja <5,6 mm



Rys. 1. Widok granulacji wybranego plastomeru PET
(Poli(tereftalan etylenu) po procesie pulweryzacji

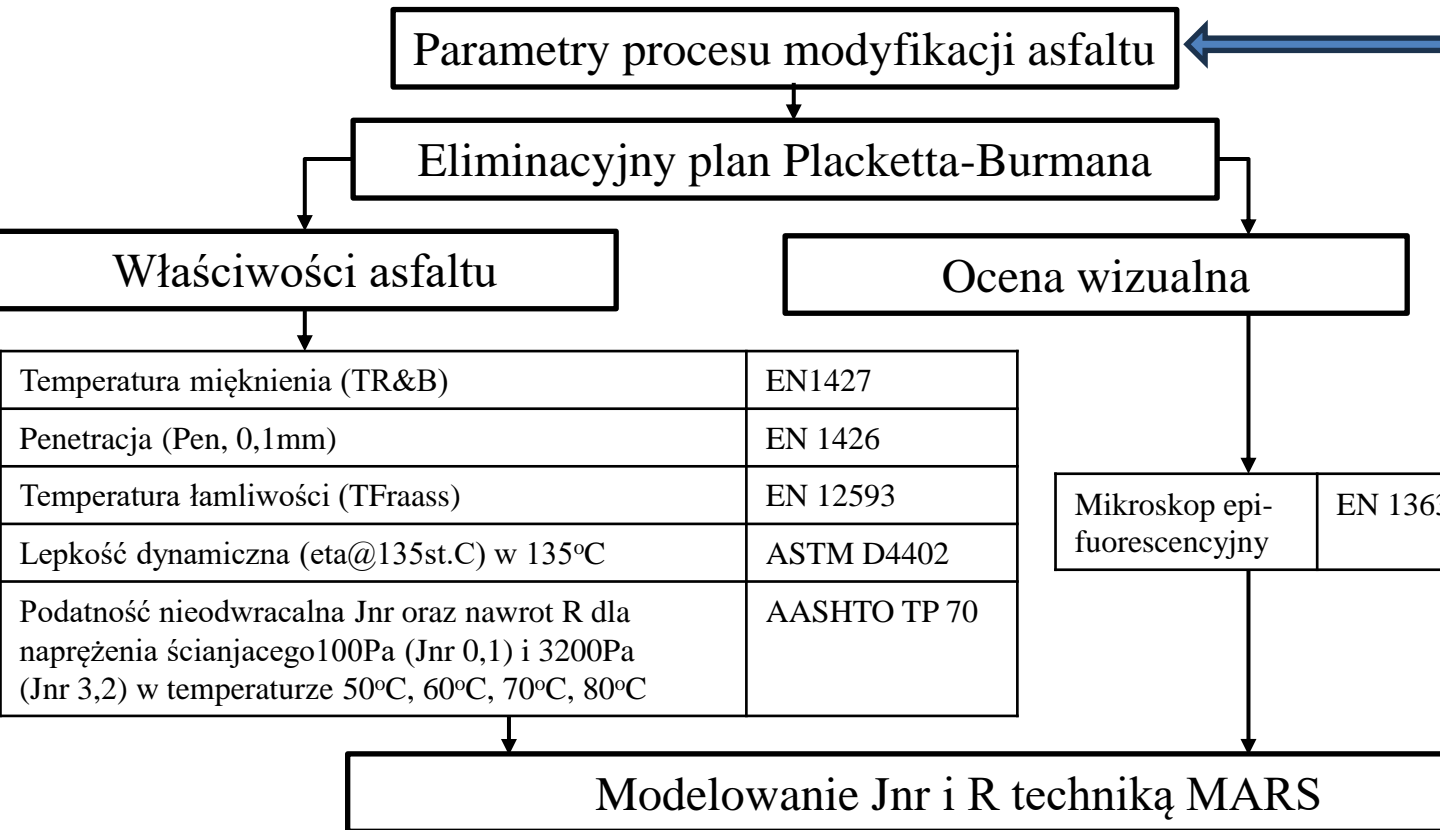
Tabela 3. Właściwości PET i PP po procesie pulweryzacji

