

## Modification of paving bitumens with waste polymeric materials

# Modyfikacja asfaltów drogowych odpadami z materiałów polimerowych



DOI: 10.15199/62.2025.1.12

*A review, with 68 refs., of the modification of paving bitumens with waste polymeric materials. The effects of plastomers on changing the properties of paving bitumens were presented.*

**Keywords:** paving bitumens, modification, waste polymeric materials

Dokonano przeglądu literaturowego dotyczącego modyfikacji asfaltów drogowych odpadami z materiałów polimerowych. Omówiono wpływ odpadów z plastomerów na zmianę właściwości asfaltów drogowych w metodzie na mokro.

**Słowa kluczowe:** asfalty drogowe, modyfikacja, odpady polimerowe

Tworzywa sztuczne uznawane są obecnie za jedną z ważnych przyczyn zanieczyszczenia środowiska naturalnego. Względy technologiczne, ekologiczne i ekonomiczne powodują konieczność poszukiwania efektywnych metod ich utylizacji. Naturalna degradacja odpadów tworzyw sztucznych poprzez składowanie jest najmniej ekologiczną i ekonomiczną metodą ich utylizacji, a przy tym długotrwałą. Najbardziej popularna i najtańsza metoda recyklingu to recykling materiałowy. W 2022 r. poziom recyklingu odpadów z materiałów polimerowych w Europie osiągnął 26,9%, a wykorzystanie recyklatów tworzyw sztucznych z odpadów pokonsumenckich od 2018 r. wzrosło o 70% (6,8 mln t w 2022 r.). Zwiększenie jakości materiałów polimerowych po recyklingu przyczyniło się do wzrostu zawartości cyrkularnych tworzyw sztucznych w nowych produktach (7,3 mln t w 2022 r.)<sup>1)</sup>. Interesujące z poznawczego i utylitarne punktu widzenia jest wykorzystanie materiałów polimerowych po recyklingu jako modyfikatorów asfaltów drogowych.

Asfalty modyfikowane materiałami polimerowymi to grupa lepiszczy asfaltowych mających na celu poprawę właściwości użytkowych mieszanek mineralno-asfaltowych oraz wydłużenie okresu eksploatacji nawierzchni drogowych. Wymaga to zwiększenia odporności mieszanki mineralno-asfaltowej na odkształcenia trwałe, pękanie, zmęczenie, starzenie oraz na oddziaływanie czynników zewnętrznych. Korzystne jest, aby zakres lepkości asfaltu był na tyle szeroki, by w ekstremalnych temperaturach występujących w czasie eksploatacji obiektu, w którym lepiszcze asfaltowe zostało zastosowane, nie zmienił swego stanu reologicznego. Rozszerzenie zakresu lepkości asfaltu możliwe jest poprzez zastosowanie odpowiednich dodatków modyfikujących, np. materiałów polimerowych<sup>2-4)</sup>.

Modyfikacja asfaltów drogowych materiałami polimerowymi polega na wprowadzeniu związku wielkocząsteczkowego do lepiszcza poprzez mieszanie mechaniczne (modyfikacja fizyczna) lub reakcję chemiczną (modyfika-



Dr hab. inż. Grzegorz MAKOMASKI, prof. uczelni (ORCID: 0000-0002-5172-424X), w roku 2007 ukończył studia na Wydziale Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii Politechniki Warszawskiej Filii w Płocku. Stopień doktora uzyskał w 2011 r. na Wydziale Chemicznym Politechniki Wrocławskiej, a stopień doktora habilitowanego w 2019 r. na Politechnice Świętokrzyskiej w Kielcach. Obecnie jest zatrudniony na stanowisku profesora uczelni w Instytucie Chemii macierzystej uczelni. Specjalność – porowate materiały węglowe, chemia i technologia materiałów polimerowych, chemia i technologia produktów przerobu węgla kamiennego i ropy naftowej.



Mgr inż. Lidia MAŃSKA (ORCID: 0009-0003-2869-450X) w roku 2022 ukończyła studia na Wydziale Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii Politechniki Warszawskiej Filii w Płocku. Jest asystentem w Instytucie Chemii tej samej uczelni. Specjalność – chemia i technologia materiałów polimerowych, chemia i technologia produktów przerobu ropy naftowej.

