

**Dr inż. Artur Wolak**

Katedra Towaroznawstwa Przemysłowego  
Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie  
ul. H. Sienkiewicza 4, 30-033 Kraków  
e-mail: artur.wolak@uek.krakow.pl

**Dr hab. inż. Grzegorz Zajac**

Katedra Energetyki i Środków Transportu  
Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie  
ul. Głębocka 28, 20-612 Lublin  
e-mail: grzegorz.zajac@up.lublin.pl

**Kinetyka zmian lepkości kinematycznej olejów silnikowych w warunkach eksploatacji**

**Słowa kluczowe:** *degradacja, silnik, olej silnikowy, lepkość kinematyczna, niezawodność, modelowanie, eksploatacja*

**Streszczenie:** Niniejszy artykuł opisuje odrębne degradacje 5 olejów silnikowych pochodzących od różnych producentów, należących do tej samej klasy lepkościowej wg SAE. Analizowano kierunek oraz nasilenie zmian lepkości kinematycznej w temperaturze 40°C oraz 100°C. W ramach zaprezentowanego eksperymentu zostały obserwowane zmiany olejów silnikowych występujące w trakcie rzeczywistej eksploatacji, w warunkach które można określić jako „trudne” tzn. częste uruchamianie silnika, jazda na krótkich odcinkach, przedłużona praca silnika na biegu jałowym. Oleje były eksploatowane w samochodach osobowych stanowiących jednolitą flotę 25 pojazdów. Lepkość kinematyczna wyznaczana była zgodnie z normą EN ISO 3104. Uzyskane zależności pozwoliły na opracowanie statystycznego modelu, umożliwiającego dokonywanie punktowych predykcji przeciętnych wartości lepkości kinematycznej dla zadanej wielkości przebiegu. Uzyskane wyniki mogą okazać się pomocne podczas podejmowania racjonalnych decyzji dotyczących okresu eksploatacji olejów silnikowych.

## 1. Wstęp

Olej smarowy, bez którego praca silnika nie byłaby możliwa, w trakcie eksploatacji podlegając procesowi starzenia, może pracować w silniku tak długo, jak długo wypełnia właściwie zadania stawiane olejom smarowym poprzez odpowiednie właściwości fizykochemiczne. Odpowiednia wartość oraz poziom poszczególnych właściwości fizykochemicznych oleju wpływa na jakość i zakres spełnianych przez olej funkcji i jest warunkiem jego przydatności dla danego typu silnika. Wśród parametrów i wielkości fizykochemicznych, podawanych w normach przedmiotowych oraz literaturze przedmiotu, uprzywilejowanymi dla olejów smarowych stosowanych w silnikach są: lepkość kinematyczna oraz lepkość dynamiczna (jedne z podstawowych właściwości płynów eksploatacyjnych) [2, 4, 6, 10, 12]. Lepkość kinematyczna jest podawana w wymaganiach jakościowych dotyczących olejów smarowych. Może ona ulegać zwiększeniu lub zmniejszeniu w trakcie eksploatacji. Zwiększenie lepkości łączy się z postępującymi procesami utleniania w podwyższonej temperaturze, a zmniejszenie ze ścinaniem oleju. Ocena lepkości oleju umożliwia użytkownikowi dobór odpowiedniego czasu pomiędzy kolejnymi wymianami oleju.

Zgodnie z aktualnym stanem wiedzy, jakość oleju silnikowego może być określona za pomocą szeregu testów, które obejmują laboratoryjną ocenę właściwości fizykochemicznych, jak również ocenę właściwości po długotrwałych i kosztownych badaniach eksploatacyjnych [1, 3, 8, 14, 16, 17, 19]. Znajomość i zrozumienie cech charakterystycznych dla olejów silnikowych oraz opracowanie skutecznych metod ich analizy umożliwia stworzenie systemów monitorowania jakości prowadzonych w cyklu długości życia silnika. W literaturze przedmiotu opisanych jest wielu naukowców, którzy zajmują się jakością olejów i prowadzą w tym zakresie liczne badania. Inayatullah i in. [5] wykorzystali technikę emisji akustycznej w celu dokonania analizy lepkości olejów silnikowych. Karpovich i in. [7] pracowali nad uniwersalnym instrumentem do mierzenia i kontroli jakości olejów silnikowych. Ocenę jakości i stanu oleju silnikowego przeprowadzali z uwzględnieniem lepkości jako zasadniczego czynnika podlegającego ewaluacji. Agoston i in. [1] dla odmiany skupili się w swoich badaniach nad procesem starzenia termicznego olejów. Wynika z nich, że istotny wpływ na starzenie się oleju mają takie czynniki, jak odparowanie części oleju czy też jego spalanie. Procesy te powodują, że olej w pewnym momencie nie posiada odpowiednich właściwości, niezbędnych do spełniania swoich funkcji. Wang [15] wykorzystał testy drogowe w ocenie stanu oleju oraz

specjalne czujniki, które zostały zainstalowane w trzech pojazdach i testowane w trakcie jazdy. Wyniki przeprowadzonych badań wykazały, że degradacja olejów silnikowych przebiega w trzech etapach: 1. Stan dobry, 2. Szybki wzrost liczby kwasowej, 3. Szybki wzrost lepkości. Bassbasi i in. [3] zaproponowali spektroskopię w podczerwieni w celu monitorowania i kontroli oraz szybkich przeglądów eksploatowanych olejów silnikowych. Podobnie Wolak i Janocha [17] skoncentrowali się na ocenie zmian właściwości fizykochemicznych, silnikowego oleju smarowego, przy wykorzystaniu metody spektroskopii w podczerwieni z transformacją Fouriera. Dodatkowo wyniki uzyskane tradycyjną, akredytowaną metodą, porównali z wynikami uzyskanymi za pomocą nowoczesnej aparatury FluidScan. Youngk [18] zajmował się wpływem olejów na jakość, długość życia oraz niezawodność silnika. Analiza prowadzona była w oparciu o przegląd olejów, silnika, technologii oraz ankietowe badanie użytkowników pojazdów. Wyniki tych badań wskazują na istotny wpływ okresów wymiany olejów, na jakość i niezawodność silnika.

Celem przeprowadzonych badań było sprawdzenie kierunku oraz nasilenia zmian lepkości kinematycznej olejów silnikowych występujących w trakcie eksploatacji. Uzyskane zależności pozwoliły na opracowanie statystycznego modelu opisującego te zależności. Badania w warunkach ruchu drogowego odzwierciedlające rzeczywiste warunki eksploatacji pozwalają na uzyskanie rzeczywistej informacji na temat współpracy układu silnik-olej silnikowy w odróżnieniu od warunków testowych [11], duża liczba analizowanych obiektów pozwala na potwierdzenie zaobserwowanych zmian.

