



Analiza wpływu składu chemicznego biopaliwa na właściwości eksploatacyjne silnika

WIKTOR OLCHOWIK^{1, 2}, MIECZYŚLAW STRUŚ^{3, 4}

¹Wyższa Szkoła Technologii Informatycznych, 01-030 Warszawa, ul. Pawia 55

²Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Systemów Elektronicznych,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

³Politechnika Wroclawska, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn,
50-371 Wrocław, ul. I. Łukasiewicza 7/9

⁴MSS Ekspert Technika i Generacja Proekologiczna,
50-301 Wrocław, Jedności Narodowej 125/7

Streszczenie. W publikacji dokonano porównania efektywności energetycznej procesów spalania w silniku o zapłonie samoczynnym zasilanym różnymi mieszankami paliw odnawialnych oraz tego samego silnika zasilanego standardowym olejem napędowym podczas pracy w stanach dynamicznych. Efektywność silnika i jakość spalania paliwa określono za pomocą pomiarów akceleracji wału korbowego silnika i zadymienia spalin, wykorzystując w pełni zautomatyzowane stanowisko badawcze realizujące zaprogramowaną serię pomiarów. Wielkości pola podaży energii oraz efektywności i sprawności procesu spalania określono za pomocą innowacyjnych metod przetwarzania i analizy danych.

Słowa kluczowe: biokomponenty, cyklodyna, Bioxdiesel, efektywność i sprawność procesu spalania

1. Wstęp

Analiza dotychczasowego stanu wiedzy w zakresie rozwiązań procesów zasilania paliwami alternatywnymi, zwłaszcza pochodzenia roślinnego, wykazała znaczące korzyści ich stosowania w wielu aspektach, m.in. ekologicznym, ekonomicznym, trybologicznym.

Jednocześnie w wielu doniesieniach przedstawia się wady stosowania biopaliw, m.in. w zakresie mniejszej efektywności pracy silników zasilanych biopaliwami,

a także ich negatywnego wpływu na trwałość i żywotność silnika spalinowego oraz na otaczające środowisko.

Większość dostępnych publikacji w zakresie badań silników o ZS zasilanych biopaliwami dotyczy tradycyjnych badań hamownianych z użyciem specjalnych konstrukcji silników zasilanych zazwyczaj olejem napędowym z jednym biokomponentem lub biokomponentem stanowiącym samoistne paliwo, przy czym wyniki badań uzyskiwane były w ustalonych parametrach pracy silnika, a o rozpoczęciu i zakończeniu pomiarów decydował operator.

W warunkach rzeczywistej eksploatacji pojazdów, praca silników spalinowych odbywa się głównie w stanach nieustalonych. Przyjęta w pracy koncepcja pomiarów umożliwiła osiągnięcie dużej dokładności także podczas akceleracji wału korbowego od prędkości obrotowej biegu jałowego do prędkości maksymalnej. Dzięki całkowitej automatyzacji stanowiska badawczego otrzymano bardzo wysoką powtarzalność wyników pomiarów, co umożliwiło uzyskanie wiarygodnych parametrów efektywnych pracy silnika w warunkach badań porównywalnych z rzeczywistymi warunkami eksploatacji.

Realizacja badań w zakresie zasilania silnika biopaliwami wieloskładnikowymi stanowi próbę obalenia fałszywych opinii i poglądów generowanych przez wiele ośrodków politycznych, gospodarczych, a nawet inżynierskich o szkodliwości i nieopłacalności ekonomicznej stosowania biopaliw i biokomponentów w tłokowych silnikach spalinowych o zapłonie samoczynnym.

2. Cel, przedmiot i metodyka badań

Celem badań było określenie wpływu składu chemicznego biopaliwa na właściwości eksploatacyjne silnika poprzez określenie cech dynamicznych silników o ZS zasilanych różnymi mieszankami paliw odnawialnych oraz porównanie uzyskanych parametrów z parametrami silnika zasilanego standardowym olejem napędowym.

Przedmiot badań stanowił sześciocyldrowy silnik o ustalonym stanie cieplnym płynów eksploatacyjnych. Silnik o pojemności skokowej 15,9 dm³ i maksymalnej mocy 220 kW przy 2600 obr/min, z bezpośrednim wtryskiem paliwa i 4 zaworami na cylinder ma cylindry usytuowane w układzie widlastym i cieczowy układ chłodzenia.

Efektywność pracy silnika określono na podstawie pomiarów jego charakterystyk dynamicznych, które przedstawiają przebieg momentu obrotowego wytwarzanego przez silnik przy zmianie prędkości obrotowej wału korbowego.

Moment obrotowy generowany przez silnik opisuje równanie (1):

$$M_o = J \frac{d\omega}{dt} = J\varepsilon, \quad (1)$$

gdzie: ε — chwilowe przyspieszenie wału korbowego silnika;
 J — biegunowy moment bezwładności obrotowych mas silnika
 sprowadzony do osi wału korbowego.

Silnik zasilany był (tab. 1) olejem napędowym (ON/BB), paliwem BIOXDIESEL o różnych wartościach proporcji węgla, wodoru i tlenu oraz czystym estrem wyższych kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego (RME).

