

INVESTIGATION RHEOLOGICAL PROPERTIES OF RAPESEED OIL METHYLESTERS AND THEIR BLENDS WITH DIESEL FUELS

Kazimierz Baczewski, Piotr Szczawiński

Military University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering
Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warsaw, Poland
tel.: +48 22 6839759; +48 22 6837384, fax: +48 22 6837370
e-mail: k.baczewski@wme.wat.edu.pl, p.szczawinski@wme.wat.edu.pl

Abstract

The paper presents results of investigations of rheological properties (dynamic viscosity and shear rate) at low temperature and cold flow parameters (Cloud Point, Cold Filter Plugging Point and Pour Point) of rapeseed oil methylesters (RME), their blends with other fuels and RME with various flow improves additives (depressants). Common depressants for diesel fuels are less efficient with reference to RME. RME generally need other depressants than diesel fuels.

The test results showed that common depressants used to improve the cold flow properties of petroleum-based diesel fuels can different effect on pour points and cold filter plugging points of rapeseed oil methylesters. About 1000 ppm of depressants is required to significantly improving of cold flow parameters of rapeseed oil methylesters.

It was showed that blending arctic diesel fuel or aviation turbine fuel Jet A-1 with rapeseed oil methylesters at rate of 10% (by volume) or more leads to significant improve in the rheological properties (dynamic viscosity and shear rate) of RME at the low temperature and cold flow parameters (Cloud Point, Cold Filter Plugging Point and Pour Point).

Keywords: combustion engines, alternative fuels, Rapeseed Oil Methylesters (RME), low-temperature properties, rheological properties at low temperature, depressants

BADANIE WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNYCH ESTRÓW METYLOWYCH OLEJU RZEPAKOWEGO I ICH MIESZANIN Z OLEJAMI NAPĘDOWYMI

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań właściwości reologicznych (lepkości dynamicznej i naprężeń ścinających) w niskiej temperaturze oraz parametrów niskotemperaturowych (temperatury mętnienia, temperatury zablokowania zimnego filtra i temperatury płynięcia) estrów metylowych oleju rzepakowego (RME), ich mieszanin z innymi paliwami oraz RME z różnymi dodatkami (depresatorami) poprawiającymi te właściwości. Handlowe depresatory przeznaczone do olejów napędowych są mniej skuteczne w odniesieniu do RME. RME generalnie wymagają stosowania innych depresatorów niż ON.

Wykazano, że handlowe depresatory stosowane do olejów napędowych pochodzenia naftowego wpływają inaczej na obniżenie temperatury zablokowania zimnego filtra i temperatury płynięcia estrów metylowych oleju rzepakowego. Do polepszenia parametrów niskotemperaturowych estrów metylowych oleju rzepakowego wystarczy dodanie depresatorów w stężeniu do 1000 ppm.

Wykazano, że dodanie do estrów metylowych oleju rzepakowego oleju napędowego arktycznego oraz paliwa lotniczego Jet A-1 w stężeniu 10% i więcej (objętościowo) znacznie poprawia właściwości reologiczne (lepkość dynamiczną i naprężenia ścinające) RME w niskiej temperaturze oraz parametry niskotemperaturowe (temperaturę mętnienia, temperaturę zablokowania zimnego filtra i temperaturę płynięcia).

Słowa kluczowe: silniki spalinowe, paliwa alternatywne, estry metylowe oleju rzepakowego (RME), właściwości niskotemperaturowe, właściwości reologiczne w niskiej temperaturze, depresatory

1. Wstęp

Estry metylowe kwasów tłuszczowych (FAME) otrzymywane w procesie transestryfikacji olejów roślinnych alkoholem metylowym są coraz powszechniej stosowane do zasilania silników o zapłonie samoczynnym (ZS) i określane są ogólnie jako „biodiesel”.

Najczęściej używanymi surowcami do ich produkcji są: olej rzepakowy i słonecznikowy w Europie, olej sojowy w USA, olej palmowy w Malezji, a także tłuszcze zwierzęce i oleje odpadowe z produkcji żywnościowej.

Większość głównych parametrów eksploatacyjnych FAME jako paliwa do zasilania silników o ZS ma wartości porównywalne z parametrami olejów napędowych (ON) otrzymywanych z przeróbki ropy naftowej [1, 2]. Największe różnice występują w obszarze właściwości reologicznych FAME i ON, a szczególnie właściwości niskotemperaturowych. FAME mają słabe właściwości reologiczne w niskiej temperaturze, o czym świadczy stosunkowo wysoka wartość temperatury mętnienia (T_M), płynięcia (T_P) i zablokowania zimnego filtra (T_{ZZF}). W rezultacie przy obniżaniu temperatury ciekły ester staje się mętny z powodu tworzenia się kryształów, ich rozrostu i aglomeracji. Przy dużym obniżeniu temperatury zmniejsza się płynność FAME, następuje osadzanie się fazy stałej na ściankach przewodów i w filtrach układu zasilania silnika oraz instalacji dystrybucyjnych, a to prowadzi do trudności z niezawodną pracą silnika. Właściwości niskotemperaturowe FAME można polepszać różnymi metodami, z których najczęściej stosowanymi jest dodawanie do nich odpowiednich dodatków lub mieszanie ich ze składnikami o dobrych właściwościach niskotemperaturowych. Problem ten stanowi jedno z większych wyzwań w praktycznym zastosowaniu FAME w procesach eksploatacji i jest przedmiotem wielu badań i rozważań w literaturze fachowej [3, 4, 5, 6, 7, 8].

W pracy przedstawiono wyniki badań właściwości reologicznych estrów metylowych oleju rzepakowego (RME) w niskiej temperaturze, ich mieszanin z innymi paliwami oraz RME z różnymi dodatkami poprawiającymi właściwości niskotemperaturowe (depresatorami).

2. Zakres i metodyka badań

Badaniom podlegały próbki estrów metylowych oleju rzepakowego (RME), próbki RME z dodatkiem handlowych modyfikatorów właściwości niskotemperaturowych olejów napędowych (ON) oraz próbki będące mieszaninami RME z olejem napędowym i paliwem lotniczym Jet A-1. Do badań zastosowano RME w postaci niemodyfikowanej, tzn. nie zawierającego żadnych dodatków uszlachetniających. Podstawowe parametry normatywne próbek badanych paliw podano w tab. 1.

Jako depresatory zastosowano handlowe dodatki: Castrol TDA, Elf Stopogel, Keroflux 5486, Shell Diesel Depresser, WAMI. Badaniom poddano mieszaniny RME z próbkami oleju napędowego arktycznego (ONA) oraz paliwa lotniczego Jet A-1 o stężeniach 10, 20, 30, 40 i 50% obj. Natomiast dodatki depresujące dodawano do RME w stężeniach 250, 500, 1000 i 2000 ppm.

