

*absorpcja, asfalt, kruszywo, gęstość, lepkość, porowatość*

Monika ZIĘBA\*

## WŁAŚCIWOŚCI ABSORPCYJNE KRUSZYW DROGOWYCH

Kruszywa mineralne charakteryzują się obecnością pustych przestrzeni, które mogą być dostępne dla lepiszczy asfaltowych podczas produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych (skrótowo MMA). Zapisy normowe mówią, że przeciętna objętościowa absorpcja lepiszcza wynosi około 1/3 objętości zewnętrznych (dostępnych) porów w kruszywie. Oznacza to, że porowatość rzędu 1,5% (V/V) będzie powodowała maksymalną absorpcję lepiszcza około 0,5% (V/V) lub 0,2% (m/m). W polskich Wymaganiach Technicznych (WT-2 2010), dotyczących ustalania składu tych mieszanek, nie wprowadzono żadnej procedury uwzględniającej absorpcję asfaltu przez kruszywo.

### 1. WROWADZENIE

Kruszywa mineralne charakteryzują się obecnością pustych przestrzeni, które mogą być dostępne dla lepiszczy asfaltowych podczas produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych MMA. Oznacza to, że w odpowiednio wysokiej temperaturze, określona ilość asfaltu może być wchłonięta przez puste przestrzenie w kruszywie, co w konsekwencji będzie wpływać na gęstość oraz zwiększenie zawartości wolnych przestrzeni w tych mieszankach.

Podczas projektowania MMA w USA [4], uwzględnia się asfalt zaabsorbowany przez kruszywo  $P_{ba}$  oraz efektywną zawartość asfaltu  $P_{be}$ . W Niemczech [6], stosuje się poprawkę na asfalt zaabsorbowany przez kruszywo (w zależności od ilości wypełniacza w mieszance):

$$B_{uni} = 0,014 \cdot F + 0,1 \text{ [%]} \quad (1)$$

gdzie:  $F$  – zawartość ziaren poniżej 0,063 mm w mieszance kruszywa.

W polskich Wymaganiach Technicznych WT-2 2010 [5], dotyczących ustalania składu mieszanek mineralno-asfaltowych, nie wprowadzono żadnej procedury uwzględniającej absorpcję asfaltu przez kruszywo. Analizując definicje gęstości kruszyw podane w normach PN-EN 1097-6 oraz PN-EN 12697-5 i porównując je z definicjami podanymi w [4, 7], można dojść do ciekawych wniosków.

---

\* TPA Instytut Badań Technicznych w Pruszkowie, monika.zieba@tpaqi.com

**Gęstość objętościowa ziaren  $\rho_a$**  wg PN-EN 1097-6 – stosunek masy próbki kruszywa wysuszonej w suszarce do objętości, jaką próbka zajmie w wodzie wraz z wewnętrznymi zamkniętymi pustymi przestrzeniami lecz bez pustych przestrzeni dostępnych dla wody (wg PN-EN 12697-5 jest to gęstość pozorna ziaren; wg [4] jest to „Apparent Specific Gravity” –  $G_{sa}$ ).

**Gęstość ziaren wysuszonych w suszarce  $\rho_{rd}$**  wg PN-EN 1097-6 – stosunek masy próbki kruszywa wysuszonej w suszarce, do objętości, jaką próbka zajmie w wodzie wraz z wewnętrznymi zamkniętymi pustymi przestrzeniami oraz pustymi przestrzeniami dostępnymi dla wody (wg PN-EN 12697-5 jest to gęstość suchych ziaren ( $\rho_{pdd}$ ) dla próbek kruszywa otoczonego asfaltem w temperaturze 120 °C; wg [4] jest to „Bulk Specific Gravity” –  $G_{sb}$ ).

**Gęstość efektywna ziaren** (wg [4] jest to „Effective Specific Gravity” –  $G_{se}$ ) – stosunek masy próbki suchego kruszywa, do jego objętości wraz z wewnętrznymi zamkniętymi pustymi przestrzeniami oraz pustymi przestrzeniami dostępnymi dla wody, ale bez objętości pustych przestrzeni dostępnych dla asfaltu (w PN-EN 1097-6 nie ma opisu takiej gęstości; w normie PN-EN 12697-5 są tylko niejednoznaczne zapisy jak obliczyć objętość wchłoniętego asfaltu).

Dla próbek kruszywa otaczanych asfaltem w temperaturach wyższych niż norma (120 °C), wartość gęstości suchych ziaren kruszywa  $\rho_{pdd}$  będzie się zbliżała do gęstości efektywnej ziaren  $G_{se}$  – wraz ze wzrostem temperatury otaczania, asfalt będzie stopniowo wypełniał puste przestrzenie w kruszywie.

