

Mieczysław S. Struś

**Ocena wpływu biopaliw
na wybrane właściwości
eksploatacyjne silników
o zapłonie samoczynnym**



Oficina Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej
Wrocław 2012

Recenzenci
Lech SITNIK
Zdzisław STELMASIAK

Opracowanie redakcyjne i korekta
Alina KACZAK

Projekt okładki
Marcin ZAWADZKI

Wszelkie prawa zastrzeżone. Żadna część niniejszej książki, zarówno w całości, jak i we fragmentach, nie może być reprodukowana w sposób elektroniczny, fotograficzny i inny bez zgody wydawcy i właściciela praw autorskich.

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2012

OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCLAWSKIEJ
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
<http://www.oficyna.pwr.wroc.pl>
e-mail: oficwyd@pwr.wroc.pl
zamawianie.ksiazek@pwr.wroc.pl

ISBN 978-83-7493-717-7

Drukarnia Oficyny Wydawniczej Politechniki Wrocławskiej. Zam. nr 941/2012.

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń.....	5
1. Wprowadzenie.....	7
2. Przedmiot pracy.....	9
3. Analiza wiedzy w zakresie tematu pracy.....	11
3.1. Kształtowanie sektora biopaliw ciekłych w Polsce.....	11
3.2. Charakterystyka biopaliw silnikowych.....	16
3.3. Estry etylowe i metylowe wyższych kwasów tłuszczowych.....	17
3.4. Charakterystyki silników w stanach ustalonych i nieustalonych.....	19
3.5. Ocena stanu wiedzy, wybór kierunków badań: paliw samoistnych, paliw 2-komponentowych, paliw 3-komponentowych.....	22
4. Cel, tezy i zakres pracy.....	31
5. Badania własne.....	33
5.1. Kompozycje i badania biopaliw.....	33
5.1.1. Schemat procesu wytwarzania i badań paliw typu BIOXDIESEL.....	33
5.1.2. Metodyka badań, eksperyment, modelowanie matematyczne.....	34
5.2. Badania właściwości komponentów 3-komponentowych biopaliw typu BIOXDIESEL i technologia ich wytwarzania.....	36
5.2.1. Metodyka określania cech właściwości fizykochemicznych komponentów i biopaliw.....	36
5.2.2. Właściwości fizykochemiczne REE.....	36
5.2.3. Analiza porównawcza właściwości fizykochemicznych biopaliw złożonych z biokomponentów etylowych i ON.....	41
5.2.4. Badania właściwości smarnych paliw BIOXDIESEL, ON, REE.....	48
5.2.5. Przykładowa technologia wytwarzania biokomponentów etylowych i paliwa BIOXDIESEL.....	51
5.3. Badania silnika zasilanego paliwem BIOXDIESEL.....	53
5.3.1. Metodyka pomiarów.....	53
5.3.1.1. Stanowisko badawcze silnika w stanach nieustalonych.....	53
5.3.1.2. Charakterystyki przepływów powietrza i paliwa, zmian prędkości obrotowej wału korbowego silnika oraz zadymienia spalin w stanach nieustalonych (przejściowych).....	60
5.3.2. Cyklodyna (pole podaży energii) i środek ciężkości cyklodiny.....	65
5.3.2.1. Parametry cyklodiny badanego silnika.....	68
5.3.2.2. Wskaźnik konwersji biopaliwa.....	78
5.3.3. Metodyka weryfikacji stanowiskowej i eksploatacyjnej doboru komponentów biopaliwa.....	79