## **2. Materiał i metody**

Materiał doświadczalny stanowiło 5 olejów silnikowych należących do tej samej klasy lepkościowej wg SAE, a pochodzące od różnych producentów. Oleje zostały zakodowane jako CE, MS, ME, PS, PE, specyfikację tych olejów przedstawiono w Tabeli 1. Oleje były eksploatowane w samochodach osobowych stanowiących jednolitą flotę 25 pojazdów. Samochody te były wyposażone w silniki benzynowe o pojemności skokowej 1332 cm<sup>3</sup>.

Ze względu na charakter użytkowania, pojazdy były podzielone na dwie grupy. Pierwsza grupa 23 pojazdów była eksploatowana w warunkach które można określić jako „trudne” tzn. częste uruchamianie silnika, jazda na krótkich odcinkach, przedłużona praca silnika na biegu jałowym. Druga grupa 2 pojazdów (PS018193 i CE017977), była eksploatowana w typowych warunkach jazdy miejskiej i mieszanej. W opracowaniu

zaprezentowano graficzne ilustracje otrzymanych wyników z uwzględnieniem olejów grupy drugiej. Niemniej jednak pominięte one zostały w analizach statystycznych ze względu na niespełnienie warunku koniecznego, mówiącego o zbliżonej eksploatacji. Obie grupy pojazdów były zasilane paliwem pochodzącym z tego samego źródła. Każdy z olejów został zaaplikowany losowo do pięciu samochodów.

**Tabela 1.** Klasyfikacje jakościowe oraz lepkościowe wybranych do badań olejów silnikowych

Kod oleju	Klasyfikacja SAE	Klasyfikacja ACEA	Klasyfikacja API	SpecyfikacjeOEM
CE	5w-30	A3, C3	SH	VW 504 00; BMW Longlife-04; MB-Approval; 229.31/ 229.51; Porsche C30
ME	5w-30	C2/C3	SM/SN	BMW: Longlife 04; MB-Approval: 229.31/229.51; Chrysler: MS-11106; Porsche: C30; Chrysler: MS-11106; Peugeot/Citroën Automobiles: B71 2290, B71 2297; AvtoVAZ: Group "Luxe"; AAE: Standard STO 003-05, Group B6
MS	5w-30	C3	SM/SL	General Motors Service Fill dexos2™ (license number GB1A0914015); BMW Longlife 04; Dopuszczenie MB 229.31/229.51; Volkswagen (benzyna) 502 00 / 505 00
PE	5w-30	C2	-	JASO - DL-1
PS	5w-30	A3	SM	VW 504.00-507.00

Źródło: opracowanie własne

Pobieranie próbek oleju jest istotnym zagadnieniem w tego typu badaniach, ponieważ próbka musi być reprezentatywna. Można to zrobić, nie tylko poprzez zapewnienie prawidłowej i systematycznej procedury pobierania próbek, ale również poprzez ustawienie odpowiednich częstotliwości próbkowania. Ze względu na problemy związane z możliwością regularnego pobierania próbek po określonym przebiegu, do realizacji celów badania częstotliwość próbkowania została ustawiona na okres czasowy - 3 miesiące z rejestracją przebiegu danego pojazdu. Na początku testu zbadano próbkę oleju świeżego, a następnie pobierano próbki olejów po 3, 6, 9 i 12 miesiącach. W 3 i 6 miesiącu zostało pobranych po 25 próbek badanych olejów, natomiast w 9 i 12 po 23 próbki (ze względu na wycofanie z eksploatacji dwóch pojazdów). Sumarycznie po 12 miesiącach pobrano 96 próbek. W Tabeli 2. zaprezentowano informacje związane z liczbą przejechanych kilometrów przez każdy z samochodów biorący udział w teście. Oznaczenie próbki zawiera kod oleju oraz kod samochodu.

**Tabela 2.** Liczba przejechanych kilometrów

Kod próbki	Przebieg samochodu – start eksp. [km]	Przebieg po 3 miesiącach [km]	Przebieg po 6 miesiącach [km]	Przebieg po 9 miesiącach [km]	Przebieg po 12 miesiącach [km]
CE 17760	12858	4401	7931	11358	13220
CE 17943	14571	4215	7996	11450	13907
CE 17977	6033	2973	5640	8796	9975
CE 17988	14804	874	4350	-	-
CE 18716	9477	3080	6360	10009	12169
ME 17764	15484	3752	8593	11620	14501
ME 17810	7840	3350	5183	7702	8749
ME 17973	8015	2811	5513	7579	9029
ME 18345	9753	3176	5922	8196	9234
ME 18760	15307	4654	8641	12018	14573
MS 18011	13486	2205	5199	7265	9005
MS 18128	14571	1808	5218	8773	10803
MS 18361	14988	3790	7654	12331	14166
MS 18793	6223	818	1120	3240	6100
MS 18817	14666	3832	8037	11439	13877
PE 17939	12370	4180	8806	11990	13066
PE 18024	11694	3758	5881	10203	11748
PE 18207	12209	3836	7311	10663	13223
PE 18591	15409	4738	8697	13073	15188
PE18689	13290	3944	8749	13974	15531
PS 18149	13556	4269	8317	12412	14384
PS 18193	14457	5240	10619	14732	18211
PS 18597	15361	3544	8022	-	-
PS 18784	11948	3177	7249	10907	12317
PS 18799	14154	4083	8035	11792	13523

Źródło: opracowanie własne

W pobranych próbkach jak i w oleju świeżym oznaczono lepkość kinematyczną w 40°C i 100°C. Lepkość kinematyczna wyznaczana była zgodnie z normą EN ISO 3104 wykorzystując kapilary Ubbelohda (Rozmiar 2C; zakres pomiarowy 60-300 mm<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup> – temp. 40°C oraz rozmiar 1B; zakres pomiarowy 10-50 mm<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup> – temp. 100 °C). Stanowisko do oznaczania lepkości kinem. w 40°C oraz w 100°C zaprezentowano na rys. 1.

Oznaczenia wykonane zostały w 3-krotnym powtórzeniu, otrzymane wyniki zostały poddane analizie statystycznej z wykorzystaniem pakietu Statistica 10. Początkowo do danych dopasowano model regresji liniowej szacowany za pomocą metody największej wiarygodności w ramach tzw. uogólnionej metody najmniejszych kwadratów. Zastosowanie wspomnianej metody umożliwiło włączenie do procesu estymacji teoretycznie uzasadnionego założenia o skorelowaniu kolejnych następujących po sobie w czasie pomiarów parametrów oleju pochodzącego z tego samego pojazdu. Założenie to wprowadzono poprzez przyjęcie, że

składnik losowy w modelu regresji podlega ciągłemu procesowi autoregresyjnemu pierwszego rzędu. Jednakże w toku dalszych analiz oraz w wyniku analizy czułości wykazano, że wykorzystanie opisanego powyżej zaawansowanego aparatu statystycznego zmieniło wyniki analizy w stopniu minimalnym w stosunku do klasycznego modelu normalnej regresji liniowej. W rezultacie, w celu uproszczenia prezentacji wyników oraz ułatwienia interpretacji, modele regresji liniowej szacowano klasyczną metodą najmniejszych kwadratów.