TABELA 1

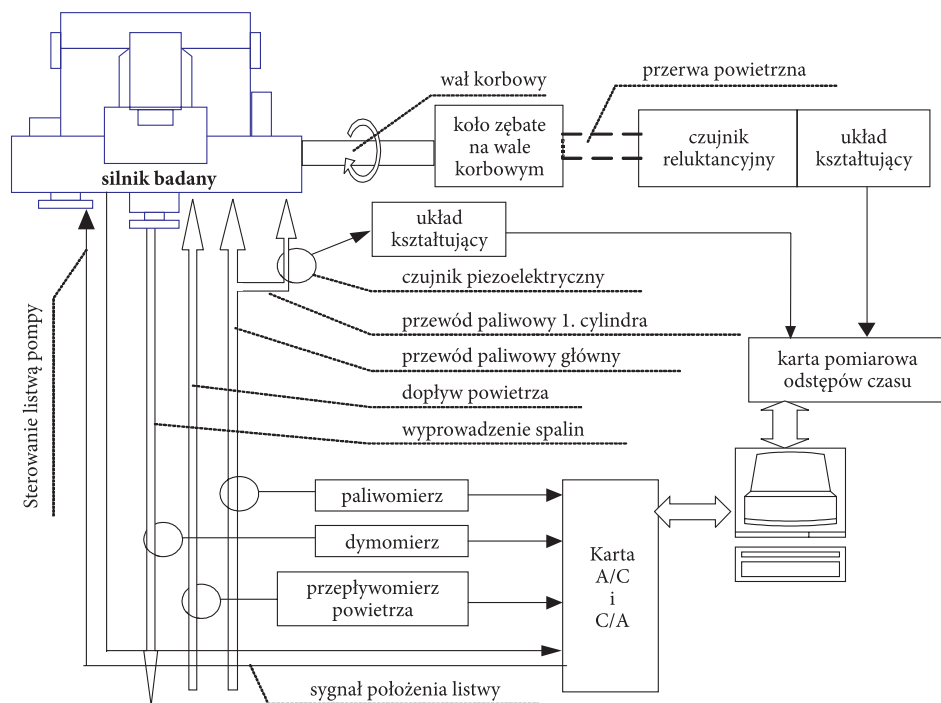
Parametry badanych paliw

Rodzaj paliwa	Stosunek C/H/O (% mas)	Wartość opałowa (MJ/kg)	Gęstość (kg/dm ³)
PR 1	79,4/13,7/6,9	39,55	0,82
PR2	80,6/13,7/ 5,7	40,2	0,825
PR3	81,8/13,7/4,5	40,85	0,83
PR4 (ON+RME)	83/13,7/3,3	41,5	0,835
PR5 (ON/BB)	86/14/0	43,0	0,816
PR6 (RME)	76/13/11	38	0,88

3. Stanowisko badawcze

Schemat funkcjonalny systemu pomiarowego przedstawiono na rysunku 1. Badania przeprowadzane były na stanowisku wyposażonym w komputer z kartami umożliwiającymi pomiar sygnałów analogowych i odstępów czasu oraz analogowe i cyfrowe wyjścia sterujące. Odpowiednie wejścia były połączone ekranowanymi przewodami z czujnikami lub wyjściami analogowymi przyrządów pomiarowych.

Sygnały analogowe z paliwomierza, dymomierza i przepływomierza powietrza podawane były na wejścia A/C, natomiast sygnał z czujnika reluktancyjnego i piezoelektrycznego podawany był do karty mierzącej odstęp czasu. Na tej podstawie obliczano wartości prędkości obrotowej, przyspieszenia kąтового momentu obrotowego i w efekcie mocy silnika. Rejestrowano również momenty przyjścia impulsów z czujnika piezoelektrycznego, czyli znaczników zwrotu zewnętrznego, co umożliwiło identyfikację suwów pracy cylindrów i synchronizację pomiarów. Sterowanie listwą pompy wtryskowej realizowano za pomocą napięcia wytwarzanego na karcie pomiarowej, co umożliwiło w pełni automatyczne sterowanie pomiarami bez udziału operatora, zapewniając dokładność i powtarzalność procesów. Algorytm pomiarowy przedstawiono na rysunku 2.

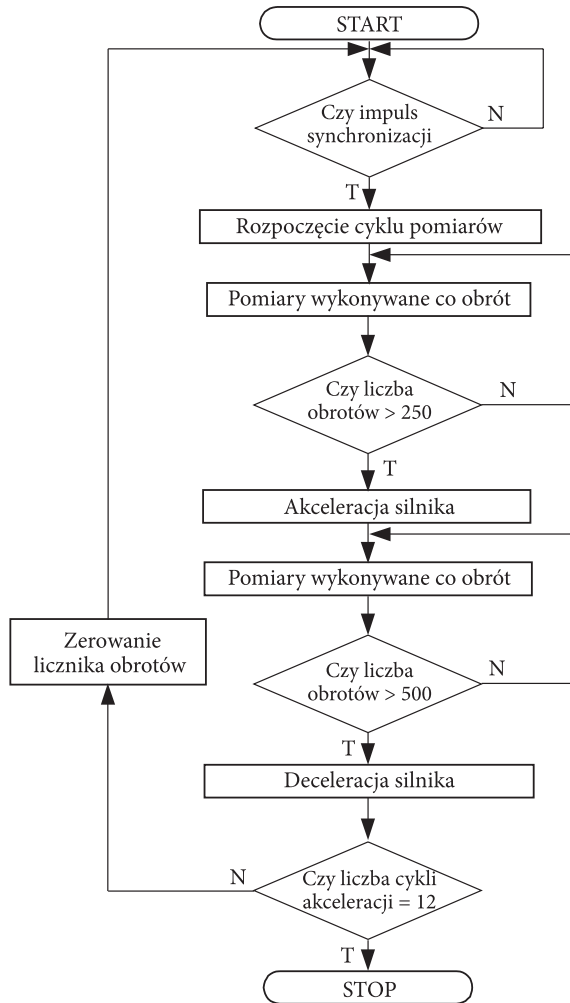


Rys. 1. Schemat funkcjonalny systemu pomiarowego

Badanie obejmowało dwanaście pełnych cykli charakterystyki dynamicznej, czyli dwanaście cykli akceleracji i deceleracji silnika. Efektem badania były przebiegi czasowe sygnałów napięciowych z przyrządów pomiarowych zużycia paliwa i powietrza, zadymienia spalin oraz czasu trwania kolejnych obrotów silnika. Przykład przebiegów uzyskanych dla pojedynczego cyklu akceleracji i deceleracji silnika przedstawiono na rysunku 3.