Badano następujące parametry RME, paliw, mieszanin paliw z RME, RME i HON z depresatorami, opisujące ich właściwości reologiczne w niskiej temperaturze:

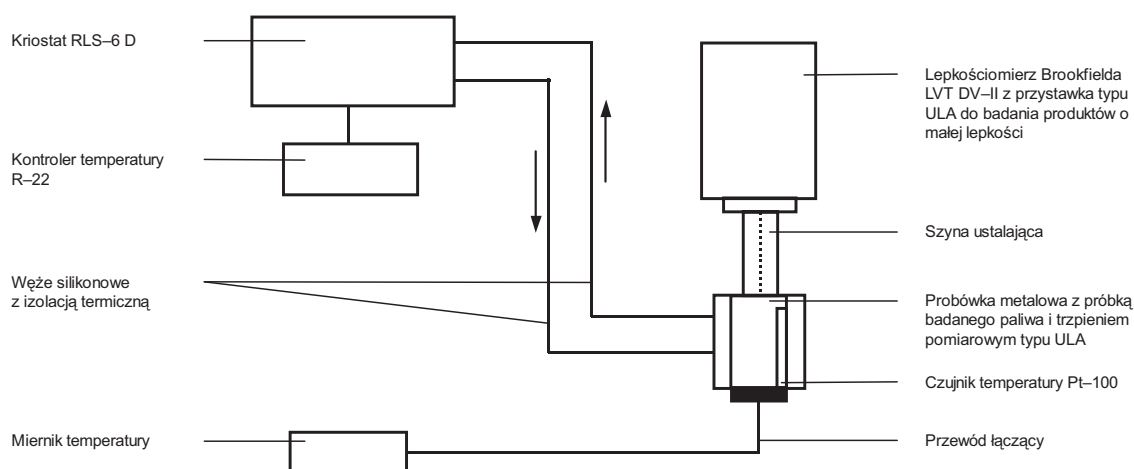
- temperaturę mętnienia (T_M),
- temperaturę płynięcia (T_P),
- temperaturę zablokowania zimnego filtra (T_{ZZF}),
- zmiany lepkości dynamicznej i naprężeń ścinających, w zależności od temperatury i prędkości ścinania.

Temperatury te badano zgodnie z postanowieniami odpowiednich norm: temperaturę mętnienia wg PN-ISO 3015: 1997, temperaturę płynięcia wg PN-ISO 3016:2005, temperaturę zablokowania zimnego filtra wg PN-EN 116:2001. Natomiast badania lepkości dynamicznej i naprężeń ścinających realizowano na lepkościomierzu Brookfielda LVT DV-II z przystawką typu ULA do badania produktów o małej lepkości wg metodyki własnej [9]. Schemat stanowiska badawczego

przedstawiono na rys. 1. Lepkość dynamiczną i naprężenia ścinające badano przy zmianie temperatury w granicach $-30...20^{\circ}\text{C}$ i prędkości ścinania $3,67...73,4\text{ s}^{-1}$.

Tab. 1. Podstawowe parametry badanych paliw
Tab. 2. Basic parameters of tested fuels

Parametr	Jm	Wymagania dla FAME wg PN-EN 14214:2004	RME	ONA	Jet A-1	HON	Wymagania dla ON wg PN-EN 590:2004
Indeks cetanowy	–	b.w.	–	48,0	48,0	50,0	min. 46,0
Gęstość w temperaturze 15°C	kg/m^3	860–900	882	829	804	856	820–845
Lepkość w temperaturze 40°C	mm^2/s	3,5–5,0	4,84	2,43	1,27	4,3	2,0–4,5
Zawartość siarki	mg/kg	max. 10	5	500	900	23	max. 50
Temperatura zapłonu	$^{\circ}\text{C}$	min. 120	174	66	57	74	min. 55
Badanie działania korodującego na miedź (w temp. 50°C , 3 godz.)	stopień korozji	max. 1	1	1	1	1	max. 1
Całkowita zawartość zanieczyszczeń mechanicznych	mg/kg	max.24	9	12	2	10	max. 24
Liczba kwasowa	mg KOH/g	max. 0,50	0,27	0,08	0,002	0,05	b.w.
Skład frakcyjny:							
– temperatura początku destylacji	$^{\circ}\text{C}$	b.w.	312	173	174	208	b.w.
– 10% destyluje do temperatury	$^{\circ}\text{C}$	b.w.	321	200	185	242	b.w.
– 20% destyluje do temperatury	$^{\circ}\text{C}$	b.w.	324	212	191	255	b.w.
– 50% destyluje do temperatury	$^{\circ}\text{C}$	b.w.	325	249	203	296	b.w.
– 90% destyluje do temperatury	$^{\circ}\text{C}$	b.w.	335	322	225	344	b.w.
– do temperatury 250°C destyluje	% obj.	b.w.	–	51	98	18	max. 65
– do temperatury 350°C destyluje	% obj.	b.w.	97	96	–	91	min. 85
– temperatura końca destylacji	$^{\circ}\text{C}$	b.w.	348	358	240	366	max. 360
Temperatura mętnienia	$^{\circ}\text{C}$	b.w.	–6	–20	–19	1	b.w.
Temperatura zablokowania zimnego filtra	$^{\circ}\text{C}$	w zależności od warunków klimatycznych	–9	–28	–48	1	w zależności od warunków klimatycznych
Temperatura płynięcia	$^{\circ}\text{C}$	b.w.	–12	–34	–54	–3	b.w.
b.w. – brak wymagań							



Rys. 1. Schemat stanowiska do badania lepkości dynamicznej i naprężeń ścinających metodą Brookfielda
Fig. 1. Schematic view of test stand for investigation of dynamic viscosity and shear stresses with the Brookfield method

3. Wyniki badań i ich analiza

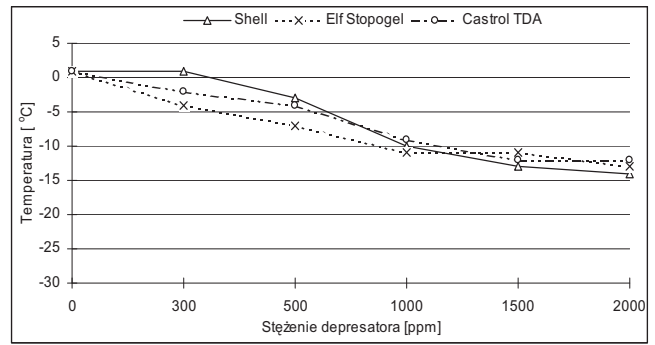
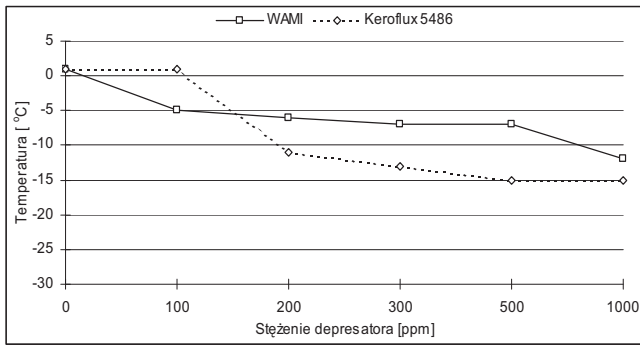
Z danych przedstawionych w tab. 1 wynika, że badany RME ma parametry niskotemperaturowe lepsze niż badany hydroodsiarczony olej napędowy (HON), ale dużo gorsze niż olej napędowy arktyczny (ONA) i paliwo lotnicze (Jet A-1). Poprawę właściwości niskotemperaturowych RME można uzyskać wprowadzając do nich dodatki depresujące, które są zalecane do poprawy tych właściwości olejów napędowych pochodzących z przeróbki ropy naftowej. Porównanie efektywności działania tych dodatków badano wprowadzając je do RME i do HON. Na rys. 2–5 przedstawiono wpływ stężenia różnych depresatorów na obniżenie temperatury zablokowania zimnego filtra i płynięcia RME oraz bazowego oleju napędowego (HON). Z danych tych wynika, że dla HON następuje wyraźna poprawa parametrów niskotemperaturowych (T_{ZZF} i T_P) wraz ze wzrostem stężenia dodatku.