Plastomer	T _p (temp. płynięcia)	T _z (temp. zeszklenia)	Rozpuszczalność δ
PET	250	75	15,8 J ^{1/2} cm ^{-3/2}
PP	165	-10	13,2 J ^{1/2} cm ^{-3/2}



Źródło: Giovanni Polacco i inni, „A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt/ polymer interactions and principles of compatibility”, Advances in Colloid and Interface Science, 2015

Program badań



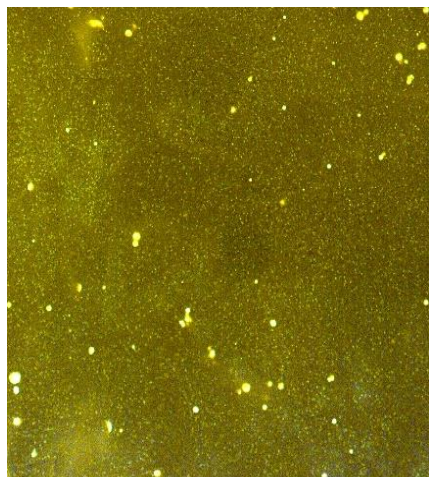
1. Prędkość mieszania
2. Temperatura mieszania
3. Czas mieszania
4. Zawartość plastomeru
5. Typ asfaltu
6. Rodzaj plastomeru (PET, PP)
7. Granulacja plastomeru

Temperatura mięknięcia (TR&B)	EN1427
Penetracja (Pen, 0,1mm)	EN 1426
Temperatura łamliwości (TFraass)	EN 12593
Lepkość dynamiczna ($\eta_{a@135st.C}$) w 135°C	ASTM D4402
Podatność nieodwracalna Jnr oraz nawrot R dla naprężenia ścianjacego 100Pa (Jnr 0,1) i 3200Pa (Jnr 3,2) w temperaturze 50°C, 60°C, 70°C, 80°C	AASHTO TP 70

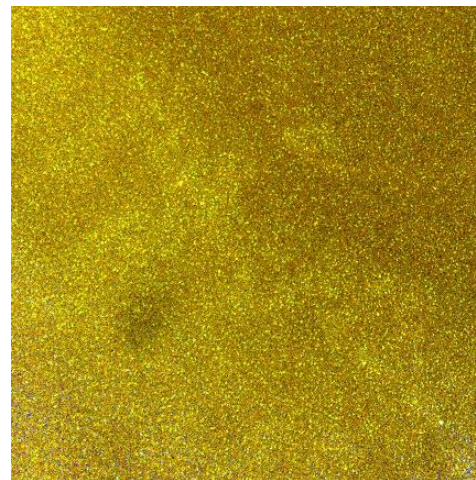
Mikroskop epi-fuorescencyjny	EN 13632
------------------------------	----------