5.3.3.1. Moment obrotowy i moc użyteczna silników zasilanych różnymi paliwami.....	79
5.3.3.2. Zadymienie spalin	83
5.3.3.3. Emisja toksycznych składników spalin	84
5.3.3.4. Zużycie energii.....	85
5.3.3.5. Trwałość aparatury wtryskowej.....	85
5.3.3.6. Parametry fizykochemiczne silnikowego oleju smarującego	89
5.3.3.7. Koksowanie wtryskiwaczy.....	91
5.3.3.8. Właściwości rozruchowe silnika w niskiej temperaturze	92
5.3.4. Wpływ udziału biokomponentów w paliwie BIOXDIESEL na efekty konwersji energii.....	93
5.3.4.1. Parametry efektywne silników eksploatacyjnych zasilanych paliwem BIOXDIESEL i ON w stanach nieustalonych	93
5.3.4.2. Parametry użyteczne silnika zasilanego ON i RME w stanach ustalonych ...	98
5.3.4.3. Wpływ biokomponentów w paliwie BIOXDIESEL na zadymienie spalin	101
5.3.4.4. Wpływ udziału biokomponentów w paliwie BIOXDIESEL na emisję składników toksycznych gazów spalinowych.....	105
5.3.5. Porównanie zużycia paliwa	107
5.3.6. Wpływ biokomponentów paliwa BIOXDIESEL na koksowanie wtryskiwaczy	108
5.3.6.1. Wyniki badań koksowania ON, RME, REE	109
5.3.6.2. Wyniki badania koksowania paliwa BIOXDIESEL	113
5.3.7. Wpływ estrów oleju rzepakowego na trwałość aparatury wtryskowej i lepkość kinematyczną oleju smarującego.....	115
5.3.8. Wpływ paliwa BIOXDIESEL na właściwości fizykochemiczne silnikowego oleju smarującego.....	120
5.3.9. Wpływ paliwa BIOXDIESEL na rozruch silnika w niskiej temperaturze otoczenia	126
5.4. Ośrodki badawcze, w których realizowano pracę	128
6. Wnioski z badań własnych	129
6.1. Wnioski dotyczące przyjętych tez pracy	130
6.2. Wnioski szczegółowe.....	131
6.3. Wnioski poznawcze	133
6.4. Wnioski utylitarne.....	133
6.5. Proponowane kierunki dalszych badań	134
Bibliografia.....	135
Streszczenie w języku angielskim	143

Wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń

BIOXDIESEL	– mieszanina FAEE (FAME), EtOH i ON
BWP	– bojowy wóz piechoty
B20	– mieszanina 20% (v/v) FAME i 80 % (v/v) ON
CNG	– sprężony gaz ziemny (<i>Compressed Natural Gas</i>)
CP	– temperatura mętnienia (<i>Cloud Point</i>)
$(d_p/d)_{\max}$	– maksymalna szybkość przyrostu ciśnienia, charakteryzująca twardość pracy silnika
E_p	– energia zużytego paliwa
EtOH	– alkohol etylowy
FAEE	– estry etylowe kwasów tłuszczowych (<i>Fatty Acid Ethyl Esters</i>)
FAME	– estry metylowe kwasów tłuszczowych (<i>Fatty Acid Methyl Esters</i>)
FT-IR	– spektroskopia w podczerwieni z transformacją Fouriera (<i>Fourier Transformation Infrared</i>)
GC-MS	– chromatografia gazowa ze spektrometrią masową (<i>Gas Chromatography-Mass Spectrometry</i>)
G_e	– godzinowe zużycie paliwa
G_{eON}	– godzinowe zużycie paliwa podczas zasilania olejem napędowym
G_{eREE}	– godzinowe zużycie paliwa podczas zasilania REE
g_e	– jednostkowe zużycie paliwa
g_{eON}	– jednostkowe zużycie paliwa podczas zasilania olejem napędowym
g_{eREE}	– jednostkowe zużycie paliwa podczas zasilania REE
HC	– niespalone węglowodory obecne w spalinach (<i>Hydrocarbons</i>)
HFC	– wodorofluorowęglowodory (<i>Hydrofluorocarbons</i>)
HFRF	– test tribologiczny badania właściwości smarych paliw i środków smarowych w warunkach poziomych drgań z dużą częstotliwością, obciążonej od góry kulki na nieruchomej płycie zanurzonej w paliwie (<i>High Frequency Reciprocating Rig</i>)
h_{listwy}	– wartość przesuwu listwy sterującej pompy wtryskowej
IC	– indeks cetanowy
I_2	– cząsteczka jodu
k	– współczynnik pochłaniania światła (badania zadymienia spalin)
LC	– liczba cetanowa
M_o	– moment obrotowy silnika
M_{oON}	– moment obrotowy silnika podczas zasilania olejem napędowym
\dot{m}_{pal}	– masowe natężenie przepływu paliwa
\dot{m}_{pow}	– masowe natężenie przepływu powietrza
M_{oREE}	– moment obrotowy silnika podczas zasilania REE
MS	– spektrometria masowa (<i>Mass Spectrometry</i>)

