

Article citation info:

Chłopek Z, Jagiełło S, Juwa S, Zakrzewska D. Badania procesu spalania w silniku o zapłonie samoczynnym. The Archives of automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji. 2017; 76(1): <http://dx.doi.org/10.14669/AM.VOL76.ART1>

Badania procesu spalania w silniku o zapłonie samoczynnym zasilanym olejem napędowym i estrami metylowymi oleju rzepakowego

Zdzisław Chłopek¹, Sebastian Jagiełło², Sebastian Juwa³, Dagna Zakrzewska⁴

Przemysłowy Instytut Motoryzacji
Politechnika Warszawska

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań procesu spalania w silniku o zapłonie samoczynnym zasilanego olejem napędowym i estrami metylowymi oleju rzepakowego z dodatkami letnim i zimowym. Celem badań była ocena, czy ze względu na właściwości procesu spalania jest uzasadnione traktowanie estrów metylowych oleju rzepakowego jako paliw zastępczych w stosunku do oleju napędowego. Badania przeprowadzono w warunkach zewnętrznej charakterystyki prędkościowej na stanowisku badawczym AVL Single Cylinder Test Bed z jednocylindrowym silnikiem badawczym o zapłonie samoczynnym AVL 5402. Wyznaczono charakterystykę zewnętrzną momentu obrotowego i sprawności ogólnej. Zbadano wartości maksymalne ciśnienia indykowanego i kąty obrotu wału korbowego odpowiadające tym wartościom. Wyznaczono wartości ekstremalne pochodnej ciśnienia indykowanego względem kąta obrotu wału korbowego. Do wyznaczenia przebiegu wielkości charakteryzujących proces spalania wykorzystano oprogramowanie CONCERTO. Zbadano wartości maksymalne temperatury czynnika, wyznaczono także kąty obrotu wału korbowego odpowiadające tym wartościom. Stwierdzono duże podobieństwo wyznaczonych charakterystyk⁵ dla oleju napędowego i estrów oleju rzepakowego z dodatkiem letnim, natomiast wyraźnie różnią się charakterystyki zimowej wersji biopaliwa.

Słowa kluczowe: silniki spalinowe, estry metylowe oleju rzepakowego, proces spalania

Keywords: internal combustion engines, rape methyl ester, combustion process

1. Wstęp

Paliwa skomponowane na bazie estrów olejów biologicznych są zazwyczaj uważane za paliwa zastępcze w stosunku do olejów napędowych służących do zasilania silników o zapłonie samoczynnym [8, 9, 11–13, 16–21, 23–26]

¹ Przemysłowy Instytut Motoryzacji, Dział Nauki, ul. Jagiellońska 55, 03-301 Warszawa, Polska; e-mail: Zdzislaw.Chlopek@pimot.eu

² Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Instytut Pojazdów, ul. Narbutta 84, 02-791 Warszawa, Polska, e-mail: jagiello.sebastian@gmail.com

³ Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Instytut Pojazdów, ul. Narbutta 84, 02-791 Warszawa, Polska, e-mail: sebastianjuwa@interia.pl

⁴ Przemysłowy Instytut Motoryzacji, Dział Nauki, ul. Jagiellońska 55, 03-301 Warszawa, Polska; e-mail: d.zakrzewska@pimot.eu

⁵ Pod pojęciem „charakterystyka” autorzy rozumieją nie tylko zależności, jak jest to zazwyczaj powszechnie stosowane, ale i wartości – w tym wypadku są to charakterystyki zerowymiarowe (inaczej: punktowe). Takie stosowanie nazwy „charakterystyka” jest zgodne ze źródłosłowem rozpatrywanego terminu: podstawowym znaczeniem tego terminu jest – zgodnie ze Słownikiem Języka Polskiego – „opis cech charakteryzujących kogoś lub coś”.

Od paliw zastępczych w stosunku do paliw ropopochodnych oczekuje się, aby było możliwe użytkowanie silników zasilanych zamiennie tymi paliwami albo paliwami klasycznymi, bez dodatkowych zmian konstrukcyjnych i regulacyjnych silników [13]. Istnieje kilka podstawowych kryteriów oceny paliw niekonwencjonalnych ze względu na spełnianie warunków paliw zastępczych. Kryteria te można ogólnie podzielić w następujący sposób:

- kryteria oparte na ocenie właściwości fizyko-chemicznych ze względu na wykorzystanie paliw do zasilania silników,
- kryteria oparte na ocenie właściwości użytkowych silników spalinowych zasilanych ocenianymi paliwami,
- kryteria oparte na ocenie procesów zachodzących w silnikach spalinowych zasilanych ocenianymi paliwami.

Śród kryteriów opartych na ocenie właściwości fizyko-chemicznych można wymienić przede wszystkim: skład elementarny oraz, związane z nim, wartość opałową i stałą stechiometryczną [7–9, 13, 25]. Ważną właściwością jest lepkość paliwa, a także inne wielkości charakteryzujące właściwości trybologiczne paliwa, takie jak np.: skłonność do oddziaływania na materiały konstrukcyjne i eksploatacyjne silników [7, 8, 18, 25]. Ze względów organizacyjnych duże znaczenie ma stabilność paliwa związana z jego właściwościami [7–9, 15].

Śród kryteriów opartych na ocenie właściwości użytkowych silników spalinowych wymienia się przede wszystkim ich właściwości operacyjne, głównie ze względu na właściwości energetyczne (moc użyteczna, moment obrotowy) oraz ekonomiczne (sprawność ogólna i inne charakterystyki zużycia paliwa) [11, 12, 16–21, 23–26]. Ważne są również kryteria ekologiczne, charakteryzujące m.in. emisję zanieczyszczeń i hałasu, czy skłonność paliwa do biodegradowalności [1, 11, 12, 16–21, 23–26]. Do kryteriów opartych na ocenie właściwości użytkowych silników spalinowych należy również zaliczyć właściwości charakteryzujące trwałość i niezawodność silników oraz wymagania związane z ich obsługiwaniem [7, 8, 25].

Procesami zachodzącymi w silnikach spalinowych, głównie determinującymi ich właściwości użytkowe, są przede wszystkim procesy związane z zasilaniem silników oraz ze spalaniem paliwa w ich cylindrach [1, 7, 8, 16, 18, 21, 23].

W niniejszej publikacji zostały przedstawione wybrane wyniki badań porównawczych procesu spalania oleju napędowego i estrów metylowych oleju rzepakowego w silniku o zapłonie samoczynnym. Celem badań była ocena, czy ze względu na właściwości procesu spalania jest uzasadnione traktowanie estrów metylowych oleju rzepakowego jako paliw zastępczych w stosunku do oleju napędowego.