Modelowanie Jnr i R techniką MARS

Ocena wizualna



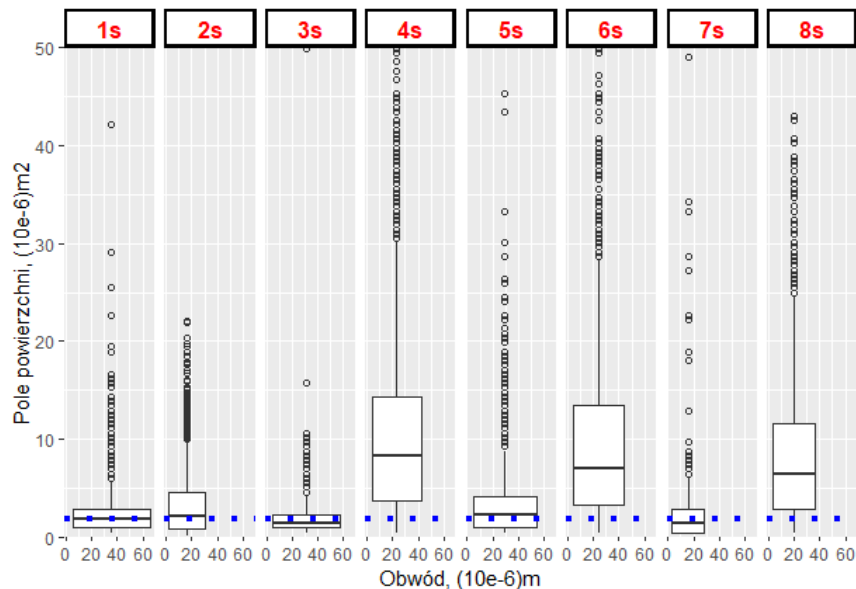
Przypadek 2s	
Prędkość mieszania	9500
Temperatura mieszania	160
Czas mieszania	30
Zawartość plastomeru	2
Asfalt	20/30
Plastomer	PP
Granulacja	>5.6



Przypadek 4s	
Prędkość mieszania	9500
Temperatura mieszania	180
Czas mieszania	30
Zawartość plastomeru	5
Asfalt	20/30
Plastomer	PET
Granulacja	<5.6

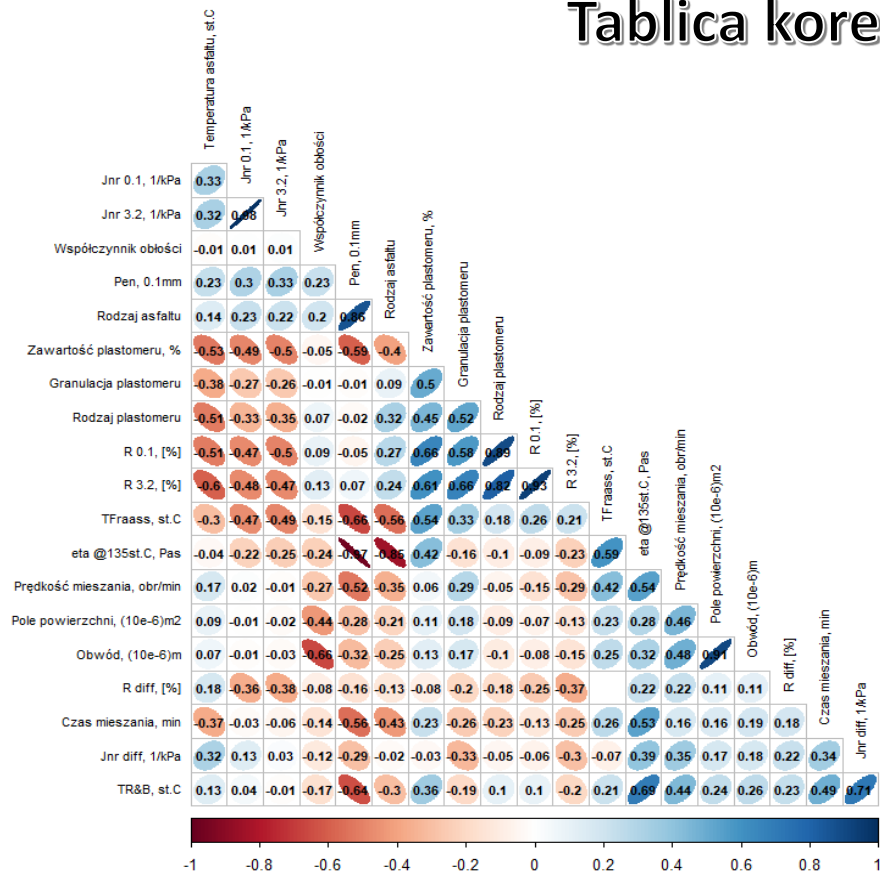
Rys. 2. Obraz mikrostruktury asfaltów modyfikowanych polimerami (powiększenie 100x)