m/z	– stosunek masy do ładunku (wielkość używana w MS)
n	– prędkość obrotowa wału korbowego silnika
N_e	– moc efektywna silnika
N_{eON}	– moc silnika podczas zasilania olejem napędowym
N_{eREE}	– moc silnika podczas zasilania REE
NCW	– Narodowy Cel Wskaźnikowy – minimalny udział biokomponentów i innych paliw odnawialnych w ogólnej ilości paliw ciekłych i biopaliw ciekłych zużywanych w ciągu roku kalendarzowego w transporcie, określane według W_p
NO_X	– tlenki azotu
ON	– olej napędowy
p_e	– średnie ciśnienie efektywne
p_w	– maksymalne ciśnienie wtrysku
p_z	– ciśnienie spalania
PM	– zawartość sadzy i innych cząstek stałych (<i>Particulate Matter</i>)
REE	– estry etylowe wyższych kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego (<i>Rapeseed Ethyl Esters</i>)
RME	– estry metylowe wyższych kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego (<i>Rapeseed Methyl Esters</i>)
SF ₆	– heksafluorek siarki
SL BOCLE	– test tribologiczny badania właściwości smarnych paliw w warunkach współpracy obciążanej kulki z obracającym się pierścieniem częściowo zanurzonym w paliwie (<i>Scuffing Load Ball-on-Cylinder Lubricity Evaluator</i>)
SME	– estry metylowe oleju sojowego (<i>Soybean Methyl Esters</i>)
T	– temperatura
TAG	– trójpodstawione estry acylowe glicerolu (triacyloglicerole, trójglicerydy)
T_{spal}	– temperatura spalania
TZZF	– temperatura zablokowania zimnego filtra
V_{ss}	– objętość skokowa silnika
W_e	– praca całkowita
WKS	– wał korbowy silnika
WKT	– wolne kwasy tłuszczowe
W_p	– wartość opałowa paliwa
WWA	– wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne
ZI	– tłokowy silnik spalinowy o zapłonie iskrowym
ZS	– tłokowy silnik spalinowy o zapłonie samoczynnym
GMP	– górny martwy punkt (zwrot zewnętrzny)
α	– kąt obrotu wału korbowego silnika
λ	– współczynnik nadmiaru powietrza
ε	– stopień sprężania
γ	– gęstość paliwa
ρ	– gęstość powietrza
φ	– wilgotność powietrza
τ	– smarność paliwa
t	– czas

1. Wprowadzenie

Analiza dotychczasowego stanu wiedzy w zakresie badań procesów zasilania silników roślinnymi paliwami alternatywnymi, a zwłaszcza pochodzenia rzepakowego – wykazała istotne korzyści w wielu aspektach użytkowych, m.in. ekologicznym, ekonomicznym, tribologicznym [54, 59, 72, 81, 95, 122]. Jednocześnie w publikacjach przedstawia się wady stosowania biopaliw i ich negatywny wpływ na trwałość i żywotność silnika spalinowego, a także na otaczające środowisko [9, 15, 36]. Należy zaznaczyć, że biopaliwo do silników o ZS zapłonie samoczynnym stanowią mogą jednородne substancje pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego, a także mieszaniny paliwa standardowego (ON) z biokomponentem – biopaliwa 2-składnikowe oraz mieszaniny ON z biokomponentami – biopaliwa 3-składnikowe. Ze względu na złożony skład ON i biokomponentów w dalszej części pracy używane są pojęcia: biopaliwa 2-komponentowe i 3-komponentowe.