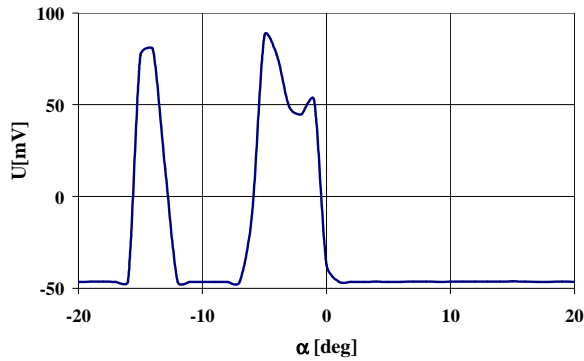
2. Obiekt i program badań

Obiektem badań był jednocylindrowy silnik badawczy o zapłonie samoczynnym AVL 5402 [4] zasilany paliwami:

- klasycznym olejem napędowym – ORLEN VERVA,
- biopaliwem B100 (RME – Rape Methyl Esters – estry metylowe oleju rzepakowego) z dodatkiem letnim – RME – S,
- biopaliwem B100 z dodatkiem zimowym – RME – W.

Badania empiryczne zostały przeprowadzone na stanowisku badawczym AVL Single Cylinder Test Bed [6] z silnikiem badawczym AVL 5402 oraz oprzyrządowaniem sterująco-kontrolnym i pomiarowym. Do rejestracji oraz analizy danych służy oprogramowanie AVL PUMA [5] i AVL CONCERTO [3].

Silnik AVL 5402 ma sterowane ciśnienie doładowania i stopień sprężania. Zastosowany zasobnikowy układ zasilania ma możliwość modyfikacji algorytmu zasilania silnika paliwem. W badaniach stosowano dwufazowy wtrysk paliwa – na rysunku 1 przedstawiono przykładowy przebieg napięcia prądu sterującego otwarcie wtryskiwacza w dziedzinie kąta obrotu wału korbowego, mierzonego względem górnego zwrotnego punktu, w punkcie odpowiadającym prędkości obrotowej 1600 min^{-1} na zewnętrznej charakterystyce.



Rys. 1. Przebieg napięcia prądu sterującego otwarciu wtryskiwacza – U w dziedzinie kąta obrotu wału korbowego – α względem górnego zwrotnego punktu na zewnętrznej charakterystyce dla prędkości obrotowej 1600 min^{-1}

Program badań [12] obejmował pracę silnika w stanach statycznych na zewnętrznej charakterystyce prędkościowej w zakresie prędkości obrotowej ($1200 \div 3600$) min^{-1} co 400 min^{-1} . Podstawowe pomiary obejmowały m.in. następujące wielkości:

- prędkość obrotową – n ,
- moment obrotowy – M_e ,
- masowe natężenie zużycie paliwa – G_f ,
- temperatura spalin – T_{ex} ,
- ciśnienie indykowane – p_g , rejestrowane w dziedzinie kąta obrotu wału korbowego – α a także inne wielkości, nie wykorzystywane do analiz w niniejszej publikacji, m.in.: masowe natężenie zużycia powietrza i stężenia składników spalin oraz pomiary kontrolne.

Zastosowana do badań aparatura [5, 6] spełnia wymagania następujących przepisów: Dyrektywa 1999/96/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 13 grudnia 1999 r., Rozporządzenie (WE) nr 715/2007 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 20 czerwca 2007 r. oraz Rozporządzenie Komisji (WE) nr 692/2008 z dnia 18 lipca 2008 r.

W tabeli przedstawiono podstawowe właściwości fizyko-chemiczne badanych paliw.

Tabela. Podstawowe właściwości fizyko-chemiczne badanych paliw

Wielkość	Jednostka miar	Paliwo		
		ORLEN VERVA	RME – S	RME – W
Gęstość	kg/m^3	832,5	880,0	880,0
Wartość opałowa	MJ/kg	43	38	39
Liczba cetanowa				
Lepkość kinematyczna w temperaturze 40°C	mm^2/s	2,87	4,50	4,49
Skład elementarny paliwa:				
zawartość masowa węgla		0,837	0,772	0,772
zawartość masowa wodoru		0,149	0,120	0,120
zawartość masowa tlenu		0,014	0,108	0,108
zawartość masowa siarki	ppm	7,5	3,0	3,0
Temperatura zablokowania zimnego filtra paliwa	deg C	-28	-15	-20
Temperatura zapłonu paliwa	deg C	65	101	101

Gęstość estrów metylowych oleju rzepakowego jest większa od gęstości oleju napędowego o około 6%, natomiast wartość opałowa jest mniejsza od ponad 10%. Paliwa RME mają lepszą skłonność do samozapłonu – liczbę cetanową większą o około 1,7. Dużo większa jest lepkość kinematyczna paliw RME w 40°C w odniesieniu do oleju napędowego – o prawie 60%, co ma istotny wpływ na właściwości rozruchowe silników w niskiej temperaturze otoczenia.

Biopaliwa mają znacznie większy udział masowy tlenu – w badanych wypadkach prawie rząd wielkości większy niż w wypadku oleju napędowego. Zawartość siarki w badanych paliwach jest śladowa, jednak w RME o 60% mniejsza – obecnie, gdy stosuje się powszechnie oleje napędowe o małej zawartości siarki, właściwość ta straciła na znaczeniu w stosunku do czasów wprowadzenia do użytku biopaliw.

Istotne różnice są w wartościach temperatury zablokowania zimnego filtra paliwa – zdecydowanie gorsze są właściwości biopaliw, szczególnie wersji letniej – RMR – S, co skutkuje gorszymi właściwościami rozruchowymi tego paliwa w stosunku do klasycznych olejów napędowych.

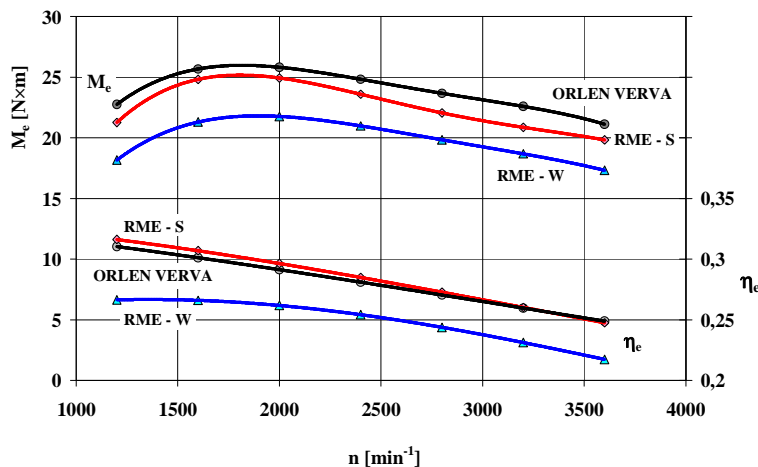
Temperatura zapłonu paliw RME jest o ponad 30°C wyższa od temperatury zapłonu oleju napędowego, co może mieć eksploatacyjną interpretację jako lepsze w stosunku do oleju napędowego właściwości charakteryzujące bezpieczeństwo układu paliwowego silnika.