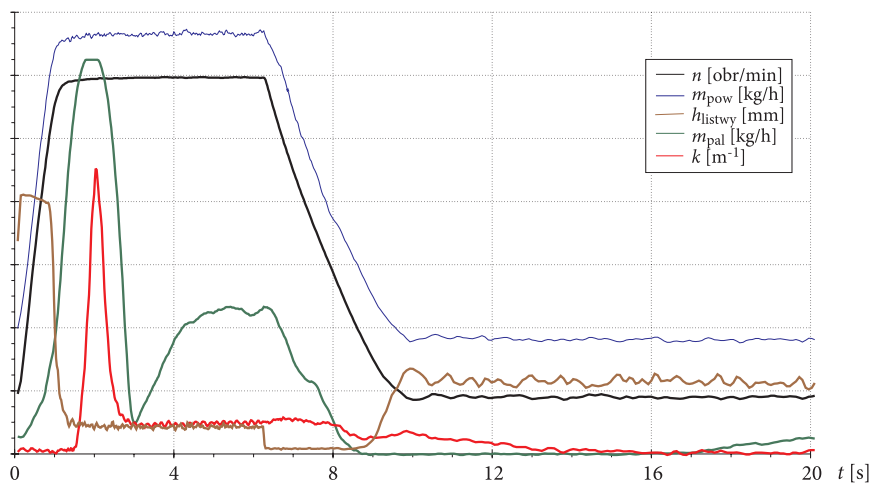
Uzyskane wyniki wskazują, że:

- przebieg zużycia powietrza był zgodny z oczekiwanym i zsynchronizowany w czasie, co umożliwiło bezpośrednie użycie do obliczeń wartości chwilowych i średnich;
- przebieg współczynnika zadymienia był zgodny z prognozowanym, ale przesunięty o 61 obrotów z powodu konieczności pokonania przez spaliny pewnej odległości od cylindrów silnika do urządzenia pomiarowego, można go było więc użyć bezpośrednio do obliczeń wartości uśrednionych, a po korekcie osi czasu także do porównania wartości chwilowych;
- przebieg zużycia paliwa tylko w ogólnym zarysie odzwierciedlał chwilowy przepływ paliwa, ponieważ rejestrowane zmiany przepływu następowały z opóźnieniem i znacznie wolniej niż rzeczywiste zużycie, przebieg może być użyty więc tylko do analizy średniego zużycia paliwa.



Rys. 2. Algorytm pomiarowy

Charakterystyki momentu obrotowego i mocy otrzymuje się na podstawie pomierzonych wartości czasów trwania poszczególnych obrotów silnika. Metodyka obliczania wymienionych wielkości została przedstawiona między innymi w [1] i [2].



Rys. 3. Wyniki pomiarów dla pojedynczego cyklu

4. Cyklodyna jako charakterystyka procesu przejściowego

Bardzo istotną charakterystyką pracy silnika w aspekcie analizy właściwości energetycznych paliwa jest charakterystyka procesu przejściowego, przedstawiająca wartości momentu obrotowego w funkcji prędkości obrotowej.

Najczęściej analizuje się wartości momentu obrotowego podczas akceleracji, które są proporcjonalne do uzyskiwanych przyspieszeń i mocy silnika. Analizie poddano pola charakterystyk momentu obrotowego, które dla pojedynczego cyklu stanowią zamkniętą figurę geometryczną zdefiniowaną jako cyklodyna charakterystyki przejściowej. Przykładowe kształty zbioru cyklodyn opisanych w tabeli 1 jako PR2, a w tabeli 2 reprezentowane przez 2-1 i 2-2 przedstawiono na rysunku 4. Dla serii cyklodyn wytworzonych z pojedynczych badań obliczono środki ciężkości, a następnie, stosując metody statystyczne, obliczono parametry rozkładu współrzędnych środka ciężkości i określono obszar na płaszczyźnie nM_o w postaci elipsy o środku $P(n_o, M_o)$ i średnicach $2\sigma_n$ i $2\sigma_M$ [1]. Dla badanych paliw uzyskano wyniki przedstawione w tabeli 2 a graficznie zobrazowano na rysunku 5.