Badania w zakresie określania cech fizykochemicznych biopaliw samoistnych, stanowiących podstawę próby zastosowania do silników o ZS jednородnych paliw pochodzenia biologicznego, realizowane były przez wiele ośrodków naukowych na świecie. Wykazywały one konieczność modyfikacji konstrukcji silnikowych lub budowy specjalnych konstrukcji [34, 42, 46, 57, 141, 151].

Biopaliwa 2-komponentowe cechują się zbliżonymi właściwościami fizykochemicznymi do standardowego ON, czego skutkiem są jedynie nieco mniejsze osiągi silników i emisja składników toksycznych spalin, o zwiększonych wymaganiach dotyczących logistyki (ograniczonosc stosowania w niskiej temperaturze otoczenia, magazynowanie itp.) [4, 11, 12, 22, 25, 27, 39, 48, 53, 56, 58, 70, 104, 139, 143, 150, 154]. Obiecujące efekty użytkitarne ma zasilanie dwupaliwowe (z inicjującą dawką ON) silników o ZS zasilanych gazem, szczególnie CNG [123], a w przyszłości biogazem.

Możliwość komponowania biopaliw 3-komponentowych stanowi podstawę do kształtowania požądanych właściwości fizykochemicznych paliw w aspekcie efektywnościowym, a także proekologicznym i trwałościowym silników. Dotychczasowe prace dotyczyły głównie komponowania tego rodzaju paliwa z zastosowaniem ON, estrów metylowych wyższych kwasów tłuszczowych (przede wszystkim RME, SME) i alkoholu (metanolu i etanolu) [24, 69, 127].

Analiza dostępnych publikacji wykazuje, że prace w ośrodkach naukowych skoncentrowane były przede wszystkim na rozwoju biopaliw w aspekcie dostępności surowcowej i ekologicznym.

Rozwój ten musi być oparty na maksymalnym poznaniu zachodzących procesów fizycznych i chemicznych w aspekcie ich komponowania i spalania owocującym wytworzeniem optymalnego paliwa wieloskładnikowego do współczesnych silników o ZS.

Brak jest doniesień w literaturze o wytwarzaniu biopaliw wielokomponentowych z biokomponentami całkowicie odnawialnymi i badań silników zasilanych tymi paliwami. Praca przyczynia się do wypełnienia braków wiedzy w tym zakresie.

Zgodnie z aktualną wiedzą autora, niniejsza monografia jest pierwszą pracą w zakresie paliw wielokomponentowych z biokomponentami całkowicie odnawialnymi.

2. Przedmiot pracy

W ostatnich latach nastąpił gwałtowny rozwój prac badawczych związanych z opracowaniem nowych alternatywnych paliw do silników spalinowych.

Pomimo stałego rozwoju nie zostały dotychczas naukowo opracowane algorytmy komponowania biopaliw wieloskładnikowych z biokomponentami całkowicie odnawialnymi. Nie zostały także dostatecznie poznane zjawiska i efekty użycia biopaliw o różnych składach biokomponentów na:

- efektywność energetyczną spalania (zwłaszcza w stanach nieustalonych pracy silnika),

- smarność paliwa,
- zużycie paliwa przez silnik,
- trwałość eksploatacyjną silnika,
- emisję składników toksycznych spalin.