Wszystkie depresatory wprowadzone do bazowego oleju napędowego spowodowały istotną poprawę jego parametrów niskotemperaturowych, chociaż z różną intensywnością (rys. 2 i 3). Zarówno T_{ZZF} jak i T_P obniżały się wraz ze wzrostem stężenia dodatków. Dla większości badanych dodatków (oprócz dodatku Shell Diesel Depresser) wystarczające stężenie wynosi 1000 ppm – przy zwiększaniu stężenia do 2000 ppm uzyskuje się tylko dalsze niewielkie obniżenie zarówno T_{ZZF} , jak i T_P . Obniżenie wartości obu temperatur ma w zasadzie liniowy charakter w zależności od ich stężenia w HON w zakresie wartości do 1000 ppm. Najbardziej efektywnym okazał się depresator Keroflux 5486, który przy stężeniu równym 1000 ppm obniżył T_P HON-u o ok. 25°C, a T_{ZZF} o ok. 17°C. Pozostałe depresatory obniżyły te temperatury odpowiednio o ok. 13...15°C i ok. 12...14°C.

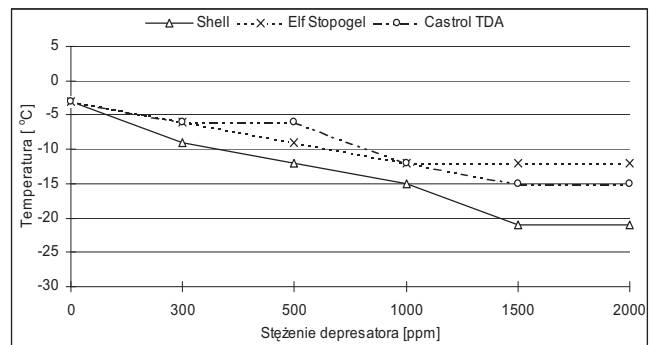
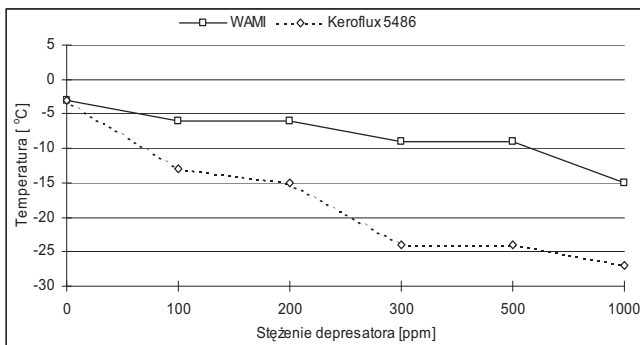
Jednak te same depresatory dodane do RME spowodowały tylko niewielkie, a niektóre żadnego, obniżenie T_{ZZF} i T_P (rys. 4 i 5). Przy zawartości 1000 ppm T_P estru obniżyła się tylko o ok. 4...6°C, a T_{ZZF} o ok. 5°C. Przy tym depresator Elf Stopogel nie wykazał żadnego oddziaływania na T_{ZZF} estru dla dowolnego stężenia. Depresator Keroflux 5486 spowodował zmniejszenie T_{ZZF} o ok. 5 przy stężeniu 500 ppm, ale większa jego zawartość nie powodowała dalszego zmniejszenia T_{ZZF} , a przy stężeniu 2000 ppm zaobserwowano wręcz wzrost T_{ZZF} do wartości większej niż zmierzono dla czystego RME. Wynika z tego, że mechanizm działania dodatków depresujących jest inny w przypadku paliw pochodzących z przeróbki ropy naftowej (HON) niż w przypadku estrów metylowych kwasów tłuszczowych, co potwierdza sugestie przedstawione w [5]. Dlatego do poprawy właściwości niskotemperaturowych RME należy stosować inne związki chemiczne niż do konwencjonalnych ON.

Znaczne efekty w zakresie poprawiania właściwości niskotemperaturowych RME można uzyskać mieszając go (dodając do niego) z handlowymi gatunkami olejów napędowych o dobrych parametrach niskotemperaturowych (gatunki zimowe lub arktyczne) lub z paliwem lotniczym Jet A-1, które ma także bardzo dobre parametry niskotemperaturowe [2]. W przypadku dodania do czystego RME oleju napędowego arktycznego lub paliwa lotniczego, można uzyskać istotne obniżenie jego T_M , T_{ZZF} i T_P (rys. 6). Obniżenie wartości każdej z tych temperatur ma przebieg zbliżony do liniowego w funkcji ilości dodanego ONA lub Jet A-1 (a zakresie zawartości tych paliw do 50% obj. w mieszaninie z RME). Jest przy tym charakterystyczne, że dodatek do RME oleju napędowego arktycznego powoduje intensywniejsze obniżenie T_{ZZF} i T_P w funkcji ilości dodanego ONA niż ma to miejsce dla paliwa Jet A-1, chociaż parametry niskotemperaturowe paliwa lotniczego Jet A-1 są dużo lepsze niż ONA (tab. 1). Dopiero przy zawartości paliwa Jet A-1 w ilości powyżej 60% obj. tendencje zmieniają się na przeciwnie. Należy zaznaczyć, że paliwo Jet A-1 ma parametry zbliżone do wymaganych dla paliw do silników o ZS [2], dlatego dodanie go do RME nie powoduje pogorszenia jego parametrów normatywnych, w tym samozapłonowych.