3. Wyniki badań

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono mniejsze wartości momentu obrotowego – M_e w całym zakresie prędkości obrotowej – n : wartość różnicy względnej momentu obrotowego wynosi (rysunek 2):

- dla paliwa RME – S w stosunku do oleju napędowego średnio o około 6% (od 3% do 8%),
- dla paliwa RME – W w stosunku do oleju napędowego średnio o około 17% (od 12% do 20%).

Sprawność ogólna silnika zasilanego olejem napędowym i letnim biopaliwem jest porównywalna z dokładnością do około 1% różnicy względnej, natomiast dla biopaliwa zimowego różnica względna sprawności ogólnej w stosunku do oleju napędowego jest wyraźna – średnio 11% (od 10% do 14%) na niekorzyść paliwa RME – W.



Rys. 2. Charakterystyka prędkościowa momentu obrotowego – M_e i sprawności ogólnej – η_e .

Wartość maksymalna momentu obrotowego występuje dla prędkości obrotowej równej około 1600 min^{-1} , a największej mocy użytecznej dla 3600 min^{-1} .

Rejestracja indykowania cylindra silnika polegała na zapisywaniu w dziedzinie obrotu wału korbowego 20 cykli ciśnienia indykowanego w każdym punkcie badań. Komplet 20 zarejestrowanych w każdym punkcie pomiarowym przebiegów ciśnienia indykowanego jest traktowany jako zbiór realizacji procesu stochastycznego ciśnienia indykowanego w tym punkcie. Rejestracji dokonywano z rozdzielczością 1 deg⁶ obrotu wału korbowego, a w przedziale (–30 ÷ 90) deg dla górnego zwrotnego położenia tłoka, odpowiadającego spalaniu, z rozdzielczością 0,1 deg. W celu zmniejszenia udziału szumów o wysokiej częstotliwości w sygnałach, dokonano ich przetwarzania w postaci uśredniania synchronicznego [10, 22].

Badania procesów zachodzących w cylindrze silnika są wykonywane dla przedziału obrotu wału korbowego zawierającego proces spalania.

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono dla badanych paliw porównanie ciśnienia indykowanego i pochodnej ciśnienia indykowanego względem kąta obrotu wału korbowego w punkcie pracy

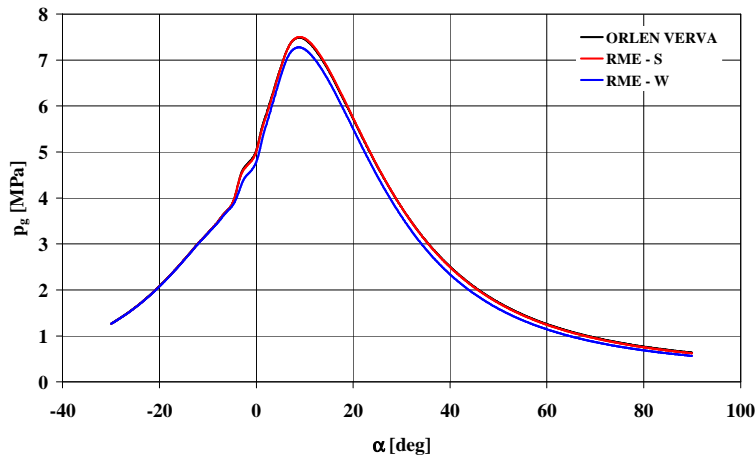
⁶ Ponieważ w pracy wykorzystuje się różniczkowanie względem kąta, do oznaczenia stopnia stosuje się „deg” a nie „°”, aby uniknąć symbolu „°” w mianowniku oznaczenia jednostki miary pochodnej względem kąta.

odpowiadającym maksymalnemu momentowi obrotowemu. Zgrubny estymator różniczkowania numerycznego został poddany filtrowaniu dolnoprzepustowemu w celu zmniejszenia w sygnale udziału szumów o dużej częstotliwości [14, 15]. Do filtracji zastosowano pięciokrotnie filtr nierekurencyjny [10, 14, 15, 22]:

$$\bar{y}_i = \frac{1}{11} \sum_{j=i-5}^{i+5} y_j$$

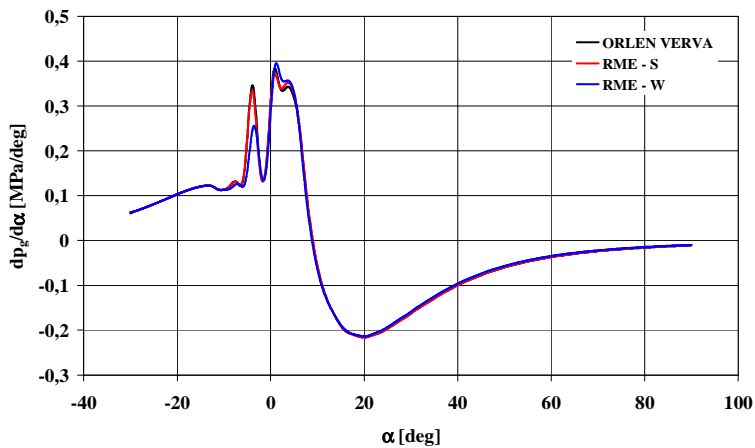
gdzie: y – estymator zgrubny,

\bar{y} – estymator przefiltrowany.



Rys. 3. Wykres indykatorowy – ciśnienie indykowane – p_g dla maksymalnego momentu obrotowego ($n = 1600 \text{ min}^{-1}$)

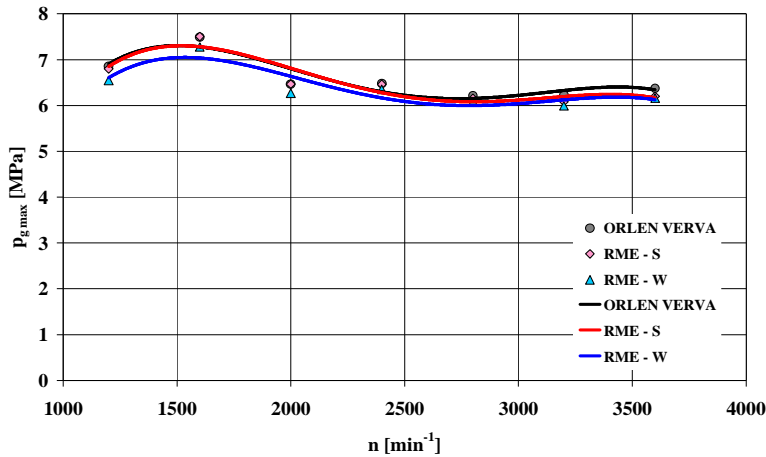
Wykresy indykatorowe dla paliw ORLEN VERVA i RME – S są zbliżone do siebie. Nieznacznie mniejsze jest ciśnienie indykowane w wypadku paliwa RME – W.



