



Eksperymentalne badania elektroreologicznych właściwości olejów smarnych zawierających ciecz jonową

Część 1. Badania zmodyfikowanym viskozymetrem Brookfield DV-III Ultra

JAROSŁAW JUDA, TOMASZ JAN KAŁDOŃSKI,
TADEUSZ KAŁDOŃSKI

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny,
Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu, ul. gen. S. Kaliskiego 2,
00-908 Warszawa, tomasz.kaldonski@wat.edu.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki eksperymentalnych badań właściwości elektroreologicznych (ER) olejów smarnych zawierających ciecz jonową. Badania przeprowadzono na stanowisku specjalnie zaprojektowanym do tego celu, w którym zastosowano zmodyfikowany viskozymetr Brookfield DV-III Ultra. Stanowisko to zostało zastrzeżone w Urzędzie Patentowym RP (W124200 — 10.02.2017 r.). Oceniono właściwości ER dwóch mieszanin, tj. silikonowej cieczy tłumiącej GP-1 zawierającej 2% (v/v) cieczy jonowej CJ 001, tj. tetrafluoroboranu 1-metylo-3-oktyloksymetyloimidazolowego oraz oleju bazowego polialfaolefinowego PAO-6 zawierającego 2% (v/v) cieczy jonowej CJ 008, tj. triheksyloitetradecylofosfonowego bis (tri-fluorometylosulfonylo)imidu. Dobór składników obu mieszanin bazował na wynikach badań mieszalności i ocenie podstawowych właściwości fizykochemicznych. Przeprowadzone badania wykazały, że wytworzone mieszaniny generowały efekt ER, lecz był on krótkotrwały, co sugerowało zmiany struktury wewnętrznej tych mieszanin. Dlatego zaplanowano kolejne badania, m.in. spektroskopię dielektryczną i obserwacje mikroskopowe *in situ* tych mieszanin w zewnętrznym polu elektrycznym. Celem tych badań będzie zarejestrowanie znikającego efektu ER i rozpoznanie jego mechanizmu.

Słowa kluczowe: efekt elektroreologiczny, mieszaniny homogeniczne, oleje smarowe, ciecze jonowe
DOI: 10.5604/01.3001.0013.5554

1. Wstęp

Ciecz elektoreologiczna (ER) na ogół składa się z ciekłego, izolującego medium zawierającego aktywne elektrycznie, polaryzowalne cząstki stałe lub materiał ciekły, np. ciekłokrystaliczny [1÷5]. Właściwości reologiczne cieczy ER (lepkość, granica plastyczności, moduł sprężystości poprzecznej...) mogą zmieniać się odwracalnie nawet o kilka rzędów wartości pod wpływem działania zewnętrznego pola elektrycznego o natężeniu kilku kilowoltów na milimetr [4÷6]. Ponieważ jej mechaniczne właściwości mogą być łatwo kontrolowane w szerokim zakresie wartości, ciecz ER może być wykorzystywana jako elektryczna i mechaniczna powierzchnia międzyfazowa w wielu branżach przemysłu. Przykładowo może być stosowana w przemyśle motoryzacyjnym: w układach sprzęgłowych, hamulcowych, tłumiących [1, 6, 7]. Bogactwo potencjalnych zastosowań wzbudziło wielkie zainteresowanie, zarówno w świecie akademickim, jak i w przemyśle, odkąd w 1949 r. Winslow po raz pierwszy opisał efekt ER [2]. Badał on zachowanie się w polu elektrycznym zawieszin sporządzonych z wysoce izolujących olejów (olej transformatorowy, olej silikonowy) zawierających cząstki stałe (mąki, żelatyny, wapienia). Na podstawie tych badań Winslow uznał, że o znacznym wzroście lepkości zawiesiny, pod wpływem działania zewnętrznego pola elektrycznego (efekt ER), decyduje konstrukcja „łańcuchów” cząstek ciała stałego utworzonych pomiędzy elektrodami („łańcuchy fibrylowe”). Dopiero w latach 80. i na początku lat 90. XX wieku rozpoczęły się intensywne badania efektu ER [7÷18]. Jednak nadal nie są dokładnie znane mechanizmy i procesy, jakie zachodzą w takiej cieczy ER pod wpływem działania pola elektrycznego. Z pewnością oddziaływania kulombowskie są wspólne dla teoretycznych modeli opisu procesów zachodzących w cieczy ER. Polegają one na tworzeniu w polu elektrycznym „łańcuchów” polarnych cząstek rozproszonych w cieczy bazowej [14]. Takie kolumnowe struktury cząstek pomiędzy elektrodami zauważane są tylko w warunkach statycznych i dodatkowo w bardzo rozcieńczonych zawieszinach, co zaobserwowali Henley i Filisko w swoich badaniach [7]. W układzie dynamicznym następuje zrywanie tych „fibrylowych łańcuchów” pod wpływem przekroczonej wartości granicznej siły ścinającej. Ponadto, według tych autorów [7], powstające warstwy spolaryzowanych cząstek przyłączane są na przemian do jednej z dwóch elektrod, zatem w warunkach ścinania sąsiednie zespoły struktury łańcuchowej mogą przemieszczać się w przeciwnych kierunkach i ślizgać się po powierzchni elektrody, z którą nie są związane.

W literaturze przedmiotu proponuje się wiele modeli teoretycznych opisujących funkcjonowanie heterogenicznych cieczy ER w polu elektrycznym, mianowicie: model polaryzacyjny [14÷16], model przewodnościowy [8, 9], model mostków wodnych [13], model stratności dielektrycznej [17÷19]. Żaden z tych modeli samodzielnie nie tłumaczy wszystkich aspektów aktywności elektoreologicznej układu. Niewątpliwie warunkiem koniecznym, chociaż niewystarczającym, dla

zaistnienia efektów ER jest znaczna różnica w przenikalności elektrycznej między fazą rozproszoną a izolującą cieczą bazą.

Podstawowym mankamentem heterogenicznych cieczy ER jest sedimentacja fazy stałej, którą można zminimalizować, stosując dodatkowo odpowiednie środki powierzchniowo czynne (dyspergatory). Jednak najskuteczniejszym sposobem pozbycia się problemu sedimentacji jest zastosowanie homogenicznej cieczy ER. Z dotychczasowych danych literaturowych wynika, że w jednorodnych cieczach ER wykorzystuje się ciekłe kryształy o niskiej masie cząsteczkowej i polimery ciekłokrystaliczne [4, 5, 20]. Ciecze takie w idealnej sytuacji wykazują charakterystyki cieczy newtonowskiej, tzn. że naprężenie ścinające jest proporcjonalne do szybkości ścinania. W rezultacie urządzenie z homogeniczną cieczą ER może być skonfigurowane jako impedancja mechaniczna z tłumikiem o zmiennych właściwościach lepkościowych cieczy tłumiącej. Lokalna stabilność cieczy homogenicznej powinna być lepsza od cieczy zawierającej cząstki ciała stałego, ponieważ nie mają one udziału w formowaniu jej właściwości. Ponadto, odstęp między elektrodami może być niewielki, dzięki czemu pole elektryczne może skutecznie oddziaływać na ciecz homogeniczną, gdy do elektrod zostanie przyłożone napięcie. Jednak wiedza na temat homogenicznych cieczy ER jest niewielka, w tym także o emulsjach elektreologicznych zaliczanych do rodziny cieczy homogenicznych. Dotychczas prace badawcze dotyczyły głównie polimerowych ciekłych kryształów, np. ciekłych polisiloksanów [21÷24].

2. Ciecz jonowa — składnik aktywny elektrycznie cieczy ER?

Wciąż trwają poszukiwania homogenicznej cieczy ER, która mogłaby zastąpić niedoskonałą ciecz dwufazową. Bardzo mało jest publikacji i informacji na temat homogenicznych cieczy ER. Bezwodne ciecze homogeniczne mogłyby być stosowane w szerokim zakresie temperatur pracy układów mechanicznych, w tym systemów tribologicznych, mając lepsze właściwości niż te, które z różnych względów zawierają wodę. Czynnikiem, które wpływają na efekt ER, są m.in.: natężenie pola elektrycznego, częstotliwość pola elektrycznego, przewodnictwo elektryczne, właściwości dielektryczne składników cieczy, stężenie objętościowe składnika aktywnego elektrycznie oraz temperatura [1, 3, 6, 58...]. Poprzez łączenie różnych cieczy nośnikowych (cieczy izolujących) i dodatków o dużej stałej dielektrycznej poszukiwana jest wysoko wydajna, z silnym efektem ER, idealna ciecz homogeniczna. W literaturze wymieniony jest pojedynczy przykład jednorodnej cieczy ER, wyprodukowanej przez firmę Asahi Kasei (Japonia) na bazie ciekłych kryształów o małej masie cząsteczkowej z dodatkiem polimerów ciekłokrystalicznych, której charakterystyki $\tau = f(\dot{\gamma})$ są zbliżone do charakterystyk newtonowskich [4, 5, 20].

Dotychczas brakuje wyników badań dotyczących ewentualnego zastosowania cieczy jonowych jako składnika aktywnego elektrycznie w cieczy ER. Ciecze jonowe ze względu na swoje różnorodne i bardzo często unikatowe właściwości są bardzo interesujące dla obszaru zwanego techniką smarowniczą [25÷31]. Na przestrzeni lat kształtowały się różne definicje cieczy jonowych. Wynikało to ze wzrostu zainteresowania tymi cieczami i odkrywania ich nowych właściwości i zastosowań. W efekcie przyjęto następującą definicję cieczy jonowych: „są to wszystkie substancje ciekłe składające się wyłącznie z jonów (kationów i anionów), których temperatura topnienia jest mniejsza od 100°C” [33]. Zalicza się do nich również stopione sole. Uściślenie definicji wiąże się z występowaniem w cieczach jonowych silnych oddziaływań jon-jon poniżej granicy wrzenia wody, co różni je od zwykłych stopionych soli. Do cieczy jonowych, których temperatura topnienia jest mniejsza od temperatury otoczenia, używa się terminu: niskotemperaturowe („pokojowe”) ciecze jonowe (ang. *Room Temperature Ionic Liquids* — RTILs) [32, 33]. W temperaturze pokojowej większość cieczy jonowych jest bardzo podobna (z wyglądu) do wody, czyli są to przezroczyste ciecze o zróżnicowanej lepkości. Najczęściej wykorzystywane w badaniach ciecze jonowe powstają w wyniku kombinacji dużego organicznego kationu oraz nieorganicznego lub organicznego anionu.

Nieograniczone możliwości modyfikacji budowy kationu i anionu dostarczają współczesnej technologii dużą liczbę potencjalnych pochodnych o różnorodnych właściwościach fizykochemicznych. Możliwość kombinacji jest olbrzymia i ocenia się ją na 10^{18} [32, 33]. Wpływając na zmianę struktury kationu i dobierając odpowiedni anion, można zmienić m.in. gęstość, lepkość i temperaturę topnienia itd. Właściwości fizykochemiczne cieczy jonowych zależą od natury i rozmiaru kationu i anionu. Strukturalnymi wyznacznikami właściwości w budowie jonów są głównie: symetria, gęstość ładunku, liczba atomów węgla w podstawniku alkilowym, obecność struktur rozgałęzionych oraz grup funkcyjnych. Z literatury wynika, że związki zawierające symetryczne kationy charakteryzują się wyższą temperaturą topnienia w porównaniu do związków zbudowanych z kationów asymetrycznych [25, 28, 29, 32÷35]. Do podstawowych, najczęściej wymienianych w literaturze, właściwości cieczy jonowych, które równocześnie mają bezpośredni wpływ na ich funkcjonowanie, m.in. w systemach tribologicznych, można zaliczyć: lepkość, gęstość, temperaturę topnienia, właściwości elektrochemiczne, polarność [28, 31]. Właściwości te są także bardzo ważne dla układów elektroleologicznych. Nieograniczona liczba kombinacji jonów daje teoretyczną możliwość uzyskania cieczy o ściśle określonych właściwościach. Realne staje się w przyszłości manipulowanie ww. właściwościami, a także innymi. Jednak nie jest to sprawa prosta i badania w tym obszarze są na etapie początkowym. Pewne sukcesy w zakresie celowego projektowania cieczy jonowych (ang. *Task Specific Ionic Liquids* — TSILs) uzyskano tylko w odniesieniu do rozpuszczalników [31, 33].