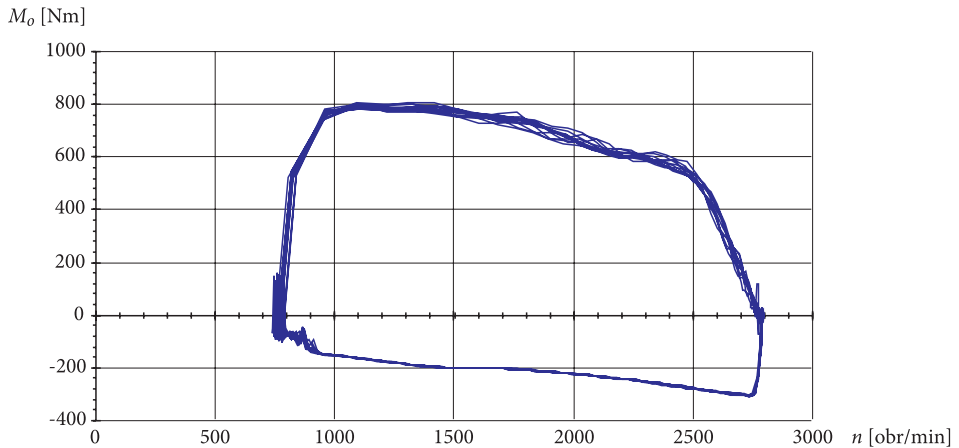
Widoczne są wyraźne zależności pomiędzy położeniem środka ciężkości cyklodyny a składem chemicznym paliwa. Analiza usytuowania środków ciężkości trójskładnikowego paliwa Biodiesel wyraźnie wskazuje, że paliwa zawierające największą zawartość tlenu kształtują cyklodyny podaży energii o wyższych wartościach momentu obrotowego przy niższych wartościach prędkości obrotowej wału korbowego silnika, co jest szczególnie korzystne w pojazdach o dużej częstotliwości przyspieszeń i zmiennych wartościach oporów ruchu np. podczas jazdy autobusów komunikacji miejskiej. Usytuowanie tych środków ciężkości odzwierciedla

właściwości eksploatacyjne silnika, ale nie daje odpowiedzi na temat sprawności procesu spalania poszczególnych paliw w komorach spalania cylindrów silnika.

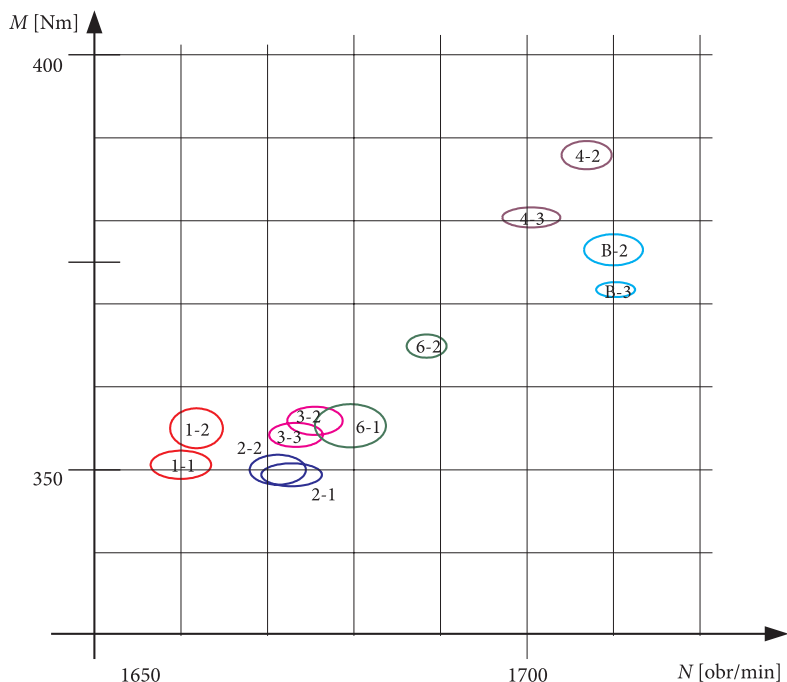
TABELA 2

Parametry rozkładów statystycznych dla badanych paliw

Seria pomiarowa	Paliwo	n_0	M_0	δ_n	δ_m
B2	ON	1710,1	376,5	6,8	3,7
B3		1710,2	371,6	4,4	1,7
1-1	Biodiesel	1669,8	350,6	7,0	3,3
1-2		1671,8	355,0	6,1	4,8
2-1		1682,2	34934	7,1	2,7
2-2		1681,2	350,0	6,5	3,6
3-2		1685,5	355,9	6,4	3,4
3-3		1683,3	354,2	6,2	2,9
4-2	ON + RME	1716,9	387,9	5,8	3,4
4-3		1710,5	380,4	6,7	2,3
6-1	RME	1689,6	355,3	8,1	5,2
6-2		1698,4	364,9	4,6	2,8



Rys. 4. Zbiór cykłodyn dla wariantu 2 paliwa BIOXDIESEL



Rys. 5. Zbiór środków ciężkości cyklodłyn dla silnika zasilanego różnymi paliwami

5. Analiza efektywności energetycznej procesów spalania biopaliw

Najczęściej właściwości energetyczne paliwa określa się na podstawie jego wartości opałowej, która przedstawia ilość energii, jaką zawiera dane paliwo, co może służyć do prognozowania zużycia paliwa przez silnik, jego sprawności i ilości emitowanych gazów spalinowych. Należy jednak zaznaczyć, że wartość ta zależy od stosunku wodoru i węgla oraz budowy cząsteczkowej decyduje o zużyciu paliwa, natomiast moc silnika zależy od wartości opałowej mieszanki paliwowo-powietrznej. Dlatego właściwości energetyczne paliwa analizuje się najczęściej za pomocą określenia maksymalnego momentu obrotowego i mocy lub pracy użytecznej wykonanej przez silnik dla zadanej ilości paliwa. Dokładna analiza efektywności procesu spalania paliwa w cylindrach silnika wymaga nie tylko określenia pracy użytecznej na kole zamachowym wału korbowego, lecz pracy całkowitej wykonywanej przez siły gazowe oddziałujące na mechanizm tłokowo-korbowy silnika. W tym celu określono efektywność procesu spalania η jako stosunek pracy całkowitej W_c do energii zużytego paliwa E_p (2). Taka metodyka jest szczególnie uzasadniona w przypadku badań silnika w stanach nieustalonych, czyli akceleracji i deceleracji z obciążeniem jedynie własnymi masami wirującymi i siłami tarcia.