**\* Adres do korespondencji:**

Wydział Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii, Politechnika Warszawska, ul. Łukasiewicza 17, 09-400 Płock, tel.: (24) 367-22-11, e-mail: grzegorz.makomaski@pw.edu.pl

cja chemiczna). Najczęściej wykorzystywanymi materiałami polimerowymi do modyfikacji asfaltu są: elastomery termoplastyczne (m.in. kopolimer styren-butadien-styren (SBS), kopolimer styren-izopren-styren (SIS))<sup>5-10</sup>, plastomery (m.in. polipropylen (PP), polietyleny (PE), kopolimer etylen-octan winylu (EVA))<sup>11-19</sup>, kauczuki naturalne<sup>20-25</sup> i syntetyczne (m.in. kauczuk butadienowo-styrenowy (SBR))<sup>26-31</sup> oraz woski syntetyczne<sup>32-36</sup>. Elastomery termoplastyczne zapewniają dobre właściwości sprężyste, podczas gdy plastomery zwiększają sztywność i zmniejszają odkształcenia pod obciążeniem w modyfikowanym asfalcie. Układy polimerowo-asfaltowe są w zasadzie mieszaninami heterogenicznymi o różnym charakterze i stopniu wzajemnego rozproszenia składników<sup>37</sup>.

Ze względu na zwiększenie się liczby regulacji prawnych w zakresie zagospodarowania odpadów tworzyw sztucznych nastąpił wzrost prac badawczych związanych z wykorzystaniem materiałów polimerowych pochodzących z recyklingu w przemyśle drogowym, które powodują m.in. zwiększenie trwałości nawierzchni asfaltowych<sup>38, 39</sup>. Giustozzi i współpracownicy<sup>40, 41</sup> dowiedli, że przy zastosowaniu przyjaznych dla środowiska metod budowy nawierzchni drogowych, wykorzystanie odpadów z materiałów polimerowych do modyfikacji lepiszczy asfaltowych może przyczynić się do zmniejszenia emisji ditlenku węgla.

Od kilkadziesiąt lat w Instytucie Chemii Politechniki Warszawskiej w Płocku prowadzone są prace badawcze dotyczące wykorzystania odpadów z materiałów polimerowych do modyfikacji lepiszczy asfaltowych. Prace te skoncentrowane są na modyfikacji odpadami tworzyw sztucznych z grupy plastomerów<sup>42-44</sup>.

Istnieją dwie metody wykorzystania odpadów z materiałów polimerowych w drogownictwie, a mianowicie: metoda mokra i sucha. W metodzie mokrej odpady z materiałów polimerowych dodawane są bezpośrednio do rozgrzanego lepiszcza asfaltowego w celu modyfikacji jego właściwości. Homogenizacja mieszanki asfaltowo-polimerowej odbywa się w wysokiej temperaturze, wymagane jest mechaniczne mieszanie szybkoobrotowe w celu uzyskania homogenicznego modyfikowanego asfaltu. Temperatura i czas homogenizacji oraz obroty

mieszadła szybkoobrotowego zależą od rodzaju materiału polimerowego pochodzącego z recyklingu. W metodzie suchej odpady z materiałów polimerowych dodawane są bezpośrednio do mieszanki mineralno-asfaltowej jako częściowe zastąpienie kruszywa bądź jako modyfikatory mieszanki<sup>45, 46</sup>. Chavez i współpracownicy<sup>47</sup> wykazali, że modyfikowane lepiszcza asfaltowe otrzymane metodą mokrą odznaczają się lepszą adhezją do kruszywa niż uzyskane metodą suchą. Spowodowane jest to zwiększoną lepkością modyfikowanego asfaltu uzyskanego metodą mokrą.

Najwięcej prac badawczych związanych z modyfikacją lepiszczy asfaltowych dotyczy wykorzystania odpadów pochodzących z recyklingu plastomerów, ze względu na ich powszechną dostępność, łatwy recykling i niski koszt. Do modyfikacji asfaltów plastomerami można stosować różne rodzaje homopolimerów lub kopolimerów. Do homopolimerów wykorzystywanych do modyfikacji asfaltów można zaliczyć polietyleny (HDPE, LDPE) i polipropylen.