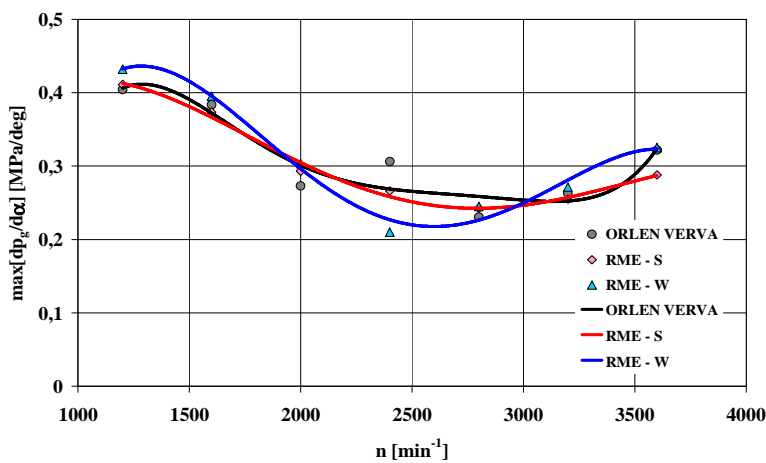
Rys. 4. Pochodna ciśnienia indykowanego względem kąta obrotu wału korbowego – $dp_g/d\alpha$ dla maksymalnego momentu obrotowego ($n = 1600 \text{ min}^{-1}$)

Również w wypadku pochodnej ciśnienia indykowanego względem kąta obrotu wału korbowego podobieństwo przebiegów dla paliw ORLEN VERVA i RME – S jest znaczne. W wypadku paliwa RME – W szczególnie duża różnica jest dla pierwszego maksimum dla biopaliwa zimowego jest to mniejsza wartość.

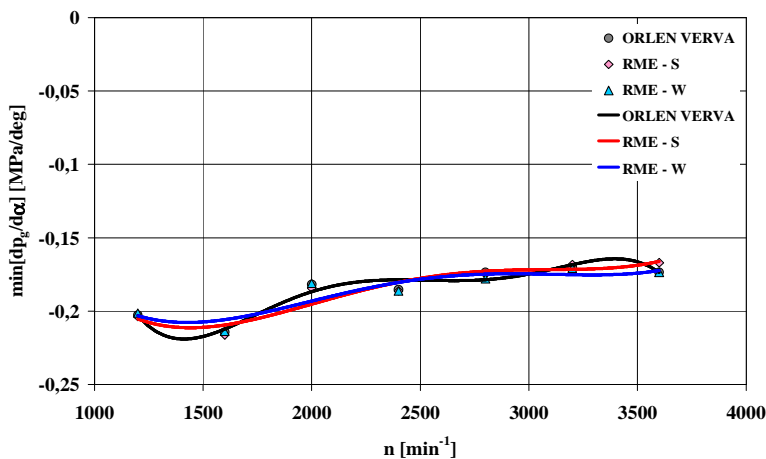
Na rysunkach 5–7 przedstawiono charakterystyki prędkościowe maksymalnego ciśnienia indykowanego oraz ekstremalnych wartości pochodnej ciśnienia indykowanego względem kąta obrotu wału korbowego.



Rys. 5. Charakterystyka prędkościowa maksymalnego ciśnienia indykowanego – p_{gmax}



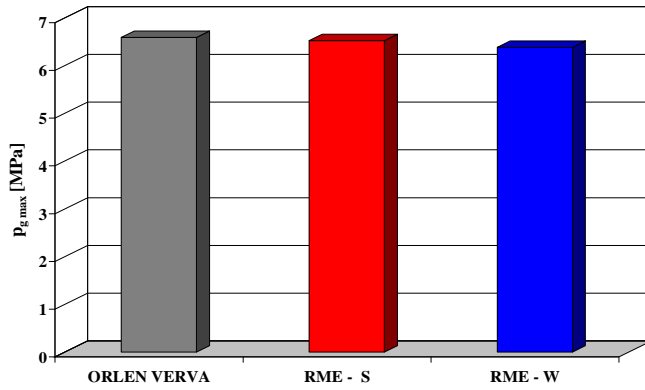
Rys. 6. Charakterystyka prędkościowa maksymalnej pochodnej ciśnienia indykowanego względem kąta obrotu wału korbowego – $\max[dp_g/d\alpha]$



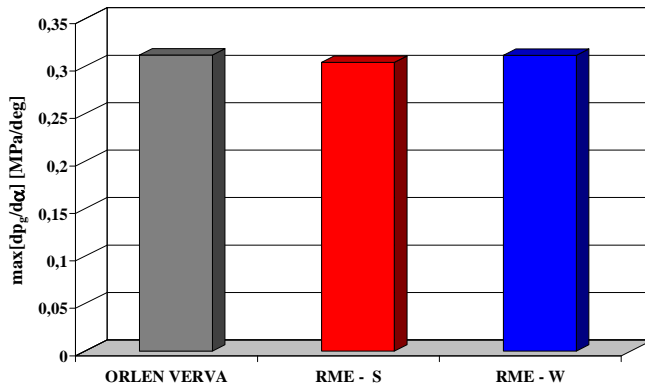
Rys. 7. Charakterystyka prędkościowa minimalnej pochodnej ciśnienia indykowanego względem kąta obrotu wału korbowego – $\min[dp_g/d\alpha]$

Również w wypadku przedstawionych charakterystyk prędkościowych zauważa się ich podobieństwo w wypadku paliw ORLEN VERVA i RME – S.

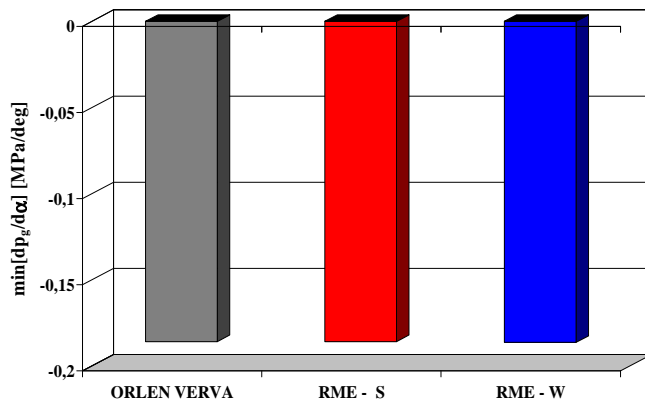
Na rysunkach 8–10 przedstawiono wartość średnią w dziedzinie prędkości obrotowej: maksymalnego ciśnienia indykowanego, maksymalnej pochodnej ciśnienia indykowanego względem kąta obrotu wału korbowego oraz minimalnej pochodnej ciśnienia indykowanego względem kąta obrotu wału korbowego.