$$\eta = \frac{W_c}{E_p}, \quad (2)$$

przy czym praca całkowita W_c jest sumą pracy efektywnej W_e i pracy oporów ruchu W_r .

$$W_c = W_e + W_r. \quad (3)$$

W stanach ustalonych praca jest iloczynem mocy N i czasu t . Ponieważ w trakcie badań dynamicznych moc silnika zmienia się i jest funkcją czasu $N(t)$, to do obliczeń stosuje się całkę mocy po czasie (4).

$$W = \int_{t_p}^{t_k} N(t) dt. \quad (4)$$

W efekcie otrzymujemy zależność (5)

$$W_c = \int_{t_p}^{t_k} N_e(t) dt + \int_{t_p}^{t_k} N_r(t) dt = \int_{t_p}^{t_k} [N_e(t) + N_r(t)] dt. \quad (5)$$

Ponieważ pomiary były realizowane zgodnie z algorytmem (rys. 2) i wyniki rejestrowano w dyskretnych chwilach czasowych dokładnie co jeden obrót wału korbowego, to wzór obliczeniowy przyjmuje postać (6)

$$W_c = \sum_{i=1}^n [N_e(i) + N_r(i)] t(i). \quad (6)$$

Do określenia efektywności należy jeszcze obliczyć energię zużytego paliwa E_p . Jest ona iloczynem masy paliwa m_p i jego wartości opałowej W_{op}

$$E_p = m_p \cdot W_{op}. \quad (7)$$

Ponieważ mierzone było chwilowe zużycie paliwa, to do obliczeń należy użyć wzoru (8), a przy pomiarach dyskretnych (9).

$$E_p = \int_{t_p}^{t_k} m_p(t) W_{op} dt = W_{op} \int_{t_p}^{t_k} m_p(t) dt, \quad (8)$$

$$E_p = W_{op} \sum_{i=1}^n m_p(i) t(i). \quad (9)$$

Paliwomierz w stanowisku badawczym mierzył objętość podawanego paliwa, odpowiadającą standardowemu olejowi napędowemu, i wyskalowany był dla masy m_w . Należy więc dokonać korekty masy paliwa m_p wynikającej z różnicy gęstości paliwa badanego ρ_p i gęstości oleju napędowego ρ_{ON} .

$$m_p = m_w \frac{\rho_p}{\rho_{ON}}. \quad (10)$$

Do obliczania energii zużytego paliwa zastosowano więc wzór (11).

$$E_p = W_{op} \frac{\rho_p}{\rho_{ON}} \sum_{i=1}^n m_w(i) t(i). \quad (11)$$

Efektywność procesu spalania natomiast obliczano ze wzoru (12).

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n [N_e(i) + N_r(i)] t(i)}{W_{op} \frac{\rho_p}{\rho_{ON}} \sum_{i=1}^n m_w(i) t(i)}, \quad (12)$$

gdzie: i — numer kolejnego obrotu wału korbowego;
 $N_e(i)$ — moc efektywna dla i -tego obrotu;
 $N_r(i)$ — moc oporów ruchu dla i -tego obrotu;
 $m_w(i)$ — wartość zużycia paliwa wskazana przez paliwomierz dla i -tego obrotu;
 ρ_p — gęstość badanego paliwa;
 ρ_{ON} — gęstość standardowego oleju napędowego;
 W_{op} — wartość opałowa badanego paliwa;
 $t(i)$ — czas trwania i -tego obrotu.

Przedstawione we wzorze (12) wartości gęstości badanego paliwa oraz standardowego oleju napędowego, a także wartości opałowej badanego paliwa zostały określone laboratoryjnie podczas oddzielnych badań. Przebieg chwilowego zużycia paliwa wskazany przez paliwomierz oraz czas trwania poszczególnych obrotów zostały precyzyjnie zarejestrowane na stanowisku badawczym, a przebieg mocy efektywnej obliczony według wcześniej opisanej metodyki.

Przebieg mocy oporów ruchu otrzymujemy podczas deceleracji wału korbowego silnika, czyli w fazie pracy silnika bez wtrysku paliwa. Konieczne jest natomiast odtworzenie kształtu cyklodiny dla całego badanego czasu pracy.

Można zauważyć, że moc oporów ruchu jest funkcją prędkości obrotowej. Założono, że poza okresem deceleracji silnika moc ta przyjmuje identyczne wartości, zależne od prędkości obrotowej. W efekcie przyjęto, że przebieg mocy oporów ruchu N_r można odtworzyć, podstawiając dla kolejnych obrotów wartości funkcji $N_r(n)$, gdzie n — prędkość obrotowa wału korbowego silnika.

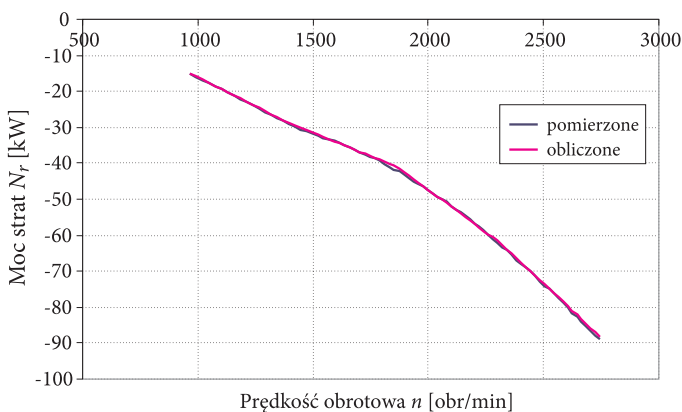
Rozpatrzono szereg modeli matematycznych funkcji aproksymujących $N_r(n)$, w tym funkcję wykładniczą, wielomianową trzeciego rzędu i prostą łamaną. Przyjmując jako wzorzec funkcję $N_r(n)$ uzyskiwaną podczas deceleracji silnika oraz kryterium najmniejszych kwadratów, najlepsze wyniki uzyskano dla czteroodcinkowej prostej łamanej. Współczynniki kierunkowe prostej (a_1, a_2, a_3, a_4), przesunięcie b_2 na osi N_r oraz wartości graniczne podziału prostej na odcinki (n_1, n_2, n_3) były empirycznie określane. Przesunięcia b_1, b_3 i b_4 , na osi N_r były natomiast obliczane na podstawie wartości pozostałych prostych. Funkcję optymalizowano ze względu