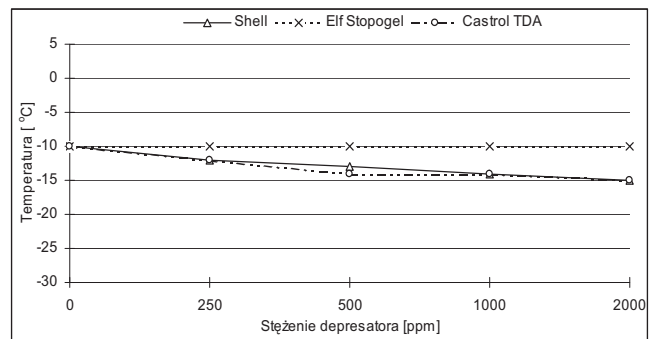
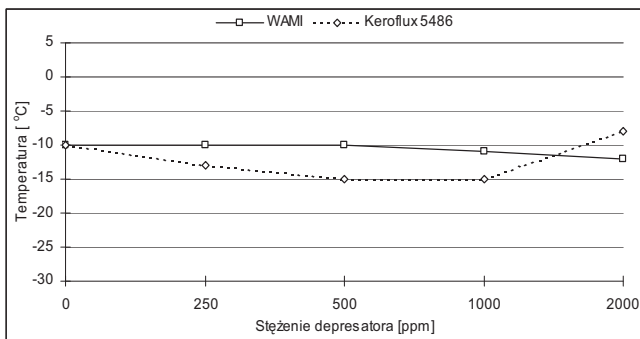
W przeciwieństwie do depresatorów dodanie do RME oleju napędowego arktycznego lub paliwa lotniczego powoduje obniżenie jego temperatury mętnienia – niewielkie (o ok. 5°C) w przypadku ONA i duże (o ok. 12°C) przy dodaniu 50% obj. paliwa Jet A-1.



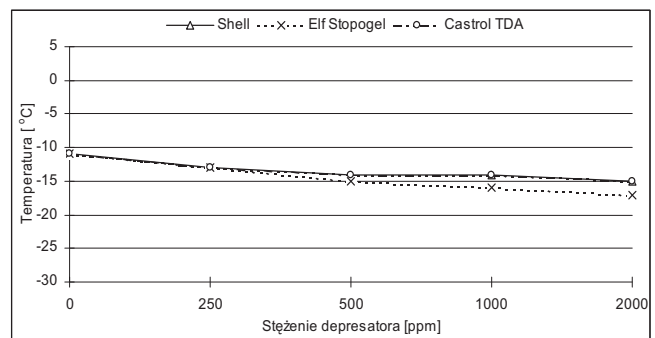
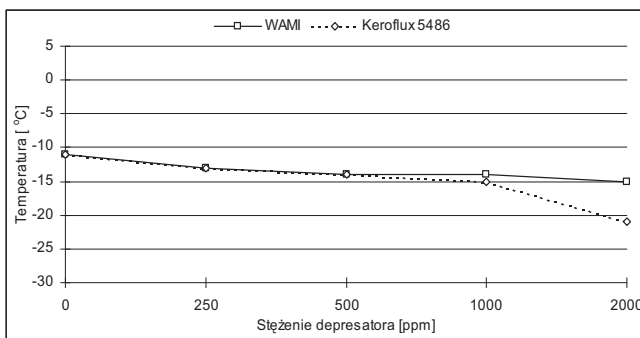
Rys. 2. Temperatura zablokowania zimnego filtra (T_{ZZF}) HON w funkcji zawartości depresatorów
Fig. 2. Cold Filter Plugging Point (CFPP) of HON vs. depressants concentration



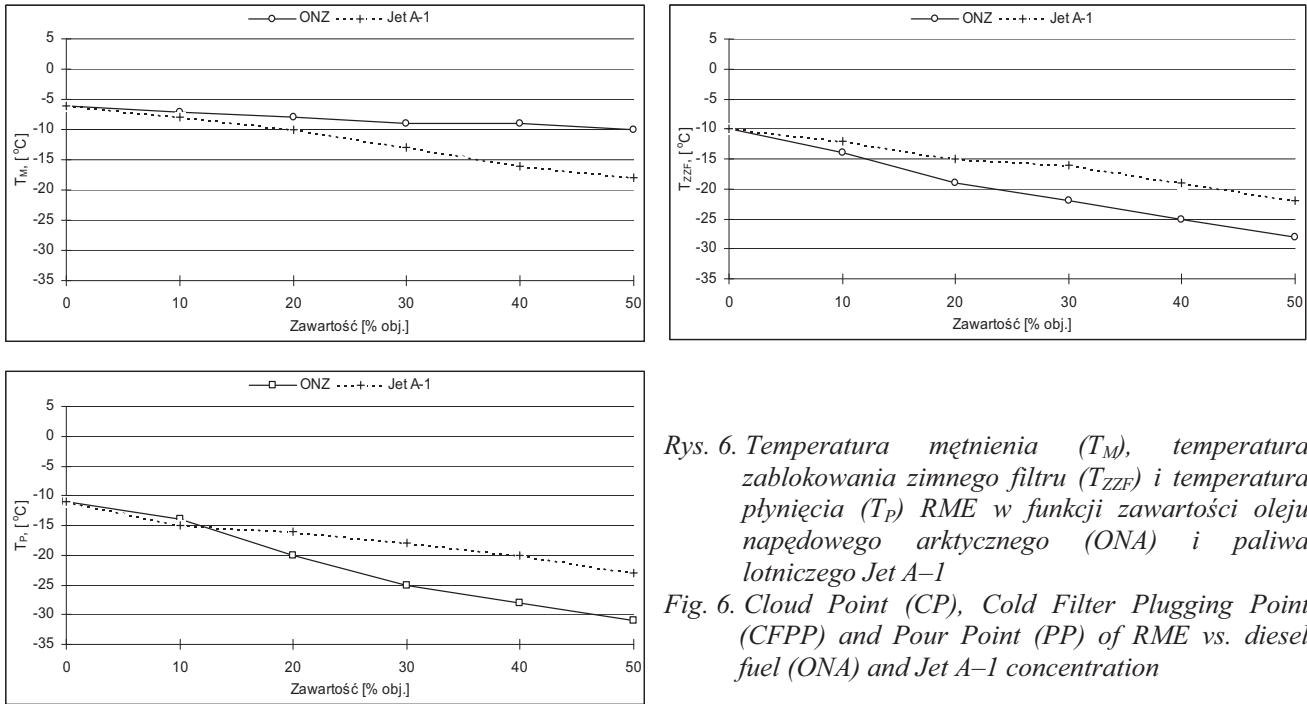
Rys. 3. Temperatura płynięcia (T_P) HON w funkcji zawartości depresatorów
Fig. 3. Pour Point (PP) of HON vs. depressants concentration



Rys. 4. Temperatura zablokowania zimnego filtra (T_{ZZF}) RME w funkcji zawartości depresatorów
Fig. 4. Cold Filter Plugging Point (CFPP) of RME vs. depressants concentration