Rys. 8. Wartość średnia w dziedzinie prędkości obrotowej maksymalnego ciśnienia indykowanego – $P_{g,max}$



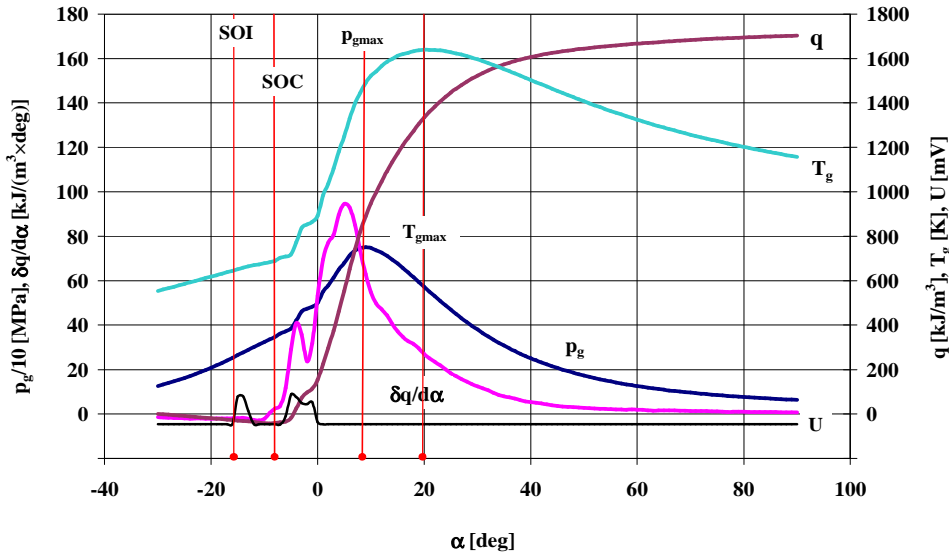
Rys. 9. Wartość średnia w dziedzinie prędkości obrotowej maksymalnej pochodnej ciśnienia indykowanego względem kąta obrotu wału korbowego – $\max[dp_g/d\alpha]$



Rys. 10. Wartość średnia w dziedzinie prędkości obrotowej minimalnej pochodnej ciśnienia indykowanego względem kąta obrotu wału korbowego – $\min[dp_g/d\alpha]$

Różnice wartości średniej w dziedzinie prędkości obrotowej badanych wielkości są niewielkie – współczynnik zmienności zbiorów tych wielkości nie przekracza 2%.

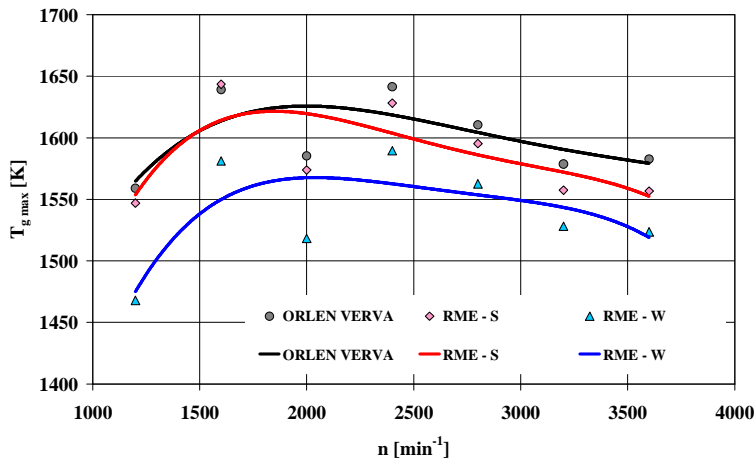
Na podstawie zarejestrowanych przebiegów ciśnienia indykowanego oraz informacji związanych z parametrami silnika i paliw wyznaczono, zgodnie z algorytmem AVL CONCERTO, przebiegi: ciepła jednostkowego odniesionego do objętości skokowej cylindra, szybkości wydzielania się ciepła jednostkowego i temperatury czynnika. Na rysunku 11 przedstawiono przebiegi tych wielkości punktu odpowiadającego maksymalnemu momentowi obrotowemu. Na wykresie zaznaczono kąty obrotu wału korbowego odpowiadające początkowi wtrysku paliwa, samozapłonowi oraz maksymalnemu ciśnieniu indykowanemu i maksymalnej temperaturze czynnika.



Rys. 11. Ciężnienie indykowane – p_g , temperatura czynnika – T_g , szybkość wydzielania się ciepła jednostkowego – $\delta q/d\alpha$.

(δ – forma Pfaffa), ciepło jednostkowe – q i napięcie sygnału sterującego otwarcie wtryskiwacza – U dla maksymalnego momentu obrotowego ($n = 1600 \text{ min}^{-1}$) dla paliwa ORLEN VERVA; SOI – kąt początku wtrysku, SOC – kąt samozapłonu, p_{gmax} – maksymalne ciśnienie indykowane, T_{gmax} – maksymalna temperatura czynnika

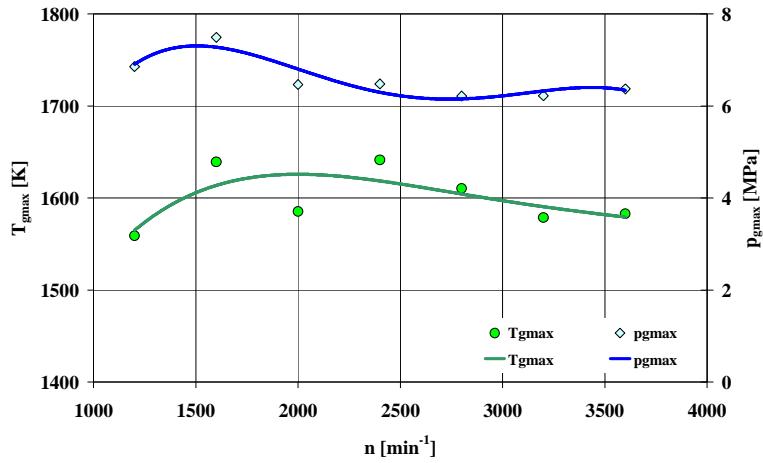
Na rysunku 12 przedstawiono charakterystykę prędkościową maksymalnej temperatury czynnika.



