

**dr inż. Mirosław Karczewski**

Wydział Mechaniczny  
Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu  
Wojskowa Akademia Techniczna,  
ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa  
E-mail [mirosław.karczewski@wat.edu.pl](mailto:mirosław.karczewski@wat.edu.pl)

**dr inż. Leszek Szczęch**

Wydział Mechaniczny  
Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu  
Wojskowa Akademia Techniczna,  
ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa  
E-mail [leszek.szczuch@wat.edu.pl](mailto:leszek.szczuch@wat.edu.pl)

**Wpływ mieszanin jednolitego paliwa pola walki F-34 z biokomponentami na parametry użyteczne silnika**

**Słowa kluczowe:** *silnik spalinowy, układ zasilania, paliwo F-34, RME – estry metylowe kwasów oleju rzepakowego*

**Streszczenie:** Problemy zasilania silników pojazdów wojskowych narastają wraz ze wzrostem liczby pojazdów w armiach. Silniki tłokowe i turbinowe wykorzystują paliwa różniące się zakresem temperatury destylacji. Dodatkowym problemem przy zasilaniu współczesnych silników spalinowych jest konieczność stosowania biokomponentów, które mogą zmieniać właściwości paliw podstawowych i wpływać na pogorszenie przebiegu spalania. Dlatego też konieczne jest podejmowanie działań prowadzących do zbadania wpływu paliw pochodzących ze źródeł odnawialnych na parametry pracy silników.

Celem badań było ocena wpływu zastosowanego paliwa na parametry użyteczne i skład spalin tłokowego silnika o zapłonie samoczynnym Renault G9T. Badania przeprowadzono podczas zasilania silnika sześcioma rodzajami paliwa: paliwem podstawowym, jakim był olej napędowy, paliwem lotniczym o kodzie NATO F-34, mieszaninami paliw: F-34 i estrów metylowych wyższych kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że parametry silnika Renault G9T z wysokociśnieniowym układem wtrysku, zasilanego paliwem F-34 i biokomponentami uległy pogorszeniu w stosunku do podstawowego paliwa, jakim był olej napędowy, co może mieć znaczenie przy wykorzystaniu tego rodzaju paliw w silnikach pojazdów wojskowych.

**Keywords:** *IC engine, fuel supply system, F-34 fuel, RME- Rapeseed Methyl Esters*

**Abstract:** The problem of the military vehicles engines fuelling increases with the growth of the amount of vehicles in the armies. At the same time, another problem with fuel supply in modern engines is the use of bio component additives, which changes characteristics (quality) of the used fuels. Therefore, it is important to take actions to adapt engines to powering with fuels coming from renewable sources.

The aim of the research was to define the influence of an engine supplying fuel on work parameters and exhaust gases composition in the G9T Renault diesel engine. The tests were conducted during fuelling of the engine with six kinds of fuels: basic fuel (diesel oil), NATO code F-34 fuel, as well as fuel mixtures: F-34 and RME with different ratio. In the result of the research it was concluded that the parameters of the G9T Renault engine with the common rail fuel system in terms of F-34 and RME consumption (using) decreased in comparison to diesel oil basic fuel.

## 1. Wprowadzenie

Paliwa ciekłe są najważniejszymi źródłami energii na współczesnym polu walki. Dostępność paliw decyduje o ruchliwości wojsk, efektywności wykorzystania uzbrojenia i innego sprzętu pomocniczego oraz dostawach odpowiedniej ilości zaopatrzenia. Spełnienie rosnącego zapotrzebowania walczących wojsk w materiały pędne jest jednym z najtrudniejszych problemów logistycznego zabezpieczenia pola walki. Kalkuluje się, że średniodobowe zapotrzebowanie na materiały pędnych i smarów liczone na jednego żołnierza może sięgać do 30 kg [4,11]. Dostarczenie tak dużych ilości tych materiałów wojskom w warunkach oddziaływania przeciwnika na system komunikacyjny i infrastrukturę zaopatrzeniową jest problemem niezwykle skomplikowanym. Dlatego dąży się do ujednoczenia asortymentu paliwa w wojsku, a przykładem tego jest wprowadzanie w NATO jednolitego paliwa pola walki F-34. W efekcie zdecydowano się ujednoczyć paliwa do silników tłokowych pojazdów mechanicznych i turbinowych silników spalinowych stosowanych w samolotach stacjonujących na lądzie. Wprowadzono paliwo oznaczone symbolem F-34/35, które ma identyczną bazę jak paliwo lotnicze JP8 (JET-A1), a jego właściwości końcowe wynikają z dodatków wprowadzanych przed ostateczną dystrybucją paliwa do zbiornika pojazdu.

Obecnie paliwo F-34/35 zostało przyjęte, jako jednolite paliwo pola walki do wszystkich silników o zapłonie samoczynnym państw NATO. W końcu XX wieku paliwo F-34 zostało poddane szerokim badaniom, które dotyczyły głównie silników starszej generacji z rzędowymi i rozdzielaczowymi pompami wtryskowymi [2], bez uwzględnienia silników z wysokociśnieniowymi układami wtryskowymi typu Common Rail. Od czasu prac prowadzonych nad wdrożeniem tego paliwa zmienił się osprzęt silników, zamiast tłoczkowych pomp wtryskowych obecnie powszechnie stosowane są systemy wtrysku wysokociśnieniowego Common Rail oraz systemy oparte na pompowtryskiwaczach. W układach tych ciśnienie paliwa jest podnoszone do (140 ÷ 200) MPa co w znaczący sposób wpływa na właściwości paliwa w momencie wtrysku [7,8,10,13,14]. Zmienia to istotnie warunki termiczne paliwa przed wtryskiem do komory spalania, a jego temperatura jest dużo wyższa w porównaniu z temperaturą paliwa w klasycznej pompie tłoczkowej.

Układy wtryskowe typu Common Rail są już powszechnie stosowane w silnikach samochodów osobowych dostawczych, ciężarowych, lokomotyw i jednostek pływających, a także wozów bojowych np. silniki MTU serii MT 880, w których zastąpiono układy wtryskowe z pompami tłoczkowymi stosowane w początkowych wersjach. Układy zasilania Common Rail są także masowo wykorzystywane w pojazdach ciężarowych znajdujących się obecnie na wyposażeniu Wojska Polskiego, np. MAN, IVECO i inne.

Zastosowanie samego paliwa F-34 do zasilania silnika z układem Common Rail może spowodować istotne zmiany parametrów jego pracy. Badania własne silnika G9T z takim układem zasilania przeprowadzone w Wojskowej Akademii Technicznej [10, 11] wykazały wyraźne zmniejszenie jego maksymalnego momentu obrotowego, obniżenie udziału tlenków azotu w spalinach oraz zwiększenie jednostkowego zużycia paliwa.

Tabela 1. Wybrane własności fizykochemiczne paliw stosowanych podczas badań [3, 11]

Parametr	Jednostka miary	ON IZ-40	RME	Paliwo F-34
Gęstość w temp. 15°C	g/cm <sup>3</sup>	0,831	0,881	0,804
Wartość opałowa	MJ/kg	43,2	38,3	42,8
Temperatura zapłonu	°C	66	177	57
Temp. zablokowania zimnego filtra	°C	-31	-9	-54
Lepkość kinematyczna w 40°C	mm <sup>2</sup> /s	2,35	4,60	1,27
Zawartość siarki	mg/kg	350	19	3 000
Liczba cetanowa	-	50	43	45

W porównaniu z olejem napędowym paliwa F-34/F-35 charakteryzują się: lepszymi właściwościami niskotemperaturowymi, mniejszą lepkością, mniejszą liczbą cetanową, mniejszą

wartością opałową. Zalety techniczne jednolitego paliwa to: zgodność z paliwem lotniczym (JET-A1) do samolotów, mniejsza podatność na zanieczyszczenia biologiczne, dostępność na lotniskach całego świata, lepsze własności niskotemperaturowe, zmniejszenie ryzyka pożaru w porównaniu z paliwami szerokofrakcyjnymi, zmniejszona emisja zanieczyszczeń. Zalety logistyczne to: obrót tylko jednym paliwem w całej armii, uproszczenie łańcucha dostaw, jednolita infrastruktura składów i magazynów.