na dwa kryteria: jako pierwsze kryterium przyjęto zerową wartość sumy, a jako drugie minimum sumy kwadratów odchyień od przebiegów pomierzonych dla fazy deceleracji. Określona funkcja bardzo dobrze odzwierciedlała zależność mocy strat dla pojedynczej fazy deceleracji. Podczas całego badania składającego się z 12 cykli następowała jednak zmiana wartości mocy strat, szczególnie podczas pierwszych 4 cykli. Ponieważ zmiany wartości były proporcjonalne niezależnie od prędkości obrotowej, dodatkowo skorygowano powyższą funkcję, przemnażając przez dwuodcinkową prostą łamaną, zależną od liczby porządkowej kolejnego obrotu i w danym badaniu. Parametry prostej łamanej dobrano według identycznych kryteriów jak poprzednio, tylko z uwzględnieniem wszystkich cykli w danym badaniu. Otrzymano funkcję aproksymującą (13).

$$f(n,i) = f(n) \cdot f(i), \tag{13}$$

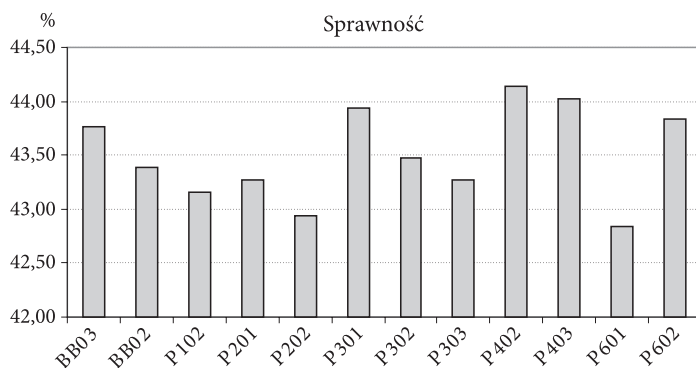
gdzie: $f(n)$ — czteroodcinkowa prosta łamana, zależna od prędkości obrotowej,
 $f(i)$ — dwuodcinkowa prosta łamana, zależna od kolejnego obrotu wału korbowego.

Efekt aproksymacji dla przykładowego przebiegu deceleracji przedstawiono na rysunku 6.

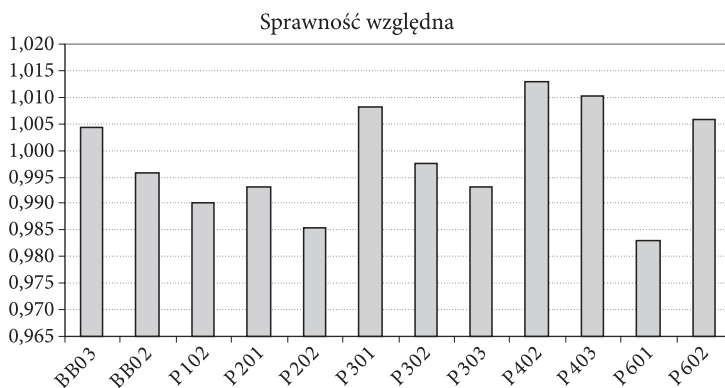


Rys. 6. Pomierzona i aproksymująca funkcja mocy strat dla przykładowej fazy deceleracji silnika

Określenie funkcji aproksymującej umożliwiło utworzenie przebiegu mocy strat i obliczenie sprawności energetycznej procesu spalania paliwa w cylindrach silnika. Wyniki uzyskane dla poszczególnych paliw przedstawiono na rysunkach 7 i 8, przy czym na wykresie 7 przedstawiono wartości bezwzględne, a na wykresie 8 wartości względne w stosunku do średniej sprawności silnika zasilanego standardowym olejem napędowym.



Rys. 7. Efektywność procesu spalania dla poszczególnych paliw



Rys. 8. Względna efektywność procesu spalania dla badanych paliw

Analiza uzyskanych rezultatów wymaga przeprowadzenia analizy ewentualnych błędów pomiarów i przetwarzania danych. Podczas badań dołożono wszelkich starań, by dokładność pomiarów była jak najwyższa, a warunki powtarzalne. Tym niemniej niepewność pomiarów można oszacować na około 0,5%, a ponadto nie da się uniknąć błędów systematycznych wynikających z różnych warunków pracy silnika, błędów pomiaru wartości opałowej i gęstości paliwa, powtarzalności składu paliwa czy aproksymacji mocy oporów ruchu. Ponadto silnik najwięcej paliwa zużywał podczas pracy w chwilowym stanie ustalonym przy maksymalnej prędkości obrotowej wału korbowego, w którym sprawność procesu spalania dla wszystkich badanych paliw jest podobna. Są to niewielkie błędy, ale o nieznanym charakterze i przyjmowanie jakichkolwiek konkluzji przy zróżnicowaniu wyników na poziomie 1,5% jest ryzykowne.