Do podstawowych problemów naukowych dotyczących biopaliw, a zwłaszcza paliw wieloskładnikowych skomponowanych z całkowicie odnawialnych biokomponentów, należy zaliczyć m.in.:

- a) dokładniejsze poznanie procesów fizycznych, chemicznych, termodynamicznych, eksploatacyjnych, logistycznych,

- b) opracowanie technologii wytwarzania biopaliw w aspekcie obciążenia silnika (eksploatacja dalekobieżna, miejska itp.) i proekologicznym,

- c) automatyzację procesu wytwarzania biopaliw w przedstawionych aspektach,

- d) opracowanie linii technologicznych biopaliw wielokomponentowych.

W przedstawionej rozprawie podjęte są zagadnienia cech strukturalnych biokomponentów całkowicie odnawialnych i wpływu biopaliw (głównie 3-komponentowych) z określonymi właściwościami fizykochemicznymi na cechy użytkowe silnika (efektywność, trwałość, emisja składników toksycznych). Zagadnienia zawarte w pracy odpowiadają na istotne problemy teorii i technologii biopaliw (według pkt. a–d) wybranych biopaliw trójkomponentowych typu BIOXDIESEL.

W pracy podjęto także problematykę nowego sposobu identyfikacji i opisu efektywnościowo-energetycznego tłokowych silników o zapłonie samoczynnym (ZS) przez wyznaczenie pola podaży energii w stanach nieustalonych pracy silników za

pomocą cyklodyny. Terminem tym określono: figurę powstałą na skutek cyklicznego wyznaczania momentu obrotowego M_o w funkcji prędkości obrotowej wału n silnika pracującego w stanach dynamicznych, tj. akceleracji i deceleracji wału korbowego. Cechą charakterystyczną cyklodyny jest położenie jej środka ciężkości. Opracowana metoda pozwala na określanie tzw. względnego wskaźnika konwersji, co może umożliwić szybką weryfikację oceny jakości paliwa.

3. Analiza stanu wiedzy w zakresie tematu pracy

3.1. Kształtowanie sektora biopaliw ciekłych w Polsce

Biopaliwa wytworzone z biomasy (pochodzenia roślinnego i zwierzęcego), których składnikami są węgiel, wodór i tlen, stanowiąc mogą zasadniczo zamienniki paliw ropopochodnych, bez wprowadzania istotnych zmian w konstrukcji silnika. Po raz pierwszy olej roślinny (z orzeszków ziemnych) jako paliwo zastosował Rudolf Diesel. Silnik napędzany tym biopaliwem prezentowany był na wystawie światowej w Paryżu w 1900 r. W opisie patentowym (1912 r.) Diesel napisał: *choć wykorzystanie oleju roślinnego jako paliwa jest w obecnych czasach zagadnieniem o niewielkim znaczeniu, to nie jest wykluczone, że z biegiem lat paliwa tego rodzaju będą zyskiwać na znaczeniu, jak to ma miejsce w przypadku paliw węgl- i ropopochodnych obecnie.*

W Stanach Zjednoczonych w latach trzydziestych XX wieku podjęto badania nad wytworzeniem paliw silnikowych z olejów palmowych, nasion bawełny i olejów rybnych, a w latach pięćdziesiątych XX w. w uniwersytecie w Ohio dokonano badań zastosowania mieszanek oleju napędowego z olejami roślinnymi do silnika o ZS [15].

W Niemczech w latach 30. XX wieku prowadzono badania w tym kierunku. Pierwsze prace dotyczące biopaliwa były publikowane przez A. Schmidta i K. Gauppa z Uniwersytetu Technicznego we Wrocławiu [114].

Również w Belgii i we Włoszech prowadzono prace nad zastosowaniem paliw roślinnych, czego efektem był zrealizowany z powodzeniem eksperyment zasilania silnika autobusu estrowym paliwem roślinnym na trasie Bruksela–Leoven w 1938 roku [15, 16].