Wadami jednolitego paliwa są: wzrost zapotrzebowania i popytu na paliwa oparte na bazie ropy naftowej i spadek popytu na inne paliwa, co może spowodować wzrost ceny paliwa, spadek mocy użytecznej silników ze względu na zmniejszenie wartości opałowej paliwa, konieczność modernizacji obecnie wykorzystywanego sprzętu i stosowania dodatków.

Zastosowanie paliw wykorzystujących składniki odnawialne takie jak estry metylowe oleju rzepakowego (RME) może skrócić łańcuch dostaw ze względu na wykorzystanie zasobów ziarna rzepakowego z elewatorów zbożowych znajdujących się w całym kraju. Konieczne jedynie jest wyposażenie Wojska w mobilne instalacje do tłoczenia oleju i estryzacji. Zmniejsza się wtedy wrażliwość armii na zachwiania płynności dostaw w razie konfliktu zbrojnego.

Paliwa „estrowe” różnią się zasadniczo od paliw ropopochodnych właściwościami fizykochemicznymi, dlatego w przypadku ich mieszania zmieniają się parametry produktów końcowych. Zmiana właściwości fizykochemicznych paliwa wiąże się również ze zmianą parametrów pracy silnika [12]. Prezentowane w różnych publikacjach wyniki stosowania estrów metylowych oleju rzepakowego w postaci czystej lub w mieszaninie z olejem napędowym do zasilania silników o zapłonie samoczynnym są na ogół zbliżone, jednakże nie są publikowane wyniki badań mieszanin RME z paliwem F-34. Badania przeprowadzone na silnikach różniących się systemami spalania, mocą użyteczną i prędkością obrotową wykazały, że dodatek biokomponentu do oleju napędowego wywiera wpływ na moc użyteczną silnika, powodując jej zmniejszenie w całym zakresie prędkości o ok. (5 ÷ 15)% i znaczący wzrost zużycia paliwa ok. 15% [1,4,5,9,14].

Paliwo składające się z estrów metylowych oleju rzepakowego ma nieco inne właściwości niż paliwo węglowodorowe, wynikające z odmiennego składu, ponieważ w strukturze oprócz węgla i wodoru zawiera również dość dużą ilość tlenu (ok. 12%). Zawartość tlenu oraz wiązania nienasycone sprzyjają samozapłonowi oraz zupełnemu i całkowitemu spalaniu. Tlen zawarty w paliwie wykazuje większą aktywność niż tlen zawarty w powietrzu, co powoduje zwiększenie liczby cetanowej tego paliwa. Zmiana przebiegu procesu spalania wpływa korzystnie na stężenia związków toksycznych w spalinach oraz zmniejszenie zadymienia. Wadą estrów metylowych oleju rzepakowego jest duża zawartość wody oraz agresywne oddziaływanie na elementy gumowe i powłoki lakierowe [6, 9, 12]. Paliwo to ma większą gęstość i lepkość, dlatego jego dodanie do standardowego paliwa F-34 powinno spowodować zbliżenie właściwości paliwa F-34 do oleju napędowego.

## **2. Cel i zakres pracy**

Aktualna sytuacja paliwowa na świecie oraz przewidywane zmniejszanie się naturalnych zasobów ropy naftowej zmusza do poszukiwania nowych rodzajów paliw. Dotyczy to także paliw stosowanych do zasilania pojazdów wojskowych. Mimo przyjęcia przez państwa NATO paliwa F-34 jako paliwa podstawowego, rozważana jest bardzo poważnie sytuacja, w której konieczne będzie uzupełnianie tego paliwa o produkty nie pochodzące z przeróbki ropy naftowej. Jednocześnie zauważalny jest wzrost liczby pojazdów w jednostkach wojskowych wyposażonych w silniki o zapłonie samoczynnym z układami wtryskowymi opartymi na pompowtryskiwaczach oraz wykorzystującymi system Common Rail. Niezależnie od sposobu uzyskiwania wysokiego ciśnienia paliwa podstawowym problemem są zjawiska zachodzące podczas wtrysku paliwa pod wysokim ciśnieniem oraz proces tworzenia mieszanki palnej i spalania.

Celem prezentowanych badań była empiryczna ocena wpływu paliwa F-34 i mieszaniny paliwa F-34 z biokomponentami w postaci estrów metylowych oleju rzepakowego (RME) na osiągi silnika o zapłonie samoczynnym z wysokociśnieniowym wtryskiem paliwa na przykładzie systemu Common Rail.

## **3. Obiekt, metodyka i zakres badań**

Obiektem badań był czterocylindrowy silnik o zapłonie samoczynnym Renault G9T, o mocy znamionowej 95 kW przy  $n = 2500 \text{ min}^{-1}$  i o momencie 280 N\*m przy  $n = 1750 \text{ min}^{-1}$ , stosowany do napędu samochodów dostawczych różnych producentów. Jest to silnik z bezpośrednim wtryskiem

paliwa do toroidalnej komory spalania, wyposażony w wysokociśnieniowy wtrysk paliwa typu CR. Silnik jest doładowany za pomocą turbosprężarki i wyposażony w układ chłodzenia powietrza doładowującego.

Badany silnik był wyposażony w fabryczny układ zasilania typu Common Rail, produkcji Bosch, składający się z następujących zespołów:

- sterownika EDC 15A53, tzw. sterownik serwisowy,
- pompy wysokiego ciśnienia CR/CP1S3/L70/10-1S,
- wtryskiwaczy elektromagnetycznych BX CRI 1.

Zakres badań obejmował pomiary parametrów użytecznych silnika, parametrów procesu spalania oraz składu spalin. Badania wykonano dla całego pola pracy silnika (charakterystykę zewnętrzną oraz charakterystyki obciążeniowe w całym zakresie prędkości silnika) dla statycznych warunków pracy. Badania zostały przeprowadzone metodą eksperymentu biernego w statycznych stanach pracy silnika dla prędkości obrotowych: 1500 min<sup>-1</sup>, 2000 min<sup>-1</sup>, 2500 min<sup>-1</sup>, 3000 min<sup>-1</sup> i 3500 min<sup>-1</sup> oraz wykonując charakterystykę zewnętrzną silnika w zakresie (1000 ÷ 3750) min<sup>-1</sup> co 250 min<sup>-1</sup>. Charakterystyki obciążeniowe silnika zrealizowano, zmieniając obciążenie od minimalnego (biegu luzem) do maksymalnego (wartość momentu obrotowego na charakterystyce zewnętrznej) co 30 N\*m. Podczas sporządzania charakterystyk obciążeniowych za każdym razem ustawiano takie same obciążenie silnika, tak aby można było porównywać parametry użyteczne silnika w tych samych punktach pomiarowych.

Mierzono parametry użyteczne silnika, temperaturę (cieczy chłodzącej, oleju, spalin przed i za turbosprężarką), stężenia w spalinach: dwutlenku węgla, tlenu, tlenku węgla, węglowodorów, tlenków azotu oraz zadymienie spalin wyrażone jako współczynnik ekstynkcji promieniowania pochłanianego przez spaliny.

Badania silnika wykonano na typowym stanowisku dynamometrycznym. Silnik był obciążony hamulcem typu Schenck W 230 o maksymalnej mocy 230 kW. Moment obrotowy wytwarzany przez silnik był mierzony przy użyciu przetwornika tensometrycznego. Prędkość obrotową rejestrowano za pomocą przetwornika impulsowego, który współpracował z wieńcem zębatym umieszczonym na przyłączu hamulca. Do pomiaru zużycia paliwa wykorzystano wagę paliwową AVL Fuel Balance, która umożliwiała próbkowanie zużycia paliwa co 5 s. Przepływ powietrza przez chłodnicę powietrza doładowującego wywołano stosując zespół dwóch wentylatorów. Temperaturę płynu chłodzącego w silniku utrzymywano na poziomie 85 ÷ 90°C z wykorzystaniem zewnętrznego wymiennika ciepła.

Tabela. 2 Wykaz przyrządów pomiarowych wykorzystanych podczas badań.