Rys. 1. Stanowisko do oznaczania lepkości kinematycznej w Zakładzie Oceny Właściwości Eksploatacyjnych Instytutu Nafty i Gazu w Krakowie

Źródło: zdjęcie własne

#### 4. Wyniki i dyskusja

Wyniki badań lepkości kinematycznej dla badanych okresów przedstawiono graficznie na rys 2 i 3. Wszystkie badane oleje odpowiadały klasie lepkości 5W-30, dla której zgodnie z klasyfikacją SAEJ300-2013, lepkość kinematyczna w temperaturze 100°C powinna mieścić się w przedziale  $9,3-12,5 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . Mimo że wszystkie oleje spełniały wymagania to wyraźnie widać, że olej PE, charakteryzował się najniższymi wartościami lepkości kinematycznej.

Analiza zmian lepkości kinematycznej badanych olejów silnikowych w trakcie eksploatacji daje podstawę do stwierdzenia, że lepkość kinematyczna olejów CE, MS oraz PE w temperaturze 40 i 100°C wykazywała tendencję wzrostową, co jednoznacznie wskazywało na dużą intensywność procesów utleniania. W przypadku olejów ME oraz PS, zaobserwowano odwrotną tendencję, tzn. spadek lepkości kinematycznej w stosunku do wartości wyjściowej. Spadek lepkości tych olejów w początkowej fazie eksploatacji, w wyniku ścinania modyfikatora lepkości nie był rekompensowany wzrostem lepkości

wynikającym z zagęszczania oleju produktami degradacji. Sytuacja uległa diametralnym zmianom pomiędzy 10 000-15 000 km, kiedy to proces degradacji drastycznie przyspieszył ustanawiając maksima dla wszystkich badanych olejów.

Należy również zwrócić uwagę, że olej PE który cechował się najniższą wartością lepkości kinematycznej, po przebiegu blisko 15 000 km, osiąga poziomy początkowe pozostałych, analizowanych olejów. Tym samym olej PE, po roku eksploatacji posiada lepkość kinematyczną zbliżoną, bądź też równą świeżym olejom CE i MS.

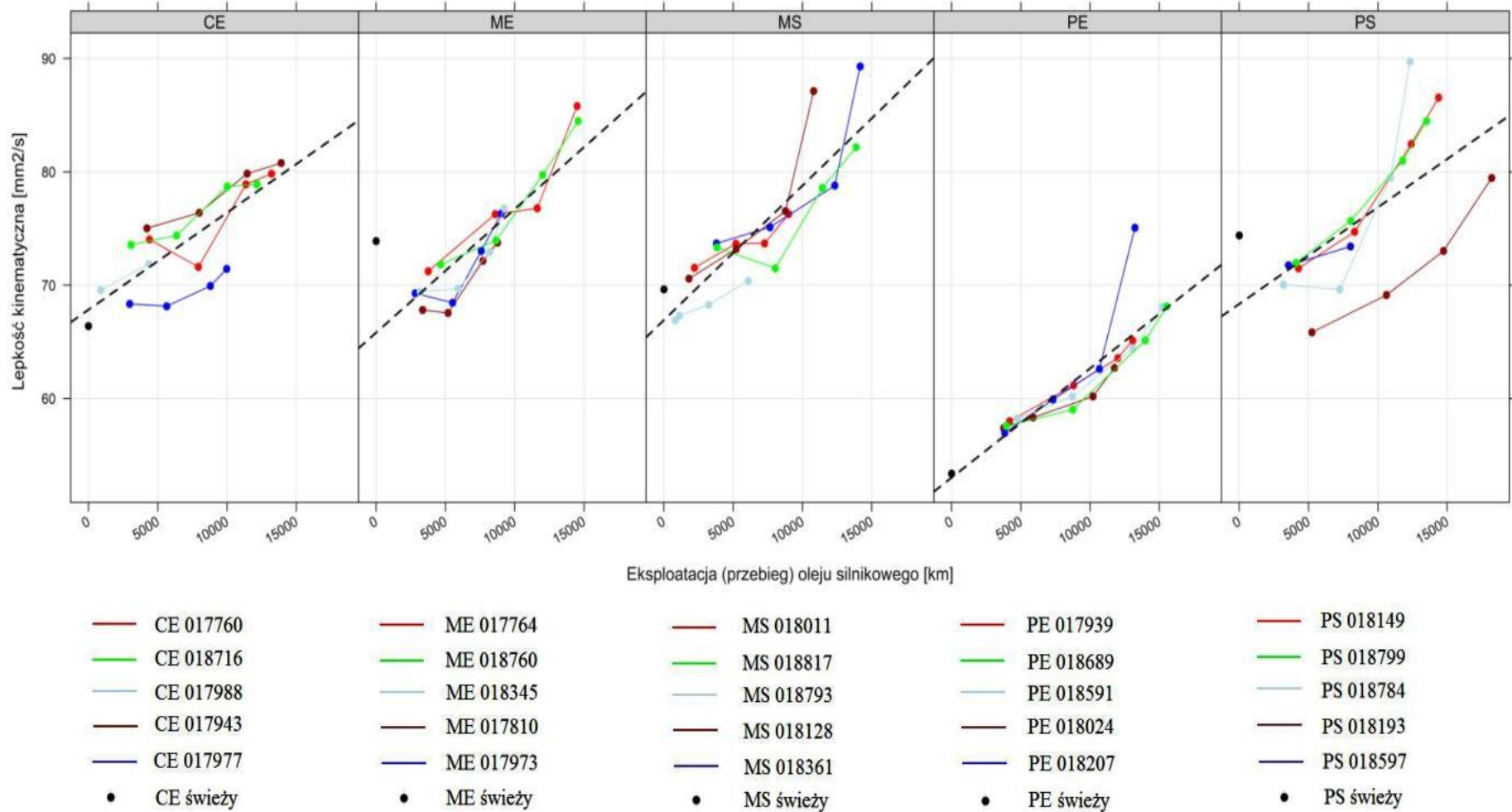
Spośród 23 analizowanych olejów z trzeciego na czwarty kwartał największy przyrost procentowy lepkości w temp 40°C zanotowały następujące oleje: PE 018207 o 20% (z 62,6 do 75,1  $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ), MS 018128 o 14% (z 76,5 do 87,1), MS 018361 o 13% (z 78,8 do 89,3), PS 018784 o 13% (z 79,5 do 89,7) oraz ME 017764 o 12% (z 76,8 do 85,8). Zaś dla lepkości w temp 100 °C oleje: ME 017764 o 14% (z 11,8 do 13,4), PS 018149 o 13% (z 11,6 do 13,1) oraz ME 018760 o 12% (z 11,9 do 13,3).

Na dodatkową analizę zasługują oleje grupy drugiej PS 018193 i CE 017977. Widać wyraźnie, że zmiana charakteru eksploatacji wpłynęła na charakter zmiany lepkości. Utrzymują one niższą o ok 10% wartość lepkości przez cały przebieg eksploatacyjny w stosunku do olejów eksploatowanych w pojazdach grupy pierwszej.