Interesujące publikacje dotyczące stosowania estru etylowego z oleju palmowego opracowane przez G. Chavanne'a z Uniwersytetu Brukselskiego ukazały się w latach czterdziestych XX wieku. Zawierają one również wyniki prac prowadzonych w kolonialnym Kongo [21].

W Polsce pierwsza wzmianka o zastosowaniu biopaliwa dotyczy jego użycia do zasilania silników wozów bojowych w czasie II wojny światowej. Armia Polska po raz pierwszy w historii zastosowała do napędu czołgów silniki o zapłonie samoczynnym. Polskie czołgi 7TP były napędzane silnikami VBLDb (z bezpośrednim wtryskiem paliwa), produkowanymi na licencji firmy Saurer, a braki paliwa w czasie wojny uzupełniano olejem rzepakowym i alkoholem.

Koncepcja wykorzystania rzepaku jako surowca do produkcji paliw odżyła podczas pierwszego kryzysu paliwowego w latach 70. XX wieku. W Polsce prace rozpoczął wówczas zespół pod kierunkiem prof. Mariana Zabłockiego (Politechnika Krakowska), a celem ich było zastosowanie nieprzetworzonego oleju rzepakowego jako paliwa do silników ciągników rolniczych [157].

Możliwości zastosowania tego surowca do zasilania silników przedstawił w 1986 r. Ludwik Elsbett na konferencji naukowej KOSS '86 w Politechnice Wrocławskiej, gdzie zaprezentował zmodyfikowany przez siebie silnik Mercedesa zasilany nieprzetworzonym olejem rzepakowym [34].

Istotą modyfikacji było zastosowanie specjalnych tłoków za zmienioną komorą spalania o podwyższonej temperaturze ścianek. Umożliwiło to lepsze spalanie nieprzetworzonego oleju napędowego, co zmniejszało zadymienie spalin. Silnik uruchamiano na standardowym oleju napędowym, a po rozgrzaniu automatycznie był przełączany na zasilanie olejem rzepakowym. Przed zatrzymaniem silnik był zasilany ponownie ON, co zmniejszało możliwości blokowania aparatury wtryskowej. Wiele egzemplarzy silników zbudowanych według koncepcji przeszło długotrwałe próby eksploatacyjne, a ich przebiegi do remontu kapitalnego nie odbiegały od przebiegów silników Mercedesa zasilanych tradycyjnie ON.

Pierwsze badania dotyczące przetworzonego oleju rzepakowego (estru metylowego wyższych kwasów tłuszczowych) jako paliwa silnikowego podjął w latach 1989–1991 Andrzej Adamczyk w WSI Radom. W ramach prac opracowano polską technologię produkcji RME (*Rapeseed Methyl Esters*) i rozpoczęto pilotażową eksploatację samochodu Tarpan zasilanego tym paliwem [2].

Prace kontynuowano i rozszerzono w Instytucie Lotnictwa w latach 90. XX w. [91–93], gdzie obok badań laboratoryjnych prowadzono długotrwałe badania eksploatacyjne. Samochód osobowy Polonez, którego silnik zasilany był estrem (RME), pokonał trasę o łącznej długości 170 000 km.

W roku 1991 rozpoczęto we Wrocławiu (z udziałem autora pod kierunkiem L. Sitnika) pilotażową eksploatację autobusów komunikacji miejskiej.

Badania laboratoryjne, dotyczące RME jako paliwa i biokomponentu, wzbogacone weryfikacją eksploatacyjną prowadzono w latach 90. XX w. także m.in. na Politechnikach: Krakowskiej, Lubelskiej, Poznańskiej, Radomskiej, Szczecińskiej, Warszawskiej, Wrocławskiej, Filii Politechniki Łódzkiej w Bielsku-Białej [6, 23, 36, 37, 49, 60, 73–75, 86, 87, 103, 109, 118–120, 140–142].