Dystrybucja cząstek plastomeru w strukturze asfaltu



Rys. 3. Relacja pomiędzy polem powierzchni i obwodem cząstek polimeru

Tablica korelacyjna



Rys. 4. Macierz korelacji

Model MARS

(Multivariate Adaptive Regression Splines)

$$h_+(t; x) = \begin{cases} 0 & \text{dla } x < t \\ x - t & \text{dla } x \geq t \end{cases} = \max(0; x - t)$$

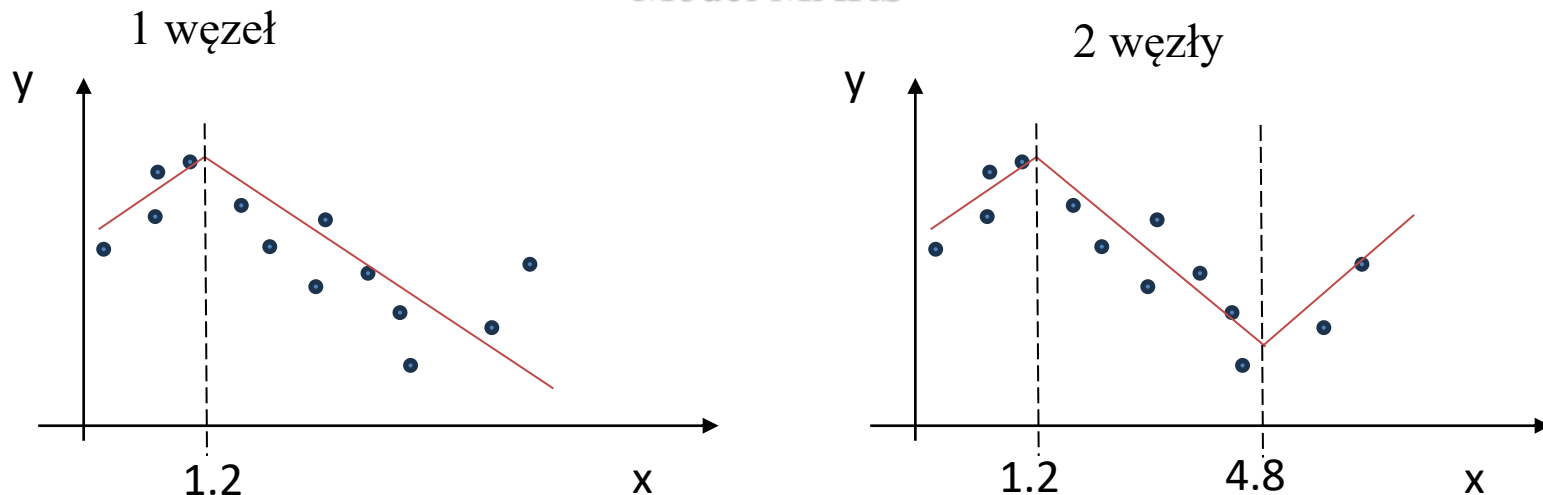
lub

$$h_-(t; x) = \begin{cases} t - x & \text{dla } x < t \\ 0 & \text{dla } x \geq t \end{cases} = \max(0; t - x)$$

$$GCV = MSE \frac{1}{\left(1 - \frac{C}{N}\right)^2}$$

gdzie: MSE – błąd średniokwadratowy estymacji, C – miara złożoności modelu proporcjonalna do jego składowych, N – liczba przypadków.