Analizując zmiany lepkości w temperaturze 40°C można stwierdzić, że stosunkowo wąski przedział zmienności zachowuje olej CE. W jego grupie, we wszystkich czterech przypadkach wartość lepkości kinematycznej utrzymuje się w przedziale od 66,4 do 80,8  $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . Natomiast dla lepkości kinematycznej w 100°C najwęższy przedział zmienności zachowuje olej PE (od 9,8 do 11,2  $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ).

Dodatkowo na uwagę zasługuje fakt, że krzywe zmiany lepkości mają zbliżony kształt w trzech przypadkach: dla olejów MS, PS oraz ME. Lepkość kinematyczna w 40°C, w tych grupach po przebiegu około 14 000 km w stosunku do lepkości kinematycznej świeżego oleju wzrosła odpowiednio o 23%, 17% oraz 15%.

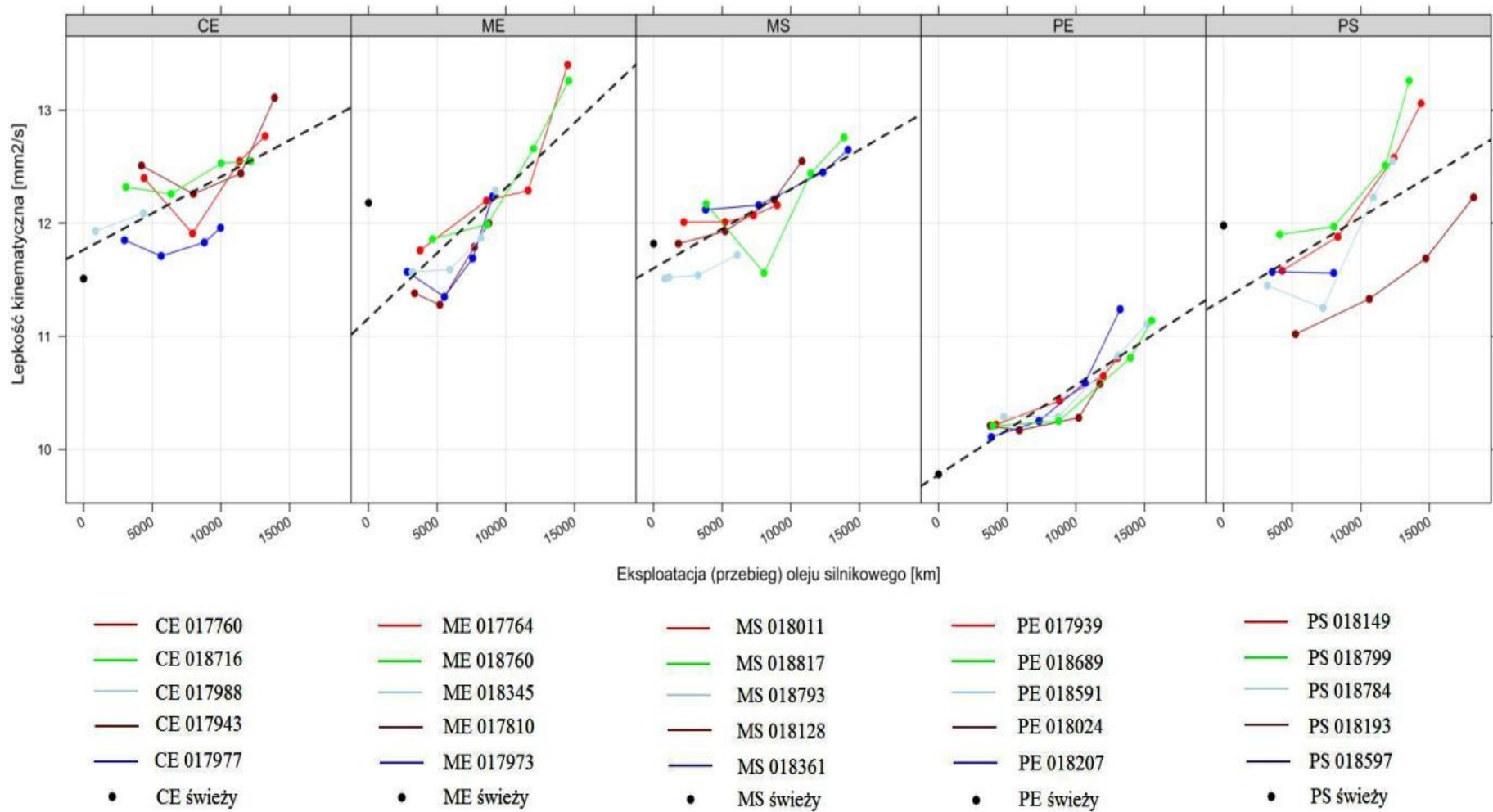
Uzyskane wyniki lepkości przy 100°C dają podstawę do stwierdzenia, że lepkość kinematyczna olejów CE, ME, MS oraz PS, po przebiegu średnio około 12 000 km wzrasta do poziomów odpowiadających klasie lepkościowej 5W-40. Jedynie oleje oznaczone jako PE przez cały okres eksploatacyjny utrzymują się w klasie lepkościowej 5W-30.



Rys. 2. Zmiany lepkości kinematycznej badanych olejów silnikowych w temperaturze 40°C

Źródło: opracowanie własne





Rys. 3. Zmiany lepkości kinematycznej badanych olejów silnikowych w temperaturze 100°C

Źródło: opracowanie własne

W Tabeli 3 zaprezentowano charakterystyki opisowe w poszczególnych okresach pomiarowych dla badanych olejów silnikowych. Wartość graniczną poziomu istotności przyjęto na poziomie 0,05. Poniżej tej wartości otrzymane rezultaty oceniono jako statystycznie istotne (wartości te wyróżniono pogrubioną czcionką). Wartości  $p$  mniejsze od 0,01 uznawano za wysoce istotne (wartości te wyróżniono pogrubioną czcionką oraz podkreśleniem).

Analizując poszczególne zmienne zamieszczone w Tabeli 3, stwierdzono, że po pierwszych trzech miesiącach eksploatacji największa ilość istotnie statystycznych różnic pomiędzy wartościami średnich dotyczy par olejów, w których znalazł się olej PE. Wykazał on niższą średnią wartość lepkości w porównaniu z pozostałymi olejami. Analiza zmiennej - przebieg pojazdu, nie wykazuje istotnie statystycznych różnic.