Także Siły Zbrojne wielu państw zachodnich zaangażowane były w rozwój jakościowy i ilościowy paliw alternatywnych, m.in. w USA organizacja odpowiedzialna za rozwój i modernizację pojazdów lądowych Armii Amerykańskiej – TARDEC (*Tank Automotive Research and Development Engineering Center*), w swoim Programie Transferu Technologii, realizowała projekty rozwoju paliw alternatywnych, a w tym pochodzenia roślinnego [114]. Federalna Armia Austriacka w latach 90. XX w. prowadziła badania dotyczące interakcji materiałowej, eksploatacji zimowej, rozrzedzania oleju smarnego oraz zdolności do składowania [21].

W Siłach Zbrojnych RP realizowano prace dotyczące zwiększenia zakresu wielopaliowości silników o ZS z zastosowaniem biopaliw m.in. w Wojskowej Akademii Technicznej, Wojskowym Ośrodku Badawczo-Rozwojowym Służby Materiałów Pędnych i Smarów w Warszawie i Wyższej Szkole Oficerskiej Wojsk Lądowych we Wrocławiu. W ostatniej z wymienionych uczelni w 1994 r. przy współpracy m.in. z Politechniką Wrocławską zastosowano po raz pierwszy w Siłach Zbrojnych RP do zasilania silników napędowych wozów bojowych paliwo pochodzenia rzepakowego (RME i ich mieszaniny z ON) [134].

Prace prowadzone przez autora [130–132, 134, 135] dotyczyły badań silników zasilanych paliwem rzepakowym o różnym stosunku estrów metylowych do oleju napędowego, a także opracowania nowego paliwa BIOXDIESEL. Paliwo to komponowane z użyciem estrów metylowych i/lub etylowych, bezwodnego etanolu i bazowego oleju napędowego stosowano do zasilania silników wozów bojowych, samochodów ciężarowo-terenowych, autobusów komunikacji miejskiej, a także samochodów osobowych. Efektem tych prac było uzyskanie m.in. patentów na wynalazki pt. *Proekologiczne paliwo do silników o zapłonie samoczynnym – patent nr 193339* (2007 r.) [136] oraz *Mobilna wytwórnia biokomponentów i biopaliw do silników spalinowych – patent nr 207660* (2011 r.) [133].

Prace prowadzone od wielu lat przez autora ściśle korespondują z badaniami prowadzonymi na świecie w tej dziedzinie, o czym świadczą najnowsze doniesienia naukowe: m.in. w zakresie efektów użycia biopaliwa 3-komponentowego (z RME) na efektywność, emisję składników toksycznych w gazach spalinowych, jakość spalania [44, 116], czy też w zakresie efektów użycia różnych biokomponentów na fizykochemiczne właściwości paliwa do silników o zapłonie samoczynnym [2, 120].

Biorąc pod uwagę wytyczne Dyrektywy 2003/30/WE, zobowiązujące państwa członkowskie UE do podejmowania działań prowadzących do osiągnięcia określonego minimalnego udziału biokomponentów na rynku paliw transportowych, sposób dochodzenia do tych wielkości w Polsce w latach 2007–2014 (Narodowe Cele Wskaźnikowe NCW) kształtuje się w sposób przedstawiony w tabeli 3.1. Natomiast w tabeli 3.2. przedstawiono dla porównania udział biokomponentów w ogólnej ilości paliw zużywanych w transporcie w okresie poprzedzającym obowiązek realizacji NCW.