L.p	Nazwa urządzenia / mierzona wielkość	Typ	Zakres	Dokładność
1.	Hamulec elektrowirowy – moment obrotowy – $M_o$ , – prędkości obrotowej – $n$	Elektrowirowy, Schenck W 230	$M_o = (0 \div 700) \text{ N*m}$ , $n = (0 \div 4000) \text{ min}^{-1}$	$\pm 0,1 \text{ N*m}$ , $\pm 1 \text{ min}^{-1}$ ,
2.	Waga paliwa, godzinowe zużycie paliwa – $G_e$	AVL 733S Fuel Balance	(0 ÷ 200) kg/h	$\pm 0.005 \text{ kg/h}$
3.	Analizator spalin – pomiar stężenia związków toksycznych w spalinach - dwutlenek węgla ( $\text{CO}_2$ ), - węglowodory (HC), - tlenek węgla (CO), - tlenki azotu ( $\text{NO}_x$ ), - tlen ( $\text{O}_2$ ).	AVL CEBII	$\text{CO}_2 (0,01 \div 23)\%$ $\text{HC} (1,0 \div 2200)\text{ppm}$ , $\text{CO} (1,0 \div 11000)\text{ppm}$ , $\text{NO}_x (1,0 \div 6000) \text{ ppm}$ $\text{O}_2 (0,1 \div 21)\%$	$\pm 0,1\%$ mierzonej wielkości
4.	Zadymienie spalin – współczynnik ekstynkcji promieniowania świetlnego – $k$ .	AVL Opacimetr 4390	(0.001 ÷ 10.0) m <sup>-1</sup>	$\pm 0.002 \text{ m}^{-1}$
5.	Termopara – pomiar temperatury spalin – $T$	NiCr – NiAl (K)	(-50 ÷ 1100)°C	$\pm 1^\circ\text{C}$

Wyniki pomiarów parametrów pracy silnika gromadzono w ciągu całego eksperymentu w celu bieżącej kontroli jego stanu technicznego lub określenia okoliczności ewentualnej awarii oraz kontroli przebiegu realizacji kolejnych etapów badań. Wyniki pomiarów parametrów użytecznych silnika zredukowano do warunków normalnych zgodnie z normą PN-ISO 15550:2009.

Badania przeprowadzono przy zasilaniu silnika następującymi rodzajami paliwa:

- olejem napędowym IZ-40 – przyjęte oznaczenie: ON,
- paliwem F-34/35 – przyjęte oznaczenie: F-34,
- mieszaninami paliwa F-34/35 i estrów metylowych wyższych kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego – przyjęte oznaczenie: B-20, B-40, B-60 i B-80 gdzie liczba po literze B oznacza masowy udział RME w mieszaninie.

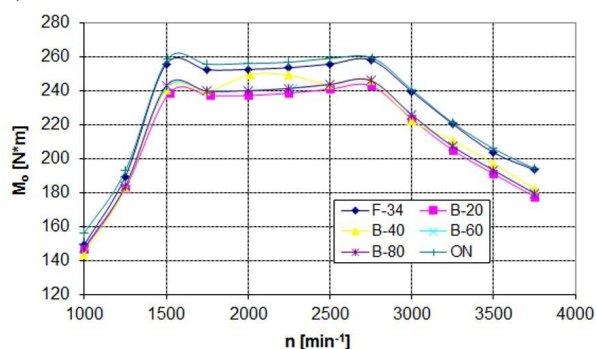
## 4. Wyniki badań

### 4.1. Charakterystyka zewnętrzna

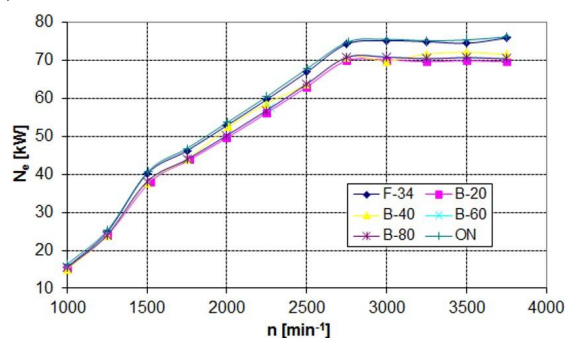
Analiza wyników badań pozwoliła określić wpływ poszczególnych rodzajów paliw na parametry użyteczne silnika, parametry indykowane, stężenia składników spalin oraz zadymienie spalin.

Na podstawie analizy uzyskanych charakterystyk zewnętrznych silnika G9T zasilanego poszczególnymi paliwami należy stwierdzić, że największa moc użyteczna silnik jest osiągnięta podczas zasilania na paliwie podstawowym (ON) (rys. 1a i 2.b). Zastosowanie paliwa F-34 spowodowało nieznaczny spadek mocy użytecznej ( $N_e$ ) o około (1 ÷ 2)%. Dodanie RME do paliwa F-34 wywołało dalszy spadek mocy użytecznej o około (7 ÷ 8)%, w zależności od składu mieszaniny (udziału procentowego estrów). Przyczyną tego jest zwiększenie gęstości mieszanin paliwa F-34 z RME oraz zmniejszenie jego wartości opałowej. Różnice w osiągniętej mocy użytecznej rosną wraz z prędkością obrotową osiąganą przez silnik.

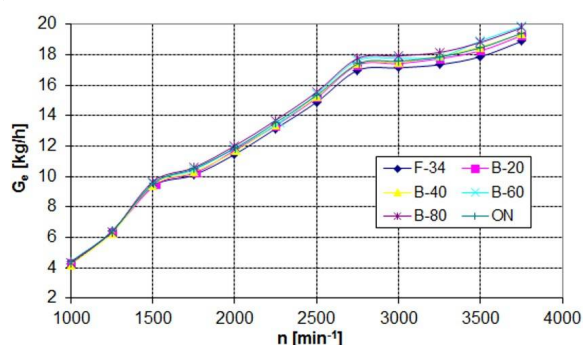
a)



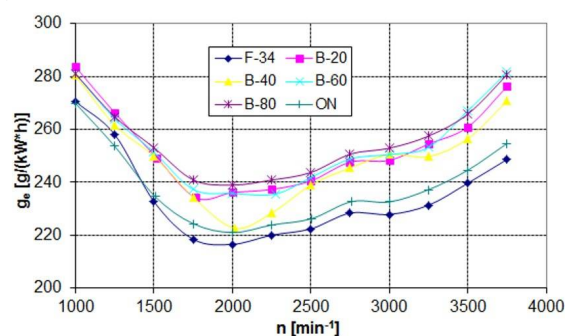
b)



c)



d)



Rys. 1. Charakterystyka zewnętrzna silnika: a) moment obrotowy, b) moc użyteczna, c) godzinowe zużycie paliwa, d) jednostkowe zużycie paliwa.

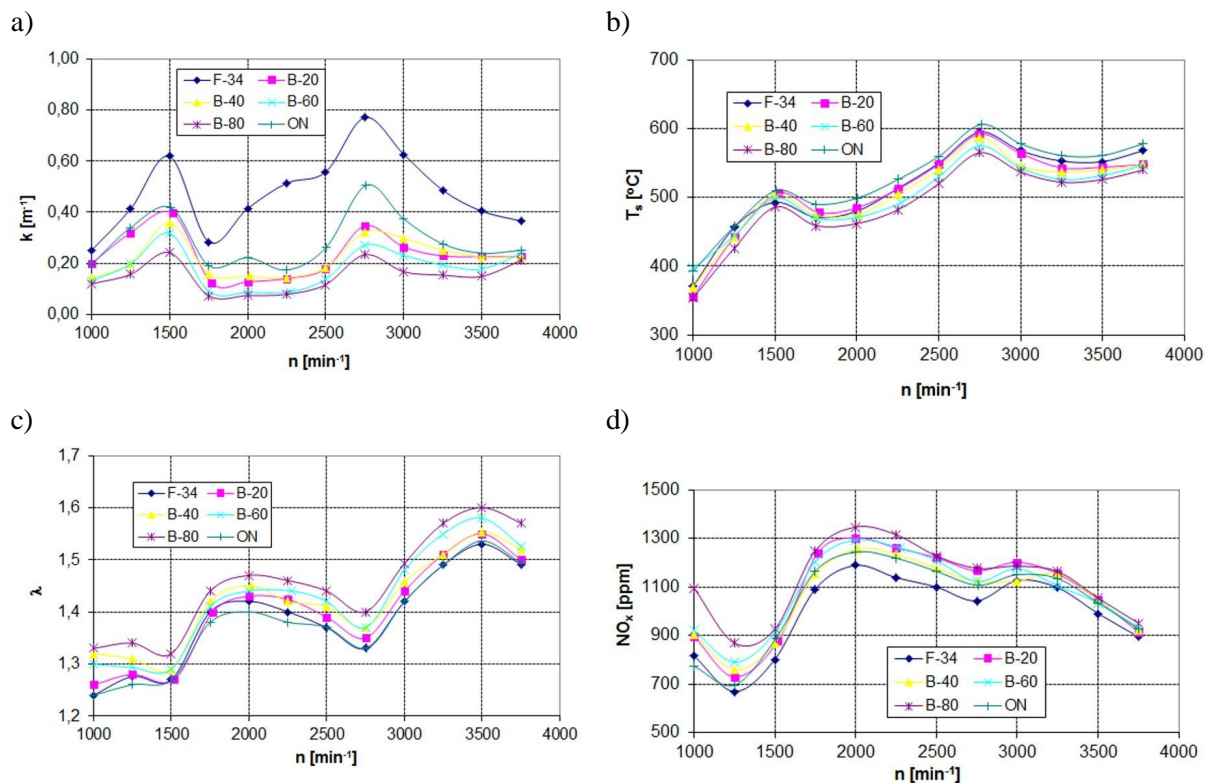
Najmniejsze natężenie zużycia paliwa występuje dla oleju napędowego (rys. 1.c), który jest paliwem podstawowym stosowanym dla badanego silnika, chociaż wartości dla paliwa F-34 są podobne. Zastosowanie RME w mieszaninach powoduje wzrost godzinowego zużycia paliwa ( $G_e$ ) o około (3 ÷ 5)% w zależności od składu mieszaniny i prędkości obrotowej. Jest to spowodowane