Biorąc pod uwagę zespół unikatowych właściwości cieczy jonowych, można postawić tezę, że odpowiednio dobrana ciecz jonowa wprowadzona do oleju (smarowego, hydraulicznego) w małym stężeniu mogłaby pozwolić na wytworzenie cieczy o właściwościach ER. Ostatnio przeprowadzono w różnych ośrodkach naukowych, w tym także w Wojskowej Akademii Technicznej, wiele badań, których celem było wykazanie możliwości zastosowania cieczy jonowych jako samodzielnych substancji smarujących lub jako dodatków poprawiających właściwości smarnościenne olejów przemysłowych [25÷29, 31, 36, 37]. Niestety, w nielicznych zagranicznych pracach [36, 37] dotyczących stosowania określonej cieczy jonowej jako dodatku smarnościennego do oleju bazowego autorzy z reguły nie podają jego rodzaju. Nie opisują także sposobu i stanu uzyskanej mieszaniny (roztwór czy emulsja). Zarówno z punktu widzenia tribologicznego, jak i elektroreologicznych właściwości homogenicznej cieczy smarującej bardzo ważna jest określona mieszalność cieczy jonowej z olejem nośnym (bazowym). Nadal brakuje zadowalających odpowiedzi na wiele pytań dotyczących rozpuszczalności i mieszalności różnych substancji w cieczach jonowych i odwrotnie. Niektóre dane literaturowe zdają się podważać powszechnie uznaną przez chemików zasadę: podobne rozpuszcza podobne — *like dissolves like* [33]. Przykładowo niepolarny benzen ($\mu = 0$; $\epsilon_r = 2,28$) rozpuszcza się do 50% (v/v) w bardzo polarnych cieczach jonowych opartych na jonach tetrachloroaluminowych [29, 31, 33]. Ciecze jonowe wykazują zdolność rozpuszczania szerokiej gamy materiałów organicznych i nieorganicznych. Oczywiście nie jest tak, że każda ciecz jonowa rozpuszcza wszystko. Większość cieczy jonowych nie miesza się także z większością ciekłych węglowodorów. Z punktu widzenia tematu obecnego artykułu, a także z tribologicznego punktu widzenia, chodzi właśnie o ewentualną mieszalność cieczy jonowej z konwencjonalnymi, organicznymi i syntetycznymi olejami smarowymi stosowanymi w urządzeniach technicznych do smarowania par trących lub będącymi cieczami hydraulicznymi w różnego typu amortyzatorach, tłumikach drgań itp.

3. Cel i zakres badań

Podstawowym celem tych badań było uzyskanie odpowiedzi na pytanie, czy olej węglowodorowy zawierający niewielką ilość dobranej cieczy jonowej, będąc pod wpływem działania zewnętrznego pola elektrycznego, może wykazać efekt ER. Należało zatem podjąć próbę wytworzenia homogenicznych mieszanin na bazie oleju mineralnego lub syntetycznego o małej lepkości, zawierającego jako dodatek aktywny elektrycznie dobraną ciecz jonową, i następnie przeprowadzić szczegółowe badania tych mieszanin umożliwiające ocenę ich możliwości i zakresu funkcjonowania w zewnętrznym polu elektrycznym.

Na podstawie wyników badań, wcześniej przeprowadzonych w Zakładzie Tribologii, Inżynierii Powierzchni i Logistyki Płynów Eksploatacyjnych Wydziału Mechanicznego WAT, dotyczących właściwości smarnościowych wybranych olejów i cieczy jonowych [25÷28] szczegółowym badaniom mieszalności poddano:

- olej syntetyczny perfluoropolieteryowy Fomblin PFPE Y04 [38, 39];
- silikonową ciecz tłumiącą GP-1-(MPS S-91715), będącą mieszaniną polimetylosiloksanów [40];
- olej bazowy polialfaolefinowy PAO-6 [41];
- mineralny olej bazowy z destylacji próżniowej ropy naftowej SN-650 [42];
- olej przekładniowy Hipol 15 F SAE 85W/90 [43];
- ciecz jonową CJ 001, tj. tetrafluoroboran 1-metylo-3-oktyloksymetyloimidazolowy [44];
- ciecz jonową CJ 002, tj. bis(trifluorometylosulfonylo)imid 1-metylo-3-oktyloksymimidazolowy [44];
- ciecz jonową CJ 003, tj. bis(trifluorometylosulfonylo)imid 1-metylo-3-butoksymetyloimidazolowy [44];
- ciecz jonową CJ 004, tj. bis(trifluorometylosulfonylo)imid 3-butoksymetylo-1-butyloimidazolowy [44];
- ciecz jonową CJ 006, tj. 3-metylo-1-propylopirydynowy bis(trifluorometylosulfonylo)imid [45];
- ciecz jonową CJ 007, tj. 1,2-dimetylo-3-propyloimidazolowy bis(trifluorometylosulfonylo)imid [45];
- ciecz jonową CJ 008, tj. triheksyloctetradecylofosfonowy bis(trifluorometylosulfonylo)imid [45].

4. Badania mieszalności wybranych olejów i cieczy jonowych — wytworzenie mieszanin do badań właściwości ER

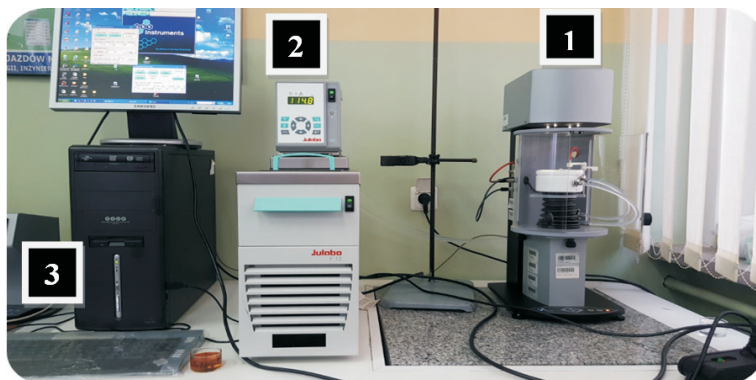
Wstępną ocenę mieszalności przeprowadzono przy użyciu mikroskopu na szkiełkach zegarkowych, obserwując łączenie się kropli cieczy jonowej z olejem znajdującym się na dnie szkiełka. W przypadkach kiedy wydawało się, że oleje i ciecze jonowe skutecznie się zmieszały, wykonano w kolbach szklanych próbki 50 ml z 5% (v/v) zawartością dobranej cieczy jonowej. Następnie w ciągu 20 min mieszano ciecz za pomocą mieszadła mechanicznego i w ciągu kolejnych 20 min w myjce ultradźwiękowej VTUSC3 w temperaturze 50°C. Po zmieszaniu próbki odstawiono najpierw na 2 godziny, a następnie na 48 godzin, w celu sprawdzenia, czy nie występuje zjawisko wytrącania lub sedymentacji cieczy jonowej. W większości próby mieszania olejów i cieczy jonowych wymienionych w p. 3 były nieskuteczne. Uzyskano tylko dwie ciecze skutecznie wymieszane. Pierwszą mieszaniną był olej hydrauliczny GP-1 z cieczą jonową CJ 001, a drugą olej bazowy PAO-6 z cieczą jonową CJ 008. W obu przypadkach, po

wymieszaniu oleju z 5% (v/v) zawartością cieczy jonowej, nastąpiło dobre połączenie. Po odczekaniu 48 godz. nie zauważono zmiany barwy. Nie zauważono również wytrąceń cieczy jonowej. W obu przypadkach konsystencja mieszanin okazała się stabilna.

5. Identyfikacja podstawowych właściwości fizykochemicznych wybranych olejów i cieczy jonowych oraz ich mieszanin

Przeprowadzono badania kontrolne gęstości, lepkości i wskaźnika lepkości oraz ocenę zdolności do polaryzacji przygotowanych do badań próbek olejów, cieczy jonowych oraz ich mieszanin. Istotna jest znajomość zmienności tych właściwości w przypadku oleju zawierającego określoną ilość cieczy jonowej o zdecydowanie odmiennych właściwościach. Bezpośrednio przed pomiarami próbki mieszanin olejów z cieczami jonowymi ponownie mieszano przez 20 minut w myjce ultradźwiękowej w temperaturze pokojowej ($\sim 22^{\circ}\text{C}$).

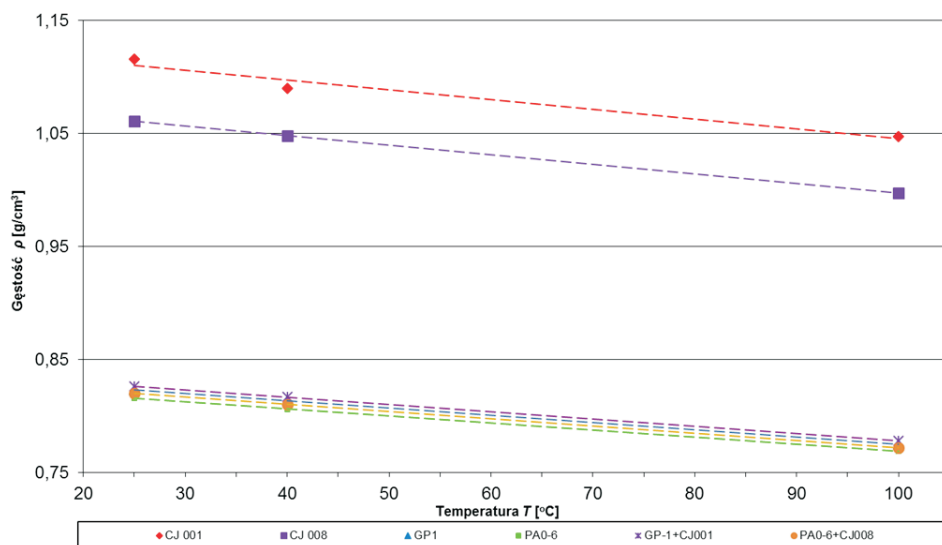
Do określania gęstości cieczy użyty został fiński tensjometr KSV Sigma 701 (rys. 1. — 1). Cały przebieg pomiarów gęstości był sterowany za pomocą oprogramowania komputerowego. Pomiary wykonano zgodnie z instrukcją tego urządzenia [46] w temperaturze 25°C , 40°C i 100°C . Próbkę termostatowaną były za pomocą łaźni Julabo F-12 [47] (rys. 1. — 2). Na rysunku 2 przedstawiono graficznie zobrazowanie uzyskanych wyników badań gęstości cieczy.



Rys. 1. Stanowisko stosowane do oceny gęstości cieczy: 1 — tensjometr KSV Sigma 701, 2 — łaźnia termostatująca Julabo F-12, 3 — komputer sterujący

Zgodnie z przewidywaniem stwierdzono niewielki spadek gęstości wszystkich cieczy w funkcji przyrostu temperatury. Przebieg zmian gęstości mieszanin był identyczny i praktycznie niczym nie różnił się od przebiegu zmienności gęstości olejów bazowych. W temperaturze 25°C gęstość cieczy izolującej GP-1 wynosiła $\rho = 0,823 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, a dodanej cieczy jonowej CJ 001 — $\rho = 1,116 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Zatem

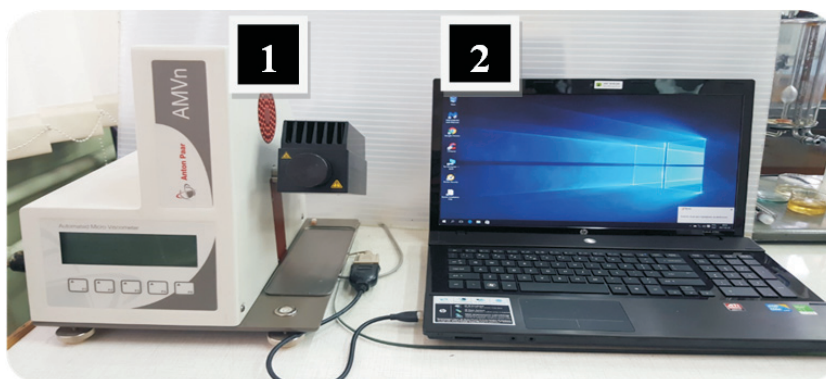
różnica gęstości w tym przypadku wynosiła $\rho = 0,293 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Natomiast w drugiej mieszance olej bazowy PAO-6 miał gęstość $\rho = 0,816 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, a ciecz jonowa CJ 008 $\rho = 1,061 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Zatem różnica gęstości wynosiła $0,245 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. W efekcie wytworzono dwie mieszanki o niemal takiej samej gęstości: GP-1 + CJ 001 o gęstości $\rho = 0,816 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ i PAO-6 + CJ 008 o gęstości $\rho = 0,820 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.