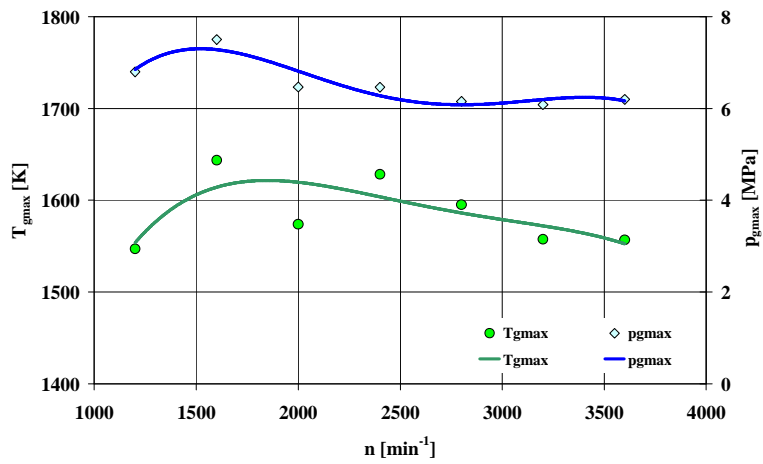
Rys. 12. Charakterystyka prędkościowa maksymalnej temperatury czynnika – T_{gmax}

Charakterystyki maksymalnej temperatury czynnika dla oleju napędowego i biopaliwa letniego są do siebie zbliżone, dla biopaliwa zimowego maksymalna temperatura jest o około 50 K niższa.

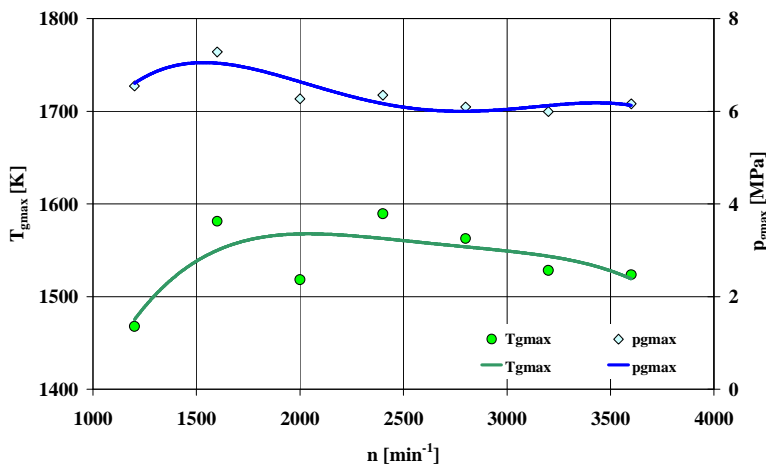
W celu analizy charakterystyki prędkościowej maksymalnej temperatury czynnika na rysunkach 13–15 przedstawiono na wykresach charakterystyki prędkościowe maksymalnej temperatury czynnika i maksymalnego ciśnienia indykowanego dla poszczególnych paliw.



Rys. 13. Charakterystyka prędkościowa maksymalnej temperatury czynnika – T_{gmax} i maksymalnego ciśnienia indykowanego – p_{gmax} dla paliwa ORLEN VERVA

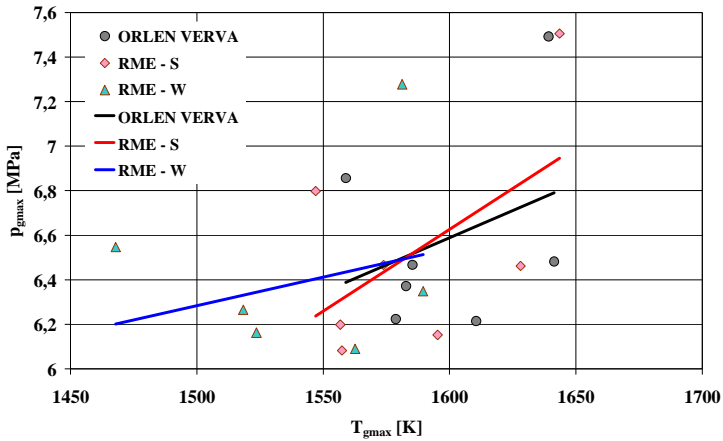


Rys. 14. Charakterystyka prędkościowa maksymalnej temperatury czynnika – T_{gmax} i maksymalnego ciśnienia indykowanego – p_{gmax} dla paliwa RME – S



Rys. 15. Charakterystyka prędkościowa maksymalnej temperatury czynnika – T_{gmax} i maksymalnego ciśnienia indykowanego – p_{gmax} dla paliwa RME – W

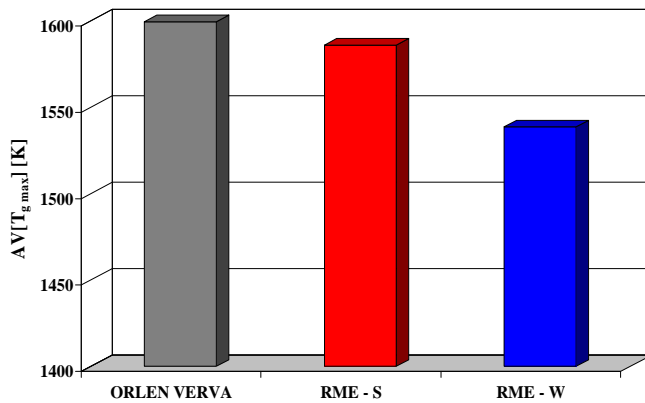
Na rysunku 16 przedstawiono zależność korelacyjną maksymalnego ciśnienia indykowanego – p_{gmax} i maksymalnej temperatury czynnika – T_{gmax} .



Rys. 16. Zależność korelacyjna maksymalnego ciśnienia indykowanego – p_{gmax} i maksymalnej temperatury czynnika – T_{gmax}

Korelację między badanymi zbiorami należy ocenić jako słabą. Współczynnik korelacji liniowej Pearsona nie przekracza 0,55, a prawdopodobieństwo nieodrzućcia hipotezy o braku korelacji liniowej jest większe od 0,19.

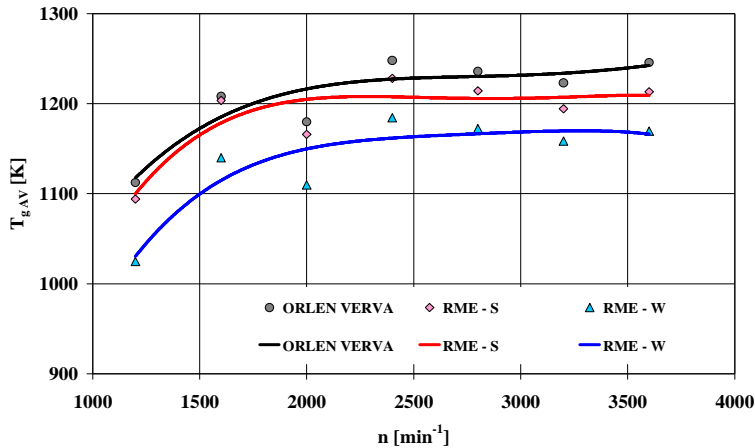
Na rysunku 17 przedstawiono wartość średnią w dziedzinie prędkości obrotowej maksymalnej temperatury czynnika.