Model MARS



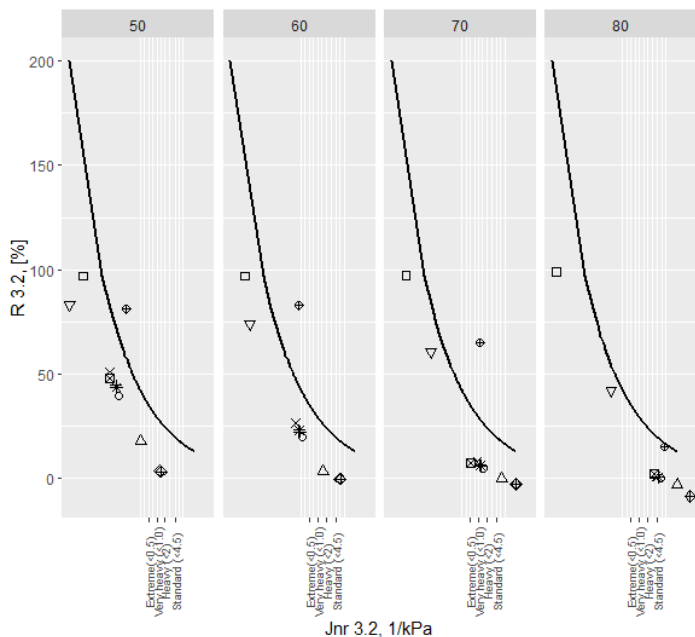
Rys. 5 Idea budowy modelu MARS

$$y = \begin{cases} a_0 + a_1(1.2 - x) & x < 1.2 \\ a_0 + a_2(x - 1.2) & x > 1.2 \end{cases}$$

$$y = b + \sum_{i=1}^M a_i H_i(x)$$

$$y = \begin{cases} a_0 + a_1(1.2 - x) & x < 1.2 \\ a_0 + a_2(x - 1.2) & x > 1.2 \\ a_0 + a_3(4.8 - x) & x > 4.8 \end{cases}$$

Rezultaty badań MSCR



Rys. 6 Wyniki badania MSCR asfaltu modyfikowanego plastomerami

Tabela 4. Ocena parametrów modelu dla cechy Jnr 3,2 i R

Cecha	Jnr 3,2			R		
	Parametr	Bł. stand.	Pr(> t)	Parametr	Bł. stand.	Pr(> t)
Wyraz wolny	11,065	0,492	<0,001	88,196	1,014	<0,001
Prędkość mieszania, obr/min	0,000	0,000	<0,001	-0,004	0,000	<0,001
Temperatura asfaltu, st.C	-0,024	0,003	<0,001	-0,353	0,006	<0,001
Czas mieszania, min	0,001	0,000	<0,001	-0,050	0,001	<0,001
Zawartość plastomeru, %	-1,299	0,021	<0,001	5,895	0,043	<0,001
Plastomer	-4,386	0,062	<0,001	38,175	0,128	<0,001
Asfalt	3,601	0,062	<0,001	0,121	0,128	0,345
Granulacja	0,255	0,062	<0,001	-29,904	0,128	<0,001
R²	0,29 (p-value: < 0,001)			0,66 (p-value: < 0,001)		

Prognozowanie Jnr przy 3200 Pa

Mars: Jnr 3,2, 1/kPa

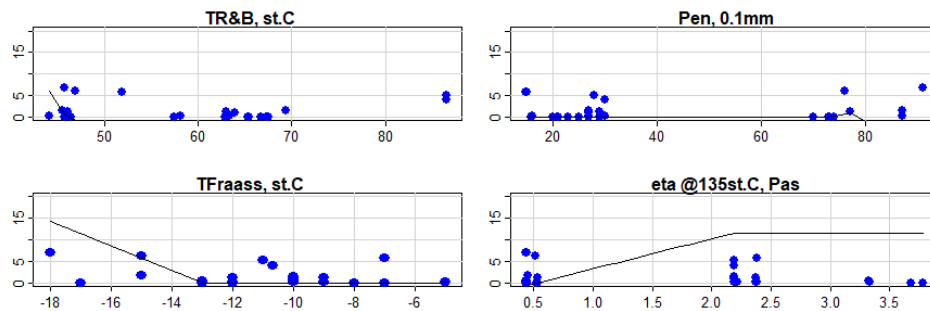
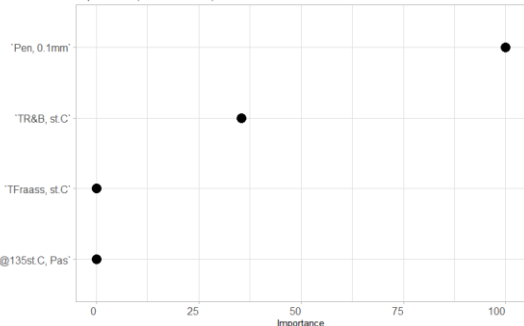