Przy założeniach normowych:

$$\rho_{pdd} = \rho_{rd} \text{ w temp. } 120 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ oraz } \rho_{pdd} \rightarrow G_{se} \text{ w temp. } >120 \text{ } ^\circ\text{C}$$

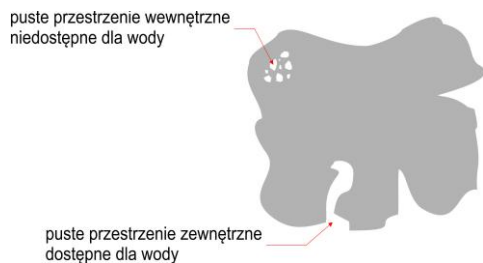
Interpretacja graficzna gęstości kruszywa została przedstawiona na rysunkach 1–4.

## 2. PROGRAM BADAŃ

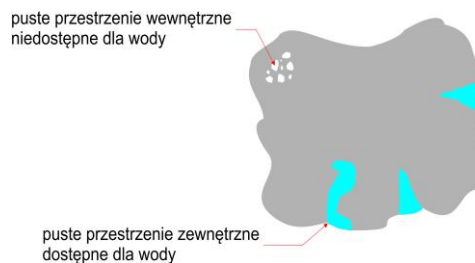
Głównym celem wykonanych badań było określenie, jaka jest absorpcja asfaltu przez różne kruszywa stosowane w kraju do produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych. Badania zostały wykonane na frakcji 8/11 mm, z użyciem dwóch asfaltów 35/50 i PMB 45/80-55, przy wykorzystaniu kruszyw o „potencjalnie” różnej absorpcji (wapień, dolomit, kruszywo polodowcowe, melafir, gabro, bazalt, kwarcyt).

### 2.1. BADANIA LEPKOŚCI ASFALTÓW WG PN-EN 13302

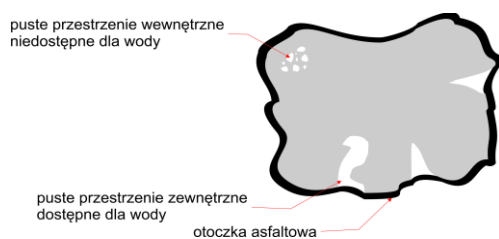
Na potrzeby niniejszych badań wykonano badania lepkości asfaltów w temperaturze 90, 105, 120 oraz 135 °C wg PN-EN 13302, a następnie przygotowano próbki każdego kruszywa otoczonego asfaltem podgrzanym do każdej z ww. temperatur (ilość asfaltu ustalano doświadczalnie, aby całkowicie otoczyć kruszywo). Wyniki badań lepkości asfaltów zostały przedstawione w tabeli 1.



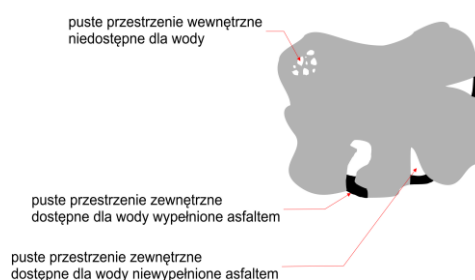
Rys. 1. Gęstość objętościowa ziaren  
Fig. 1. Apparent particle density



Rys. 2. Gęstość ziaren wysuszonych w suszarce  
Fig. 2. Particle density on an oven dried basis



Rys. 3. Gęstość suchych ziaren  
Fig. 3. Particle dry density



Rys. 4. Gęstość efektywna ziaren  
Fig. 4. Particle effective density

Tabela 1

Wyniki badań lepkości asfaltów w zależności od temperatury

	Temperatura	Asfalt	
		35/50	PMB 45/80-55
Lepkość [Pa·s] wg PN-EN 13302	90 °C	20,78	28,07
	105 °C	5,48	6,83
	120 °C	1,86	2,21
	135 °C	0,75	0,94

## 2.2. OZNACZENIE GĘSTOŚCI KRUSZYW

Gęstości wszystkich kruszyw  $\rho_a$ ,  $\rho_{ssd}$ ,  $\rho_{rd}$  zostały oznaczone wg PN-EN 1097-6. Następnie obliczono ich porowatości (norma tego nie przewiduje) na podstawie oznaczonych gęstości (puste przestrzenie w kruszywie wypełnione całkowicie wodą), wg wzoru analogicznego do podanego w normie PN-EN 12697-5.

$$\text{Porowatość} = 100 \cdot (\rho_a - \rho_{rd}) / \rho_{rd} [\%] \quad (2)$$

gdzie:

- $\rho_a$  – gęstość objętościowa ziaren,
- $\rho_{rd}$  – gęstość ziaren wysuszonych w suszarce,

Wyniki badań gęstości kruszyw oraz porowatości podano w tabeli 2.

Tabela 2

Wyniki badań gęstości kruszyw i obliczonej porowatości

Kruszywo	Gęstość objętościowa ziaren $\rho_a$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	Gęstość ziaren nasyconych i powierzchniowo osuszonych $\rho_{ssd}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	Gęstość ziaren wysuszonych w suszarce $\rho_{td}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	Porowatość (kruszywo bez otoczki, badane w wodzie) [%]
melafir	2,700	2,649	2,620	3,1
kruszywo polodowcowe	2,697	2,650	2,622	2,9
dolomit	2,811	2,762	2,735	2,8
wapień	2,708	2,673	2,653	2,1
kwarcyt	2,657	2,622	2,610	1,8
bazalt	3,134	3,056	3,020	3,8
gabro	3,004	2,955	2,931	2,5

Gęstość określano wg PN-EN 1097-6; wyniki badań gęstości podano z zaokrągleniem do 0,001 Mg/m<sup>3</sup>.