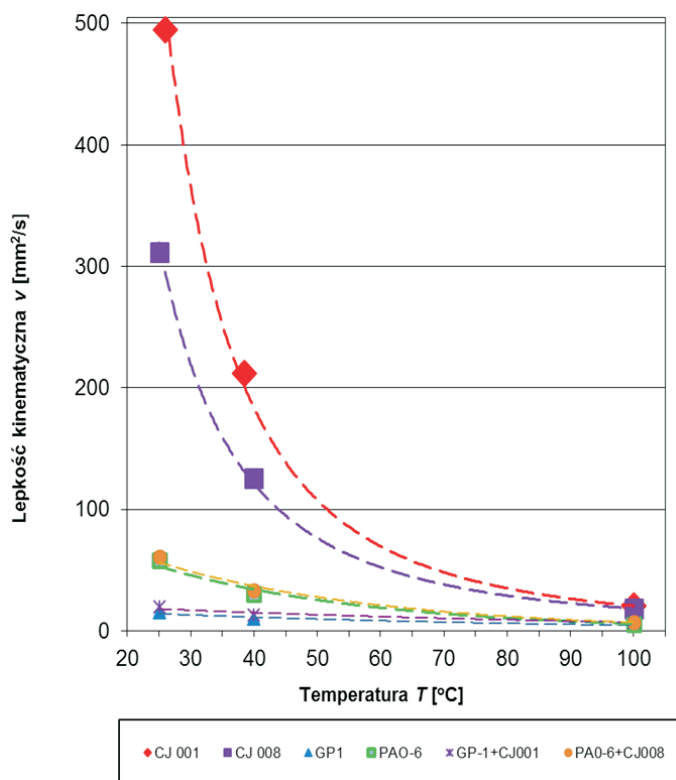
Rys. 2. Zależność gęstości olejów bazowych, cieczy jonowych i wytworzonych mieszanin od temperatury

Pomiar lepkości kinematycznej cieczy wykonano zgodnie z PN-EN ISO 3104:2004 [48], natomiast wskaźnik obliczono zgodnie z PN-EN ISO 2909:2009 [49]. Do wyznaczenia lepkości kinematycznej olejów posłużono się popularną łaźnią termostatującą TAMSON TV 2000 z wiskozymetrem Pinkiewicza [50], wykonując pomiary w temperaturze 25°C, 40°C i 100°C. Ze względu na ograniczoną ilość posiadanych bardzo drogiej cieczy jonowych wyznaczenie ich lepkości wykonano, używając mikrolepkościomierza AMVn austriackiej firmy Anton-Paar (rys. 3).

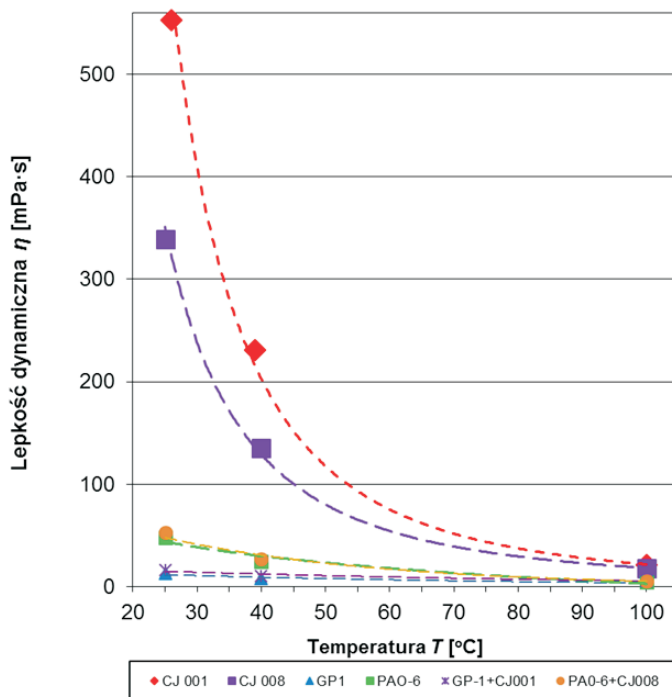
Mikrowiskozymetr AMVn Anton Paar wykonany jest na wzór lepkościomierza Höpplera, z tym że jest nieporównanie bardziej ekonomiczny i wydajny, gdyż umożliwia wykonanie pomiarów przy użyciu jedynie $\sim 150 \mu\text{L}$ badanej cieczy. Wcześniejsze badania zrealizowane w Zakładzie Tribologii, Inżynierii Powierzchni i Logistyki Płynów Eksploatacyjnych Wydziału Mechanicznego WAT wykazały, że wyniki uzyskiwane za pomocą AMVn Anton Paar nie odbiegają od wyników uzyskiwanych metodą Pinkiewicza — otrzymano wyniki nieróżniące się więcej niż $\pm 0,5\%$ [25]. Na rys. 4 i 5 przedstawiono graficznie zobrazowane zmiany lepkości badanych cieczy w funkcji przyrostu temperatury.



Rys. 3. Stanowisko do wyznaczania lepkości cieczy jonowych: 1 — wiskozymetr AMVn Anton-Paar, 2 — komputer do rejestracji wyników



Rys. 4. Zależność lepkości kinematycznej olejów bazowych, cieczy jonowych oraz ich mieszanin od temperatury



Rys. 5. Zależność lepkości dynamicznej olejów bazowych, cieczy jonowych oraz ich mieszanin od temperatury

Podobnie jak w przypadku niewielkich zmian gęstości od temperatury, w tym przypadku także stwierdzono zgodnie z przewidywaniem duży spadek lepkości wszystkich cieczy w funkcji przyrostu temperatury. Przebieg zmian lepkości mieszanin był identyczny i praktycznie niczym nie różnił się od przebiegu zmian lepkości olejów bazowych. Pięcioprocentowa zawartość (v/v) cieczy jonowej w oleju bazowym wpłynęła w niewielkim stopniu na spadek wartości wskaźnika lepkości (ang. *viscosity index* — VI). Większy spadek zanotowano w przypadku oleju GP-1 (z wartości VI = 264 do VI = 218). W przypadku PAO-6 spadek ten był nieznaczny (z wartości VI = 144 do VI = 140). W temperaturze 25°C lepkość dynamiczna cieczy izolującej GP-1 wynosiła $\eta = 12,61$ mPa·s, a dodanej cieczy jonowej CJ 001 — $\eta = 552,42$ mPa·s. Zatem różnica lepkości w tym przypadku wynosiła aż $\eta = 539,81$ mPa·s. Natomiast w drugiej mieszaninie olej bazowy PAO-6 miał lepkość $\eta = 47,36$ mPa·s, a ciecz jonowa CJ 008 — $\eta = 327,24$ mPa·s. Zatem różnica lepkości wynosiła $\eta = 279,88$ mPa·s. W efekcie wytworzono dwie mieszaniny o znacząco różniącej się lepkości: GP + CJ001 o lepkości $\eta = 16,56$ mPa·s i PAO-6 + CJ008 o lepkości $\eta = 50,08$ mPa·s.

Jak już wcześniej zaznaczono (p. 1), warunkiem koniecznym dla zaistnienia efektu ER w mieszaninie dwóch cieczy jest to, aby w niepolarniej bazowej cieczy

izolującej znajdowała się pewna ilość cieczy aktywnej elektrycznie o dużej polarności [14÷16]. Polarność cieczy ma duże znaczenie nie tylko w aspekcie istnienia efektu ER, jest także niezbędną właściwością cieczy smarującej, szczególnie podczas tarcia granicznego, gdyż ułatwia stworzenie trwałego filmu granicznego adsorbowanego na smarowanej powierzchni w wyniku oddziaływania pola niewysyconych sił międzycząsteczkowych powierzchniowych warstw elementów pary trącej. Efekt ER zaistniały w takiej cieczy smarującej może wspomagać konstituowanie filmu granicznego. W literaturze brakuje wiarygodnych danych na ten temat w odniesieniu do cieczy jonowych, ale określa się je jako bardzo polarne [33]. W pracy tej [33] stwierdzono, że „jedną z metod ściśle związaną z polarnością cieczy jonowych jest współczynnik załamania światła” (R) — *refractive index* — w Polsce stosuje się symbol n). Stwierdzono także, że „wzrost liczby, długości i rozgałęzień łańcuchów alkilowych na kationach powoduje zwiększenie RI ” oraz że „możliwa jest mniejsza wartość RI spowodowana spadkiem polaryzowalności anionu”.

Całkowita polaryzacja molowa badanego związku o trwałym momencie dipolowym ($\mu = q \cdot l$ [C·m], gdzie: l — odległość między ładunkami $+q$ i $-q$), w odróżnieniu od momentu indukowanego, który wytwarza się tylko wtedy, gdy na cząsteczkę działa zewnętrzne pole elektryczne (usunięcie pola likwiduje moment indukowany), opisana jest wzorem P. Debye'a [59]:

$$P = \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \cdot \frac{M}{\rho} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot N \cdot \alpha + \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot N \cdot \left(\frac{\mu^2}{3 \cdot k \cdot T} \right) \quad (1)$$

gdzie: ρ — gęstość badanej substancji;

M — masa molowa badanej substancji chemicznej;

ϵ_r — stała dielektryczna określona jako wielkość bezwymiarowa w stosunku do ϵ_0 próżni (dla gazów) lub powietrza (ciecze i ciała stałe);

N — liczba Avogadro;

k — stała Boltzmana;

T — temperatura bezwzględna;

α — współczynnik charakteryzujący siłę więzi w cząsteczce zwany zdolnością polaryzacyjną lub polaryzowalnością ($\alpha = \alpha_e + \alpha_a + \alpha_{or}$; α_e — polaryzowalność elektronowa, α_a — polaryzowalność atomowa, α_{or} — polaryzowalność orientacyjna).

Jeśli cząsteczka danej substancji chemicznej jest niepolarna ($\mu = 0$), to ulega tylko polaryzacji elektronowej (α_e) i atomowej (α_a). Przykładowo takie węglowodory jak benzen i n -heptan mają zerowy moment dipolowy ($\mu = 0$), ich stałe dielektryczne mają również bardzo małe wartości charakterystyczne dla niepolarnych dielektryków (dla benzenu $\epsilon_r = 2,284$, a dla n -heptanu $\epsilon_r = 1,924$ [59]). Również ich

napięcia powierzchniowe mają małą wartość, co znamionuje słabe oddziaływania międzycząsteczkowe w tych cieczach, umożliwiające dobre zwilżanie elementów smarowanych. Większe napięcie powierzchniowe (σ) w 20°C wykazuje benzen ($28,87 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$) niż *n*-heptan ($20,30 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$), co słusznie wskazuje na silniejsze oddziaływania międzycząsteczkowe struktury pierścieniowej benzenu niż liniowej struktury *n*-heptanu. Potwierdzają to również współczynniki załamania światła (n), zależne tylko od polaryzacji elektronowej, mianowicie dla benzenu wynosi on 1,5012, a dla *n*-heptanu 1,38764 [59]. Dla takich niepolarnych dielektryków ($\mu = 0$) wzór Debye'a sprowadzony do ilościowego ujęcia polaryzacji deformacyjnej przez Clasiusa-Massottiego ma postać:

$$P_d = \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} \cdot \frac{M}{\rho} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot N \cdot \alpha_d, \quad (2)$$

gdzie: $\alpha_d = \alpha_e + \alpha_a$ — polaryzowalność deformacyjna.