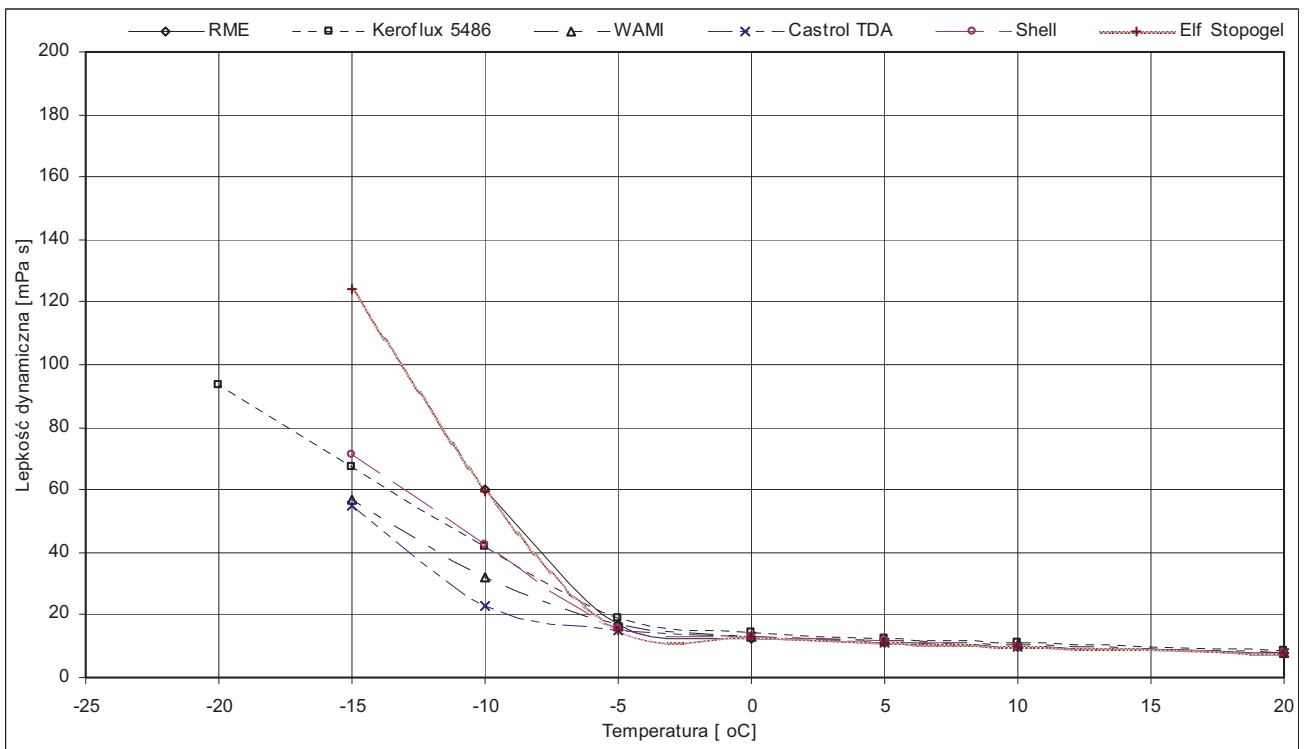
Rys. 5. Temperatura płynięcia (T_P) RME w funkcji zawartości depresatorów
Fig. 5. Pour Point (PP) of RME vs. depressants concentration



Rys. 6. Temperatura mętnienia (T_M), temperatura zablokowania zimnego filtra (T_{ZZF}) i temperatura płynięcia (T_P) RME w funkcji zawartości oleju napędowego arktycznego (ONA) i paliwa lotniczego Jet A-1

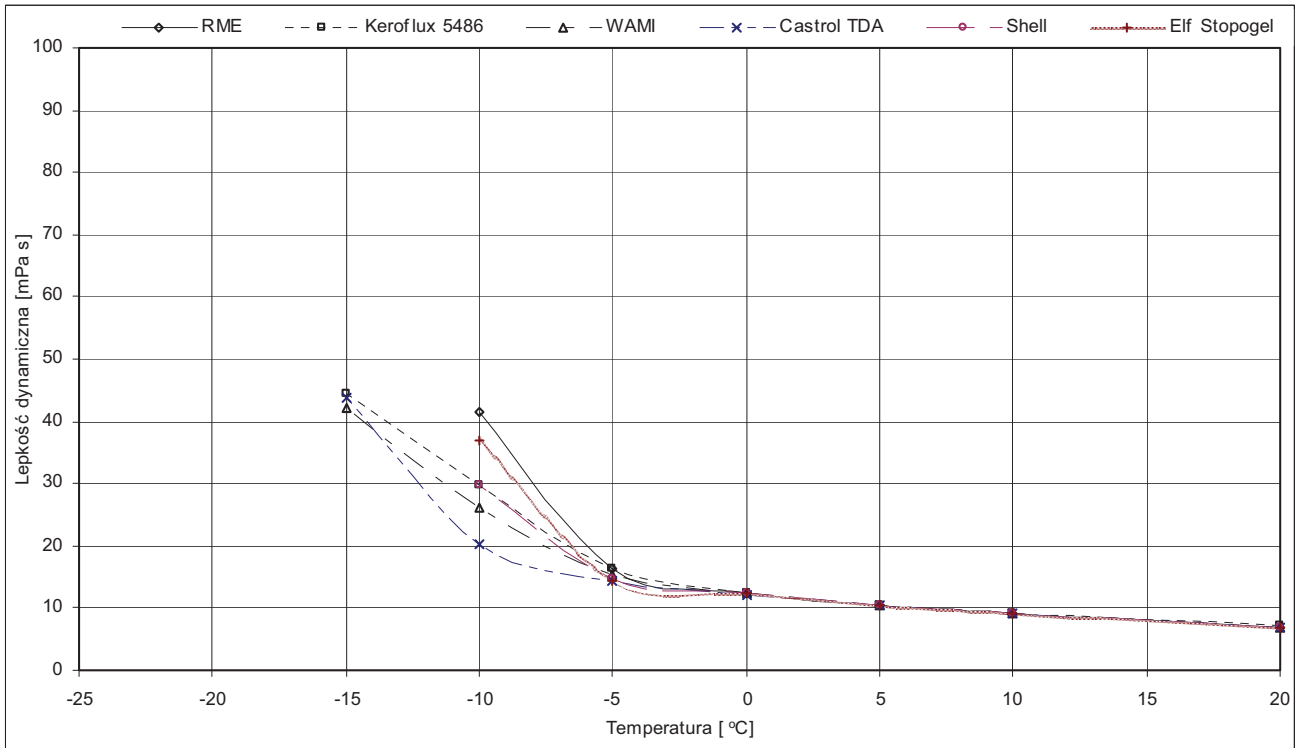
Fig. 6. Cloud Point (CP), Cold Filter Plugging Point (CFPP) and Pour Point (PP) of RME vs. diesel fuel (ONA) and Jet A-1 concentration

Oprócz normatywnych parametrów niskotemperaturowych (T_M , T_{ZZF} , T_P) właściwości reologiczne paliw można opisać na podstawie pomiarów ich lepkości dynamicznej i naprężeń ścinających. Rezultaty badań lepkości dynamicznej i naprężeń ścinających w funkcji temperatury dla prędkości ścinania $3,67 \text{ s}^{-1}$ czystego RME, RME z depresatorami i mieszanin RME z ONA przedstawiono na rys. 7–12.