Odpadowe polietyleny jako modyfikatory lepiszczy asfaltowych stosowane są w ilościach 3–6% mas. (HDPE) lub 2–10% mas. (LDPE), przy temperaturze mieszania w zakresie 160–185°C oraz czasie homogenizacji 1,5 h dla HDPE i 1–2 h dla LDPE<sup>48-52</sup>. Dodatek odpadowego polietylenu do lepiszcza asfaltowego poprawia właściwości eksploatacyjne mieszanek asfaltowych, takie jak właściwości wysokotemperaturowe i odporność na pękanie w niskiej temperaturze<sup>53-55</sup>. Oprócz warunków mieszania wpływ na właściwości modyfikowanego asfaltu ma rodzaj odpadu z materiału polimerowego, w tym jego właściwości, skład chemiczny i masa cząsteczkowa. Autorzy pracy<sup>56</sup> do modyfikacji asfaltu wykorzystali różne rodzaje odpadowego LDPE. Wykazali, że masa cząsteczkowa i rozkład masy cząsteczkowej odpadowego LDPE mają znaczący wpływ na właściwości modyfikowanego lepiszcza asfaltowego w niskich temperaturach, stabilność magazynowania i rozkład fazy polimerowej. Odpadowy LDPE o niższej masie cząsteczkowej i szerszym rozkładzie masy cząsteczkowej jest najbardziej odpowiedni do modyfikacji asfaltu. Liang i współpracownicy<sup>57</sup> wykazali, że na właściwości modyfikowanych lepiszczy asfaltowych,



Mgr inż. Klaudia ŁYZIŃSKA (ORCID: 0009-0007-5094-4965), w roku 2022 ukończyła studia na Wydziale Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii Politechniki Warszawskiej Filii w Płocku. Jest asystentem w Instytucie Chemii tej samej uczelni. Specjalność – chemia i technologia materiałów polimerowych, chemia i technologia produktów przerobu ropy naftowej.



Dr inż. Karolina BRZEZIŃSKA (ORCID: 0000-0002-2297-3554) w roku 2018 ukończyła studia na Wydziale Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii Politechniki Warszawskiej Filii w Płocku. Stopień doktora uzyskała w 2022 r. na Wydziale Chemicznym Politechniki Łódzkiej. Jest adiunktem w Instytucie Chemii Politechniki Warszawskiej Filii w Płocku. Specjalność – chemia i technologia materiałów polimerowych, spektrometria atomowa produktów naftowych.

oprócz rodzaju PE, wpływa także wskaźnik szybkości płynięcia (MFI). Im niższa wartość MFI, tym większa odporność modyfikowanego asfaltu na koleinowanie, ale słaba kompatybilność między polimerem a lepiszczem asfaltowym. Z kolei im wyższa wartość MFI, tym większa odporność modyfikowanego asfaltu w niskich temperaturach.

Szeroko stosowanym modyfikatorem z grupy poliolefin jest również polipropylen. Warunki mieszania lepiszcza asfaltowego z odpadowym polipropylenem podawane w literaturze są następujące: ilość PP w stosunku do masy asfaltu 3–6% mas., temperatura homogenizacji 165–170°C, czas mieszania 2 h<sup>58</sup>). Modyfikacja odpadowym PP znacząco wpływa na zmianę właściwości lepiszcza asfaltowego. Brasileiro i współpr.<sup>59</sup>) wykazali, że modyfikacja asfaltu odpadowym PP powoduje zwiększenie temperatury mięknięcia, przy jednoczesnym zmniejszeniu wartości penetracji. Ponadto dodatek odpadowego PP do lepiszcza asfaltowego powoduje zmniejszenie ciągliwości oraz odporności na pęknięcia zmęczeniowe. Stąd też zaleca się stosowanie asfaltów modyfikowanych odpadami PP w obszarach o wysokiej temperaturze i dużej wilgotności<sup>58, 60</sup>). Asfalt modyfikowany odpadowym polipropylenem odznacza się dobrymi właściwościami reologicznymi w wysokiej temperaturze, a tym samym odznacza się zwiększoną odpornością na odkształcenia trwałe<sup>61</sup>).