Natomiast pod działaniem widzialnych fal świetlnych deformacji ulegają tylko powłoki elektronowe. Stąd wyrażenie na polaryzację molową w takim przypadku ma postać:

$$P_e = \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} \cdot \frac{M}{\rho} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot N \cdot \alpha_e. \quad (3)$$

Z elektromagnetycznej teorii światła Maxwella wynika związek między względną stałą dielektryczną (ε_r) substancji o niepolarnych cząstkach ($\mu = 0$) a współczynnikiem załamania światła (n) ekstrapolowanym do fal nieskończenie długich, tj. $\varepsilon_r = n_\infty^2$. Stąd:

$$P_e = \frac{n_\infty^2 - 1}{n_\infty^2 + 2} \cdot \frac{M}{\rho} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot N \cdot \alpha_e. \quad (4)$$

Ponieważ nie jest możliwe wyznaczenie wartości n_∞ , najczęściej w praktyce posługujemy się wartością (n) dla światła widzialnego względem powietrza, wyznaczoną dla linii (D) światła sodowego. Wartości liczbowe współczynników załamania światła (n_D) dla ciekłych związków organicznych wahają się od 1,30 do 1,80. Wpływ temperatury i ciśnienia na wartość (n_D) jest różny. W przypadku ciekłych związków organicznych wzrost temperatury o 1°C powoduje na ogół obniżenie wartości (n_D) o $3,5 \times 10^{-4}$ do $5,5 \times 10^{-4}$, a w pobliżu temperatury wrzenia cieczy nawet 7×10^{-4} , czyli jest znaczący. Natomiast wpływ ciśnienia na wartość współczynnika załamania światła w cieczy jest stosunkowo niewielki; zwiększenie ciśnienia o 1 atm wywołuje

na ogół wzrost (n_D) o $\sim 3 \times 10^{-5}$ [59]. W praktyce obliczeniowej stosuje się zależność zapisaną wzorem:

$$R_D = \frac{n_D^2 - 1}{n_D^2 + 2} \cdot \frac{M}{\rho} = r_D \cdot M . \quad (5)$$

Wartość (R_D) nazywa się refrakcją molową i jest ona iloczynem refrakcji właściwej (r_D) i masy molowej cieczy (M). Refrakcja molowa ma zatem sens fizyczny molowej polaryzacji elektronowej. Jako funkcja polaryzowalności jest ściśle związana ze strukturą cząsteczki.

W tzw. naftowej praktyce laboratoryjnej, w stosunku do węglowodorów pochodzenia naftowego, będących z reguły niepolarnymi dielektrykami, gdy ściśle określenie masy molowej (M) produktu naftowego jest praktycznie niemożliwe, stosuje się obliczanie wartości refrakcji właściwej, odniesionej do 1 grama substancji:

$$r_D = \frac{n_D^2 - 1}{n_D^2 + 2} \cdot \frac{1}{\rho} . \quad (6)$$

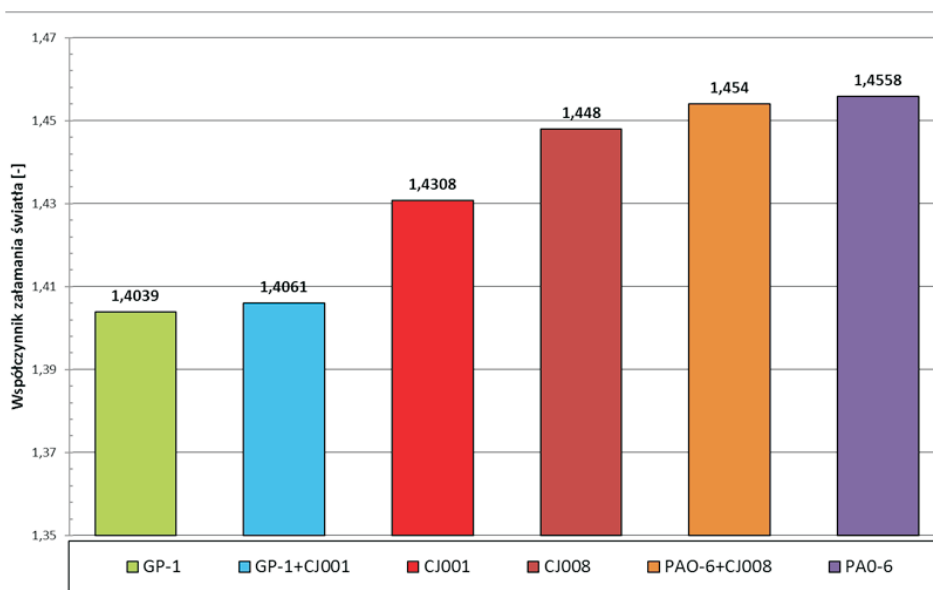
Opracowano nawet wiele praktycznych wzorów służących do obliczania (n_D) i (r_D) w zależności od gęstości produktu, jego temperatury, a nawet procentowej zawartości wodoru i węgla [60]. Zatem mierząc wartość (n_D) dla cieczy węglowodorowych zastosowanych jako bazowe oleje izolujące (GP-1 i PAO-6) w mieszaninach do badań właściwości ER, będzie można ze wzoru (6) obliczyć ich refrakcję właściwą (r_D). Natomiast ich refrakcji molowej (R_D) nie można obliczyć, ponieważ nieznane są dokładne masy molowe tych olejów bazowych.

W przypadku cieczy polarnych sytuacja wygląda zupełnie inaczej i nie tak jednoznacznie jak dla dielektryków. Jeśli nawet współczynnik załamania światła (n_D) dla takich cieczy jak np.: aceton (1,3591), woda (1,3325) lub gliceryna (1,4740) jest mniejszy od współczynnika (n_D) dla cieczy węglowodorowej, np. benzenu (1,5012), nie oznacza to ich niepolarności (ich momenty dipolowe wynoszą odpowiednio: 2,810; 2,670 i 1,840). Świadczy to jedynie o tym, że ich polaryzacja elektronowa wynikająca z ich struktury jest mniejsza, ale będąc w polu elektrycznym, stają się one bardzo polarne, co wynika z ich stałych dielektrycznych (ϵ_r), masy molowej (M) i gęstości (wzór 1). Korzystając ze wzoru (1), możemy obliczyć całkowitą polaryzację np. dla wody i gliceryny, których stałe dielektryczne (ϵ_r) w 25°C wynoszą odpowiednio $\epsilon_r = 78,38$ i $\epsilon_r = 42,5$. Uzyskujemy wartości polaryzacji całkowitej: dla wody $17,334 \text{ cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ i dla gliceryny $68,076 \text{ cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$. Zatem polaryzacja całkowita gliceryny jest znacznie większa od wody, co potwierdza również wartość momentu dipolowego: dla gliceryny $\mu = 2,67 \text{ D}$, a dla wody tylko $\mu = 1,84 \text{ D}$. Zgodność z wartością momentu dipolowego obu cieczy wykazały też współczynniki załamania światła (n_D), mianowicie woda ma słabszą polaryzację elektronową ocenianą w świetle

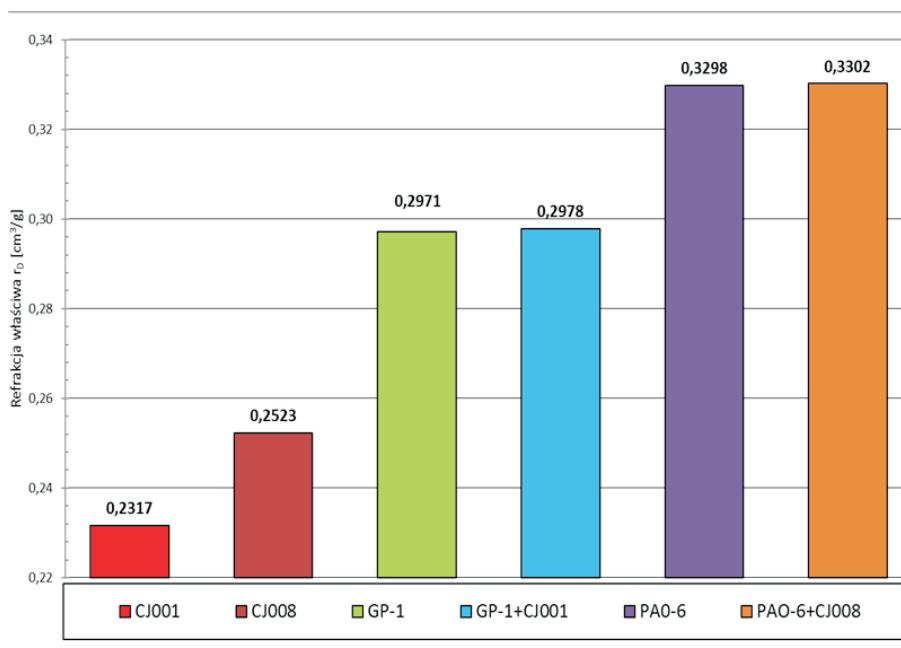
widzialnym ($n_D = 1,3325$) niż gliceryna ($n_D = 1,4740$), ale wymieniony wcześniej aceton wyłamuje się z tego porządku — przy większym momencie $\mu = 2,81 D$ od gliceryny wykazuje on współczynnik $n_D = 1,3591$, tj. znacznie mniejszy, bliższy tego dla wody ($n_D = 1,3325$). W tym przypadku nie przekłada się to również na wartość napięcia powierzchniowego. Widoczna jest raczej relacja podobna jak w dielektrykach (benzen, *n*-heptan), gdy większej wartości (ϵ_r) odpowiada większa wartość napięcia powierzchniowego. W przypadku wody o temperaturze 20°C napięcie powierzchniowe $\sigma = 72,75 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$, a stała dielektryczna $\epsilon_r = 78,38$; w przypadku gliceryny napięcie powierzchniowe $\sigma = 63,4 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$, a stała dielektryczna $\epsilon_r = 42,5$; w przypadku acetonu napięcie powierzchniowe $\sigma = 23,7 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$, a stała dielektryczna $\epsilon_r = 20,74$.

W cieczach jonowych wybranych jako aktywny elektrycznie składnik w mieszaninie ER może być jeszcze inaczej, biorąc pod uwagę ich znacznie większą gęstość niż węglowodorów (dla CJ 001 gęstość w temperaturze 25°C wynosi $\rho = 1,116 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, a dla CJ 008 gęstość w 25°C wynosi $\rho = 1,068 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ — rys. 1) i równocześnie bardzo dużą masę molową, która w przypadku CJ 001 wynosi $M = 311,2 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$, a w przypadku CJ 008 wynosi $M = 764 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$. Biorąc pod uwagę wartości napięcia powierzchniowego tych cieczy podane w [25, 52, 53], tj. dla CJ 001 napięcie powierzchniowe $\sigma = 26,032 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ oraz dla CJ 008 wartość $\sigma = 28,099 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$, a także fakt, że zarówno kation, jak i anion cieczy CJ 008 są większe i bardziej złożone niż w cieczy CJ 001, można spodziewać się, że polaryzacja całkowita CJ 008 będzie większa (wzór 1). Obydwie cieczy jonowe prawdopodobnie wykażą znacznie wyższe wartości współczynnika załamania światła (n_D) niż oleje bazowe, co będzie świadczyć także o ich znacznej polaryzacji elektronowej. Biorąc pod uwagę powyższą analizę i wypływające z niej wnioski, postanowiono ocenić współczynniki załamania światła wybranych cieczy jonowych, olejów bazowych oraz ich mieszanin.

Do określania współczynnika załamania światła wykorzystano refraktometr laboratoryjny Abbego (model RL1-PZO) produkcji polskiej [51]. Pomiar wykonano w temperaturze 25°C i 60°C . Zgodnie z przewidywaniem zarejestrowano niewielki spadek współczynnika (n_D) w funkcji przyrostu temperatury, natomiast refrakcja właściwa (r_D) mieszanin z cieczą jonową nieznacznie wzrosła w stosunku do wartości dla czystej bazy olejowej (rys. 6 i rys. 7). Oznacza to poprawę ich zdolności polaryzacyjnej odniesionej do masy 1 grama cieczy, będącej wynikiem obecności w mieszaninie niewielkiej ilości polarnych cieczy jonowych. Współczynnik załamania światła cieczy CJ 008 $n_D = 1,4480$ jest zgodnie z przewidywaniem większy niż dla CJ 001 ($n_D = 1,4308$). Odpowiednio, jak wcześniej podano, napięcie powierzchniowe cieczy CJ 008 jest większe niż dla cieczy CJ 001 ($\sigma = 28,099 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ i $\sigma = 26,032 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$) [25, 52, 53].