mniejszą wartością opałową mieszanin z estrami i koniecznością dostarczenia większej ilości paliwa do cylindra w celu osiągnięcia takiej samej mocy.

Najmniejszą wartość jednostkowego zużycia paliwa zaobserwowano dla F-34 (podobne wartości dla ON), (rys. 1.d), które wynoszą odpowiednio 233 g/(kW\*h) (236 g/(kW\*h) przy prędkości  $n = 1500 \text{ min}^{-1}$ ). Dodanie estrów do paliwa F-34 powoduje wzrost jednostkowego zużycia paliwa, i tak dla B-20 jak i dla B-80 jednostkowe zużycie paliwa wynosi 253 g/(kW\*h) (wzrost do 10%). Większe jednostkowe zużycie paliwa spowodowane jest mniejszą wartością opałową i większą lepkością RME. Większa lepkość powoduje gorsze rozpylenie i większą niejednorodność strugi paliwa, co nie sprzyja całkowitemu spalaniu mieszanki.

Stwierdzono korzystny wpływ mieszanin paliwa F-34 z RME na zadymienie spalin (rys. 2.a). Największe zadymienie zaobserwowano dla silnika zasilanego paliwem F-34 (podobne dla ON), natomiast w mieszaninach, pod wpływem zwiększania udziału estrów zadymienie jest blisko 2...3 razy mniejsze. Tendencja taka utrzymuje się w całym zakresie prędkości obrotowej. Późniejszy o kilka stopni obrotu wału korbowego silnika początek wtrysku paliwa, powoduje silny wzrost zadymienia spalin silnika zasilanego olejem napędowym. Spadek zadymienia spalin jest również spowodowany mniejszą mocą rozwijaną przez silnik.

Temperatura spalin na wyjściu silnika jest najwyższa dla ON i wynosi  $622^\circ\text{C}$  przy  $n = 1500 \text{ min}^{-1}$  (rys. 2.b). Najniższą temperaturę spalin ma mieszanina B-80, która wynosi  $592^\circ\text{C}$  przy  $n = 1500 \text{ min}^{-1}$ , obserwujemy tu obniżenie temperatury o ponad  $45^\circ\text{C}$ . Widoczny jest również spadek temperatury spalin wraz ze wzrostem udziałów RME w paliwie.

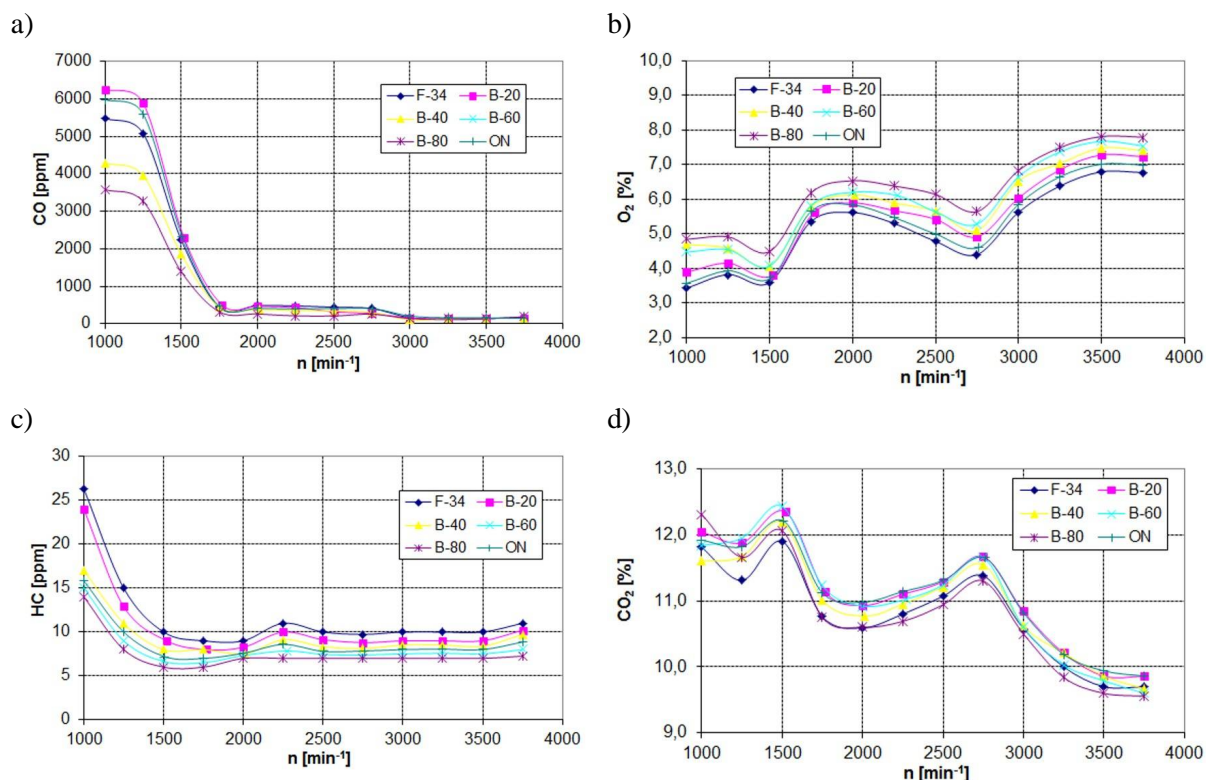


Rys. 2. Charakterystyka zewnętrzna silnika: a) współczynnik ekstynkcji promieniowania pochłoniętego, b) temperatura spalin, c) współczynnik składu mieszanki, d) stężenie tlenków azotu w spalinach

Najmniejszą wartość współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$  stwierdzić można przy zasilaniu paliwem F-34 (rys. 2.c). Dodanie estrów wyraźnie zwiększa współczynnik  $\lambda$ . W przypadku mieszaniny B-80 wzrost ten wynosi około 25%. Fakt ten spowodowany jest większą zawartością tlenu w cząsteczkach estrów metylowych wyższych kwasów oleju rzepakowego, a co za tym idzie, mniejszym zapotrzebowaniem na tlen podczas spalania.

Stężenie tlenków azotu w spalinach jest najniższe dla paliwa F-34 i ON w całym zakresie prędkości obrotowej (rys. 2.d). Przy zasilaniu mieszaninami z dodatkiem RME zaobserwować można

wzrost emisji tlenków azotu o około (10 ÷ 15)%. Jest to spowodowane m.in. zawartością tlenu w estrach metylowych kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego. Dodatkowo paliwo to ma większą skłonność do samozapłonu (wyższa liczba cetanowa), co prowadzi do zmian w przebiegu procesu spalania. Powoduje to miejscowy wzrost temperatury wewnątrz cylindra, co z kolei sprzyja powstawaniu tlenków azotu. Stężenie tlenków azotu w spalinach jest najmniejsze dla paliwa F-34 i ON w całym zakresie prędkości obrotowej. Przy zasilaniu mieszaninami z dodatkiem RME zaobserwować można wzrost stężenia tego składnika o (10 ÷ 15)%.