Tabela 5. Parametry modelu MARS dla cechy Jnr 3,2

i	Parametr	a_i
0	Wyraz wolny (a_0)	-53,82
1	$H_1(^{\wedge}\text{TR\&B, st.C}^{-65,4})$	-3,236
2	$H_2(65,4^{-}\text{TR\&B, st.C}^{\wedge})$	3,368
3	$H_3(-13^{-}\text{TFraass, st.C}^{\wedge})$	2,884
4	$H_4(2,19^{-}\text{eta @135st.C, Pas}^{\wedge})$	-6,98
5	$H_5(^{\wedge}\text{Pen, 0.1mm}^{-77})$	-0,886
6	$H_6(^{\wedge}\text{TR\&B, st.C}^{-86,5})$	-167,6
7	$H_7(^{\wedge}\text{TR\&B, st.C}^{-58,2})$	1,064
8	$H_8(^{\wedge}\text{TR\&B, st.C}^{-45,8})$	2,387
9	$H_9(^{\wedge}\text{Pen, 0.1mm}^{-73})$	0,262
$R^2=0,99$		
GCV = 0,06 kPa⁻¹		

Rys. 7. Prognozowanie wartości Jnr3,2 z wykorzystaniem modelu MARS względem istotnych właściwości asfaltu

Importance (Jnr 3,2, 1/kPa)



Rys. 8. Wartości wskaźnika Importance względem istotnych właściwości wpływających na Jnr 3,2 w modelu MARS