Bardziej miarodajne może być określenie efektywności procesu spalania podczas akceleracji silnika. Przy maksymalnym wysunięciu listwy sterującej podczas akceleracji można założyć, że dla parzystej liczby obrotów silnika zużyta objętość paliwa V będzie identyczna dla każdego typu paliwa.

Sprawność efektywną bezwzględną określoną dla 20 obrotów w czasie rozpędzania silnika przedstawia więc zależność (14).

$$\eta = \frac{\sum_{i=k}^{k+20} [N_e(i) + N_r(i)] t(i)}{W_{op} \rho_p V}. \quad (14)$$

Nie można jednak obliczyć sprawności w wartościach bezwzględnych, ponieważ jak wcześniej przedstawiono dokładny pomiar objętości dostarczonego do silnika paliwa V podczas akceleracji nie był możliwy. Można natomiast w sposób relatywnie dokładny określić sprawność względną η_w . Jeżeli przyjmiemy jako poziom odniesienia sprawność dla oleju napędowego to otrzymamy (15).

$$\eta_w = \frac{W_{oON} \rho_{oON}}{W_{op} \rho_p} \frac{\sum_{i=k}^{k+20} [N_e(i) + N_r(i)] t(i)}{\sum_{i=k}^{k+20} [N_{eON}(i) + N_{rON}(i)] t(i)}. \quad (15)$$

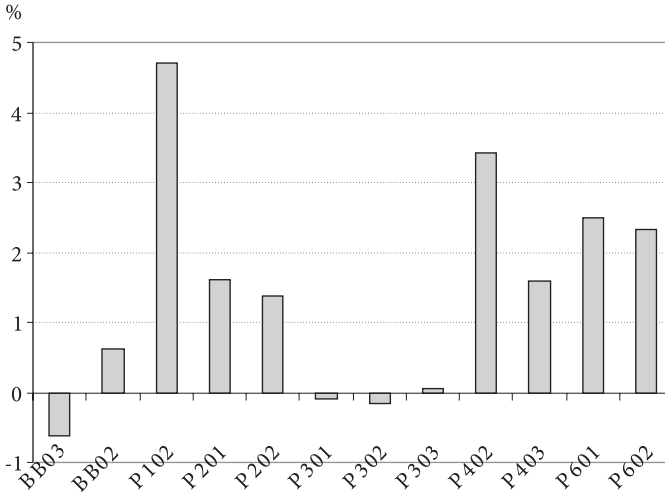
Uzyskane wyniki przedstawiono na wykresie na rysunku 9.



Rys. 9. Względna sprawność procesu spalania podczas akceleracji silnika dla badanych paliw

Analiza sprawności względnej podczas rozpędzania silnika umożliwia już wyciągnięcie pewnych wniosków, ale wyniki nadal są obciążone wcześniej wymienionymi błędami. Możemy także dokonać analizy różnic sprawności względnej pomiędzy okresami akceleracji silnika i całego badania tworzącego cyklodynę. Proces akceleracji był częścią tego samego badania i w związku z tym błędy systematyczne w większości możemy pominąć. Wykres zmian sprawności przedstawiono na rysunku 10.

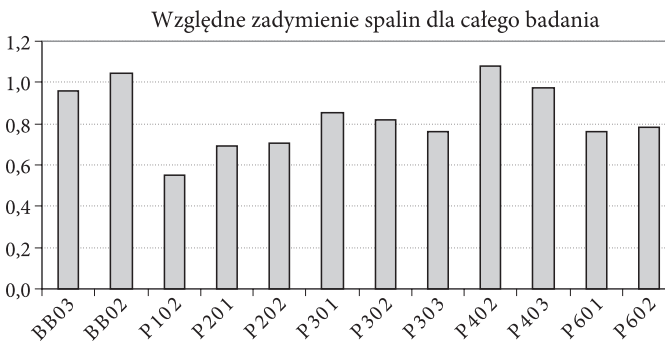
Analiza relatywnego określenia sprawności względnej procesu spalania dowodzi, że wartości sprawności procesu spalania są wyższe dla biopaliw ze znaczącą zawartością bioetanolu i mieszaniny estrów wyższych kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego i są proporcjonalne do wartości stosunku wodoru i węgla, a także zawartości tlenu w cząsteczce.



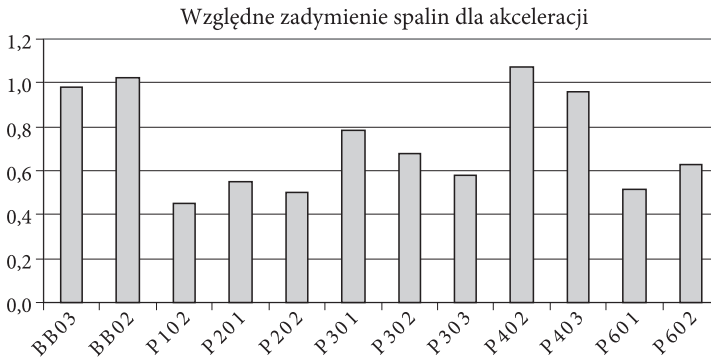
Rys. 10. Różnica względnej sprawności procesu spalania dla okresu akceleracji silnika i badania tworzącego cyklodynę