Rys. 6. Współczynnik załamania światła (n_D) olejów bazowych, cieczy jonowych i wytworzonych mieszanin



Rys. 7. Refrakcja właściwa (τ_D) olejów bazowych, cieczy jonowych i wytworzonych mieszanin

Podsumowując, można stwierdzić, że przeprowadzony dobór składników dwóch mieszanin GP-1 + CJ 001 oraz PAO-6 + CJ 008 jest uzasadniony. Potwierdziły to wstępne badania tych mieszanin na zmodyfikowanym wiskozymetrze Brookfield DV-III Ultra opisane w następnym punkcie.

6. Badania właściwości elektreologicznych wytworzonych mieszanin

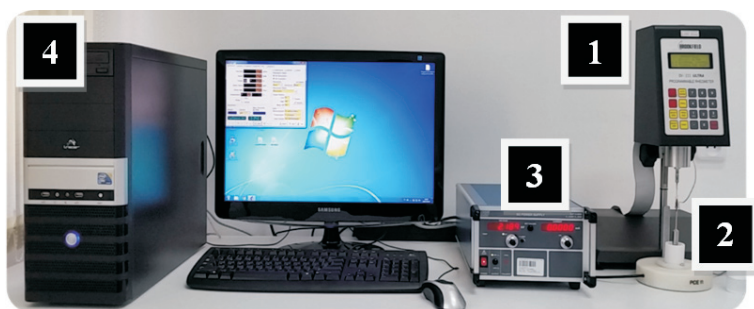
Do takich badań niezbędne jest m.in. posiadanie odpowiedniego wiskozymetru przystosowanego do oceny zmian naprężeń ścinających (lepkości) cieczy pod wpływem działania stałego, zewnętrznego pola elektrycznego. Wobec braku dostępu do takiego specjalistycznego urządzenia zaprojektowano, zbudowano i uruchomiono własne stanowisko do badań elektreologicznych na bazie dostępnego, standardowego lepkościomierza rotacyjnego Brookfield DV-III Ultra, który umożliwił spełnienie podstawowych wymagań dotyczących prowadzenia tego typu badań (patrz p. 1 i p. 2), m.in.:

- parametry przepływu cieczy w szczelinie pomiarowej reometru i warunki pomiaru powinny być tak dobrane, aby przepływ był ustalony, laminarny i izotermiczny;
- konstrukcja reometru powinna zapewnić jednorodne pole elektryczne w całej szczelinie;
- reometr musi umożliwiać pomiar przy bardzo małych szybkościach ścinania, gdy efekt ER jest najbardziej widoczny;
- powinno być możliwe sterowanie pracą wiskozymetru za pomocą komputera PC ze specjalistycznym oprogramowaniem.

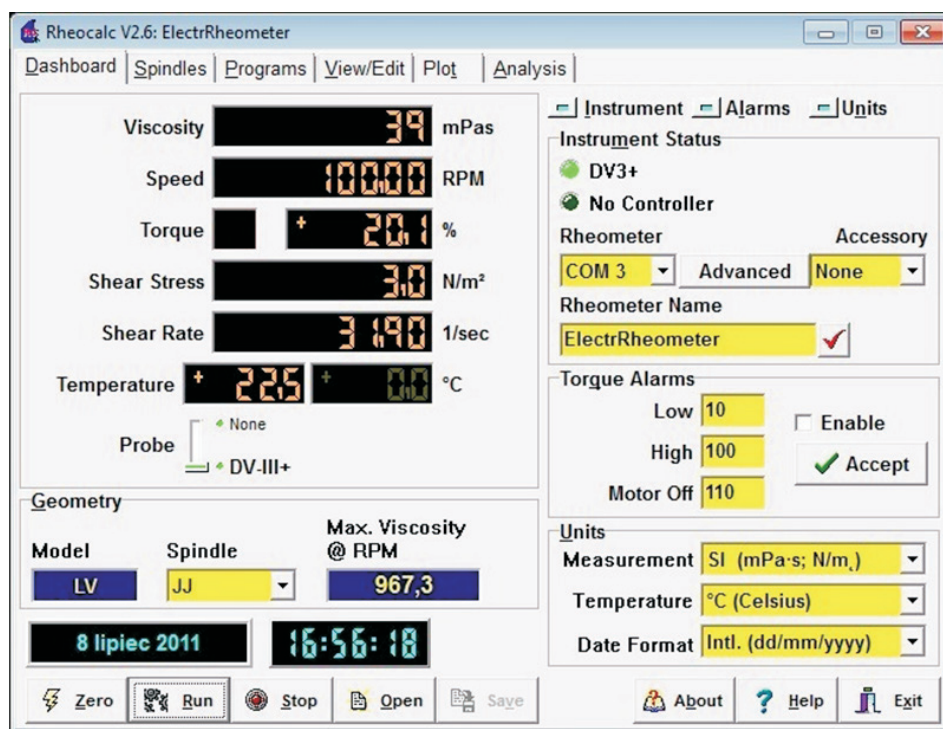
Jak dotychczas brakuje metody oceny charakterystyk płynięcia $\tau = f(\dot{\gamma})$, gdzie (τ) to naprężenia ścinające, a ($\dot{\gamma}$) to szybkość ścinania cieczy ER, za pomocą znormalizowanego wiskozymetru, według konkretnej, przyjętej powszechnie normy. Wydaje się, że możliwość taką stwarza wiskozymetr Brookfielda. Dlatego powstała koncepcja modyfikacji i przystosowania do badań ER lepkościomierza rotacyjnego Brookfield DV-III Ultra. Szczegóły tej modyfikacji omówiono na XXV Konferencji Naukowej nt. „Problemy rozwoju maszyn roboczych” w Zakopanem i opisano w artykule opublikowanym w czasopiśmie „Hydraulika i Pneumatyka” [54, 55]. Na rysunku 8 przedstawiono stanowisko wykorzystane do badań właściwości elektreologicznych sporządzonych mieszanin GP-1 + CJ 001 oraz PAO-6 + CJ 008.

Pomiary na tym stanowisku mogą być wykonywane bezpośrednio wiskozymetrem, ponieważ ma on wbudowany mikroprocesorowy sterownik, jak każdy znormalizowany lepkościomierz Brookfielda. Jednak znacznie wygodniejsze do sterowania stanowiskiem pomiarowym jest wykorzystywanie komputera PC ze specjalistycznym oprogramowaniem Rheocalc 32 v. 2.6. Z tym programem możliwa jest praca w trybie pomiarów zautomatyzowanych, który jest zalecany, gdyż

umożliwia pomiary z automatycznym zadawaniem wybranych prędkości kątowych wirowania wrzeciona, aktywizację zmierzonych danych oraz rejestrację wyników w zbiorach dyskowych. Dane te mogą być przetwarzane wewnętrznie przez program lub eksportowane do plików w formacie programu Excel. Na rysunku 9 pokazano przykładowo ekran startowy programu Rheocalc 32 v. 2.6.

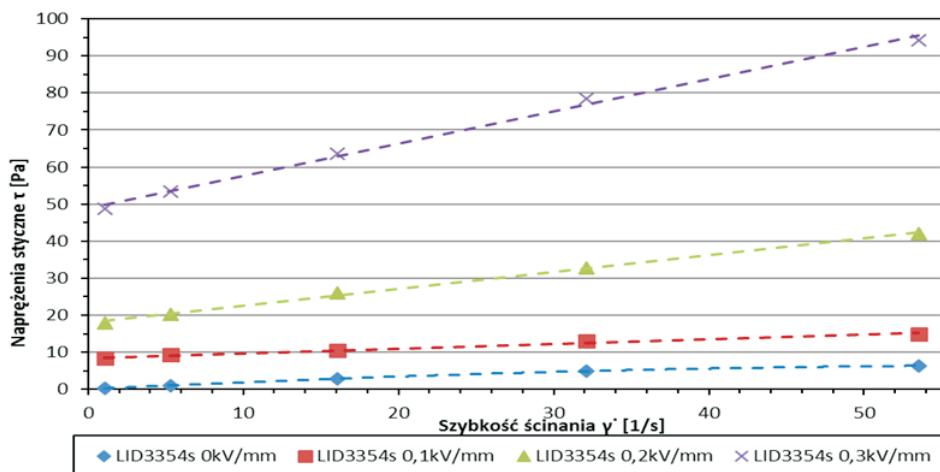


Rys. 8. Stanowisko do badania cieczy ER: 1 — reometr Brookfield DV-III Ultra z odizolowanym obrotowym wrzecionem, 2 — przystawka izolująca z cylindrami zaopatrzonymi w elektrody, 3 — zasilacz wysokiego napięcia HCP 14-6500, 4 — komputer PC z oprogramowaniem sterującym Rheocalc 32 v.2.6



Rys. 9. Ekran startowy programu Rheocalc 32 v. 2.6

Po zbudowaniu opisanego stanowiska wykonano badania rozruchowo-kontrolne, których celem było potwierdzenie poprawności oraz prawidłowości działania układu pomiarowego. Do tych badań wykorzystano komercyjną, dwufazową ciecz ER LID 3354s angielskiej firmy SMART TECHNOLOGY Ltd., składającą się z cząstek polimerowych o średnicy $45 \mu\text{m}$ i oleju silikonowego (o udziale objętościowym fazy stałej $\varphi_o = 0,375$) [56]. Rezultat tych badań był bardzo pozytywny — uzyskano charakterystyki typowe dla takiej heterogenicznej cieczy ER, tj. w przypadku braku pola elektrycznego opisaną modelem Newtona ($\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$), a w obecności pola elektrycznego opisaną modelem Bingham’a ($\tau = \tau_o + \eta_p \cdot \dot{\gamma}$) (rys. 10).



Rys. 10. Zależność naprężenia ścinającego (τ) od szybkości ścinania ($\dot{\gamma}$) dla cieczy ER LID 3354s

Na podstawie bezpośredniej obserwacji pracy zaprojektowanego urządzenia z reometrem Brookfielda oraz uzyskanych wyników badań rozruchowych stwierdzono, że urządzenie to działa poprawnie i może być wykorzystane do badań cieczy ER. W związku z tym przedstawiony na rysunku 8 „Zestaw badawczy” został zgłoszony 25 czerwca 2015 r. do Urzędu Patentowego RP pod numerem W 124200, a 10 lutego 2017 r. wydano decyzję o udzieleniu prawa ochronnego na rzecz Wojskowej Akademii Technicznej.

Przeprowadzono badania wstępne mieszanin GP-1 + CJ 001 oraz PAO-6 + CJ 008 i w efekcie dobrano odpowiedni dla każdej z tych mieszanin zestaw „wrzeczono wiskozymetru / cylinder z elektrodami” (rys. 8), umożliwiającą optymalną realizację badań [6, 57]. W tabeli 1 zaprezentowano możliwe do zastosowania w zaprojektowanym urządzeniu zestawy „wrzeczono/ cylinder” oraz ich oznaczenia.

Przy różnych zestawieniach wrzeczono i cylindrów oraz różnych wartościach napięcia zasilającego można uzyskać odmienne wartości natężenia pola elektrycznego [54, 55]. W trakcie tych wstępnych pomiarów okazało się, że wytworzone mieszaniny z 5% (v/v) zawartością cieczy jonowej mają zbyt dużą przewodność

elektryczną. W związku z tym do badań efektu ER zmniejszono zawartość cieczy jonowej w cieczy bazowej do 2% (v/v), uzyskując pozytywny efekt. Wyniki pomiarów uzyskane w programie Rheocalc 32 v. 2.6 przedstawiono w tabeli 2 i tabeli 3, a ich przykładowe zobrazowanie graficzne na rysunku 11.