Po kolejnych trzech okresach pomiarowych występuje kontynuacja wcześniej omawianych zależności, czyli wciąż największa ilość istotnych statystycznie różnic pomiędzy wartościami średniej dotyczy par olejów zawierających olej PE. Po sześciu miesiącach eksploatacji najbardziej homogenicznymi pod względem analizowanych zmiennych okazały się oleje CE z ME oraz MS z ME. Po trzecim kwartale, analiza zmiennej – lepkość kinematyczna w temperaturze 40°C oraz 100°C, pozwoliła zauważyć, że istotność statystyczna na poziomie mniejszym, bądź równym 0,001, umożliwia nazwanie porównań wcześniej opisywanych (pary olejów zawierających olej PE) wysoce istotnymi. Dla zmiennej - przebieg pojazdu, zauważono, że istotnie statystycznie różnice pomiędzy wartościami średniej dotyczą par olejów, w których znalazł się olej ME (za wyjątkiem ME i MS). Wynika to z tego, że dla grupy olejów ME średni przebieg w trzecim z badanych okresów wynosił najmniej – 2 653 km. Jest to co prawda wynik istotny statystycznie, lecz nieistotny merytorycznie. Dla olejów ME odchylenie standardowe przebiegu jest na niskim poziomie (około 541 km) – świadczy to o wysokiej jednorodności przebiegów pojazdów wyposażonych w te oleje. Po ostatnim okresie pomiarowym pod kątem przebiegu zaobserwowano brak istotnie statystycznych różnic pomiędzy wartościami średniej arytmetycznej. Analizując wszystkie cztery okresy pomiarowe można zwrócić uwagę, że w przypadku niektórych okresów, porównania niemal osiągają istotność statystyczną, sugerując potencjalne istnienie różnic. Tego rodzaju obserwacje mogą stanowić przedmiot zainteresowania w przyszłych badaniach.

Analizując Tabelę 4, można stwierdzić, że tylko niektóre z różnic w kolejnych okresach pomiarowych były statystycznie istotne, np. lepkość kinematyczna mierzona w 40°C oraz w 100°C w grupie olejów ME, wykazywała istotne statystycznie różnice pomiędzy okresem drugim i trzecim oraz pomiędzy trzecim, a czwartym, co potencjalnie może wskazywać na przyspieszenie tendencji wzrostowej dla średnich wartości tego parametru.

Tabela 3. Wartości średnie, odchylenia standardowe oraz wartości  $p^*$  po poszczególnych okresach pomiarowych

	[Ogółem]	[CE]	[ME]	[MS]	[PE]	[PS]	CE vsME	CE vsMS	CE vs PE	CE vs PS	MEvsMS	ME vsPE	ME vs PS	MS vs PE	MS vs PS	PE vs PS
	$\bar{x}(s)$						$p$									
<b>I kwartał</b>	N=28	N=5	N=6	N=6	N=6	N=5										
Przebieg pojazdu [km]	2796 (1646)	2514 (1986)	2957 (1580)	2076 (1549)	3409 (1707)	3015 (1740)	0,698	0,699	0,451	0,683	0,352	0,644	0,956	0,187	0,376	0,715
Lepkość kinemat. (40 °C) [ $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]	68,2 (6,40)	71,7 (3,63)	70,6 (2,17)	70,9 (2,52)	56,9 (1,80)	71,9 (1,57)	0,561	0,701	<b>&lt;0,001</b>	0,906	0,795	<b>&lt;0,001</b>	0,263	<b>&lt;0,001</b>	0,450	<b>&lt;0,001</b>
Lepkość kinemat. (100 °C) [ $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]	11,5 (0,78)	12,1 (0,41)	11,7 (0,28)	11,9 (0,24)	10,1 (0,18)	11,7 (0,23)	0,099	0,321	<b>&lt;0,001</b>	0,081	0,244	<b>&lt;0,001</b>	0,880	<b>&lt;0,001</b>	0,173	<b>&lt;0,001</b>
<b>II kwartał</b>	N=23	N=4	N=5	N=5	N=5	N=4										
Przebieg pojazdu [km]	3500 (1047)	3517 (206)	3222 (1187)	2955 (1552)	3798 (1077)	4138 (233)	0,612	0,466	0,596	<b>0,007</b>	0,768	0,445	0,161	0,351	0,164	0,527
Lepkość kinemat. (40 °C) [ $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]	69,7 (5,98)	73,6 (2,26)	71,2 (3,75)	72,2 (3,00)	59,7 (1,09)	73,4 (2,66)	0,280	0,449	<b>&lt;0,001</b>	0,909	0,663	<b>0,002</b>	0,344	<b>&lt;0,001</b>	0,546	<b>0,001</b>
Lepkość kinemat. (100 °C) [ $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]	11,5 (0,72)	12,1 (0,17)	11,7 (0,40)	11,8 (0,28)	10,3 (0,10)	11,7 (0,33)	0,068	0,096	<b>&lt;0,001</b>	0,059	0,505	<b>0,001</b>	0,946	<b>&lt;0,001</b>	0,440	<b>0,002</b>
<b>III kwartał</b>	N=21	N=3	N=5	N=5	N=5	N=3										
Przebieg pojazdu [km]	3409 (865)	3510 (121)	2653 (541)	3164 (1095)	4092 (835)	3837 (229)	<b>0,022</b>	0,521	0,196	0,116	0,386	<b>0,015</b>	<b>0,006</b>	0,173	0,247	0,548
Lepkość kinemat. (40 °C) [ $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]	73,7 (6,92)	79,1 (0,61)	74,9 (3,24)	75,2 (4,38)	63,2 (1,92)	81,0 (1,50)	<b>0,041</b>	0,112	<b>&lt;0,001</b>	0,159	0,920	<b>&lt;0,001</b>	<b>0,012</b>	<b>0,002</b>	<b>0,040</b>	<b>&lt;0,001</b>
Lepkość kinemat. (100 °C) [ $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]	11,9 (0,77)	12,5 (0,06)	12,1 (0,41)	12,1 (0,37)	10,6 (0,22)	12,4 (0,19)	0,069	0,094	<b>&lt;0,001</b>	0,604	0,748	<b>&lt;0,001</b>	0,123	<b>&lt;0,001</b>	0,184	<b>&lt;0,001</b>
<b>IV kwartał</b>	N=21	N=3	N=5	N=5	N=5	N=3										
Przebieg pojazdu [km]	1920 (564)	2160 (298)	1794 (867)	2181 (465)	1771 (575)	1704 (282)	0,426	0,941	0,255	0,127	0,413	0,961	0,839	0,251	0,122	0,835
Lepkość kinemat. (40 °C) [ $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]	78,2 (8,01)	79,8 (0,94)	79,4 (5,36)	81,1 (7,79)	67,8 (4,64)	86,9 (2,64)	0,875	0,747	<b>0,003</b>	<b>0,032</b>	0,712	<b>0,007</b>	<b>0,039</b>	<b>0,015</b>	0,181	<b>&lt;0,001</b>
Lepkość kinemat. (100 °C) [ $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]	12,2 (0,85)	12,8 (0,28)	12,6 (0,64)	12,4 (0,43)	11,0 (0,27)	13,0 (0,37)	0,622	0,130	<b>0,001</b>	0,614	0,460	<b>0,002</b>	0,406	<b>0,001</b>	0,094	<b>0,003</b>
N - ilość przebadanych próbek, $\bar{x}$ - średnia arytmetyczna, $s$ - odchylenie standardowe, $p$ - value (wartość)																