Jednym z najpopularniejszych plastomerów stosowanych do modyfikacji asfaltów jest kopolimer EVA. Modyfikację lepiszczy asfaltowych kopolimerem EVA prowadzi się najczęściej w temp. 160–200°C, w czasie do 6 h, przy ilości 1–10% mas. modyfikatora polimerowego. Panda i Mazumdar<sup>62</sup>) wykazali, że zmiana temperatury homogenizacji nie wpływa znacząco na zmianę temperatury mięknięcia, penetracji oraz ciągliwości asfaltu modyfikowanego kopolimerem EVA. Dowiedli również, że zwiększenie ilości kopolimeru EVA dodawanego do asfaltu zwiększa temperaturę mięknięcia, zmniejsza penetrację i ciągliwość. Zwiększenie temperatury mięknięcia może sprzyjać trwałości nawierzchni drogowej w cieplejszych warunkach klimatycznych. Z kolei zmniejszenie penetracji poprzez dodanie kopolimeru EVA sugeruje, że asfalt modyfikowany kopolimerem EVA jest bardziej odporny na koleinowanie i pęknięcie w niskiej temperatu-

rze<sup>63</sup>). Autorzy pracy<sup>64</sup>) wykazali, że dodanie odpadowego kopolimeru EVA w ilości 2–4% mas. poprawia właściwości modyfikowanego asfaltu w niskiej temperaturze. Istotny wpływ na właściwości modyfikowanego asfaltu ma zawartość octanu winylu w kopolimerze EVA. Większa jego zawartość (ponad 20%) powoduje zwiększenie polarności polimeru, a tym samym zwiększenie elastyczności i stabilności magazynowania modyfikowanego bitumu. Z kolei niższa zawartość (8–14% mas.) octanu winylu w kopolimerze EVA zwiększa stopień krystaliczności, co prowadzi do poprawy stabilności w wysokiej temperaturze, zwiększenia odporności na pęknięcie w niskiej temperaturze modyfikowanego asfaltu<sup>65</sup>).

Jedną z wad stosowania plastomerów do modyfikacji lepiszczy asfaltowych jest niestabilność modyfikowanego bitumu, co skutkuje powstaniem dwóch oddzielnych faz, tj. fazy bogatej w asfalteny i fazy bogatej w polimery<sup>66</sup>). Stabilność przechowywania jest powszechnym problemem w przypadku chemicznie obojętnych i niepolarnych materiałów polimerowych, takich jak poliolefiny (PP i PE). Kompatybilność można poprawić poprzez usunięcie lub zminimalizowanie grup niepolarnych, a w konsekwencji dodanie grup polarnych poprzez polimeryzację rodnikową (np. z akrylanem butylu lub octanem winylu) lub szczepienie (np. MA-g-PE)<sup>67</sup>). Polarność materiałów polimerowych zwiększa się wraz ze stopniem procesu starzenia, stąd też materiały polimerowe pochodzące z recyklingu odznaczają się zwiększoną zawartością grup polarnych i wykazują lepszą kompatybilność z asfaltem<sup>68</sup>).

## Podsumowanie

Modyfikacja lepiszczy asfaltowych materiałami polimerowymi uznawana jest za jedną z najlepszych metod poprawy właściwości bitumów naftowych, a tym samym nawierzchni drogowych. Ze względu na korzyści ekonomiczne i ekologiczne coraz większą uwagę zyskuje modyfikacja asfaltów za pomocą odpadów z materiałów polimerowych. Jest to jeden ze sposobów na rozwiązanie problemów utylizacji odpadów tworzyw sztucznych i zmniejszenie zanieczyszczenia środowiska. Efektywność modyfikacji asfaltu zależy od rodzaju i ilości dodawanego odpadu z materiału polimerowego, a także od sposobu



Prof. dr hab. inż. Janusz ZIELIŃSKI (ORCID: 0000-0003-3961-482X) w roku 1977 ukończył studia na Politechnice Warszawskiej w Płocku, specjalność chemia i technologia polimerów. W latach 1999–2004 i 2012–2020 był prorektorem Politechniki Warszawskiej Filii w Płocku i dziekanem Wydziału Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii tej uczelni. Jest kierownikiem Zakładu Tworzyw Sztucznych Instytutu Chemii w Płocku. Specjalność – chemia i technologia polimerów, technologia przerobu ciężkich frakcji ropy naftowej i węgla kamiennego, płyny chłodnicze.