TABELA 1

Oznaczenia zestawów „wrzeciono/ cylinder”

L.p.	Średnica cylindra D [mm]	Średnica wrzeciona d [mm]	
		3,2	11,7
1.	20	JJ 1	JJ 2
2.	17	JJ 3	JJ 4
3.	15	JJ 5	JJ 6
4.	13,5	JJ 7	JJ 8

TABELA 2

Wyniki pomiarów dla mieszaniny GP-1 + CJ 001

Nazwa badanej próbki	Natężenie pola elektrycznego E [kV·mm ⁻¹]	Prędkość obrotowa wrzeciona n [obr·min ⁻¹]	Napężenie ścinające τ [Pa]	Szybkość ścinania $\dot{\gamma}$ [s ⁻¹]	Lepkość dynamiczna η [mPa·s]
GP-1 + CJ 001 (2%) JJ 8	0	5	0,44	4,20	128,57
	0,1		0,95		261,90
	0,2		1,43		435,71
	0,3		0,45		130,95
	0	25	0,81	20,98	39,08
	0,1		1,63		77,69
	0,2		2,30		109,63
	0,3		0,81		38,61
	0	75	1,40	62,93	22,25
	0,1		2,35		33,53
	0,2		2,83		44,97
	0,3		1,44		22,88
	0	150	2,33	125,85	18,51
	0,1		2,98		23,68
	0,2		3,45		27,41
	0,3		2,35		18,67
	0	250	3,34	209,75	15,92
	0,1		3,80		18,12
	0,2		4,33		20,64
	0,3		3,39		16,02

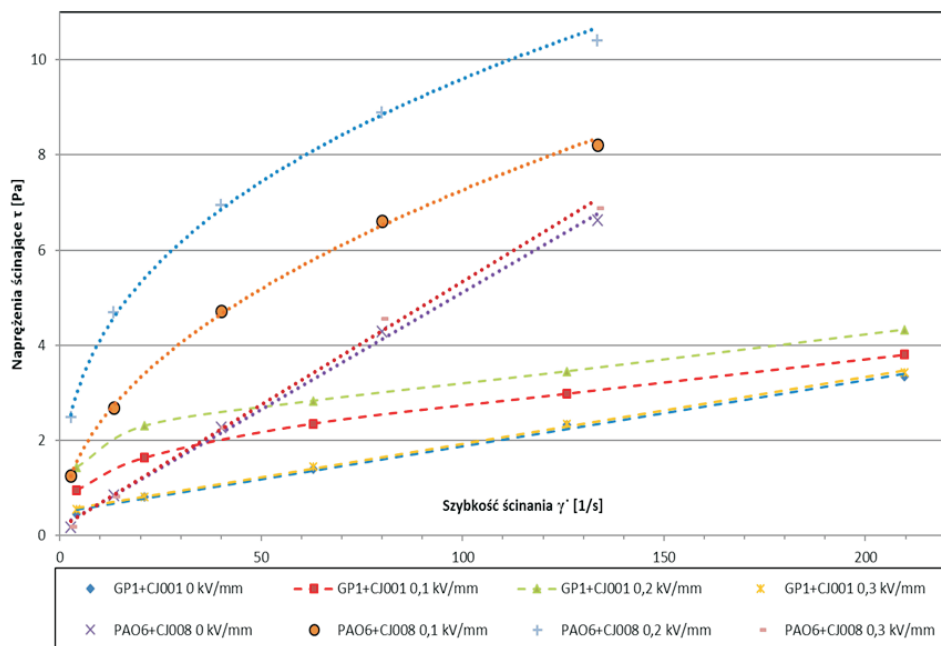
TABELA 3

Wyniki pomiarów dla mieszaniny PAO-6 + CJ 008

Nazwa badanej próbki	Natężenie pola elektrycznego E [kV·mm ⁻¹]	Prędkość obrotowa wrzeciona ν [obr·min ⁻¹]	Naprężenie ścinające τ [Pa]	Szybkość ścinania $\dot{\gamma}$ [s ⁻¹]	Lepkość dynamiczna η [mPa·s]
PAO-6 + CJ 008 (2%) JJ 6	0	5	0,18	2,67	67,41
	0,1		1,25		468,16
	0,2		2,48		1247,19
	0,3		0,19		71,16
	0	25	0,84	13,33	63,01
	0,1		2,69		186,80
	0,2		4,70		323,33
	0,3		0,83		63,01
	0	75	2,27	39,98	56,78
	0,1		4,72		105,55
	0,2		6,94		131,06
	0,3		2,28		57,03
	0	150	4,28	79,95	53,53
	0,1		6,61		73,29
	0,2		8,89		89,93
	0,3		4,33		53,78
	0	250	6,63	133,50	49,66
	0,1		8,21		60,75
	0,2		10,41		74,31
	0,3		6,69		49,89

Analizując uzyskane wyniki badań (tab. 2 i tab. 3), należy uznać, że obie mieszaniny (GP-1 + CJ 001 oraz PAO-6 + CJ 008) wykazały odmienne charakterystyki reologiczne $\tau = f(\dot{\gamma})$, zarówno w przypadku braku oddziaływania zewnętrznego pola elektrycznego ($E = 0$), jak i w obecności tego pola ($E > 0$).

Pierwsza z mieszanin, tj. GP-1 + CJ001 o lepkości 15,56 mPa·s w temperaturze 25°C, w której różnica lepkości pomiędzy CJ 001 ($\eta = 552,42$ mPa·s) a GP-1 ($\eta = 12,61$ mPa·s) wynosiła aż 539,81 mPa·s, zachowywała się, przy braku oddziaływania pola elektrycznego, jak ciecz Bingham ($\tau = \eta_p \cdot \dot{\gamma} + \tau_o$) — chociaż jej naprężenie graniczne (τ_o) miało małą wartość ok. $\tau_o = 0,5$ Pa. W obecności pola elektrycznego, do wartości $E = 0,2$ kV·mm⁻¹, charakterystyka reologiczna $\tau = f(\dot{\gamma})$ tej cieczy mogła być opisana równaniem Herschela-Bulkeya ($\tau = m_1 \cdot \dot{\gamma}^{n_1} + \tau_o$) przy $n_1 < 1$, typowym dla lepkoplastycznej cieczy pseudoplastycznej.



Rys. 11. Charakterystyki $\tau = f(\dot{\gamma})$ mieszanin GP-1 + CJ 001 oraz PAO-6 + CJ 008

Druga mieszanina, tj. PAO-6 + CJ 008 o lepkości $\eta = 50,08$ mPa·s w temperaturze 25°C , w której różnica lepkości pomiędzy CJ 008 ($\eta = 327,24$ mPa·s) a PAO-6 ($\eta = 47,36$ mPa·s) wynosiła niemal dwa razy mniej niż w poprzedniej cieczy, tj. $279,88$ mPa·s, zachowywała się przy $E = 0$ jak ciecz newtonowska ($\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$). W obecności pola elektrycznego (do wartości $E = 0,2$ kV·mm $^{-1}$) charakterystyka reologiczna $\tau = f(\dot{\gamma})$ tej cieczy mogła być opisana równaniem Ostwalda-de Waele'a ($\tau = m_2 \cdot \dot{\gamma}^{n_2}$) przy $n_2 < 1$ typowym dla lepkiej cieczy pseudoplastycznej.

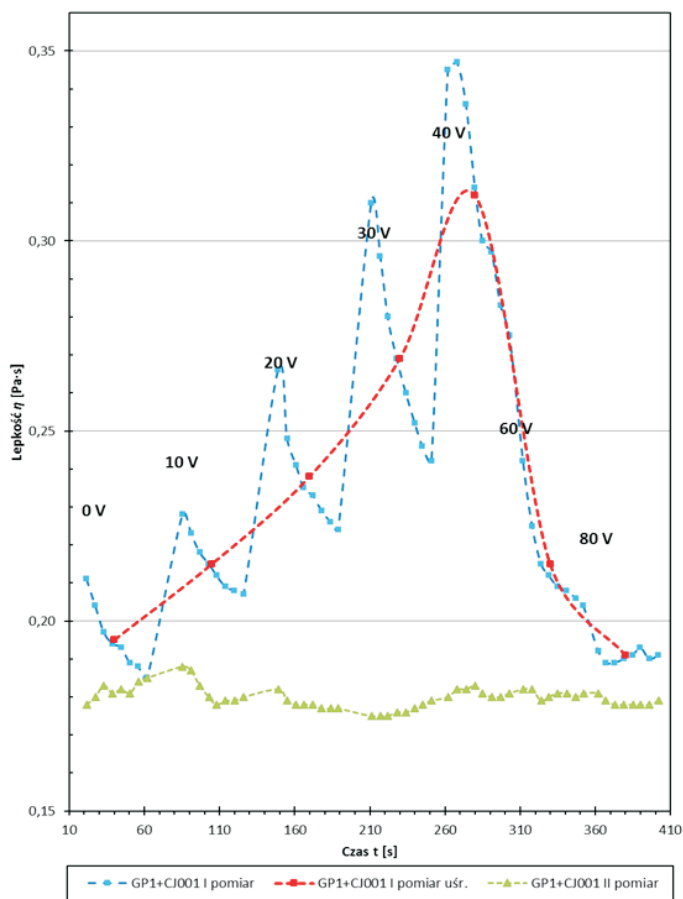
Zaobserwowano jedną wspólną właściwość dla obydwu badanych mieszanin, mianowicie przy zwiększonym natężeniu pola elektrycznego do wartości $E = 0,3$ kV·mm $^{-1}$ ich charakterystyki reologiczne $\tau = f(\dot{\gamma})$ odpowiadały tym, które miały one bez oddziaływania pola elektrycznego, tzn. gdy $E = 0$. Zatem w przypadku mieszaniny GP-1 + CJ 001 zmiany naprężenia ścinającego (τ) w funkcji przyrostu szybkości ścinania ($\dot{\gamma}$) znów można było opisać równaniem Binghama. Natomiast w przypadku mieszaniny PAO-6 + CJ 008 znów można było zastosować równanie Newtona. W obu przypadkach wartość lepkości dynamicznej (η) znów odpowiadała wartości występującej przy $E = 0$. Maksymalne wartości lepkości w wyniku działania pola elektrycznego uzyskiwano w obu przypadkach przy najmniejszych szybkościach ścinania, gdy natężenie pola elektrycznego wynosiło $E = 0,2$ kV·mm $^{-1}$. W przypadku mieszaniny GP-1 + CJ 001 była to wartość $\eta = 435,71$ mPa·s, która przy tej samej szybkości ścinania była niemal 2,5 razy

większa od lepkości rejestrowanej przy braku oddziaływania pola elektrycznego, gdy $\eta = 128,57$ mPa·s (tab. 2). Natomiast w przypadku mieszaniny PAO-6 + CJ 008, której składniki są bardziej polarne niż GP-1 + CJ 001, efekt działania pola elektrycznego był większy. Uzyskano przyrost lepkości do wartości $\eta = 1247,19$ mPa·s, która była większa niemal 20 razy od wartości (η) przy braku pola elektrycznego (tab. 3). W funkcji dalszego przyrostu szybkości ścinania ($\dot{\gamma}$) efekt ER obydwu cieczy gwałtownie malał do $\sim 30\%$ wzrostu lepkości mieszaniny GP-1 + CJ001 w stosunku do lepkości przy $E = 0$, gdy maksymalna osiągnięta przez wiskozymetr szybkość ścinania wynosiła $\dot{\gamma} = 209,75$ [s⁻¹] (tab. 2), oraz do $\sim 50\%$ wzrostu lepkości mieszaniny PAO-6 + CJ 008, w stosunku do lepkości przy $E = 0$, gdy możliwa do uzyskania szybkość ścinania wynosiła $\dot{\gamma} = 133,5$ [s⁻¹] (tab. 3). Zależało to m.in. od zastosowanego zestawu „trzcienie obrotowy/ cylinder” umożliwiającego zrealizowanie badań w optymalnych warunkach (tab. 1). W obydwu przypadkach dalsze podwyższanie natężenia pola elektrycznego nie powodowało kolejnego wzrostu lepkości cieczy, lecz powrót do wartości wyjściowej: w przypadku mieszaniny GP-1 + CJ 001 do wartości $\eta = 16,02$ mPa·s, a w przypadku PAO-6 + CJ 008 do wartości $\eta = 49,89$ mPa·s (tab. 2, tab. 3). Kolejne próby wywołania efektu ER w tych samych próbkach mieszanin nie były już możliwe.