Rys. 17. Wartość średnia w dziedzinie prędkości obrotowej maksymalnej temperatury czynnika – $AV[T_{gmax}]$

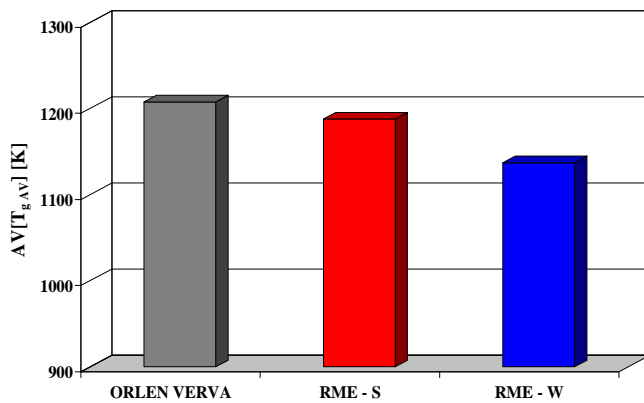
Najwyższa maksymalna temperatura czynnika jest dla oleju napędowego. Znacznie wyższa jest maksymalna temperatura czynnika w wypadku estrów metylowych oleju rzepakowego z dodatkiem letnim w porównaniu do biopaliwa z dodatkiem zimowym.

Na rysunku 18 przedstawiono charakterystykę prędkościową średniej w dziedzinie kąta obrotu wału korbowego temperatury czynnika.



Rys. 18. Charakterystyka prędkościowa średniej w dziedzinie kąta obrotu wału korbowego temperatury czynnika – $T_{g,AV}$

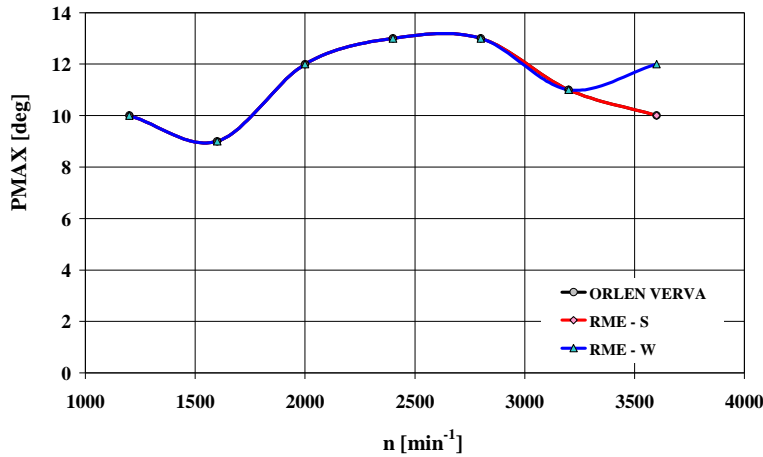
Również średnia w dziedzinie kąta obrotu wału korbowego temperatury czynnika jest najwyższa dla paliwa ORLEN VERVA. Występuje także duża różnica temperatury czynnika uśrednianej w dziedzinie kąta obrotu wału korbowego dla obydwu rodzajów biopaliw. Potwierdza to znaczna różnica wartości średniej w dziedzinie prędkości obrotowej wartości średniej w dziedzinie kąta obrotu wału korbowego temperatury czynnika – rysunek 19.



Rys. 19. Wartość średnia w dziedzinie prędkości obrotowej wartości średniej w dziedzinie kąta obrotu wału korbowego temperatury czynnika – $AV[T_{g,AV}]$

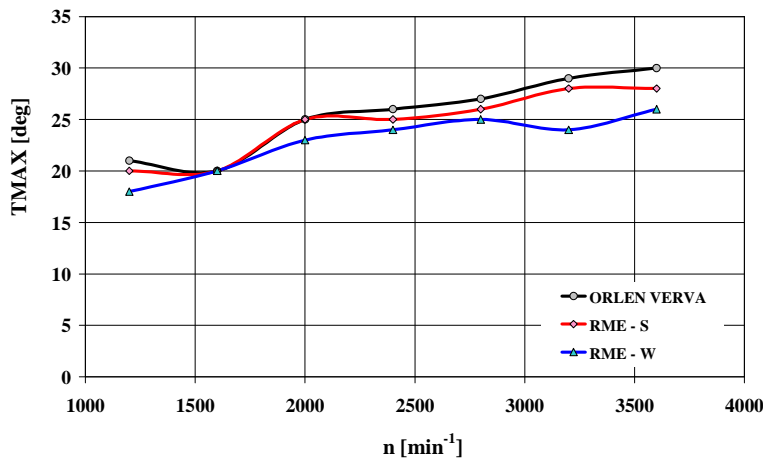
Podobnie jak w poprzednich wypadkach wartość średnia w dziedzinie prędkości obrotowej wartości średniej w dziedzinie kąta obrotu wału korbowego temperatury czynnika jest największa dla oleju napędowego, a zdecydowanie najmniejsza dla estrów oleju rzepakowego z dodatkiem zimowym.

Na rysunkach 20 i 21 przedstawiono charakterystyki prędkościowe kątów obrotu wału korbowego, odpowiadających maksymalnemu ciśnieniu indykowanemu i maksymalnej temperaturze czynnika.



Rys. 20. Charakterystyka prędkościowa kąta obrotu wału korbowego odpowiadającemu maksymalnemu ciśnieniu indykowanemu – PMAX

Kąt obrotu wału korbowego odpowiadający maksymalnemu ciśnieniu indykowanemu jest mało wrażliwy na prędkość obrotową i mieści się w granicach (9 ÷ 13)°. Wpływ rodzaju zastosowanego paliwa na ten kąt jest niewielki.



Rys. 21. Charakterystyka prędkościowa kąta obrotu wału korbowego odpowiadającemu maksymalnej temperaturze czynnika – TMAX

Kąt obrotu wału korbowego odpowiadający maksymalnej temperaturze czynnika jest rosnącą funkcją prędkości obrotowej, jednak wrażliwość tego kąta na prędkość obrotową jest niewielka. Maksymalna temperatura czynnika dla oleju napędowego występuje przeciętnie dla największego kąta obrotu wału korbowego w przeciwieństwie do biopaliwa zimowego, jednak opisywane różnice nie są duże – rzędu kilku stopni.