Mgr inż. Jakub ŁĘCKI (ORCID:0009-0000-2618-5291) w roku 2021 ukończył studia na Wydziale Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii Politechniki Warszawskiej Filii w Płocku. Jest asystentem w Instytucie Chemii tej samej uczelni. Specjalność – chemia i technologia materiałów polimerowych, porowate materiały węglowe.



otrzymywania mieszanin bitumicznych, zwłaszcza prawidłowego doboru podstawowych parametrów, takich jak: temperatura, czas mieszania, szybkość obrotów mieszadła.

Do modyfikacji asfaltów drogowych w większości stosuje się odpady z materiałów polimerowych z grupy plastomerów (HDPE, LDPE, PP, EVA). Wynika to z ich powszechnej dostępności, łatwego recyklingu i niskich kosztów. Ponadto odpady z plastomerów odznaczają się większą zawartością grup polarnych niż polimery „pierwotne”, co wpływa na poprawę kompatybilności pomiędzy bitumem a materiałem polimerowym.

Otrzymano: 28-11-2024

Zrecenzowano: 29-11-2024

Zaakceptowano: 29-11-2024

Opublikowano: 24-01-2025

#### LITERATURA

- [1] Tworzywa sztuczne w obiegu zamkniętym. Analiza sytuacji w Europie, Plastics Europe, 2024.
- [2] I. Gawęł, M. Kalabińska, J. Piłat, *Asfalty drogowe*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2014.
- [3] G. Makomaski, K. Niemyjski, J. Zieliński, W. Ciesińska, K. Brzezińska, J. Olszacki, P. Mańkowski, *Przem. Chem.* 2022, **101**, nr 11, 980.
- [4] G. Makomaski, R. Kołodziejwski, J. Zieliński, *Przem. Chem.* 2009, **88**, nr 1, 73.
- [5] G. Wen, Y. Zhang, Y. Zhang, K. Sun, Y. Fan, *Polym. Test.* 2002, **21**, 295.
- [6] T. Wang, T. Yi, Z. Yuzhen, *Pet. Sci. Technol.* 2010, **28**, 764.
- [7] *Pat. CN 104059369* (2014).
- [8] *Pat. CN 102220020* (2014).
- [9] F. Zhang, Ch. Hu, Y. Zhang, *Mater. Chem. Phys.* 2018, **205**, 44.
- [10] J. Zhu, B. Birgisson, N. Kringos, *Eur. Polym. J.* 2014, **54**, 18.
- [11] Y. Becker, M.P. Méndez, Y. Rodríguez, *Vis. Tecnol.* 2001, **9**, 39.
- [12] *Pat. US 7317045* (2008).
- [13] J.Y. Nunez, M.D. Domingos, A.L. Faxina, *Constr. Build. Mater.* 2014, **73**, 509.
- [14] F.M. Nejad, M. Gholami, K. Naderi, M. Rahi, *Mater. Struct.* 2015, **48**, 3295.
- [15] A. Abed, H. Bahia, *Constr. Build. Mater.* 2020, **236**, 117604.
- [16] J. Stastna, L. Zanzotto, O.J. Vacin, *J. Colloid Interface Sci.* 2003, **259**, 200.
- [17] M. Ameri, A. Mansourian, A.H. Sheikhmotevali, *Constr. Build. Mater.* 2012, **36**, 1001.
- [18] U. Isacsson, X. Lu, *J. Mater. Sci.* 1999, **34**, 3737.
- [19] X. Lu, U. Isacsson, *Constr. Build. Mater.* 2000, **14**, 79.