W celu uzyskania całkowitej pewności co do właściwej interpretacji wyników uzyskanych za pomocą zmodyfikowanego wiskozymetru Brookfielda (rys. 8), szczególnie w zakresie zanikającego efektu ER przy $E = 0,3$ kV·mm⁻¹, przeprowadzono badanie weryfikacyjne mieszaniny GP-1 + CJ 001 specjalistycznym reometrem produkowanym seryjnie przez renomowaną firmę. W efekcie poszukiwań uzyskano taką możliwość w Instytucie Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej, gdzie znajduje się reometr Physica MCR 101 firmy Anton-Paar GmbH. Sposób pomiaru tym przyrządem jest odmienny w porównaniu z wiskozymetrem Brookfielda. Elektrodamy w tym reometrze są dwie równoległe metalowe płytki o średnicy 5 mm, przemieszczające się względem siebie ruchem obrotowo-oscylacyjnym, pomiędzy którymi znajduje się badana ciecz ER. Szerokość szczeliny pomiędzy płytkami wynosiła 0,1 mm. Na rysunku 12 przedstawiono zarejestrowaną zależność lepkości dynamicznej (η) [Pa·s] w funkcji czasu pomiaru t [s] dla zakresu napięcia elektrycznego $U = 0 \div 80$ V.

Mimo odmiennego charakteru pracy obydwu wiskozymetrów uzyskano podobny efekt. Na początku badania napięcie elektryczne wynosiło $U = 0$ V, a średnia lepkość mieszaniny GP-1 + CJ 001 wynosiła $\eta = 0,185$ Pa·s. Następnie, co ~ 60 s, zwiększano napięcie o 10 V. Przy $U = 10$ V lepkość wynosiła $\eta = 0,215$ Pa·s, przy $U = 20$ V — $\eta = 0,238$ Pa·s, a przy $U = 30$ V — $\eta = 0,269$ Pa·s. Największą wartość lepkości dynamicznej odnotowano dla $U = 40$ V, która wynosiła $\eta = 0,312$ Pa·s. Przy kolejnych próbach uzyskania lepszego efektu ER nie odnotowano zwiększenia wartości lepkości, lecz jej spadek, aż do wartości bliskiej wartości początkowej przy

$U = 0$ (rys. 12). Ponowna próba poddania tej samej próbki cieczy działaniu pola elektrycznego nie spowodowała już tak pozytywnego efektu ER jak przy pierwszym pomiarze, a następnie żadnego efektu ER (rys. 12). Zatem można uznać, że wyniki uzyskane w badaniach zmodyfikowanym viskozymetrem Brookfielda są miarodajne — okazały się całkowicie zbieżne z wynikami uzyskanymi w badaniach reometrem Physica MCR 101.



Rys. 12. Zależność lepkości dynamicznej (η) w czasie (t) przy zmieniającym skokowo napięciu (U) w zakresie od 0 do 80 V, dla mieszaniny GP-1 + CJ 001

7. Podsumowanie i wnioski

Zgromadzone wyniki badań skłaniają do stwierdzenia, że uzyskanie homogenicznej mieszaniny o właściwościach ER, na bazie oleju węglowodorowego jako cieczy izolującej, z dodatkiem niewielkiej ilości cieczy jonowej jako składnika aktywnego elektrycznie, napotyka na spore trudności. Po pierwsze, bardzo trudno jest dobrać ciecz jonową dobrze mieszającą się w cieczy węglowodorowej będącej dobrym izolatorem elektrycznym. Nie ma większego problemu z doбором samej cieczy węglowodorowej o znakomitych właściwościach izolujących, stanowiącej ciecz hydrauliczną, smarującą czy wręcz izolator elektryczny (np. GP-1, PAO-6 czy wręcz olej transformatorowy). Znacznie trudniej dobrać ciecz jonową, której niewielka ilość pozwoli wytworzyć jednorodną mieszaninę (roztwór lub emulsję koloidalną) o właściwościach ER, pozwalających na jej praktyczne zastosowanie. Jak już wcześniej wspomniano (p. 1 i p. 2), ciecz taka powinna mieć małą lepkość w warunkach braku działania pola elektrycznego, duży przyrost naprężenia ścinającego (lepkości) podczas działania stałego pola elektrycznego, krótki czas reakcji, możliwość pracy w szerokim zakresie temperatur. W cieczach homogenicznych nie występują niekorzystne zjawiska, m.in. takie jak: koagulacja i sedymentacja, związane z obecnością w nich polarnych cząstek stałych. Znacznym ograniczeniem w zastosowaniu praktycznym homogenicznych cieczy ER jest jednak ich wrażliwość na zanieczyszczenia oraz skłonność do przebicia elektrycznego (zwarcia).

Dobrane do badań ER dwie mieszaniny, tj. GP-1 + CJ 001 oraz PAO-6 + CJ 008, spełniały niemal wszystkie wymagania. Okazało się jednak, że obie ciecze jonowe mają zbyt dużą przewodność elektryczną, co przy większej ich zawartości w oleju bazowym było przyczyną przebicia podczas oddziaływania pola elektrycznego. Jednak zmniejszenie zawartości odpowiednio dobranej cieczy jonowej (tutaj do 2% v/v) w oleju mineralnym lub syntetycznym umożliwiało uzyskanie mieszaniny o właściwościach ER.

W obydwu badanych przypadkach (GP-1 + CJ 001 i PAO-6 + CJ 008) stwierdzono, że uzyskany efekt ER był krótkotrwały i niepowtarzalny, co sugeruje nieodwracalne zmiany struktury wewnętrznej tych mieszanin. Lepszy efekt ER (większe wartości τ i η podczas działania zewnętrznego pola elektrycznego) uzyskano dla mieszaniny PAO-6 + CJ 008, opisanej równaniem potęgowym Ostwalda-de Waele'a ($\tau = m_1 \cdot \dot{\gamma}^{n_2}$), której składniki różniły się wartością lepkości o 279,88 mPa·s, tj. dwa razy mniej niż w mieszaninie GP-1 + CJ 001, opisanej równaniem Herseya-Bulkleya ($\tau = m_1 \cdot \dot{\gamma}^{n_1} + \tau_0$), gdzie różnica ta wynosiła 539,81 mPa·s. Należy równocześnie zauważyć, że w pierwszym przypadku bazowa ciecz izolująca, czyli PAO-6, miała lepkość $\eta = 47,36$ mPa·s, a w drugim przypadku bazowa ciecz izolująca, czyli GP-1, miała lepkość $\eta = 12,61$ mPa·s, tj. cztery razy mniejszą od PAO-6. Takie spostrzeżenia sugerują, że w omawianym przypadku wpływ na prawie trzykrotnie większą maksymalną wartość lepkości mieszaniny PAO-6 + CJ 008 ($\eta = 1247,19$ mPa·s),

przy $E = 0,2 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$, od mieszaniny GP-1 + CJ 001 ($\eta = 435,71 \text{ mPa}\cdot\text{s}$) miała m.in. większą lepkość cieczy bazowej PAO-6 od GP-1, a nie zróżnicowanie lepkości obu składników mieszaniny, które z kolei mogło wiązać się z wystąpieniem naprężenia granicznego (τ_o) w mieszaninie GP-1 + CJ 001 (granicy płynięcia).

Łącząc powyższe rozważania z zarejestrowaną anomalią polegającą na zaniku efektu ER przy $E = 0,3 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$, podczas badań zrealizowanych za pomocą zmodyfikowanego wiskozymetru Brookfield DV-III Ultra, potwierdzonych w badaniach weryfikacyjnych reometrem Physica MCR 101 firmy Anton-Paar GmbH, należy przypuszczać, że podstawową przyczyną tego zaniku jest zbyt duża konduktywność obydwu zastosowanych cieczy jonowych. Bardziej szczegółowe objaśnienie tego zjawiska wymaga przeprowadzenia dodatkowych badań składników obu mieszanin ER, tj. olejów bazowych GP-1 i PAO-6 oraz cieczy jonowych CJ 001 i CJ 008 w tzw. spektroskopii dielektrycznej, oceniając oprócz stałej dielektrycznej (ϵ_r) również rezystancję (R) [Ω] i konduktywność (δ) [$\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$]. Badania takie pozwolą zarejestrować i potwierdzić zmiany struktury wewnętrznej badanych mieszanin pod wpływem działającego pola elektrycznego, będące przyczyną zaniku efektu ER przy $E = 0,3 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$, zanotowanego w badaniach na wiskozymetrze Brookfielda. Ponieważ autorzy nie posiadają odpowiedniego stanowiska badawczego umożliwiającego przeprowadzenie badań w spektroskopii dielektrycznej, skorzystano z pomocy Zakładu Fizyki i Technologii Kryształów w Instytucie Fizyki Technicznej Wydziału Nowych Technologii i Chemii WAT.

W tym samym celu niezbędne jest także przeprowadzenie obserwacji mikroskopowych *in situ* ocenianych mieszanin poddanych działaniu zewnętrznego pola elektrycznego. Pozwoli to na szczegółowe rozpoznanie i zrozumienie przebiegu zarejestrowanego efektu ER w zakresie do $E = 0,2 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ i jego zaniku przy $E = 0,3 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$. Badania takie są obecnie realizowane w Zakładzie Tribologii, Inżynierii Powierzchni i Logistyki Płynów Eksploatacyjnych Wydziału Mechanicznego WAT.

Na obecnym etapie eksperymentalnych badań elektoreologicznych właściwości olejów smarowych zawierających ciecz jonową można sformułować wstępnie następujące wnioski:

- 1) możliwe jest wytworzenie mieszaniny o właściwościach ER na bazie oleju węglowodorowego jako cieczy izolującej, zawierającej niewielką ilość cieczy jonowej jako składnika aktywnego elektrycznie;
- 2) wydaje się, że przebieg funkcji $\tau = f(\dot{\gamma})$ przy $E = 0$ w dużej mierze zależy m.in. od różnicy lepkości oleju bazowego izolującego i dodanej cieczy jonowej, natomiast na uzyskiwane wartości maksymalne (τ_{max}) i (η_{max}) przy $E > 0$ ma wpływ w większej mierze lepkość samej bazy izolującej;
- 3) zbyt duża ilość cieczy jonowej o znacznej konduktywności w bazowym oleju izolującym prowadzi do przebicia elektrycznego (zwarcia);

- 4) wytworzone mieszaniny zawierające 2% (v/v) cieczy jonowych osiągnęły swoje najlepsze właściwości ER (τ_{max} ; η_{max}) przy $E = 0,2 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$, a przy $E = 0,3 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ następował zanik efektu ER;
- 5) dotychczasowe wyniki badań nakazują przypuszczać, że w wytworzonych mieszaninach ER dochodzi do zmian ich struktury wewnętrznej, prowadzących do zaniku efektu ER;
- 6) niezbędne jest przeprowadzenie *in situ* badań w tzw. spektroskopii dielektrycznej i obserwacji mikroskopowych wytworzonych mieszanin poddanych działaniu pola elektrycznego, w celu rozpoznania zachodzących w nich zmian, co pozwoli na zaplanowanie następnych etapów badań zmierzających do opracowania nowej, skutecznej, homogenicznej cieczy ER.

Źródło finansowania pracy — działalność statutowa Wojskowej Akademii Technicznej.

Artykuł wpłynął do redakcji 2.04.2019 r. Zweryfikowaną wersję po recenzjach otrzymano 22.08.2019 r.