### 2.3. PRZYGOTOWANIE PRÓBEK KRUSZYWA OTOCZONEGO ASFALTEM

Poszczególne kruszywa pokrywano szczelną otoczką asfaltową zgodnie z załącznikiem B normy PN-EN 12697-5, aby osiągnąć nieprzepuszczalność tej otoczki.

Norma badawcza PN-EN 12697-5 sugeruje użycie 1% (m/m) asfaltu (nie precyzuje jednak jakiego) o temperaturze 120 °C w stosunku do ilości kruszywa, a równocześnie mówi, że lepkość asfaltu powinna być tak dobrana, aby nie wnikał on w pory powierzchniowe i aby nie tworzyły się puste kawerny pod tą otoczką. Zaleca równocześnie ograniczenie ilości asfaltu przeznaczonego do otoczenia ziaren, aby nie doprowadzić do zamknięcia wolnych przestrzeni między ziarnami.

W pierwszej kolejności podjęto próby otaczania kruszywa wg opisu podanego w normie PN-EN 12697-5 (kruszywo o temperaturze otoczenia, wymieszane z 1% (m/m) asfaltu o temperaturze 120 °C). Takich próbek nie dało się przygotować nawet zwiększając temperaturę asfaltu używanego do otaczania kruszywa.

Założono, że kruszywo będzie podgrzewane do tej samej temperatury co asfalt. Próby otaczania kruszywa asfaltem 35/50 oraz PMB 45/80-55 w temperaturze 90 °C nie dały satysfakcjonujących rezultatów. Dopiero w temperaturze 105 °C wyniki otaczania kruszywa asfaltem można uznać za pozytywne. Stopień pokrycia kruszywa asfaltem oceniano za każdym razem wizualnie. Celem było otoczenie kruszywa szczelną otoczką asfaltową zgodnie z załącznikiem B normy PN-EN 12697-5 przy wykorzystaniu minimalnej ilości asfaltu. Do otaczania każdej próbki kruszywa używano od 1% do 3% (m/m) asfaltu w stosunku do masy próbki kruszywa. Dla każdej przygotowanej próbki kruszywa otoczonego asfaltem określano również rzeczywistą ilość asfaltu, która pozostawała na powierzchni ziaren kruszywa.

Po otoczeniu ziaren kruszywa asfaltem, wszystkie ziarna były ręcznie rozdzielane, aby nie dopuścić do powstania wolnych przestrzeni pomiędzy sklejonymi ziarnami.

#### 2.4. OZNACZENIE GĘSTOŚCI MMA WG PN-EN 12697-5

Dla przygotowanych próbek oznaczono gęstości MMA ( $\rho_{mv}$ ), czyli gęstości kruszyw otoczonych asfaltem wg PN-EN 12697-5 metodą A w wodzie (wg [4] oznacza się je symbolem  $G_{mm}$ ). Średnie wartości gęstości zostały przedstawione w tabeli 3.

Tabela 3

Wyniki badań gęstości MMA

Kruszywo + asfalt 35/50	Gęstość $\rho_{mv}$ metoda A wg PN-EN 12697-5 [Mg/m <sup>3</sup> ]
melafir	2,580
kruszywo polodowcowe	2,570
dolomit	2,669
wapień	2,588
kwarcyt	2,540
bazalt	2,963
gabro	2,858

#### 2.5. OBLICZENIE POROWATOŚCI KRUSZYW OTOCZONYCH ASFALTEM

Dla przygotowanych próbek oznaczono i obliczono objętości grysów otoczonych, objętości otoczki asfaltowej oraz gęstości suchych ziaren kruszywa  $\rho_{pdd}$ .

Następnie obliczono porowatości kruszyw otoczonych asfaltem (otoczka asfaltowa zamyka ściśle puste przestrzenie w kruszywie wypełnione powietrzem) na podstawie oznaczonych gęstości wg wzoru podanego w normie PN-EN 12697-5.

$$\text{Porowatość} = 100 \cdot (\rho_a - \rho_{pdd}) / \rho_{pdd} \quad [\%] \quad (3)$$

gdzie:

$\rho_a$  – gęstość pozorna kruszywa,

$\rho_{pdd}$  – gęstość suchych ziaren.

W podanym powyżej wzorze, określenie „gęstość pozorna kruszywa” odpowiada gęstości objętościowej kruszywa wg PN-EN 1097-6.