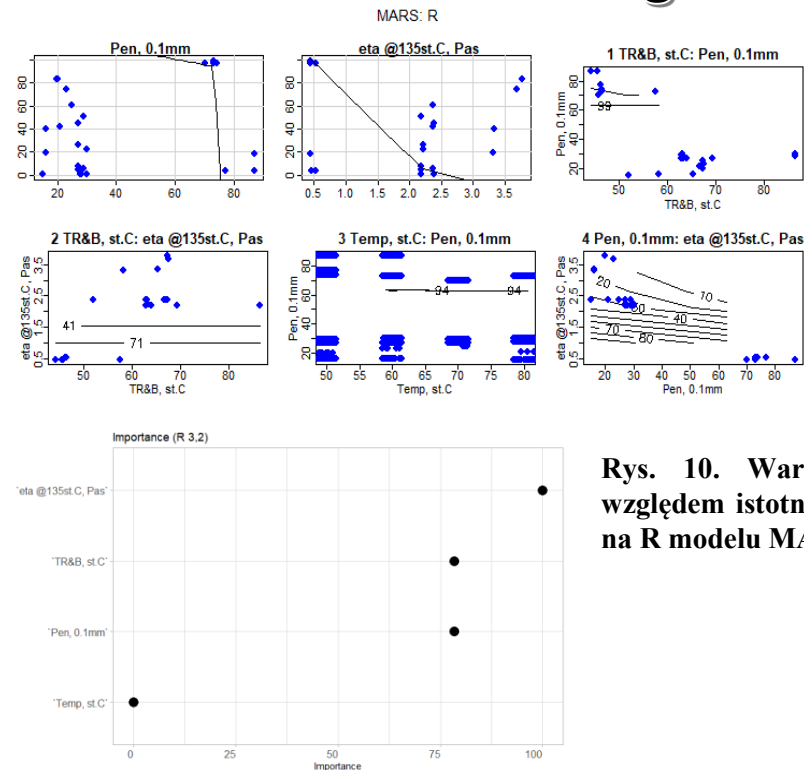
Prognozowanie R przy 3200 Pa

Tabela 6. Parametry modelu MARS dla cechy R

i		a_i
0	Wyraz wolny (a_0)	4,758
1	$H_i('Pen, 0.1mm^{-73})$	112,2
2	$H_i(70^{-}Temp, st.C^{-} * H_i(73^{-}Pen, 0.1mm^{-})$	0,049
3	$H_i('Pen, 0.1mm^{-73}) * H_i('eta @135st.C, Pas^{-}0,53)$	-3828
4	$H_i('Pen, 0.1mm^{-73}) * H_i(0,53^{-}eta @135st.C, Pas^{-})$	-153,4
5	$H_i(73^{-}Pen, 0.1mm^{-}) * H_i('eta @135st.C, Pas^{-}3,33)$	-9,823
6	$'TR\&B, st.C^{-} * H_i('Pen, 0.1mm^{-73})$	-2,367
7	$H_i('eta @135st.C, Pas^{-}2,19)$	-14,68
8	$H_i(2,19^{-}eta @135st.C, Pas^{-})$	54,02
9	$H_i('TR\&B, st.C^{-}65,4) * H_i('eta @135st.C, Pas^{-}2,19)$	83,51
R²=0,99		
GCV = 8,6 %		

Rys. 9. Prognozowanie wartości R z wykorzystaniem modelu MARS względem istotnych właściwości asfaltu oraz ich wzajemnych interakcji

Rys. 10. Wartości wskaźnika Importance względem istotnych właściwości wpływających na R modelu MARS



Wnioski

Na podstawie wykonanych badań i analiz sformułowano następujące wnioski:

- Za pomocą techniki MARS uzyskano model regresyjny wykazujący wysoką skuteczność w prognozowaniu nieodwracalnej części modułu podatności oraz procentowego nawrotu za pomocą podstawowych właściwościami asfaltu na poziomie 99%,
- Cechą kluczową w prognozowaniu nieodwracalnej części modułu podatności asfaltu modyfikowanego plastomerami była penetracja oraz temperatura mięknięcia. Natomiast w przypadku procentowego nawrotu najważniejszymi cechami była lepkość dynamiczna oraz penetracja.
- Zastosowanie plastomeru typu PP o drobnym uziarnieniu (<5,6mm) spowodowało gwałtowny spadek wartości nieodwracalnej części modułu podatności oraz wartości procentowego nawrotu,
- Szybki wzrost cechy J_{nr} można uzyskać stosując plastomer PET o drobnym uziarnieniu w ilości poniżej 5% z wykorzystaniem asfaltu miękkiego (70/100). Z kolei wzrost wartości cechy R bezpośrednio korelował z przypadkami, gdzie zastosowano gruboziarnistą granulację plastomeru (>5,6mm) w ilości >3% typu PP.



Prognozowanie nieodwracalnej podatności i nawrotu sprężystego asfaltów modyfikowanych plastomerami odpadowymi w badaniach MSCR



Warsaw, 18 October 2023

MRP'23

Dziękuję za uwagę

Badania zostały wykonane w ramach Projektu nr RPSW.01.02.00-26-0011/22 pt.: „Opracowanie innowacyjnego lepiscza asfaltowego modyfikowanego polimerem odpadowym PET (Poli(tereftalan etylenu))” dofinansowanego w ramach działania Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Świętokrzyskiego na lata 2014-2020 w ramach Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Osi priorytetowej 1 Innowacje i nauka Działanie 1.2 Badania i rozwój w sektorze świętokrzyskiej przedsiębiorczości.