4. Podsumowanie

Przedstawione wyniki badań empirycznych i ich analizy upoważniają do sformułowania następujących wniosków:

1. Ze względu na rozpatrywane kryteria podobieństwa, stosowane w niniejszej pracy w odniesieniu do badanych procesów spalania, stwierdzono znaczne podobieństwo ocenianych charakterystyk dla paliw ORLEN VERVA i RME – S. Zależność ta występuje mimo stosunkowo dużych niekiedy różnic w wartościach wielkości charakteryzujących właściwości fizyko-chemiczne tych paliw, szczególnie wartości opałowej i lepkości.
2. Wyznaczone w pracy charakterystyki dla paliwa RME – W w większości wypadków odbiegają od analogicznych charakterystyk dla pozostałych paliw, mimo znacznego podobieństwa właściwości fizyko-chemicznych obydwu rodzajów biopaliw. Przyczyną zaistniałej sytuacji są przede wszystkim właściwości pakietów dodatku letniego i dodatku zimowego, stosowanych do estrów metylowych oleju rzepakowego. Ze szczegółowych różnic w wypadku wyników badań należy zwrócić uwagę na nieznacznie mniejsze

ciśnienie indykowane oraz temperaturę w czasie spalania dla paliwa RME – W. Ogólnie oceniane w niniejszym punkcie różnice należy jednak ocenić jako niewielkie.

W podsumowaniu przeprowadzonych rozważań można stwierdzić, że – ze względu na rozpatrywane w pracy kryteria podobieństwa – istnieje podstawa do uznania, iż badane paliwa na bazie estrów metylowych oleju rzepakowego spełniają warunki, aby uznać je za paliwa zastępcze w stosunku do oleju napędowego.

Podziękowanie

Badania empiryczne silnika spalinowego przeprowadzono w Zakładzie Pojazdów i Silników Samochodowych Instytutu Eksploatacji Pojazdów i Maszyn na Wydziale Mechanicznego Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu w ramach realizacji prac inżynierskich przez Sebastiana Jagiełłę i Sebastiana Juwę [12]. Wyniki badań były również wykorzystane do realizacji pracy magisterskiej inż. Dagny Zakrzewskiej. Autorzy artykułu wyrażają swą wdzięczność władzom i pracownikom Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, w szczególności dyrektorowi Instytutu Eksploatacji Pojazdów i Maszyn i kierownikowi Zakładu Pojazdów i Silników Samochodowych Panu prof. drowi hab. inż. Sławomirowi Luftowi, a także pracownikom Zakładu Panu drowi inż. Tomaszowi Skrzekowi i drowi inż. Grzegorzowi Pawlakowi za umożliwienie przeprowadzenia dyplomantom badań.

The full text of the article is available in Polish online on the website

<http://archiwummotoryzacji.pl>

Tekst artykułu w polskiej wersji językowej dostępny jest na stronie

<http://archiwummotoryzacji.pl>

Literatura

- [1] Ambrozik A, Orliński P, Orliński S. Influence of diesel engine fuelling with different fuels on self-ignition delay in aspect of ecology. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* Nr 3/2003. 50–55.
- [2] AVL: BOOST. Version 2011. Theory. 07/2011.
- [3] AVL: CONCERTO™ – Data Post-Processing. <https://www.avl.com/-/avl-concerto-data-post-processing>. (2015.07.11).
- [4] AVL: Product Description. Single cylinder research engine.
- [5] AVL: PUMA Open Automation Platform. <https://www.avl.com/-/avl-puma-open-automation-platform>. (2015.07.11).
- [6] AVL: Testing Solutions. Measure and Control. Single Cylinder Research Engines & Compact Test Bed.
- [7] Baczewski K, Kałdoński T. Paliwa do silników o zapłonie iskrowym. WKŁ 2005.
- [8] Baczewski K, Kałdoński T. Paliwa do silników o zapłonie samoczynnym. WKŁ 2008.
- [9] Bajdor K, Biernat K. Biopaliwa jako alternatywne nośniki energii w silnikach spalinowych, klasyfikacja i perspektywy rozwoju. *The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji* 2011; 1. 5–19.
- [10] Bendat J S, Piersol A G, *Random data: analysis & measurement procedures*. Wiley New York. 1966.
- [11] Chłopek Z, Bardziński W, Jarczewski M, Sar H. Influence of fatty acid methyl esters' additive to diesel engine on ecology, fuel consumption and vehicle's performance. *Journal of KONES* 2006. 1. 261–268.
- [12] Chłopek Z, Jagiełło S, Juwa S, Skrzek T. Badania porównawcze właściwości użytkowych silnika spalinowego zasilanego olejem napędowym i estrami metylowymi oleju rzepakowego. *The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji*. (Praca w druku).
- [13] Chłopek Z. *Ekologiczne aspekty motoryzacji i bezpieczeństwo ruchu drogowego*. Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2012.
- [14] Chłopek Z. On selected methods of numerical differentiation on the example of cylindrical pressure course differentiation. *Journal of KONES* 2001. 54–64.
- [15] Chłopek Z. The subject of task explicitness in numerical differentiation. *Journal of Kones* 2001. 65–76.

- [16] Crookes R. J, Korakianitis T, Namasivayam A M. A systematic experimental assessment of the use of rapeseed methyl ester (RME) as a compression ignition engine fuel during conventional and dual-fuel operation. TAE 7th International Colloquium on Fuels. Stuttgart. 2009.
- [17] Czerwinski J. et. al.: Influences of alternative fuels GTL, RME & ROR on combustion and emissions of a modern HD-diesel engine. Verbrennungsforschung in der Schweiz, BfE Tagung, ETHZ 2009.
- [18] Hopp M. Untersuchung des Einspritzverhaltens und des thermischen Motorprozesses bei Verwendung von Rapsöl und Rapsmethylester in einem Common-Rail-Dieselmotor. Dissertation. Universität Rostock, 2005.
- [19] Kowalewicz A. Eco-diesel engine fuelled with rapeseed oil methyl ester and ethanol. Part 3: combustion processes. Proc. IMechE 2006 Vol. 220 Part D: J. Automobile Engineering. 1283–1291.
- [20] Labeckas G, Slavinskas S. The effect of rapeseed oil methyl ester on direct injection diesel engine performance and exhaust emissions. Energy Conversion and Management 47 (2006) 1954–1967.
- [21] Mancaruso E, Vaglio B M. Premixed combustion of GTL and RME fuels in a single cylinder research engine. Applied Energy Volume 91, Issue 1, March 2012. 385–394.
- [22] Ralston A., Wilf H. S.: Mathematical methods for digital computers. John Wiley. New York 1960.
- [23] Ruan D F, Cheng W L, Lee C F. Comparison of performance and combustion characteristics of diesel fuel and vegetable oils in diesel engine. 2008 SAE International Powertrains, Fuels and Lubricants Congress. Shanghai, China. 2008.
- [24] Scholz C, Starý P. Experimental study of common rail injection diesel engine fuelled with RME and diesel fuel. XLII International Scientific Conference of Czech and Slovak University Departments and Institutions Dealing with the Research of Combustion Engines. Zilina, Slovakia, 2011.
- [25] Szlachta Z. Zasilanie silników wysokoprężnych paliwami rzepakowymi. WKŁ. Warszawa 2002.
- [26] Yoshida K. et al. Effects of RME30 on exhaust emissions and combustion in a diesel engine. SAE 2008–01–2499.