#### 2.6. OBLICZENIE ILOŚCI ASFALTU ZAABSORBOWANEGO PRZEZ KRUSZYWO ORAZ EFEKTYWNEJ ZAWARTOŚCI ASFALTU W MMA

Wykorzystując wzory podane w [4], obliczono gęstość efektywną kruszywa  $G_{se}$  ze wzoru

$$G_{se} = (P_{mm} - P_b) / (P_{mm}/G_{mm} - P_b/G_b) \quad (4)$$

a następnie obliczono ilość asfaltu zaabsorbowanego przez kruszywo  $P_{ba}$  ze wzoru

$$P_{ba} = 100 \cdot G_b \cdot (G_{se} - G_{sb}) / (G_{sb} \cdot G_{se}) \quad (5)$$

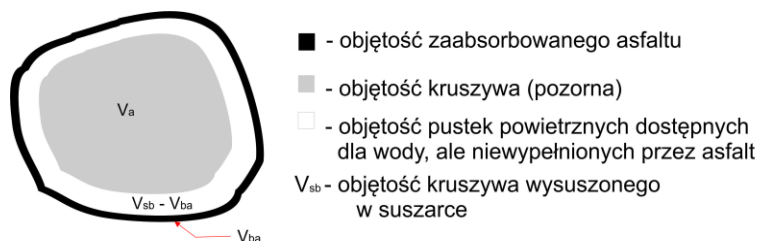
Obliczono również efektywną zawartość asfaltu w MMA  $P_{be}$  ze wzoru

$$P_{be} = P_b - P_{ba} \cdot P_s / 100 \quad (6)$$

gdzie:

- $P_{mm}$  – całkowita ilość MMA = 100%,
- $P_b$  – zawartość asfaltu w MMA,
- $G_{mm}$  – gęstość MMA,
- $G_b$  – gęstość asfaltu,
- $G_{sb}$  – „Bulk Specific Gravity” (wg PN-EN 1097-6 –  $\rho_{rd}$ ),
- $P_s$  – zawartość kruszywa w MMA.

Na podstawie oznaczonych porowatości kruszywa oraz obliczonych wartości gęstości efektywnej kruszywa  $G_{se}$ , obliczono w jakim stopniu puste przestrzenie dostępne dla wody w kruszywie (porowatość) mogą być wypełnione asfaltem.



Rys. 5. Graficzne przedstawienie parametrów objętościowych kruszywa  
 Fig. 5. Graphical interpretation of volumetric parameters of aggregate

### 3. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

#### 3.1. POROWATOŚĆ KRUSZYWA OTOCZONEGO ASFALTEM WG PN-EN 12697-5

Wyniki badań dla wybranych kruszyw otoczonych asfaltem 35/50 oraz PMB 45/80-55 w różnych temperaturach zostały przedstawione w tabelach 4–7.

Dla każdej temperatury otaczania i każdego rodzaju asfaltu obliczano średnią porowatość kruszywa, ponieważ nie zauważono znaczących różnic w pojedynczych wynikach porowatości przy zwiększaniu ilości asfaltu użytego do otoczenia próbki w danej temperaturze. Wyniki zaznaczone na szaro nie są brane pod uwagę przy obliczeniu średniej porowatości, gęstości efektywnej kruszywa, asfaltu zaabsorbowanego i efektywnego; otoczenie wynosiło poniżej 95%.

Tabela 4

## Wyniki badań porowatości kruszywa melafirowego otoczonego asfaltem

Otoczka (rodzaj asfaltu)	Temp. otaczania [°C]	Zadana ilość asfaltu [%]	Ocena pokrycia asfaltem [%]	Rzeczywista ilość asfaltu w mma [%]	Objętość gryswow otoczonych $\times 10^{-6}$ [m <sup>3</sup> ]	Objętość otoczki asfaltowej $\times 10^{-6}$ [m <sup>3</sup> ]	Gęstość suchych ziaren kruszywa [Mg/m <sup>3</sup> ]	Porowatość [%]	Średnia porowatość [%]	$G_{se}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	$P_{na}$ [%]	$P_{pe}$ [%]	
35/50	105	2.0	90	1.33	79.1	2.6	2.618	3.1	x	x	x	x	
		2.5	95	1.77	80.6	3.5	2.599	3.9	3.8	2.652	0.48	1.30	
		3.0	100	2.11	81.0	4.2	2.604	3.7	—	2.667	0.69	1.43	
	120	1.0	80	0.79	77.3	1.6	2.639	2.3	—	—	—	—	—
		1.5	90	1.09	78.2	2.1	2.629	2.7	—	—	—	—	—
		2.0	100	1.28	79.2	2.5	2.610	3.5	3.6	2.632	0.18	1.11	
	135	2.5	100	1.57	79.9	3.1	2.606	3.6	—	2.644	0.36	1.22	
		3.0	100	1.96	80.7	3.9	2.605	3.6	—	2.661	0.60	1.37	
		1.0	100	0.65	77.1	1.3	2.638	2.4	—	2.606	-0.21	0.86	
	PMB 45/80-55	105	1.5	100	1.09	78.0	2.1	2.637	2.4	—	2.624	0.06	1.03
			2.0	100	1.33	78.8	2.6	2.630	2.7	2.6	2.634	0.21	1.13
			2.5	100	1.67	79.5	3.3	2.627	2.8	—	2.648	0.42	1.26
120		3.0	100	1.96	80.0	3.9	2.629	2.7	—	2.661	0.60	1.37	
		2.0	90	1.28	79.8	2.6	2.588	4.3	—	—	—	—	
		2.5	95	1.38	80.3	2.8	2.578	4.7	4.7	2.637	0.25	1.14	
135	3.0	100	1.67	80.9	3.3	2.582	4.6	—	2.649	0.43	1.25		
	1.0	80	0.55	77.5	1.1	2.620	3.1	—	—	—	—		
	1.5	90	0.89	78.0	1.8	2.624	2.9	—	—	—	—		
	2.0	100	1.04	79.0	2.1	2.599	3.9	—	2.622	0.04	1.00		
	2.5	100	1.38	79.8	2.8	2.597	4.0	3.9	2.637	0.25	1.14		
	3.0	100	1.77	80.5	3.5	2.600	3.9	—	2.654	0.49	1.29		
135	1.0	100	0.70	77.8	1.4	2.617	3.2	—	2.608	-0.18	0.87		
	1.5	100	0.94	78.4	1.9	2.615	3.3	—	2.618	-0.02	0.97		
	2.0	100	1.43	79.2	2.9	2.618	3.1	3.1	2.639	0.28	1.15		
średnia	2.5	100	1.48	79.3	3.0	2.621	3.0	—	2.641	0.31	1.17		
	3.0	100	2.01	80.3	4.0	2.624	2.9	—	2.664	0.64	1.38		
średnia									2.640	0.29	1.17		