Rys. 3. Charakterystyka zewnętrzna silnika: a) stężenie tlenku węgla w spalinach, b) stężenie tlenu w spalinach, c) stężenie węglowodorów w spalinach, d) stężenie dwutlenku węgla w spalinach.

Przy małych wartościach prędkości obrotowej zaobserwowano duże stężenie tlenku węgla. Wzrost prędkości powoduje znaczne obniżenie stężenia tlenku węgla w spalinach. Największe stężenie tlenku węgla występuje przy zasilaniu olejem napędowym oraz paliwem F-34, dodanie estrów do paliwa powoduje w zakresie wysokiej prędkości obrotowej obniżenie jego stężenia o około (10 ÷ 15)% (rys. 3.a). Niższe stężenie tlenku węgla w spalinach przy zasilaniu silnika paliwem z udziałem biokomponentu świadczy o zmianie przebiegu procesu spalania w stosunku do paliwa F-34 i ON. Dodatek RME wpływa korzystnie na stężenie tlenku węgla w zakresie niskiej prędkości obrotowej. Dla prędkości powyżej 1500  $\text{min}^{-1}$  utrzymuje się praktycznie na stałym poziomie, niezależnie od zastosowanego paliwa.

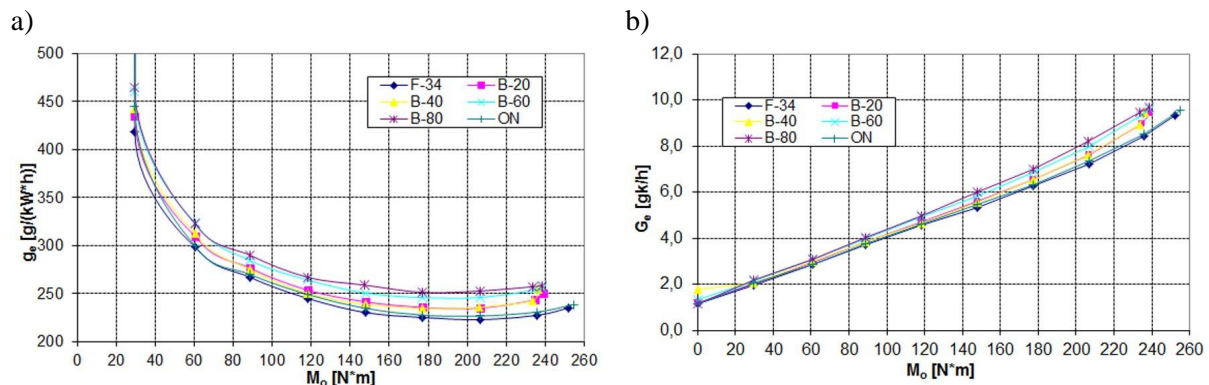
Stężenie tlenu w spalinach, kształtuje się w sposób podobny jak współczynnik nadmiaru powietrza  $\lambda$ . Najniższa wartość występuje przy zasilaniu paliwem F-34 i ON, a największa przy zasilaniu mieszanką B-80 - wzrost o około (20 ÷ 25)% (rys. 3.b).

Stężenie węglowodorów w spalinach jest niższe do 50% przy zasilaniu silnika paliwem B80 dla całego zakresu prędkości obrotowej (rys. 3.c). Podobnie jak w przypadku tlenku węgla, niższe stężenie węglowodorów w spalinach przy zasilaniu silnika paliwem B80 jest wynikiem większej zawartości tlenu w mieszance paliwowo-powietrznej, co potwierdza rysunek 4. Stężenie dwutlenku węgla kształtuje się w sposób odwrotny jak w przypadku tlenu. Najniższe wartości stwierdzono można dla F-34, a najwyższe (o około (6 ÷ 10)%) dla mieszanin z RME (rys. 3.d).

## 4.2. Charakterystyki obciążeniowe

Charakterystyki obciążeniowe sporządzono w zakresie prędkości  $1500 \div 3000 \text{ min}^{-1}$  co  $500 \text{ min}^{-1}$ . W pracy szerzej omówiono charakterystyki przy prędkości obrotowej  $n = 1500 \text{ min}^{-1}$  (zakres  $M_{\text{omax}}$ ) oraz  $n = 2500 \text{ min}^{-1}$  (zakres  $N_{\text{emax}}$ ). Na ich podstawie określono wpływ zastosowanego paliwa i jego własności ekologiczne.

Najniższe jednostkowe zużycie paliwa występuje przy zasilaniu silnika paliwem F-34 oraz olejem napędowym. Przy prędkości  $n = 1500 \text{ min}^{-1}$  wynosi ono  $225 \text{ g/(kW}\cdot\text{h)}$  (dla ON  $227 \text{ g/(kW}\cdot\text{h)}$ ) przy obciążeniu  $180 \text{ N}\cdot\text{m}$ . Dodanie estrów metylowych wyższych kwasów tłuszczowych do paliwa F-34 powoduje wzrost jednostkowego zużycia paliwa. W zależności od składu mieszaniny wzrost ten mieści się w granicach  $(8 \div 16)\%$  (rys. 4.a). Jest to spowodowane mniejszą wartością opałową przy większej gęstości RME. Przy mniejszym obciążeniu silnika, jednostkowe zużycie paliwa przy zasilaniu silnika F-34 i ON było mniejsze niż zużycie paliwa przy zasilaniu go mieszaninami RME. Zostało to prawdopodobnie spowodowane także niższą temperaturą panującą w komorze spalania, co utrudniało odparowywanie paliwa. Odwrotnie jest w warunkach dużych obciążeń, gdyż spalanie jest wtedy intensyfikowane za pomocą dodatkowego tlenu zawartego w cząsteczkach estrów metylowych oleju rzepakowego.



Rys. 4. Charakterystyka obciążeniowa silnika,  $n = 1500 \text{ min}^{-1}$ : a) jednostkowe zużycie paliwa, b) godzinowe zużycie paliwa

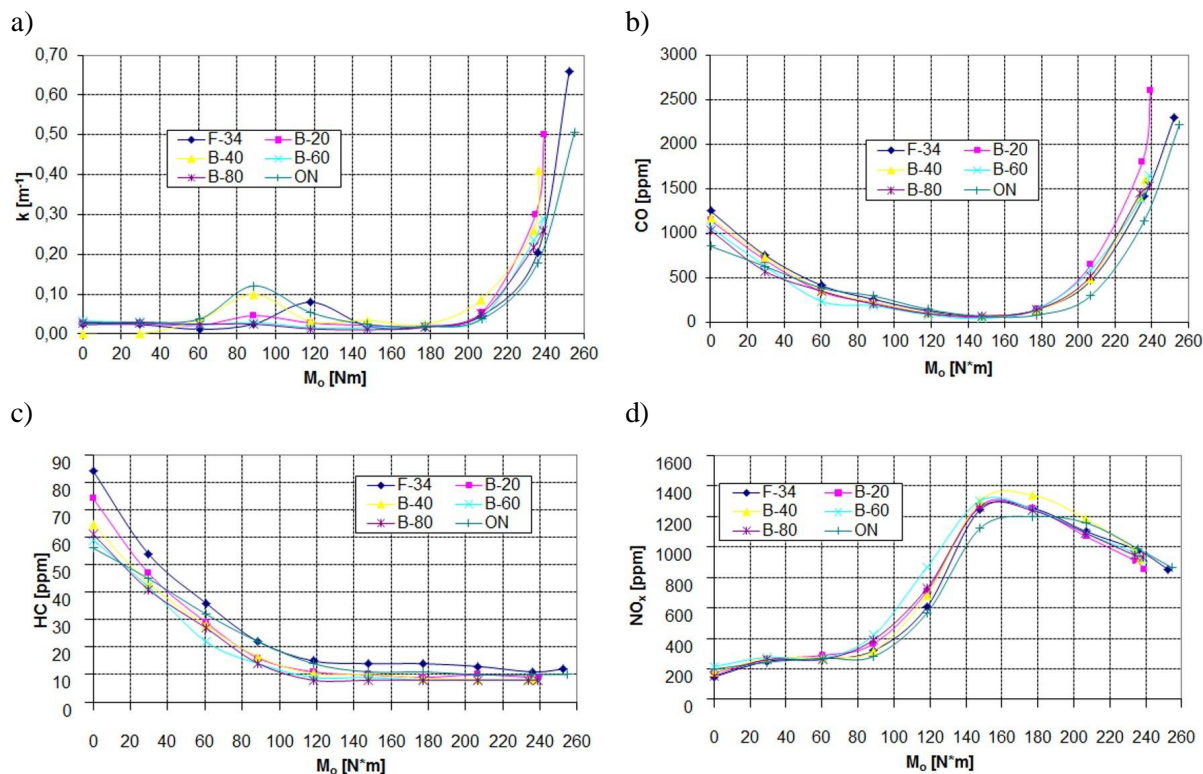
Analizując zmiany godzinowego zużycia paliwa najmniejsze wartości stwierdzono dla paliwa F-34 i ON  $3,66 \text{ kg/h}$  i  $3,76 \text{ kg/h}$  (dla  $n = 1500 \text{ min}^{-1}$ ) oraz  $7,77 \text{ kg/h}$  i  $8,00 \text{ kg/h}$  (dla  $n = 2500 \text{ min}^{-1}$ ). Godzinowe zużycie paliwa wzrasta o około  $(10 \div 12)\%$  (rys. 4b) wraz ze wzrostem udziału estrów w mieszaninie. Jest to spowodowane zmniejszeniem wartości opałowej mieszanin kompensowanym zwiększeniem masy paliwa dla utrzymania zadanej prędkości obrotowej i momentu obrotowego. Wzrost godzinowego zużycia paliwa może być również spowodowany większą lepkością paliwa, co wiąże się z gorszym rozpyleniem, odparowaniem i spalaniem paliwa w silniku.