6. Analiza zadymienia spalin

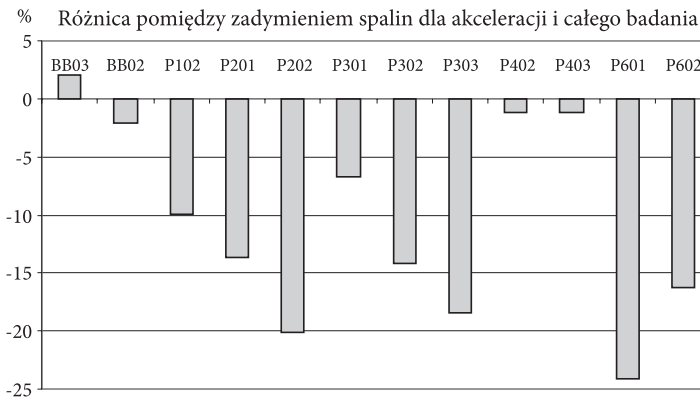
Wskaźnikiem jakości procesu spalania paliwa w cylindrze silnika jest m.in. zadymienie spalin odzwierciedlające zawartość sadzy i innych cząstek stałych jako wynik niecałkowitego i niezupełnego spalenia wtryskniętego do cylindra paliwa. Wykorzystując system pomiarowy przedstawiony na rysunku 1, mierzono wartości zadymienia spalin podczas zasilania silnika paliwami określonymi w tabeli 1. Na tej podstawie obliczono wartości średnie dla badania tworzącego cyklodynę i wartości średnie dla 20 obrotów silnika podczas akceleracji (fragment dodatniej części cyklodyny). Wyniki względnych wartości zadymienia spalin przedstawiono na wykresach na rysunkach 11 i 12.



Rys. 11. Względne zadymienie spalin dla całej cyklodyny



Rys. 12. Względne zadymienie spalin dla fragmentu dodatniej części cyklodłyny



Rys. 13. Względna różnica zadymienia spalin dla okresu akceleracji i całego zakresu cyklodłyny

Ponadto przeanalizowano względną różnicę zadymienia spalin pomiędzy okresem akceleracji i średnią dla całego badania.

Analiza wykresów jednoznacznie dowodzi, że zadymienie spalin jest zdecydowanie niższe dla biopaliw ze znaczącą zawartością bioetanolu i mieszaniny estrów wyższych kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego proporcjonalnie do wartości stosunku wodoru do węgla, a także zawartości tlenu w cząsteczce. Uzyskane rezultaty zadymienia spalin potwierdzają jednoznacznie wnioski wynikające z analizy efektywności energetycznej procesów spalania.

Wnioski

1. Efektywność procesu spalania biopaliwa w cylindrach silnika zależy od stosunku wodoru do węgla, a zwłaszcza zawartości tlenu we wtryskiwanym paliwie.

Tlen umożliwia pełniejsze spalanie węglowodorów w końcowej fazie wtrysku, szczególnie podczas akceleracji wału korbowego silnika.

2. Sprawność procesów spalania biopaliw jest tym wyższa, im wyższa jest zawartość tlenu w paliwie i w efekcie występuje zdecydowanie niższe zadymienie spalin w stosunku do paliwa węglowodorowego i mieszaniny o niskiej zawartości tlenu.
3. Silniki spalinowe o ZS zasilane biopaliwami z komponentami metylowymi i etylowymi pracujące w stanach nieustalonych generują porównywalne pole podaży energii jak przy zasilaniu standardowym olejem napędowym, pomimo mniejszej wartości energetycznej biopaliw.

Artykuł wpłynął do redakcji 14.12.2009 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w grudniu 2009 r.

LITERATURA

- [1] W. OLCHOWIK, M. STRUŚ, *Metrologiczne aspekty badań silnika spalinowego o ZS zasilanego paliwami alternatywnymi w stanach nieustalonych*, 5th International Scientific Conference on Combustion Engines KONSSPAL2002, WSO im. T. Kościuszki, Wrocław, 2002.
- [2] W. OLCHOWIK, M. STRUŚ, *Metody analizy własności dynamicznych silnika o ZS zasilanego mieszaninami paliw odnawialnych na podstawie charakterystyki przejściowej*, Międzynarodowa Konferencja Naukowa DIAG 2003, Ustroń, 2003.
- [3] A. PIĘTAK, *Diagnozowanie silników o ZS na podstawie przebiegu procesu przejściowego*, Politechnika Poznańska, Poznań, 1998.
- [4] M. STRUŚ, *Charakterystyki silnika spalinowego o ZS zasilanego paliwami alternatywnymi w procesach przejściowych*, 5th International Scientific Conference on Combustion Engines KONSSPAL2002, WSO im. T. Kościuszki, Wrocław, 2002.
- [5] M. STRUŚ, W. OLCHOWIK, *Metody analizy własności dynamicznych silnika o ZS zasilanego mieszaninami paliw odnawialnych na podstawie wartości chwilowego momentu obrotowego*, Międzynarodowa Konferencja Naukowa DIAG 2003, Ustroń, 2003.
- [6] M. STRUŚ, *Mieszanina węglowodorów mineralnych i biokomponentów etylowych w zasilaniu silników o ZS*, VII Międzynarodowa Konferencja Naukowa Silniki Gazowe, 2006, Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 2006.
- [7] M. STRUŚ, *Biopaliwa etylowe do tłokowych silników spalinowych*, XXIX Konferencja Naukowa „Rośliny Oleiste”, Poznań, 2008.

W. OLCHOWIK, M. STRUŚ

Analysis of the impact of biofuel chemical composition on the exploitation properties of combustion engine

Abstract. The paper presents the comparison of combustion processes efficiency in diesel engine running on various renewable and standard fuel mixtures. Engine efficiency and the fuel combustion quality were determined by measuring the crankshaft acceleration and smoke levels. Fully automatized measurement system was used to conduct programmed set of measurements. The size of the energy area, effectiveness and efficiency of combustion process were determined using innovative data processing and analysis methods.

Keywords: biocomponents, cyklodyne, Biodiesel, effectiveness and efficiency of combustion process