- [20] Y. Wen, Y. Wang, K. Zhao, A. Sumalee, *Int. J. Pavement Eng.* 2017, **18**, 547.
- [21] A.A. Saad, I. Yusof, M. Hermadi, M.B. Alfergani, A.A. Sinusi, *Int. J. Eng. Adv. Technol* 2013, **2**, 124.
- [22] M.G. Krishnapriya, *Int. J. Civ. Struct. Environ. Infrastruct. Eng. Res. Dev.* 2015, **5**, 121.
- [23] F.E. Okieimen, A.K. Akinlabi, *J. Appl. Polym. Sci.* 2002, **85**, 1070.
- [24] U.M. Ibeagi, S.O. Okereke, O.C. Okpareke, P.O. Ukoha, *Int. J. Chem. Sci.* 2012, **10**, 2048.
- [25] N.B. Azahar, N.B. Hassan, R.P. Jaya, M.A. Kadir, N.Z. Yunus, M.Z. Mahmud, *Int. J. Agric. For. Plant.* 2016, **2**, 212.
- [26] M. Vamegh, M. Ameri, S.F. Naeni, *Constr. Build. Mater.* 2020, **253**, 119197.
- [27] Q. Li, H. Zhang, Z. Chen, *Constr. Build. Mater.* 2021, **271**, 121870.
- [28] F. Liu, M. Zheng, X. Fan, H. Li, F. Wang, X. Lin, *Constr. Build. Mater.* 2021, **274**, 122059.
- [29] X. Fan, W. Lu, S. Lv, F. He, *Materials* 2019, **12**, 2358.
- [30] F. Zhang, J. Yu, *Constr. Build. Mater.* 2010, **24**, 410.
- [31] A.A. Abdul-Mawjoud, L.S. Thanoon, *Appl. Res. J.* 2015, **1**, 460.
- [32] G. Pollacco, S. Filippi, M. Paci, F. Giuliani, F. Merusi, *Fuel* 2012, **95**, 407.
- [33] X. Lu, P. Redelius, *Constr. Build. Mater.* 2007, **21**, 1961.
- [34] Y. Edwards, Y. Tasdemir, U. Isacsson, *Energ. Fuel* 2005, **19**, 2519.
- [35] J. Zieliński, *Przem. Chem.* 2020, **99**, nr 4, 536.
- [36] T. Brzozowska, G. Makomaski, J. Zieliński, B. Liszyńska, B. Osowiecka, I. Legocka, *Przem. Chem.* 2017, **96**, nr 4, 719.
- [37] J. Zieliński, E. Gurdzińska, B. Liszyńska, B. Osowiecka, T. Brzozowska, W. Ciesińska, *Przem. Chem.* 2009, **88**, nr 2, 172.
- [38] P.K. Guatam, P. Kalla, A.S. Jethoo, R. Agrawal, H. Singh, *Constr. Build. Mater.* 2018, **180**, 239.
- [39] S. Lambert, M. Wagner, *Chem. Soc. Rev.* 2017, **46**, 6855.
- [40] F. Giustozzi, M. Crispino, G. Flintsch, *Int. J. Life Cycle Assess.* 2012, **17**, 409.
- [41] J. Santos, A. Pham, P. Stasinopoulos, F. Giustozzi, *Sci. Total. Environ.* 2021, **751**, 141842.
- [42] B. Liszyńska, J. Zieliński, E. Gurdzińska, T. Brzozowska, B. Osowiecka, W. Ciesińska, G. Makomaski, *Przem. Chem.* 2010, **89**, nr 2, 170.
- [43] J. Zieliński, E. Gurdzińska, B. Liszyńska, B. Osowiecka, T. Brzozowska, W. Ciesińska, *Przem. Chem.* 2009, **88**, nr 6, 736.
- [44] G. Makomaski, *Przem. Chem.* 2017, **94**, nr 4, 728.
- [45] M. Ranieri, L. Costa, J.R. Oliveira, H.M. Silva, C. Celauro, *J. Mater. Civ. Eng.* 2017, **29**, 201.
- [46] D. Movilla-Quesada, A. Raposeiras, L. Silva-Klein, P. Lastra-González, D. Castro-Fresno, *Waste Manag.* 2019, **87**, 751.