Tabela 5

## Wyniki badań porowatości kruszywa bazaltowego otoczonego asfaltem

Otoczka (rodzaj asfaltu)	Temp. otaczania [°C]	Zadana ilość asfaltu [%]	Ocena pokrycia asfaltem [%]	Rzeczywista ilość asfaltu w mma [%]	Objętość grysw otoczonych $\times 10^{-6}$ [m <sup>3</sup> ]	Objętość otoczki asfaltowej $\times 10^{-6}$ [m <sup>3</sup> ]	Gęstość suchych ziaren kruszywa [Mg/m <sup>3</sup> ]	Porowatość [%]	Średnia porowatość [%]	$G_{se}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	$P_{ha}$ [%]	$P_{pe}$ [%]
35/50	105	2.0	95	1.5	69,8	3,0	2,997	4,6	4,6	3,052	0,36	1,17
		2.5	100	1,9	70,5	3,7	2,996	4,6		3,073	0,59	1,29
		3,0	100	2,1	70,9	4,1	2,996	4,6		3,086	0,72	1,35
	1,0	90	0,7	67,7	1,4	3,015	4,0	—	—	—	—	—
	1,5	95	1,0	68,5	2,0	3,011	4,1	—	—	—	—	—
	2,0	95	1,2	69,0	2,4	3,009	4,2	—	—	—	—	—
	2,5	100	1,4	69,4	2,7	3,004	4,3	4,2	4,2	3,035	0,16	1,07
	3,0	100	1,7	69,9	3,4	3,009	4,1	—	—	3,043	0,26	1,12
	1,0	90	0,8	68,2	1,7	3,009	4,1	—	—	3,064	0,49	1,24
	1,5	100	1,0	68,4	2,0	3,012	4,1	—	—	—	—	—
	2,0	100	1,2	68,9	2,4	3,013	4,0	4,0	4,0	3,020	0,00	0,99
	2,5	100	1,6	69,5	3,2	3,018	3,8	—	—	3,035	0,16	1,07
3,0	100	1,8	70,1	3,5	3,008	4,2	—	—	3,058	0,43	1,20	
2,0	95	1,3	69,4	2,6	2,992	4,8	—	—	3,067	0,52	1,25	
2,5	100	1,5	69,8	3,0	2,988	4,9	—	—	3,039	0,21	1,08	
3,0	100	1,8	70,4	3,5	2,988	4,9	—	—	3,051	0,34	1,14	
1,0	90	0,3	67,4	0,6	2,994	4,7	—	—	3,069	0,54	1,24	
1,5	90	0,7	68,3	1,4	2,993	4,7	—	—	—	—	—	
2,0	95	1,1	68,8	2,2	3,003	4,4	—	—	—	—	—	
2,5	100	1,2	69,3	2,5	2,995	4,6	—	—	3,027	0,08	1,01	
3,0	100	1,5	69,7	3,1	3,001	4,4	—	—	3,036	0,17	1,06	
1,0	90	0,8	68,2	1,6	3,004	4,3	—	—	3,054	0,37	1,16	
1,5	95	1,0	68,7	2,0	3,000	4,5	—	—	—	—	—	
2,0	100	1,1	68,8	2,3	3,009	4,2	—	—	3,021	0,01	0,98	
2,5	100	1,5	69,6	3,0	3,007	4,2	—	—	3,030	0,11	1,03	
3,0	100	1,8	70,2	3,6	3,008	4,2	—	—	3,051	0,34	1,14	
średnia									3,048	0,31	1,14	