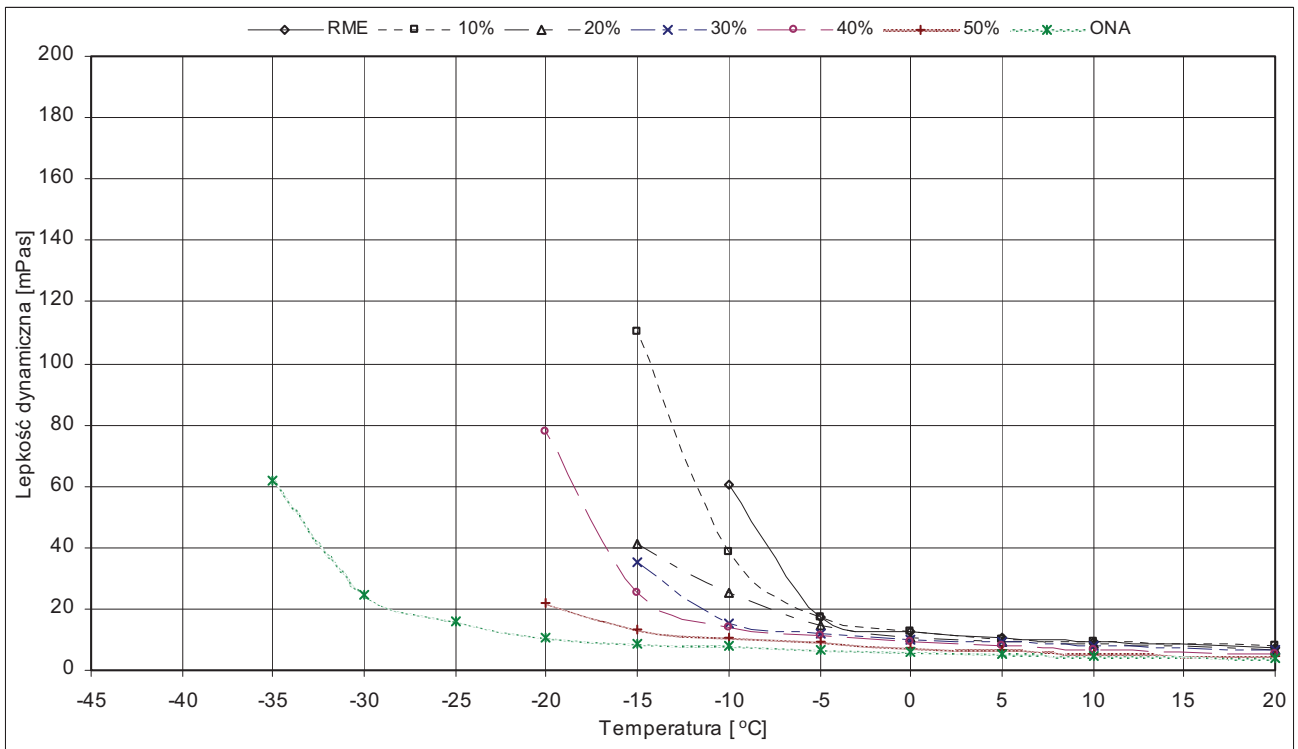
Rys. 7. Lepkość dynamiczna w funkcji temperatury RME z zawartością 1000 ppm depresatorów przy prędkości ścinania $3,67 \text{ s}^{-1}$

Fig. 7. Dynamic viscosity as a function of temperature at constant shear rate ($3,67 \text{ s}^{-1}$) for RME with 1000 ppm of depressants content



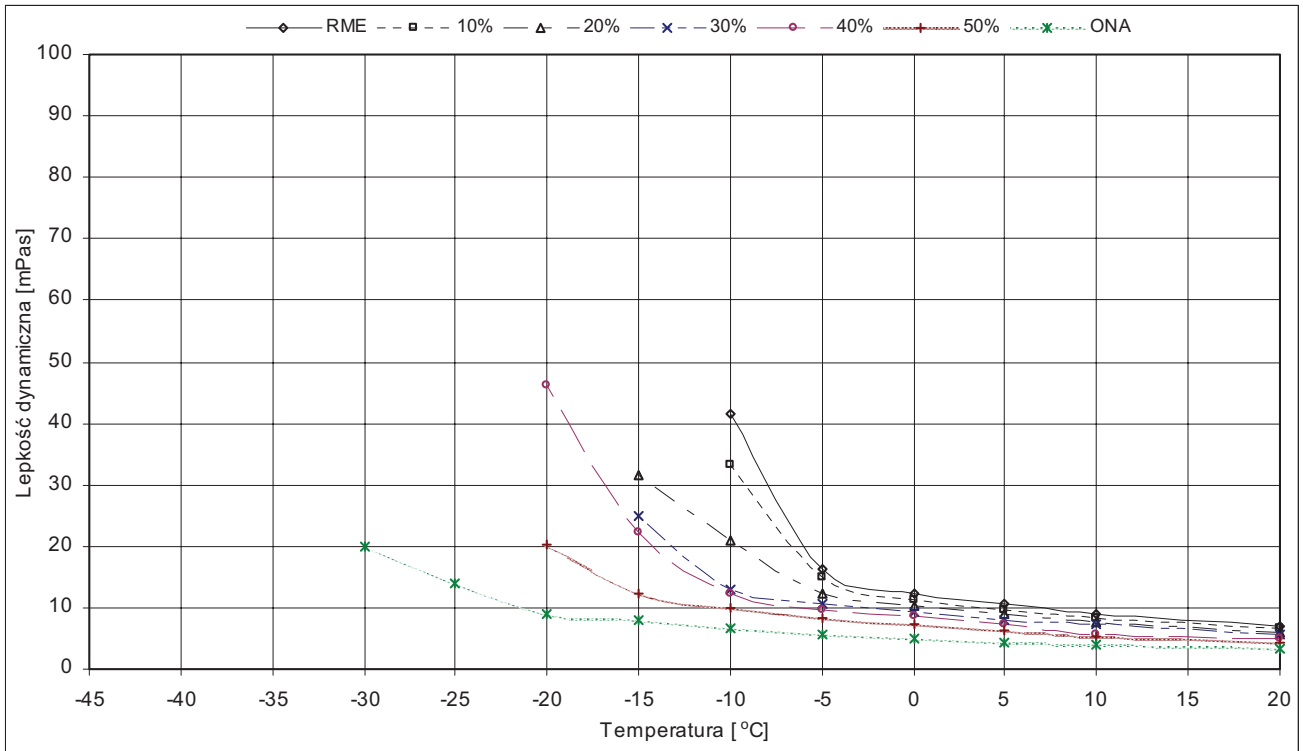
Rys. 8. Lepkość dynamiczna w funkcji temperatury RME z zawartością 1000 ppm depresatorów przy prędkości ścinania $14,68 \text{ s}^{-1}$