Dodanie RME do paliwa F-34 spowodowało znaczne obniżenie zadymienia spalin, co bardzo korzystnie wpływa na właściwości ekologiczne silnika. Przy  $n = 1500 \text{ min}^{-1}$  zadymienie spalin jest 2-krotnie mniejsze (rys. 5.a) przy zasilaniu silnika mieszaniną B80.

Współczynnik nadmiaru powietrza  $\lambda$  przyjmuje najmniejsze wartości przy maksymalnym obciążeniu zarówno przy  $n = 1500 \text{ min}^{-1}$  jak i  $n = 2500 \text{ min}^{-1}$ . Mniejsze wartości uzyskano przy zasilaniu paliwem F-34 i ON, a największe przy zasilaniu mieszaniną B80, (wzrost o około  $5\%$ ). Fakt ten spowodowany jest większym stężeniem tlenu w estrach metylowych wyższych kwasów oleju rzepakowego, a co za tym idzie mniejszym zapotrzebowaniem na tlen podczas spalania w komorze silnika.

Najmniejsze stężenie tlenków azotu w spalinach występuje dla paliwa podstawowego, jakim jest ON i paliwa F-34 w całym zakresie obciążenia (rys. 5.d). Przy zasilaniu mieszaninami z dodatkiem RME zaobserwować można wzrost stężenia tlenków azotu o około  $(10 \div 15)\%$ . Jest to spowodowane m.in. zawartością tlenu w estrach. Dodatkowo paliwo to ma większą skłonność do samozapłonu (wyższa liczba cetanowa), co powoduje zmiany w przebiegu procesu spalania. Wpływa to na wzrost chwilowej temperatury wewnątrz cylindra, co z kolei sprzyja powstawaniu tlenków azotu.

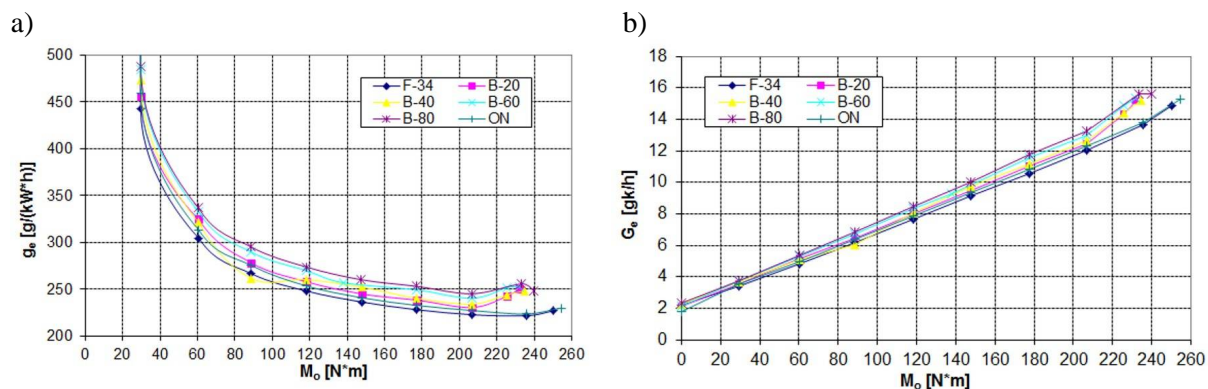




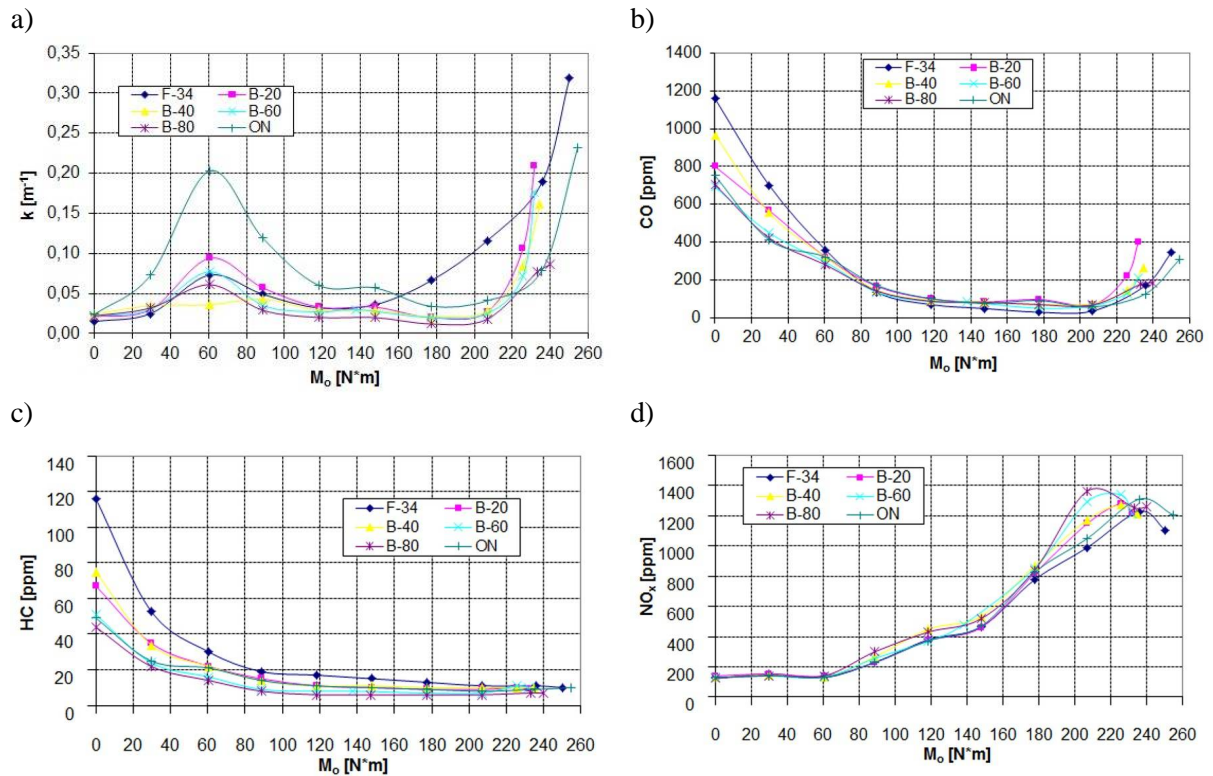
Rys. 5. Charakterystyka obciążeniowa silnika,  $n = 1500 \text{ min}^{-1}$ : a) współczynnik ekstynkcji promieniowania pochłoniętego, b) stężenie tlenku węgla w spalinach, c) stężenie węglowodorów w spalinach, d) stężenie tlenków azotu w spalinach

Duże stężenie tlenku węgla występuje przy małym i średnim obciążeniu silnika, zarówno dla prędkości  $n = 1500 \text{ min}^{-1}$  jak i  $n = 2500 \text{ min}^{-1}$ . W zakresie średniego momentu obrotowego stężenie tlenku węgla utrzymuje się na małym poziomie. Największe stężenia tlenku węgla występują przy zasilaniu olejem napędowym oraz paliwem F-34, dodanie estrów do paliwa powoduje około 2-krotnie znaczne zmniejszenie stężenia tlenku węgla w spalinach przy prędkości  $n = 1500 \text{ min}^{-1}$  (rys. 5.b). Mniejsze stężenie tlenku węgla w spalinach przy zasilaniu silnika paliwem z udziałem biokomponentu świadczy o jego lepszym spalaniu w stosunku do paliwa F-34 i ON.