- [47] F. Chavez, J. Marcobal, J. Gallego, *Constr. Build. Mater.* 2019, **205**, 164.
- [48] C. Fuentes-Auden, J.A. Sandoval, A. Jerez, F.J. Navarro, F.J. Martinez-Boza, P. Partal, C. Gallegos, *Polym. Test.* 2008, **27**, 1005.
- [49] R.K. Padhan, A. Sreeram, *Constr. Build. Mater.* 2018, **188**, 772.
- [50] S. Kishchynskyi, V. Nagaychuk, A. Bezuglyi, *Proc. Eng.* 2016, **143**, 119.
- [51] N.Z. Habib, I. Kamaruddin, M. Napiah, I.M. Tan, *Int. J. Civ. Environ. Eng.* 2011, **3**, 96.
- [52] R. Yu, C. Fang, P. Liu, X. Liu, Y. Li, *Appl. Clay Sci.* 2015, **104**, 1.
- [53] C. Fang, C. Wu, J. Hu, R. Yu, Z. Zhang, L. Nie, S. Zhou, X. Mi, *J. Vinyl Addit. Technol.* 2014, **20**, 31.
- [54] P. Ahmedzade, A. Fainleib, T. Gunay, O. Grygoryeva, *Constr. Build. Mater.* 2014, **69**, 1.
- [55] J. Hu, C. Fang, S. Zhou, L. Jiao, M. Zhang, D. Wu, *J. Vinyl Addit. Technol.* 2015, **21**, 215.
- [56] S. Ho, R. Church, K. Klassen, B. Law, D. MacLeod, L. Zanzotto, *Can. J. Civ. Eng.* 2006, **33**, 968.
- [57] M. Liang, X. Xin, W. Fan, J. Zhang, H. Jiang, Z. Yao, *Int. J. Pavement Eng.* 2021, **22**, 11.
- [58] P. Ahmedzade, K. Demireli, T. Gunay, F. Biryani, O. Alqudah, *Procedia Manuf.* 2015, **2**, 165.
- [59] L. Brasileiro, F. Moreno-Navarro, R. Tauste-Martinez, J. Matos, M. Rubio-Gamez, *Sustainability* 2019, **11**, 646.
- [60] H.S. Otuoze, S.P. Ejeh, Y.D. Amartey, M. Joel, A.A. Shuaibu, K.O. Yusuf, *Jordan. J. Civ. Eng.* 2018, **12**, 35.
- [61] P.H. Yeh, Y.H. Nien, J.H. Chen, W.C. Chen, J.S. Chen, *Polym. Eng. Sci.* 2005, **45**, 1152.
- [62] M. Panda, M. Mazumdar, *J. Mater. Civ. Eng.* 1999, **11**, 131.
- [63] A. Behnood, M.M. Gharehveran, *Eur. Polym. J.* 2019, **112**, 766.
- [64] M. Ameri, A. Mansourian, A.H. Sheikhmotevali, *Constr. Build. Mater.* 2012, **36**, 1001.
- [65] O. Gonzalez, J.A. Munoz, A. Santamaria, M. Garcia-Morales, F. Navarro, P. Partal, *Eur. Polym. J.* 2004, **40**, 2365.
- [66] N.I. Yusoff, D. Mounier, G. Marc-Stephane, M.R. Hainin, G.D. Airey, H. Benedetto, *Constr. Build. Mater.* 2013, **38**, 395.
- [67] C. Giavarini, P. De Filippis, M.L. Santarelli, M. Scarsella, *Fuel* 1996, **75**, 681.
- [68] P. Liu, K. Lu, J. Li, X. Wu, L. Qian, M. Wang, S. Gao, *J. Hazard. Mater.* 2020, **384**, 121193.



Mgr inż. Kamil NIEMYJSKI w roku 2019 ukończył studia na Wydziale Chemicznym Politechniki Warszawskiej na kierunku technologia chemiczna. Od 2021 r. jest doktorantem Szkoły Doktorskiej Politechniki Warszawskiej. Specjalność – asfalty drogowe i modyfikowane, dodatki asfaltowe.