Fig. 8. Dynamic viscosity as a function of temperature at constant shear rate ($14,68 \text{ s}^{-1}$) for RME with 1000 ppm of depressants content

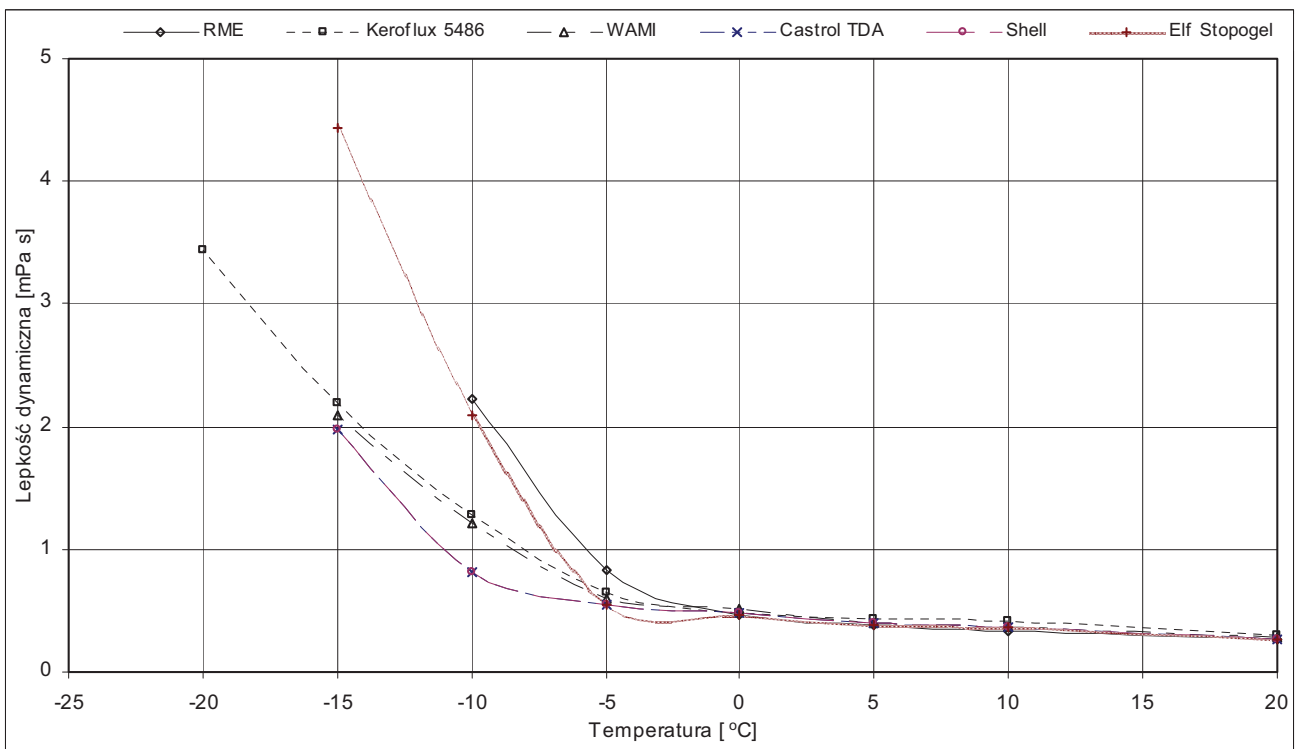


Rys. 9. Lepkość dynamiczna w funkcji temperatury mieszanin RME z olejem napędowym arktycznym (ONA) przy prędkości ścinania $3,67 \text{ s}^{-1}$

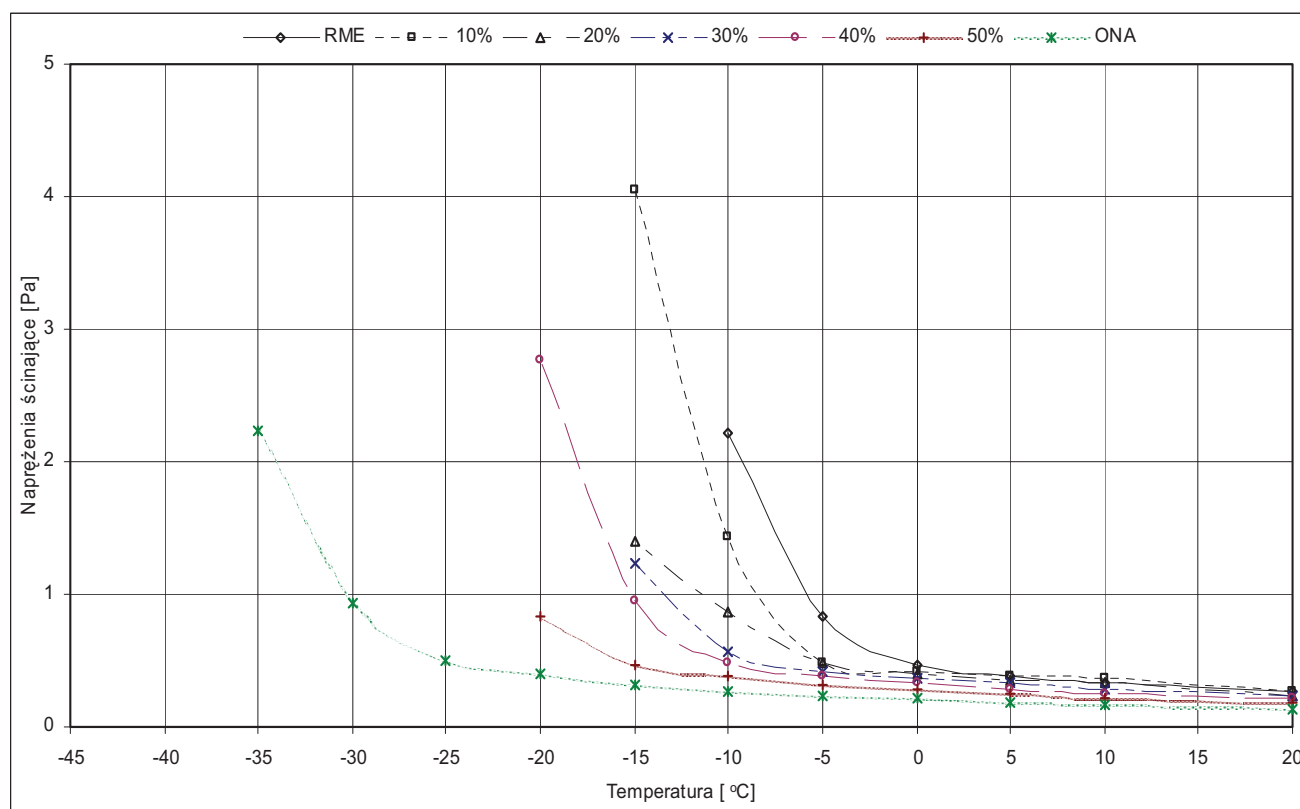
Fig. 9. Dynamic viscosity as a function of temperature at constant shear rate ($3,67 \text{ s}^{-1}$) for blends RME with various of ONA concentration