\*wartość  $p$  wynikająca z zastosowania testu t Studenta dla prób niezależnych

Źródło: opracowanie własne

**Tabela 4.** Wartości średnie, odchylenia standardowe oraz wartości  $p^*$  dla lepkości kinematycznej 40°C i 100°C

Kod oleju		[kwartał 1]	[kwartał 2]		[kwartał 2]	[kwartał 3]		[kwartał 3]	[kwartał 4]	
		N=5	N=4		N=4	N=3		N=3	N=3	
		$\bar{x}$ (s)		$p$	$\bar{x}$ (s)		$p$	$\bar{x}$ (s)		$p$
CE	Lepkość w temp. 40°C	71,7 (3,63)	73,6 (2,26)	0,647	73,6 (2,26)	79,1 (0,61)	0,050	79,1 (0,61)	79,8 (0,94)	0,106
	Lepkość w temp. 100°C	12,1 (0,41)	12,1 (0,17)	0,331	12,1 (0,17)	12,5 (0,06)	0,123	12,5 (0,06)	12,8 (0,28)	0,255
PS	Lepkość w temp. 40°C	71,9 (1,57)	73,4 (2,66)	0,115	73,4 (2,66)	81,0 (1,50)	<b>0,028</b>	81,0 (1,50)	86,9 (2,64)	0,111
	Lepkość w temp. 100°C	11,7 (0,23)	11,7 (0,33)	0,725	11,7 (0,33)	12,4 (0,19)	<b>0,029</b>	12,4 (0,19)	13,0 (0,37)	0,054
		N=6	N=5		N=5	N=5		N=5	N=5	
		$\bar{x}$ (s)		$p$	$\bar{x}$ (s)		$p$	$\bar{x}$ (s)		$p$
ME	Lepkość w temp. 40°C	70,6 (2,17)	71,2 (3,75)	0,300	71,2 (3,75)	74,9 (3,24)	<b>0,014</b>	74,9 (3,24)	79,4 (5,36)	<b>0,022</b>
	Lepkość w temp. 100°C	11,7 (0,28)	11,7 (0,40)	0,657	11,7 (0,40)	12,1 (0,41)	<b>0,019</b>	12,1 (0,41)	12,6 (0,64)	<b>0,018</b>
MS	Lepkość w temp. 40°C	70,9 (2,52)	72,2 (3,00)	0,294	72,2 (3,00)	75,2 (4,38)	0,071	75,2 (4,38)	81,1 (7,79)	<b>0,038</b>
	Lepkość w temp. 40°C	11,9 (0,24)	11,8 (0,28)	0,531	11,8 (0,28)	12,1 (0,37)	0,117	12,1 (0,37)	12,4 (0,43)	<b>0,008</b>
PE	Lepkość w temp. 40°C	56,9 (1,80)	59,7 (1,09)	<b>0,009</b>	59,7 (1,09)	63,2 (1,92)	<b>0,011</b>	63,2 (1,92)	67,8 (4,64)	0,080
	Lepkość w temp. 100°C	10,1 (0,18)	10,3 (0,10)	0,203	10,3 (0,10)	10,6 (0,22)	<b>0,016</b>	10,6 (0,22)	11,0 (0,27)	<b>0,014</b>
N - ilość przebadanych próbek, $\bar{x}$ - średnia arytmetyczna, $s$ - odchylenie standardowe, $p$ - value (wartość)										

\*wartość  $p$  wynikająca z zastosowania testu t Studenta dla prób niezależnych

Źródło: opracowanie własne

W przypadku grupy olejów PS lepkość kinematyczna wykazywała istotne statystycznie różnice tylko pomiędzy okresem drugim i trzecim co potencjalnie może wskazywać na sinusoidalną postać krzywej dla średnich wartości tego parametru. W przypadku lepkości kinematycznej dla olejów CE, zarówno w 40°C jak i w 100°C, nie zaobserwowano istotnych różnic dla żadnego z badanych sąsiadujących ze sobą okresów. Należy jednak nadmienić, że w przypadku lepkości kinematycznej w 40°C w porównaniu okresu drugiego z trzecim różnice w wartościach średnich znalazły się na granicy istotności statystycznej ( $p = 0,050$ ).

## 5. Modelowanie zmian wartości parametrów olejów silnikowych

W pierwszym etapie modelowania zmian lepkości kinematycznej w 100°C określono graniczną akceptowalną wartość [9, 12], następnie dla każdego oleju na podstawie zgromadzonego materiału empirycznego dokonano wizualnej oceny relacji pomiędzy wartościami przebiegu oraz zmianami wartości parametrów oleju. Uznano, że liniowa zależność jest adekwatna.

Tabela 5 zawiera wyniki estymacji, w której podano wartości wyrazów wolnych (A), współczynników kierunkowych (B), podano prawdopodobieństwa testowe dla hipotez głoszących zerową wartość współczynników kierunkowych (p), podano również wartości odchyłeń standardowych składnika resztowego (Se).

**Tabela 5.** Wyniki estymacji modelu regresji liniowej dla lepkości kinematycznej (100 °C)

A	B	p	Se
<b>CE</b>			
11,846	<b>0,067</b>	0,001	0,247
<b>ME</b>			
11,162	<b>0,115</b>	0,000	0,361
<b>MS</b>			
11,602	<b>0,070</b>	0,000	0,224
<b>PE</b>			
9,776	<b>0,079</b>	0,000	0,161
<b>PS</b>			
11,233	<b>0,105</b>	0,001	0,394