Stężenie węglowodorów w spalinach jest niższe o około (50 ÷ 60)% przy zasilaniu silnika mieszaninami z RME niż paliwem F-34 (dla  $n = 1500 \text{ min}^{-1}$  i  $n = 2500 \text{ min}^{-1}$ ) w całym zakresie obciążeń. Podobnie jak w przypadku tlenku węgla, mniejsze stężenie węglowodorów w spalinach przy zasilaniu silnika paliwem z dodatkiem estrów jest wynikiem jego lepszego spalania.



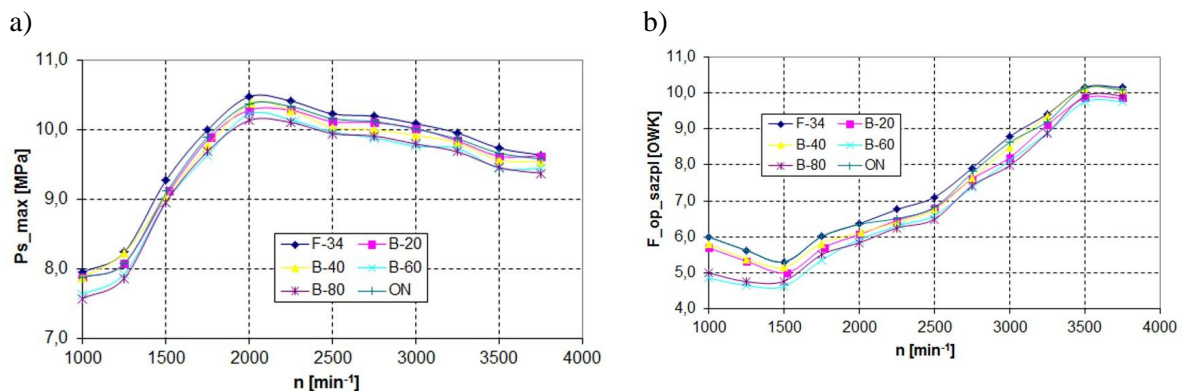
Rys. 6. Charakterystyka obciążeniowa silnika,  $n = 2500 \text{ min}^{-1}$ : a) jednostkowe zużycie paliwa, b) godzinowe zużycie paliwa



Rys. 7. Charakterystyka obciążeniowa silnika,  $n = 2500 \text{ min}^{-1}$ : a) współczynnik ekstynkcji, b) stężenie tlenku w spalinach, c) stężenie węglowodorów w spalinach, d) stężenie tlenków azotu w spalinach,

### 4.3. Wpływ mieszanin F-34 i RME na parametry cyklu pracy silnika

Analizę procesu spalania w komorze silnika G9T przeprowadzono na podstawie pomiarów parametrów cyklu pracy silnika. W trakcie badań rejestrowano przebiegi kilkudziesięciu cykli procesu spalania, a następnie obróbce statystycznej poddano 10 kolejnych z nich, z pośród których wyznaczono charakterystyczne parametry tego procesu. Na wykresach przedstawiono maksymalne ciśnienie spalania oraz kąt opóźnienia samozapłonu. Kąt opóźnienia wyznaczono jako różnicę w stopniach obrotu wału korbowego pomiędzy początkiem wzniosu iglicy wtryskiwacza i początkiem spalania aktywnego.

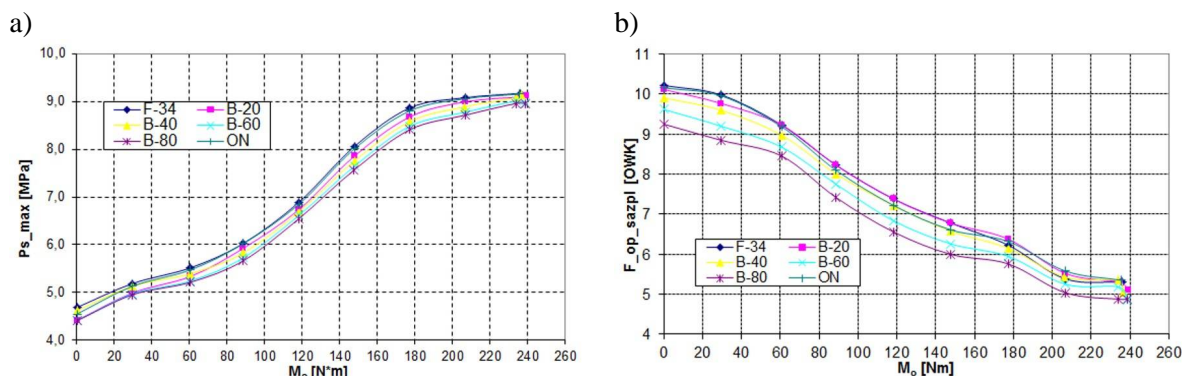


Rys. 8. Charakterystyka zewnętrzna silnika: a) maksymalne ciśnienie spalania, b) kąt opóźnienia samozapłonu.

Znaczne różnice uwidoczniły się na przebiegach maksymalnego ciśnienia spalania w komorze. Największe wartości ciśnienia spalania zarejestrowano dla oleju napędowego i paliwa F-34. Ciśnienia te są porównywalne aczkolwiek widoczne jest niewielkie jego zwiększenie przy zasilaniu paliwem F-34 – różnice są nie większe niż 0.1 MPa (rys. 8.a). Wraz ze wzrostem udziału masowego estrów w mieszaninie następuje spadek maksymalnego ciśnienia w komorze spalania. Najmniejsze wartości zarejestrowano dla mieszaniny B-80. Różnice pomiędzy wartością maksymalną dla paliwa F-34 i minimalną dla mieszaniny B-80 wynoszą około 0,4 MPa prawie w całym zakresie prędkości obrotowej silnika. Powodem takiego spadku ciśnienia spalania jest mniejsza ilość energii (zmniejszenie wartości opałowej mieszaniny paliw) zawarta w dawce paliwa dostarczonej do cylindra oraz dłuższy czas wtrysku tej dawki, co powoduje powolniejsze wydzielanie się ciepła i zmniejszenie wartości szczytowych ciśnienia spalania.

Obserwując wpływ zawartości estrów metylowych w paliwie F-34 na kąt opóźnienia samozapłonu (rys. 8b) można zauważyć, że wzrost zawartości RME powoduje skrócenie kąta zwłoki samozapłonu. Najniższe wartości kąta opóźnienia samozapłonu otrzymano dla mieszaniny B-80 najwyższe dla F-34. Dla prędkości obrotowej  $1000 \text{ min}^{-1}$  różnica wynosi około  $1^\circ \text{ OWK}$  i maleje wraz ze wzrostem prędkości obrotowej. Przy prędkości obrotowej  $3500 \text{ min}^{-1}$  wynosi jedynie  $0,2^\circ \text{ OWK}$ . Skrócenie okresu samozapłonu dla mieszaniny B-80 jest spowodowane mniejszą temperaturą samozapłonu tej mieszaniny oraz zawartością tlenu w paliwie, który przyspiesza utlenianie się paliwa.