Tabela 6

## Wyniki badań porowatości kruszywa wapiennego otoczonego asfaltem

Otoczka (rodzaj asfaltu)	Temp. otaczania [°C]	Zadana ilość asfaltu [%]	Ocena pokrycia asfaltem [%]	Rzeczywista ilość asfaltu w mma [%]	Objętość grysw otoczonych $\times 10^{-6}$ [m <sup>3</sup> ]	Objętość otoczki asfaltowej $\times 10^{-6}$ [m <sup>3</sup> ]	Gęstość suchych ziaren kruszywa [Mg/m <sup>3</sup> ]	Porowatość [%]	Średnia porowatość [%]	$G_{se}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	$P_{ba}$ [%]	$P_{be}$ [%]	
35/50	105	2,0	95	1,7	79,3	3,3	2,633	2,8	2,7	2,657	0,06	1,62	
		2,5	95	1,9	79,6	3,7	2,637	2,7		2,665	0,18	1,69	
		3,0	100	2,5	80,9	5,1	2,637	2,7		2,695	0,60	1,95	
	120	1,0	100	0,8	77,3	1,7	2,642	2,5	2,5	2,622	-0,46	1,30	
		1,5	100	1,3	78,3	2,5	2,641	2,5		2,640	-0,19	1,47	
		2,0	100	1,6	79,0	3,1	2,640	2,6		2,653	-0,01	1,58	
	135	2,5	100	2,0	79,6	3,9	2,644	2,4	2,3	2,669	0,24	1,73	
		3,0	100	2,4	80,4	4,8	2,646	2,3		2,688	0,51	1,89	
		1,0	100	0,9	77,3	1,8	2,643	2,5		2,624	-0,43	1,32	
	PMB 45/80-55	105	1,5	100	1,1	77,9	2,1	2,641	2,6	3,0	2,632	-0,31	1,39
			2,0	100	1,7	78,8	3,3	2,649	2,2		2,657	0,06	1,62
			2,5	100	2,0	79,4	3,9	2,651	2,2		2,669	0,24	1,73
120		3,0	100	2,3	79,9	4,6	2,656	2,0	-	2,684	0,45	1,86	
		2,0	90	1,4	78,6	2,8	2,637	2,7		-	-	-	
		2,5	95	1,6	79,3	3,2	2,626	3,1		2,654	0,01	1,56	
135		3,0	100	2,2	80,3	4,3	2,630	3,0	-	2,679	0,38	1,78	
		1,0	90	0,8	76,9	1,7	2,656	2,0		-	-	-	
		1,5	95	1,1	77,7	2,2	2,646	2,3		2,633	-0,29	1,38	
średnia		105	2,0	100	1,4	78,4	2,9	2,647	2,3	2,3	2,647	-0,08	1,51
			2,5	100	1,7	78,8	3,3	2,649	2,2		2,658	0,07	1,60
			3,0	100	1,9	79,3	3,8	2,649	2,2		2,669	0,22	1,69
	120	1,0	100	0,8	77,1	1,6	2,649	2,2	2,0	2,620	-0,48	1,26	
		1,5	100	1,2	77,8	2,4	2,653	2,1		2,637	-0,23	1,41	
		2,0	100	1,5	78,5	3,1	2,654	2,0		2,652	-0,02	1,54	
135	2,5	100	1,9	79,0	3,7	2,658	1,9	-	2,667	0,19	1,67		
	3,0	100	2,2	79,8	4,5	2,657	1,9		2,684	0,44	1,82		
	2,0	100	1,4	78,5	2,9	2,647	2,3		2,656	0,05	1,60		

Tabela 7

Wyniki badań porowatości kruszywa kwarcytowego otoczonego asfaltem

Otoczka (rodzaj asfaltu)	Temp. otaczania [°C]	Zadana ilość asfaltu [%]	Ocena pokrycia asfaltem [%]	Rzeczywista ilość asfaltu w mma [%]	Objętość grysw otoczonych $\times 10^{-6}$ [m <sup>3</sup> ]	Objętość otoczki asfaltowej $\times 10^{-6}$ [m <sup>3</sup> ]	Gęstość suchych ziaren kruszywa [Mg/m <sup>3</sup> ]	Porowatość [%]	Średnia porowatość [%]	$G_{se}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	$P_{ba}$ [%]	$P_{be}$ [%]	
35/50	105	2,0	95	1,7	80,9	3,4	2,581	2,9	3,1	2,607	-0,04	1,76	
		2,5	100	2,0	81,5	3,9	2,579	3,0		2,617	0,11	1,85	
		3,0	100	2,5	82,7	5,0	2,573	3,2		2,639	0,44	2,06	
	120	1,0	80	0,9	78,6	1,8	2,605	2,0	-	-	-	-	
		1,5	90	1,4	79,7	2,7	2,599	2,2					
		2,0	95	1,7	80,6	3,4	2,592	2,5					
	135	2,5	100	2,0	81,0	3,9	2,595	2,4	2,4	2,4	2,607	-0,04	1,76
		3,0	100	2,3	81,7	4,7	2,596	2,3			2,617	0,11	1,85
		1,0	90	0,7	78,0	1,5	2,614	1,6			2,633	0,35	2,00
	PMB 45/80-55	105	1,5	95	1,3	79,3	2,5	2,608	1,9	1,8	2,590	-0,31	1,59
			2,0	100	1,7	79,9	3,3	2,612	1,7		2,605	-0,07	1,74
			2,5	100	2,1	81,0	4,2	2,607	1,9		2,623	0,20	1,91
120		3,0	100	2,3	81,2	4,6	2,613	1,7	-	-	2,631	0,32	1,98
		2,0	90	1,5	80,9	3,1	2,570	3,4			-	-	-
		2,5	95	1,7	81,5	3,4	2,564	3,6			2,609	-0,02	1,74
135		3,0	95	2,2	82,4	4,3	2,562	3,7	3,7	3,7	2,627	0,25	1,91
		1,0	70	0,7	78,9	1,4	2,578	3,1			-	-	-
		1,5	80	0,9	79,7	1,9	2,569	3,4			-	-	-
PMB 45/80-55		120	2,0	90	1,0	79,9	2,1	2,569	3,4	-	-	-	-
			2,5	95	1,5	80,8	3,1	2,573	3,3				
			3,0	95	2,1	81,9	4,1	2,572	3,3				
	135	1,0	90	0,7	78,3	1,5	2,606	2,0	-	-	-	-	
		1,5	95	1,1	79,5	2,3	2,590	2,6					
		2,0	100	1,4	80,3	2,9	2,586	2,7					
	135	2,5	100	2,0	81,1	4,0	2,594	2,4	2,5	2,5	2,621	0,16	1,85
		3,0	100	2,2	81,3	4,3	2,598	2,3			2,627	0,25	1,91
		3,0	100	2,2	81,3	4,3	2,598	2,3			2,614	0,07	1,81