Źródło: opracowanie własne

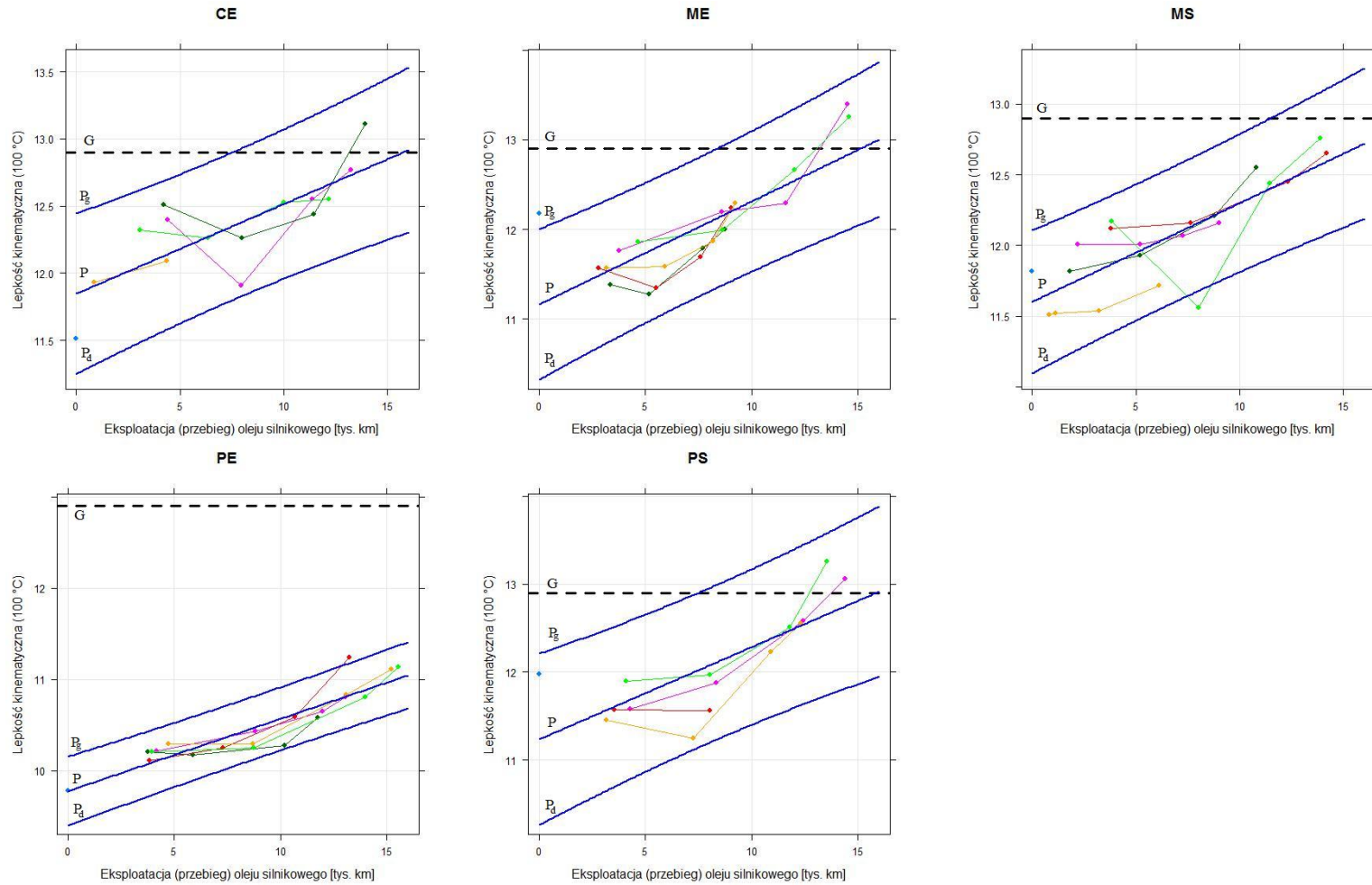
Można zauważyć, że każda z ocen współczynników kierunkowych była istotnie różna od zera (wszystkie  $p < 0,05$ ). Współczynnik kierunkowy informuje o oczekiwanej

(przeciętnej) zmianie badanego parametru wraz ze wzrostem wartości przebiegu o 1000 km. Zatem dodatnie współczynniki kierunkowe przemawiają za pozytywną relacją pomiędzy przebiegiem, a przeciętnymi wartościami parametru, podczas gdy ujemne współczynniki kierunkowe wskazują na negatywną relację pomiędzy przebiegiem, a przeciętnymi wartościami parametru.

**Oszacowane równania regresji, mające postać  $Y=A + B \cdot X$ , umożliwiają dokonanie punktowych predykcji przeciętnych wartości parametrów (Y) dla zadanej wielkości przebiegu (X).** Stosowne wartości A oraz B zostały podane w Tabeli 5. Predykcje te będą obarczone najmniejszym błędem w granicach zaobserwowanych wartości przebiegów, natomiast ekstrapolacja czyli dokonywanie predykcji dla przebiegów znacznie większych lub mniejszych niż zaobserwowane może być obarczone większym błędem, gdyż postać relacji pomiędzy przebiegiem, a badanym parametrem poza obszarem danych niekoniecznie jest takiej samej postaci.

Na rys. 4, zaprezentowano zgromadzone dane empiryczne oraz predykcje punktowe dla przebiegu w zakresie 0-16 tys. kilometrów (centralna niebieska prosta). Predykcje punktowe, jak każde inne wartości szacowane na podstawie danych empirycznych obarczone są błędem szacunku. W celu ilościowego wyrażenia poziomu błędu szacunku na wykresach umieszczono również krzywe określające granice 95% przedziałów predykcji (krzywe  $P_d$  oraz  $P_g$ ). Wykresy prezentują również czarne przerywane poziome proste, które są przyjętymi wartościami granicznymi (prosta G). W punkcie przecięcia się prostej P z prostą G można odczytać wartości przebiegu dla którego przeciętna wartość parametru przekroczy wartość progową, jest to tzw. predykcja odwrotna. Wartości przebiegu odczytane jako punkty przecięcia się prostej G z krzywymi  $P_d$  oraz  $P_g$  określają 95% przedział ufności (nazywany również przedziałem kalibracji) dla wartości przebiegu, dla którego następuje przekroczenie wartości progowej dla hipotetycznego indywidualnego pomiaru badanego parametru.

Analizując predykcje punktowe dla przebiegu w zakresie 0-16 tys. kilometrów dla parametru lepkość kinematyczna przy 100°C (rys. 4), stwierdzono, że najszybciej wartość krytyczna zostaje przekroczona przez oleje grupy ME, następnie ex aequo CE oraz PS. Wyróżniająco, niską lepkość kinematyczną w stosunku do pozostałych olejów, utrzymującą się w granicach dopuszczalnych do przebiegu 40 000 km (ekstrapolacja) odnotowano w przypadku olejów grupy PE. Warto podkreślenia są również bardzo wąskie przedziały predykcji dla olejów tej grupy.



P – predykcje punktowe; P<sub>d</sub> – dolna granica 95% przedziału predykcji; P<sub>g</sub> – górna granica 95% przedziału predykcji; G – wartość graniczna

Rys. 4. Dane empiryczne oraz predykcje punktowe dla przebiegu w zakresie (0-16) tys. kilometrów (lepkość kinematyczna w 100°C)

Źródło: opracowanie własne

## 5. Wnioski

Niniejsze opracowanie koncentruje się przede wszystkim na opisie zmian lepkości kinematycznej olejów silnikowych w trakcie eksploatacji. Badania przeprowadzone na flocie pojazdów w rzeczywistych warunkach pracy pozwoliły na uzyskanie wyników pomocnych podczas podejmowania racjonalnych decyzji dotyczących okresu eksploatacji olejów silnikowych. Główne wnioski z tego badania są następujące:

Trzy spośród 5 rodzajów olejów tj. CE, MS oraz PE wykazały od początku testu tendencję wzrostową lepkości kinematycznej w stosunku do wartości wyjściowej w temperaturze 40 i 100°C, co może świadczyć o procesach utleniania zachodzących w olejach. Krzywe zmian tych olejów mają zbliżony kształt, a lepkość kinematyczna w tych grupach po 12 miesiącach w stosunku do lepkości kinematycznej świeżego oleju wzrosła odpowiednio o: 20%, 16%, 27% (temp. 40°C) oraz 11%, 5%, 12% (temp. 100°C). Dla dwóch olejów ME oraz PS zaobserwowano początkowy spadek lepkości w stosunku do wartości wyjściowej, do przebiegu ok 10 tys. km, po czym obserwowano wzrost lepkości. Tłumaczyć to można ścinaniem dodatków lepkościowych w początkowym okresie pracy. Krzywe zmiany lepkości mają dla tych olejów zbliżony kształt a zmiana lepkości w stosunku do świeżego oleju wyniosła odpowiednio: 8% i 14% (temp. 40°C), 4% i 8% (temp. 100°C). Uzyskany obraz pozwala stwierdzić, że charakter zmian lepkości będzie zależał od formułacji oleju przez producenta. Dobór olejów formułacji dla floty pojazdów eksploatowanej w zbliżonych warunkach będzie miał wpływ na procesy degradacji oleju.

Analiza statystyczna pozwoliła potwierdzić istotność zmian lepkości pomiędzy olejem PE a pozostałymi olejami. Natomiast tylko niektóre z różnic w kolejnych okresach pomiarowych okazały się statystycznie istotne.

Uzyskane dane pozwoliły na opracowanie modelu statystycznego przy użyciu podstawowego modelu matematycznego – funkcja liniowa. Uzyskany model oparty o zmiany lepkości kinematycznej w 100°C olejów silnikowych w warunkach eksploatacji może być wykorzystany do przewidywania zachowania oleju silnikowego w trakcie eksploatacji. Należy jednak zaznaczyć, że dla uzyskania pełnego obrazu zmian zachodzących w oleju, wskazanym jest interpretowanie lepkości kinematycznej w uzupełnieniu o lepkość dynamiczną (HTHS), stopień oksydacji oraz liczbę kwasową. Właściwości te mogą wpływać na niezawodność całego silnika, i dla tego jest ważnym kontynuowanie obserwowania stanu degradacji oleju silnikowego.



## Podziękowania

*Publikacja została sfinansowana ze środków przyznanych Wydziałowi Towaroznawstwa Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie, w ramach dotacji na utrzymanie potencjału badawczego. Badania laboratoryjne stanowiące podstawę niniejszego opracowania przeprowadzono w Instytucie Nafty i Gazu w Krakowie – Państwowym Instytucie Badawczym. W tym miejscu autorzy serdecznie dziękują Dyrekcji Instytutu Nafty i Gazu Prof. dr hab. inż. Marii Ciechanowskiej oraz p.o. Zastępcy Dyrektora ds. Technologii Nafty mgr inż. Wiesławie Urzędowskiej za umożliwienie wykonania badań.*

## Literatura

1. Agoston A, Ötsch C, Jakoby B. *Viscosity sensors for engine oil condition monitoring— Application and interpretation of results*. Sensors Actuators A Phys. 2005;121(2):327–32.
2. Balabin R M, Safieva R Z. *Motor oil classification by base stock and viscosity based on near infrared (NIR) spectroscopy data*. Fuel. 2008;87(12):2745–52.
3. Bassbasi M, Hafid A, Platikanov S, Tauler R, Oussama A. *Study of motor oil adulteration by infrared spectroscopy and chemometrics methods*. Fuel. Elsevier Ltd; 2013;104:798–804.
4. Brouwer M, D, Gupta L, A., Sadeghi F, Peroulis D, Adams D. *High temperature dynamic viscosity sensor for engine oil applications*. Sensors Actuators A Phys. Elsevier B.V.; 2012;173(1):102–7.
5. Inayatullah O, Jamaludin N, Ali A, Nor M J M. *Application of acoustic emission technique to observe the engine oil's viscosity*. 2011 2nd International Conference on Instrumentation Control and Automation. IEEE; 2011. p. 344–8.
6. Jakoby B, Scherer M, Buskies M, Eisenschmid H. *An automotive engine oil viscosity sensor*. IEEE Sens J. 2003;3(5):562–8.
7. Karpovich I A, Odzhayev V B, Azarko I I, Jankovsky ON. *Universal device for motor-oil quality control*. 11th International Conference Microwave and Telecommunication Technology Conference Proceedings IEEE Cat No01EX487. 2001.
8. Kim Y, Kim N Y, Park S Y, Lee D-K, Lee J H. *Classification and individualization of used engine oils using elemental composition and discriminant analysis*. Forensic Sci Int. Elsevier Ireland Ltd; 2013;230(1-3):58–67.
9. Kral J, Konecny B, Madac K, Fedorko G, Molnar V. *Degradation and chemical change of longlife oils following intensive use in automobile engines*. Measurement. Elsevier Ltd; 2014;50:34–42.
10. Kumbar V, Votava J. *Differences in engine oil degradation in spark-ignition and compression-ignition engine*. Eksploatacja i Niezawodn – Maint Reliab. 2014;16(4):622–8.
11. Kuranc A. *Exhaust emission test performance with the use of the signal from air flow meter*. Eksploatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability 2015; 17 (1): 129–134.

12. Souza de Carvalho M J, Rudolf Seidl P, Pereira Belchior C R, Ricardo Sodré J. *Lubricant viscosity and viscosity improver additive effects on diesel fuel economy*. Tribol Int. 2010;43(12):2298–302.
13. Urzędowska W, Stępień Z. *Wybrane zagadnienia dotyczące zmian właściwości silnikowego oleju smarowego w eksploatacji*. Nafta-Gaz. 2012;12, Rok LX:1102–10.
14. Wang S. *Engine oil condition sensor: method for establishing correlation with total acid number*. Sensors Actuators B Chem. 2002;86(2-3):122–6.
15. Wang S S. *A Physical Model for the Engine Oil Condition Sensor*. Tribology Transactions. 2001. p. 411–6.
16. Wolak A, Hornik S. *Changes in functional properties of engine oils during exploitation – TBN*. Current Trends in Commodity Science: Development and Assessment of Non-Food Products. 2015.
17. Wolak A, Janocha P. *Zmiany właściwości użytkowych olejów silnikowych w warunkach eksploatacji - analizy FTIR*, Nowoczesne środki smarowe do specjalistycznych zastosowań w urządzeniach przemysłowych, transporcie i komunikacji. Kraków: Instytut Nafty i Gazu - Państwowy Instytut Badawczy; 2015. p. 84–105.
18. Youngk R D. *Automobile engine reliability, maintainability and oil maintenance*. Annu Reliab Maintainab Symp 2000 Proc Int Symp Prod Qual Integr Cat No00CH37055. 2000;94–9.
19. Zajac G, Szyszlak-Bargłowicz J, Słowik T, Kuranc A, Kamińska A. *Designation of Chosen Heavy Metals in Used Engine Oils Using the XRF Method*. Polish J Environ Stud. 2015; 2277–83.