Rys. 10. Lepkość dynamiczna w funkcji temperatury mieszanin RME z olejem napędowym arktycznym (ONA) przy prędkości ścinania $14,68 \text{ s}^{-1}$
 Fig. 10. Dynamic viscosity as a function of temperature at constant shear rate ($14,68 \text{ s}^{-1}$) for blends RME with various of ONA concentration



Rys. 11. Naprężenia ścinające w funkcji temperatury RME z zawartością 1000 ppm depresatorów przy prędkości ścinania $3,67 \text{ s}^{-1}$
 Fig. 11. Shear rate as a function of temperature at constant shear rate ($3,67 \text{ s}^{-1}$) for RME with 1000 ppm of depressants content



Rys. 12. Napężenia ścinające w funkcji temperatury mieszanin RME z olejem napędowym arktycznym (ONA) przy prędkości ścinania $3,67 \text{ s}^{-1}$

Fig. 12. Shear rate as a function of temperature at constant shear rate ($3,67 \text{ s}^{-1}$) for blends RME with various of ONA concentration

Z danych tych wynika, że zarówno lepkość dynamiczna i napężenia ścinające mają podobne wartości i przebieg dla temperatury powyżej -5°C . Dopiero przy obniżeniu temperatury poniżej -5°C lepkość dynamiczna i napężenia ścinające rosną z różną intensywnością, najintensywniej dla czystego RME (rys. 7, 8 i 11). Wprowadzenie do RME depresatorów lub dodanie do niego oleju napędowego arktycznego powoduje znaczne zmniejszenie lepkości oraz zachowanie płynności RME przy dalszym obniżeniu temperatury. Najmniejszą lepkość dynamiczną w temperaturze -15°C miały próbki RME z depresatorami Castrol TDA i WAMI, a największą (ponad dwukrotnie) z depresatorem Elf Stopogel. Przy większej prędkości ścinania lepkość dynamiczna ma mniejsze wartości (rys. 8), ale charakter jej zależności jest podobny jak dla mniejszej prędkości (rys. 7). Istnieje też związek między wartością T_{ZZF} (rys. 2) i lepkością dynamiczną (rys. 7 i 8) tzn. depresatory, które przy tym samym stężeniu powodowały większe obniżenie T_{ZZF} RME, powodowały jednocześnie większe zmniejszenie jego lepkości dynamicznej w ujemnej temperaturze.

Dodanie do RME oleju napędowego arktycznego zdecydowanie zmniejsza lepkość dynamiczną i napężenia ścinające w temperaturze ujemnej. Już mieszanina RME zawierająca 10% obj. ONA powoduje zmniejszenie lepkości dynamicznej w takim stopniu, jak wprowadzenie depresatorów w stężeniu 1000 ppm (rys. 7 i 9). Przy wzroście udziału ONA w mieszaninie z RME przebieg zależności $\eta = f(T)$ przybliży się do przebiegu tej zależności dla samego ONA. Podobnie jak przy wprowadzaniu do RME depresatorów, lepkość dynamiczna mieszanin RME z ONA ulega znacznemu zmniejszeniu przy wzroście prędkości ścinania (rys. 9 i 10). Także wartość naprężeń ścinających mieszanin RME z ONA ulega znacznemu obniżeniu ze wzrostem zawartości ONA w mieszaninie. Zdecydowane zmniejszenie wartości naprężeń ścinających ma miejsce przy zawartości powyżej 20% obj. ONA w mieszaninie z RME (rys. 12).

4. Wnioski

1. Handlowe depresatory bardzo istotnie polepszają parametry niskotemperaturowe bazowego oleju napędowego. Jednak nie wszystkie takie depresatory są równie skuteczne po wprowadzeniu ich do estrów metylowych oleju rzepakowego.
2. Z przeprowadzonych badań wynika, że handlowe depresatory przeznaczone do olejów napędowych pochodzących z przeróbki ropy naftowej są mniej skuteczne w stosunku do RME, a niektóre wręcz pogarszają ich parametry niskotemperaturowe, zwłaszcza przy większym stężeniu. Dlatego estry metylowe oleju rzepakowego generalnie wymagają stosowania innych depresatorów niż stosowane do ON.
3. Do istotnego polepszenia parametrów niskotemperaturowych estrów metylowych oleju rzepakowego wystarczy dodać depresatory w stężeniu do 1000 ppm. Dalsze zwiększanie zawartości depresatorów w RME praktycznie nie obniża wartości jego parametrów niskotemperaturowych.
4. Skutecznym sposobem polepszania właściwości niskotemperaturowych estrów metylowych oleju rzepakowego jest dodanie do nich oleju napędowego arktycznego lub paliwa lotniczego Jet A-1. Już zawartość 10% (objętościowo) każdego z tych paliw w RME znacznie poprawia ich parametry niskotemperaturowe.
5. Wprowadzenie do estrów metylowych oleju rzepakowego zarówno depresatorów, jak i oleju napędowego arktycznego lub paliwa Jet A-1 powoduje zauważalną poprawę właściwości reologicznych RME w temperaturze poniżej -5°C .

Literatura

- [1] Graboski, M. S., Mc Cormick, R. L., *Combustion of fat and vegetable oil derived fuels in diesel engines*, Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 24, pp. 125–164, 1998.
- [2] Baczewski, K., Kałdoński, T., *Paliwa do silników o zapłonie samoczynnym*, WKiŁ, Warszawa 2004.
- [3] Knothe, G., *Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters*, Fuel Processing Technology, Vol. 86, pp. 1059–1070, 2005.
- [4] Joshi, R. M., Pegg, M. J., *Flow properties of Biodiesel fuel blends at low temperature*, Fuel, Vol. 86, pp. 143–151, 2007.
- [5] Soriano, N. U., Migo V. P., Matsumara M., *Ozonized vegetable oils as pour point depressant for neat biodiesel*, Fuel, Vol. 85, pp. 25–31, 2006.
- [6] Imahara, H., Minami E., Saka, S., *Thermodynamic study on cloud point of biodiesel with its fatty acid composition*, Fuel, Vol. 85, pp. 1666–1670, 2006.
- [7] Gonzalez Gomez, M. E., Howard-Hildige, R., Leahy, J. J., Rice, B., *Winterisation of waste cooling oil methyl ester to improve cold temperature fuel properties*, Fuel, Vol. 81, pp. 33–39, 2002.
- [8] Kałdoński, T., Szczawiński, P., *Modyfikowanie właściwości paliw pochodzenia roślinnego do silników o zapłonie samoczynnym*, Biuletyn WAT, Vol. LII, nr 1, s. 103–123, Warszawa 2003.
- [9] Szczawiński, P., *Kryteria oceny właściwości niskotemperaturowych paliw do silników wysokoprężnych*, Materiały XI Sympozjum nt. Paliwa Płynne i Produkty Smarowe w Gospodarce Morskiej, s. 85–97, Jachranka 1995.