Tomasz Jan Kałdoński <https://orcid.org/0000-0002-3780-7604>

Tadeusz Kałdoński <https://orcid.org/0000-0001-6483-3739>

LITERATURA

- [1] MILECKI A., *Ciecze elektro- i magnetoologiczne oraz ich zastosowanie w technice*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2010.
- [2] WINSLOW W.M., *Induced Fibration of Suspensions*, Jour. Appl. Phys., 20, 1949, p. 1137.
- [3] DUFF A.W., *The Viscosity of Polarized Dielectrics*, Phys. Rev., 4, 1896, p. 23.
- [4] JNOUE A., MISAWA S., *Electrorheological Effect of Liquid Crystalline Polymers*, Jour. Appl. Poly. Sci., 55, 1995, pp. 113-118.
- [5] JNOUE A., IDE Y., MISAWA S., YAMADA H., *Properties of ER Fluids Comprised of Liquid Crystalline Polymers*, Proc. 6th Int. Conf. on electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspension and their Applications, Singapore 1998.
- [6] KĘSY Z., *Modelowanie i badanie elektroeologicznych i magnetoologicznych cieczy roboczych*. Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom 2009.
- [7] HENLEY S., FILISKO F.E., *Flow Profiles of Electrorheological Suspension: An alternative model for ER activity*, Jour. Rheol., 43, 1999, p. 1323.
- [8] ATTEN P., FOULC J.N., FELICI N., *A Conduction Model of the Electrorheological Effect*, Jour. Mod. Phys. B., 8, 1994, pp. 2731-2745.
- [9] WU C.W., CONRAD H., *Electrical Properties of Electrorheological Particle Clusters*, Mat., Sci. Eng. A., 255, 1998, pp. 66-69.
- [10] KLASS D.L., MARTINEK T.W., *Electroviscous Fluids. I Rheological Properties*, Jour. Appl. Phys., 38, 1967, p. 67.
- [11] UEJIMA H., *Dielectric Mechanism and Rheological Properties of Electro-fluids*. Jpn. Jour. Appl. Phys., 11, 1972, p. 319.
- [12] DEINEGA Y.F., VINOGRADOV G.V., *Electric Fields in the Rheology of Disperse Systems*, Rheol. Acta, 23, 1984, pp. 636-651.

- [13] STANGROOM J.E., *Electrorheological Fluids*, Phys. Tech. Phys., 14, 1983, p. 305.
- [14] PARTHASARATHV M., KLINGENBERG D.J., *Electrorheology: Mechanism and Models*, Mai. Sci. Eng., 17, 1996, pp. 57-103.
- [15] OTSUBO Y., WATANABE K., *Electrorheological behaviour of Barium Titane Suspensions*. Jour. Soc. Rheol. Jpn., 18, 1990, p. 639.
- [16] WU C.W., CONRAD H., *Negative Electrorheological Effect and Electrical Properties of a Teflon/Silicone Oil Suspencion*, Jour. Rheol., 41, 1997, p. 267.
- [17] HAO T., XU Y., *Conductive Behaviours of Polymer Based Electrorheological Fluid under Zero and Oscillator Mechanical Fluids*. Jour. Coll. Interface Sci., 181, 1996, pp. 581-588.
- [18] HAO T., KAWAI A., KAZAKI F., *Mechanism of the Electrorheological Effect: Evidence from the Conductive Delectric and Surface Characteristics of Water-free Electrorheological Fluids*, Langmuir, 14, 1998, pp. 1256-1262.
- [19] HAO T., *Electrorheological suspensions*, Advances in Colloid Interface Sci., 97, 2002, pp. 1-35.
- [20] NAKAMURA T., SAGA N., NAKAZAWA M., *Variable Viscous Control of a Homogenous ER Fluid Device Considering its Dynamic Characteristics Mechatronics*, 14, 2004, pp. 55-68.
- [21] JNOUE A., MANIWA S., *Electrorheological Effect of Liquid Crystalline Polymers*. Jour. Appl. Phys. Sci., 55, 1995, pp. 113-118.
- [22] JNOUE A., MANIWA S., *Electrorheological Effect of Liquid Crystalline Polymers*, Int. Jour. Mod. Phys. B., 10, 1996, p. 3191.
- [23] JNOUE A., MANIWA S., JDE Y., *Relation Between Molecular Structure and Electrorheological Effect in Liquid Crystalline Polymers*, Jour. Appl. Phys. Sci., 64, 1997, pp. 303-310.
- [24] JNOUE A., JDE Y., ODA H., *Influence of Dilution by Polydimethylsiloxane on Electrorheological Effect of Side-Chain Liquid Crystalline Polysiloxane*, Jour. Appl. Polym. Sci., 64, 1997, pp. 1319-1328.
- [25] KAŁDOŃSKI T.J., *Badania i ocena alkoksymetyloimidazolowych cieczy jonowych jako nowych smarów dla stalowych węzłów tribologicznych*, (rozprawa doktorska), WAT, Warszawa 2012.
- [26] KAŁDOŃSKI T.J., KAŁDOŃSKI T., *Lubricity and Surface Properties of Selected Imidazolium Based Ionic Liquids*, Int. Conf. BALTRIB 2009, Kaunas, Lithuania 2009.
- [27] KAŁDOŃSKI T. J., *BADANIE właściwości tribologicznych wybranych cieczy jonowych. Sprawozdanie końcowe z realizacji pracy GD/917/2010*, WAT, Warszawa 2010.
- [28] KAŁDOŃSKI T.J., *Research on Alkiloimidazolium Ionic Liquids as Lubricants for Steel Tribological Nodes*, Military University of Technology, Warsaw 2016.
- [29] BERMUDEZ M.D., JIMENEZ A.E., SANES J., CARRION F.J., *Ionic Liquids as Advanced Lubricant Fluids*, Molecules, 14, 2009, pp. 2888-2908.
- [30] TRUHAN J., QU J.J., LAU H., DAI S., BLAU P.J., *Ionic Liquids with Ammonium Cations as Lubricants or Additives*, Tribology Letters, vol. 22, no. 3, 2006, p. 1560.
- [31] KAŁDOŃSKI T.J., *Ciecze jonowe – perspektywiczne oleje smarujące*, WAT, Warszawa 2014.
- [32] PERNAK J., *Ciecze jonowe. Związki na miarę XXI wieku*, Przemysł Chemiczny, 8-9, 2003.
- [33] WASSERCHEID P., WELTON T. (eds), *Ionic Liquids in Synthesis. Second, Completely Revised and Enlarged Edition*, Wiley-WCH Vertag GmbH & Co. kGaA, Weinheim 2008.
- [34] HAGIWARA R., ITO V., *Room temperature Ionic Liquids of Alkylimidazolium Cations and Fluoroanions*, Jour. of Flurine Chemistry, 105, 2000, pp. 221-227.
- [35] PERNAK J., *Ciecze jonowe*, Politechnika Poznańska, Poznań 2005 (www.staff.amu.edu.pl/~cztc/1_Prof_Pernak.ppt).

- [36] JIMENEZ A.E., BERMEDEZ M.D., IGLESIAS P., CARRION F.J., MARTINEZ-NICOLAS G., *1-N-Alkyl-3-Methylimi-dazolium Ionic Liquids as Neat Lubricants Additives Steel – Aluminium Contants*, Wear, 2006, pp. 766-782.
- [37] QU J., BLAU P.J., DAI S., LUO H., MAYER H.M., *Ionic Liquids as Novel Lubricants and Additives for Diesel Engine Applications*. Tribology Letters, 35, 2009, pp. 181-189.
- [38] Solvay Solexis Fomblin Lubricants, www.solvaysolexis.com.
- [39] KAŁDOŃSKI T.J., GRYGLEWICZ Ł., STAŃCZYK M., KAŁDOŃSKI T., *Badanie właściwości powierzchniowych i smarnościowych wybranych olejów perfluoropolieteryowych*, Biuletyn WAT, 60, 3, 2011, s. 105-183.
- [40] Norma Obronna nr ref. NO-91-A291: 2009.
- [41] Karta Informacyjna. Produkt Data Sheet – SSPLUS Polyalphaolefins (PAO). Exxon Mobil Chemical, 150024, 2007.
- [42] Karta charakterystyki oleje bazowe: SN-100, SN-150, SN-400, SN-650. Orlen Oil Sp. z o.o., 2009.
- [43] Karta charakterystyki produktu Hipol 15F, www.ornlenoil.pl.
- [44] Materiały Chemical Reagents, J.S.C. POCH, Gliwice, Polska.
- [45] Karty charakterystyki. Materiały Sigma-Aldrich Sp. z o. o., www.sigma-aldrich.com.
- [46] Instrukcja obsługi tensjometru KSV Sigma 701, Helsinki, Finlandia.
- [47] Instrukcja obsługi łaźni termostatującej Julabo F-12, www.julabo.de.
- [48] Norma: PN-EN ISO 3104: 2004, *Przetwory naftowe. Ciecze przezroczyste i nieprzezroczyste. Oznaczanie lepkości kinematycznej i obliczanie lepkości dynamicznej*.
- [49] Norma: PN-ISO 2909: 2009, *Przetwory naftowe. Obliczanie wskaźnika lepkości na podstawie lepkości kinematycznej*.
- [50] Instrukcja obsługi łaźni TAMSON TV 2000, Netherlands, 2010.
- [51] Instrukcja obsługi refraktometru RL-1 PZO, Warszawa, Polska.
- [52] KAŁDOŃSKI T., *Sprawozdanie końcowe z realizacji projektu B+R nr 0R00002404 pt. „Opracowanie, badania i przygotowanie do wdrożenia w technice wojskowej porowatych łożysk ślizgowych nowej generacji o zwiększonej nośności i trwałości, impregnowanych ekologicznymi smarami zawierającymi dobrane surfaktanty, w tym ciecze jonowe*. WAT, Warszawa 2012.
- [53] KAŁDOŃSKI T. (red), *Porowate łożyska ślizgowe nowej generacji – badania i prognozy*, WAT, Warszawa 2013.
- [54] JUDA J., MADEJA J., OLSZAK A., KĘSY Z., KAŁDOŃSKI T., *Problematyka badania właściwości cieczy elektreologicznych*, XXV Konferencja Naukowa nt. *Problemy rozwoju maszyn roboczych*, Zakopane, 22-25 stycznia 2012.
- [55] JUDA J., MADEJA J., OLSZAK A., KĘSY Z., KAŁDOŃSKI T., *Badanie właściwości cieczy elektreologicznych*, *Hydraulika i Pneumatyka*, 2, 2012, pp. 5-8.
- [56] Lord Material Division, www.smarttec.co.uk.
- [57] FERGUSON J., KEMBŁOWSKI Z., *Reologia stosowana płynów*, Markus, Łódź 1995.
- [58] KRZTOŃ-MAZIOPA A., CISZEWSKA M., PŁOCHARSKI J., *Ciecze elektreologiczne – materiały, zjawiska, zastosowania*, nr 11-12, 2003, s. 743-752.
- [59] *Poradnik fizykochemiczny*, (praca zbiorowa), wyd. 2 zmien., Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2018.
- [60] KAŁDOŃSKI T.J., *Wybrane metody badań systemów tribologicznych. Cz. 1. Ocena właściwości cieczy smarujących systemów tribologicznych*, WAT, Warszawa, 2018.

J. JUDA, T.J. KAŁDOŃSKI, T. KAŁDOŃSKI

**Experimental investigations on electrorheological properties
of lubricating oils containing ionic liquid.**

Part. 1. Investigations with modified Brookfield DV-III Ultra Viscosimeter

Abstract: The results of experimental investigations on electrorheological (ER) properties of lubricating oils which contain ionic liquids, are presented in this article. The investigations were carried out on the special stand which was projected for this aim. On this stand there was used the modified Brookfield viscosimeter. Electrorheological properties of two mixtures were tested, i.e., silicone damping liquid GP-1 which is polimethylsiloksane mixture containing 2% (v/v) of ionic liquid CJ 001, i.e., tetrafluoroboran 1-methyl-3-octyloxymethylimidazolium as well as base polialfaolefine oil PAO-6 which contains 2% (v/v) of ionic liquid CJ 008, i.e., trihexyltetradecylphosphonium bis(trifluoromethylsulfonyl)imide. Selection of components of both mixtures was based on the results of investigations of miscible and on evaluation of basic phys-chem properties. The investigations showed that the made mixtures have generated the ER effect, but it was short-lived effect, suggesting the changes of inner structure of these mixtures. Therefore, we have planned the next investigations, among others dielectric spectroscopy and microscope observations in situ of these mixtures in external electric fields. The aim of those investigations will be to record the fading ER effect and to understand this mechanism.

Keywords: electrorheological effect, homogenous mixtures, lubricants, ionic liquids

DOI: 10.5604/01.3001.0013.5554