Podobne zależności można zaobserwować analizując charakterystyki obciążeniowe silnika. Wraz ze wzrostem udziału masowego estrów w mieszaninie następuje spadek maksymalnego ciśnienia w komorze spalania. Najmniejsze wartości zarejestrowano dla mieszaniny B-80. Różnice pomiędzy wartością maksymalną dla paliwa F-34 i minimalną dla mieszaniny B-80 wynoszą około 0,4 MPa prawie w całym zakresie obciążenia silnika. Powodem takiego spadku ciśnienia spalania jest dłuższy czas wtryskiwania dawki paliwa niezbędnej do rozwinięcia określonego momentu obrotowego [5,7,8,11,14].



Rys. 9. Charakterystyka obciążeniowa,  $n = 1500 \text{ min}^{-1}$ : a) maksymalne ciśnienie spalania, b) kąt opóźnienia samozapłonu

Odwrotne zjawisko można zaobserwować analizując wpływ obciążenia na kąt opóźnienia samozapłonu paliwa w komorze spalania. Największe różnice występują przy najmniejszym obciążeniu (rys. 9b) i wynoszą około  $1^\circ \text{ OWK}$ . Wraz ze wzrostem obciążenia kąt ten maleje do około  $0,5^\circ \text{ OWK}$ . Jest to spowodowane wzrostem ciśnienia, pod którym wtryskiwane jest paliwo [5,8,11]. Wzrost ciśnienia powoduje lepsze rozpylenie paliwa, zwiększenie zasięgu strugi a co za tym idzie zwiększenie jednorodności mieszanki paliwowo-powietrznej i skrócenie okresu zwłoki samozapłonu.

## 5. Podsumowanie

Zastosowanie paliw niekonwencjonalnych do zasilania silników pojazdów wojskowych w dzisiejszych czasach jest problemem szeroko dyskutowanym. Prowadzone są liczne badania nad adaptacją paliw odnawialnych do zasilania silników o zapłonie samoczynnym. Paliwami niekonwencjonalnymi najlepiej nadającymi się do zasilania silników o zapłonie samoczynnym są estry metylowe kwasów tłuszczowych, które w Polsce są pozyskiwane z przeróbki oleju rzepakowego. Dzięki temu istnieje możliwość ograniczenia importu ropy naftowej. Wprowadzenie paliw opartych na estrach metylowych korzystnie wpływa na rozwój rolnictwa.

W pracy zawarto wyniki badań pokazujące wpływ mieszanin paliwa F-34 z RME na przebieg pracy silnika o zapłonie samoczynnym wyposażonego w układ zasilania typ Common Rail. W wyniku badań stwierdzono, że ze wzrostem stężenia estru metylowego w paliwie F-34 maleje stężenie tlenków węgla i węglowodorów w spalinach. Spowodowane jest to wzrostem stężenia tlenu w mieszaninie (tlen zawarty w cząsteczkach estru). Wzrostowi natomiast uległo stężenie tlenków azotu i tlenu w spalinach, wzrost ten jest proporcjonalny do zawartości estru w paliwie F-34. Zauważalny jest również wzrost średniego zużycia paliwa wraz ze wzrostem zawartości RME w paliwie F-34. Zjawisko do podyktowane jest wzrostem gęstości oraz lepkości mieszaniny, przez co przepływ mieszanki przez przewody paliwowe i otwory wtryskiwaczy jest wolniejszy niż w przypadku ON i czystego paliwa F-34.

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że parametry silnika Renault G9T z wysokociśnieniowym układem wtrysku zasilanego paliwem mieszaninami paliwa F-34 z biokomponentami uległy zmianie w stosunku do paliwa podstawowego, jakim było paliwo F-34 i olej napędowy.

Na podstawie wykonanych badań stwierdzono, że:

- zmniejszenie mocy użytecznej dochodzi do 15 % (w zależności od warunków pracy lub zastosowanej mieszaniny), podczas zasilania silnika mieszaninami F-34 z dodatkiem biokomponentów,
- w stosunku do ON i czystego F-34, mniejsza moc użyteczna uzyskiwana przez silnik jest związana z mniejszą wartością opałową biokomponentów,
- jednostkowe zużycie paliwa jest do 15% większe dla paliwa z dodatkiem biokomponentów, zwłaszcza w zakresie dużych prędkości obrotowych i obciążeń silnika,
- dodanie biokomponentów do paliwa F-34 korzystnie wpływa na zadymienie spalin i emisję cząstek stałych, zadymienie spalin może być 3-krotne mniejsze w stosunku do zasilania silnika olejem napędowym,
- zastosowanie RME jako dodatku do paliwa F-34 powoduje zmniejszenie stężenia tlenku węgla w spalinach o około 15 % szczególnie w zakresie małych wartości prędkości obrotowej silnika i obciążenia,
- wzrost stężenia tlenu w spalinach o około 25%, spowodowany jest większą ilością tlenu w cząsteczkach estrów metylowych kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego,
- stężenie węglowodorów w spalinach jest niższe do 50% przy zasilaniu silnika paliwem z dodatkiem RME.

Badania nad zastosowaniem paliw niekonwencjonalnych przyczyniają się do wdrożenia ich do produkcji masowej. Celowe jest zatem prowadzenie takich badań, gdyż umożliwiają one ocenę wpływu paliw na pracę silnika w różnych warunkach pracy.

## Literatura

1. Ambrozik A, Kruczyński S, Jakubiec J, Orliński S. Wpływ zasilania silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym paliwem mineralnym i roślinnym na proces wtrysku oraz rozpad strugi paliwa. *Journal of KONES Powertrain and Transport* 2006; 3(13): 21-28.
2. Baczewski K, Kałdoński T, Walentynowicz J. Sprawozdanie z realizacji pracy naukowo-badawczej. Opracowanie koncepcji wdrożenia jednolitego paliwa do lotniczych silników turbinowych i silników wysokoprężnych. Warszawa: Wojskowa Akademia Techniczna, 2001.
3. Baczewski K, Kałdoński T. Paliwa do silników o zapłonie samoczynnym. Warszawa: WKŁ; 2004.
4. Brzozowski K, Nowakowski J. Toxicity of exhaust gases of compression ignition engine under conditions of variable load for different values of engine control parameters. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 2011; 4(52): 56-62.
5. Chong Ch. T, Hochgreb S. Spray flame structure of rapeseed biodiesel and Jet-A1 fuel. *Fuel* 2014, Volume 115: 551-558.
6. Daisuke K, Hajime I, Yuichi G, Akira N, Yuzo A. Application of Biodiesel Fuel to Modern Diesel Engine. *SAE Technical Papers*; 2006-01-0233.
7. Dagaut P, Gaïl S. Chemical Kinetic Study of the Effect of a Biofuel Additive on Jet-A1 Combustion. *JOURNAL OF PHYSICAL CHEMISTRY A*, 2007, 111 (19): 3992-4000.

8. Hileman J. I, Donohoo Pearl E, Stratton R. W. Energy Content and Alternative Jet Fuel Viability. *Journal of Propulsion and Power* 2010, Vol. 26, No. 6 (2010): 1184-1196.
9. Horn U, Egnell R, Johansson B, Andersson O. Detailed Heat Release Analyses With Regard To Combustion of RME and Oxygenated Fuels in an HSDI Diesel Engine. SAE Technical Papers; 2007-01-0627.
10. Karczewski M, Wilk M. Assessment of dynamic qualities of the G9T engine with common rail system, fed with battlefield-use fuel blends with a biocomponent. *Journal of KONES Powertrain and Transport* 2011; 1 (18): 243-252.
11. Karczewski M, Walentynowicz J, Szczęch L, Rajewski M, Pszczołkowski J. Sprawozdanie z realizacji pracy naukowo-badawczej. Określenie wpływu jednolitego paliwa F34/35 z biokomponentami na pracę wysokociśnieniowego układu zasilania typu „Common Rail”. Warszawa: Wojskowa Akademia Techniczna 2010.
12. Mayer A, Czerwiński J, Wyser M, Mattrel P, Heitzer A. Impact of RME/diesel blends on particle formation, particle filtration, and PAH emissions. SAE Technical Paper 2005-01-1728.
13. Osipowicz T, Abramek K. Catalytic treatment in Diesel engine injectors. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 2014; 1: 22-28.
14. Szlachta Z. Zasilanie silników wysokoprężnych paliwami rzepakowymi. Warszawa: WKŁ, 2002.
15. Zając G, Węgrzyn A. Analysis of work parameters changes of diesel engine powered with diesel fuel and FAEE blends. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 2008; 3: 17-24.