### 3.2. KLASYFIKACJA KRUSZYW POD WZGLĘDEM POROWATOŚCI [10, 11]

Kruszywo jest uznane za nieporowate i nieabsorbujące lepiszcza, jeżeli jego porowatość jest mniejsza niż 0,5% (V/V). Po dokonaniu takiej oceny gęstość MMA może być oznaczana w zależności od rodzaju mieszanki za pomocą postępowań A, B lub C wg PN-EN 12697-5.

Kruszywo jest uznane za nieabsorpcyjne, jeżeli jego porowatość mieści się między 0,5% (V/V) a 1,5% (V/V), wówczas gęstość MMA może być również oznaczana w zależności od rodzaju mieszanki za pomocą postępowań A, B lub C wg PN-EN 12697-5. Jednakże zaleca się, aby w postępowaniach A i B nie stosowano rozpuszczalnika organicznego jako cieczy badawczej.

Kruszywo jest uznane za absorpcyjne, jeżeli jego porowatość przekracza 1,5% (V/V). W tym przypadku metoda matematyczna może być zastosowana do obliczenia gęstości MMA (postępowanie C) tylko wtedy, gdy gęstość suchych ziaren kruszywa jest oznaczana z zastosowaniem np. asfaltu. Zaleca się aby w postępowaniach A i B nie stosowano rozpuszczalników organicznych.

Jeżeli oznacza się właściwości objętościowe MMA, (np. zawartość wolnych przestrzeni, wolne przestrzenie wypełnione asfaltem) zaleca się, aby objętość wchłoniętego asfaltu odjęto od objętości asfaltu zastosowanego w mieszance.

### 3.3. WYPEŁNIENIE PUSTYCH PRZESTRZENI ASFALTEM

Zapisy normowe [10, 11] mówią, że przeciętna objętościowa absorpcja lepiszcza wynosi około 1/3 objętości zewnętrznych (dostępnych) porów w kruszywie. Oznacza to, że porowatość rzędu 1,5% (V/V) będzie powodowała maksymalną absorpcję lepiszcza około 0,5% (V/V) lub 0,2% (m/m). Obliczone wartości wypełnienia pustych przestrzeni asfaltem zostały przedstawione w tabeli 8.

Tabela 8

Wypełnienie pustych przestrzeni asfaltem

Kruszywo	Gęstość objętościowa ziaren $\rho_s$ wg PN-EN 1097-6 [Mg/m <sup>3</sup> ]	Gęstość efektywna kruszywa $G_{se}$ wg ASHTO [Mg/m <sup>3</sup> ]	Gęstość ziaren wysuszonych w suszarce $\rho_{td}$ PN-EN 1097-6 [Mg/m <sup>3</sup> ]	Porowatość (bez otoczki, badane w wodzie) [%]	Wypełnienie pustych przestrzeni dostępnych dla wody przez asfalt [%]
melafir	2,700	2,640	2,620	3,1	25,0
kruszywo polodowcowe	2,697	2,648	2,622	2,9	34,7
dolomit	2,811	2,752	2,735	2,8	22,4
wapień	2,708	2,656	2,653	2,1	5,5
kwarcyt	2,657	2,614	2,610	1,8	8,5
bazalt	3,134	3,048	3,020	3,8	24,6
gabro	3,004	2,948	2,931	2,5	23,3

#### 4. WNIOSKI

Na podstawie wykonanych badań można stwierdzić:

- Zgodnie z zapisami podanymi w normie PN-EN 12697-5, wszystkie kruszywa używane do badań można uznać za absorpcyjne – porowatość  $> 1,5\%$  (V/V).
- Jeżeli kruszywo nie jest w 100% otoczone asfaltem, wynik badania porowatości jest obarczony błędem (woda może wnikać do wnętrza ziaren kruszywa wypełniając częściowo dostępne zewnętrzne pory w kruszywie).
- Przy wykonywaniu badań w wodzie (bez otoczki asfaltowej), największą porowatość mają kruszywa bazaltowe (3,8%), melafirowe (3,1%), polodowcowe (2,9%) i dolomitowe (2,8%), najmniejszą zaś kruszywa kwarcytowe (1,8%) oraz wapienne (2,1%). Prawidłowo wykonane badanie gęstości kruszywa w wodzie (szczególnie  $\rho_{rd}$ ) daje jednoznaczne wyniki porowatości.
- Przy wykonywaniu badań dla próbek przygotowanych w temperaturze otaczania 120 °C (normowa temperatura referencyjna) przy użyciu asfaltu 35/50 uzyskiwane wartości porowatości są nieznacznie wyższe niż przy badaniach w wodzie, ale „ranking” kruszyw pozostaje analogiczny jak przy badaniach w wodzie.
- Przy wykonywaniu badań dla próbek przygotowanych w temperaturze otaczania 135 °C przy użyciu asfaltu 35/50 uzyskiwane wartości porowatości są prawie identyczne jak przy badaniach w wodzie. Może to sugerować, że normowa temperatura referencyjna jest za niska, a uzyskane wyniki porowatości są obarczone błędem. Można więc założyć, że:  $\rho_{pdd} = \rho_{rd}$  w temp.  $\sim 135$  °C.
- W tych samych temperaturach otaczania porowatość kruszywa otoczonego asfaltem drogowym jest mniejsza od porowatości kruszywa otoczonego asfaltem modyfikowanym (różnice lepkości asfaltów) – norma powinna jednoznacznie precyzować jaki asfalt powinien być używany do badania porowatości lub jaka powinna być lepkość asfaltu używanego do otaczania kruszywa.
- Największą objętościową absorpcją asfaltu (wypełnienie pustych przestrzeni dostępnych dla wody przez asfalt) charakteryzuje się kruszywo polodowcowe ( $\sim 35\%$ ), melafirowe, dolomitowe, bazaltowe i gabrowe ( $\sim 25\%$ ), najmniejszą zaś kruszywa wapienne ( $\sim 5\%$ ) oraz kwarcytowe ( $\sim 8\%$ ) – zapisy normowe mówiące, że przeciętna objętościowa absorpcja lepiszcza wynosi około 1/3 objętości zewnętrznych porów w kruszywie nie sprawdzają się dla wszystkich kruszyw.
- Największą ilościową absorpcję asfaltu wykazują kruszywa polodowcowe ( $\sim 0,4\%$ ), bazaltowe i melafirowe ( $\sim 0,3\%$ ), najmniejszą zaś kruszywa wapienne (0,05%) i kwarcytowe (0,07%).

## LITERATURA

- [1] BŁAŻEJOWSKI K., *SMA. Teoria i praktyka*, Rettenmaier Polska Sp. z o.o., Wydanie 1, Warszawa 2007.
- [2] IWĄŃSKI M., *Adsorpcja asfaltu przez kruszywo w mieszance mineralno-asfaltowej*, *Drogownictwo*, 9/2012.
- [3] KOWALSKI S.J., *Inżynieria Materiałów Porowatych*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2004.
- [4] *Mix design methods for asphalt concrete and other hot-mix types*, The Asphalt Institute Manual Series No. 2 (MS-2).
- [5] *Nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych WT-2 2010, Mieszanki mineralno-asfaltowe. Wymagania Techniczne*, Warszawa 2010.
- [6] *TP Asphalt-StB, Teil 1. Bindemittelgehalt*, FGSV 2010.
- [7] AASHTO T 85, *Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate*.
- [8] ASTM D 2041, *Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures*.
- [9] PN-EN 1097-6: 2002+AC:2004+Ap1:2005+A1:2006 *Badanie mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – część 6: Oznaczanie gęstości ziaren i nasiąkliwości*.
- [10] PN-EN 12697-5:2008 *Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – część 5: Oznaczanie gęstości*.
- [11] PN-EN 12697-5:2010 *Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – część 5: Oznaczanie gęstości (wersja angielska)*.
- [12] PN-EN 13302:2011 *Asfalty i lepiszcza asfaltowe – Oznaczanie lepkości dynamicznej lepiszczy asfaltowych lepkościerzem obrotowym*.

## ABSORPTION PROPERTIES OF ROAD AGGREGATES

Mineral aggregates are characterised by the existence of permeable voids, which can be accessible for asphalt binders during production of asphalt mixes. The standard description says, that the volume absorption of binder is 1/3 of the volume of external (accessible) voids in aggregate. This mean, that the porosity of 1,5% (V/V) will cause the maximum absorption of binder on the level of 0,5% (V/V) or 0,2% (m/m). In the polish Technical Requirements (WT-2 2010), concerning determination of asphalt mixes properties, there is not existing the procedure concerning absorption of binder by aggregate.