Tabela 3.1. Udział biopaliw w ogólnej ilości paliw ciekłych [112]

2007 r.	2,30%
2008 r.	3,45%
2009 r.	4,60%
2010 r.	5,75%
2011 r.	6,20%
2012 r.	6,65%
2013 r.	7,10%
2014 r.	7,55%

Tabela 3.2. Udział biopaliw w ogólnej ilości paliw ciekłych w latach 2004–2006 [83]

2004 r.	0,30%
2005 r.	0,48%
2006 r.	0,92%

Pełną transpozycję Dyrektywy 2003/30/WE do polskiego prawa zapewniły Ustawy z dnia 25 sierpnia 2006 r.: *O biokomponentach i biopaliwach ciekłych* oraz *O systemie monitorowania i kontrolowania jakości paliw*. Ustawy te wprowadziły do polskiego prawa kilka zmian, ukierunkowanych na tworzenie korzystnych warunków rozwoju rynku biokomponentów i biopaliw ciekłych, w tym dwie niezwykle istotne [29, 30]:

1. Wprowadzenie, z dniem 1 stycznia 2008 r., obowiązku zapewnienia określonego udziału biokomponentów na rynku paliw transportowych. Obowiązek ten został nałożony na przedsiębiorców wykonujących działalność gospodarczą w zakresie wytwarzania i importu lub nabycia wewnątrzspółnotowego paliw lub biopaliw ciekłych, którzy sprzedają je lub zużywają na własne potrzeby. Podmioty realizujące ten obowiązek określane są jako podmioty realizujące Narodowy Cel Wskaźnikowy.

2. Wprowadzenie do polskiego prawa pojęcia „wybrane floty” definiowanego jako grupa co najmniej 10 pojazdów, ciągników rolniczych, maszyn nieporuszających się po drogach, grupa lokomotyw lub statków wyposażonych w silniki przystosowane do spalania biopaliwa ciekłego będących własnością lub użytkowanych przez osobę fizyczną wykonującą działalność gospodarczą, osobę prawną lub jednostkę organizacyjną niemającą osobowości prawnej. Wprowadzenie tego pojęcia umożliwiło zastosowanie w pojazdach i maszynach należących do „wybranych flot” biopaliw o zwiększonym (nienormatywnym) udziale biokomponentów.

W roku 2010 w Polsce przetworzono około 25,6 mln Mg ropy naftowej, z czego ok. 50% stanowiły paliwa w postaci oleju napędowego oraz benzyny (tab. 3.3). Przewiduje się, iż do roku 2020 wzrost zapotrzebowania na tego rodzaju paliwa wyniesie 30% dla silników o ZS (olej napędowy) i 15% dla silników o ZI (benzyny).

Tabela 3.3. Szacunkowe zapotrzebowanie podstawowych paliw ciekłych [99]

Wyszczególnienie	Rok			
	2007	2008	2010	2020
Masa ropy naftowej [tys. Mg]	24 360	24 960	25 580	30 430
Razem paliwa [tys. Mg]	12 180	12 483	12 787	15 219
Olej napędowy [tys. Mg]	8808	8322	8564	10 504
Benzyzna [tys. Mg]	4100	4161	4223	4715

Zgodnie z Wieloletnim Programem Promocji Biopaliw Płynnych [83] część zapotrzebowania na paliwa mineralne zostanie zastąpiona biopaliwami bądź w postaci biokomponentów na rzecz realizacji NCW, bądź różnego rodzaju mieszanek, w tym zarówno dla flot, jak i samoistnych paliw (tab. 3.4).

Tabela 3.4. Przewidywane wielkości produkcji biokomponentów [tys. Mg] [99]

	2007	2008	2010	2020
Produkcja estrów	13,7	385	766	1 829
na rzecz NCW		325	546	1 389
na rzecz mieszanek i samoistnych paliw	–	60	220	440
Produkcja bioetanolu	10,1	257	469	1 074
na rzecz NCW		227	379	694
na rzecz mieszanek i samoistnych paliw	–	30	90	380
Razem produkcja biokomponentów	23,8	642	1 235	2 902

Realizacja przyjętego programu udziału biopaliw w całości zużywanych paliw ciekłych może doprowadzić do istotnych efektów ekonomicznych, technicznych i ekologicznych dla całej gospodarki w Polsce (tab. 3.5.).

Tabela 3.5. Wpływ biopaliw na zmniejszenie zużycia ropy naftowej [99]

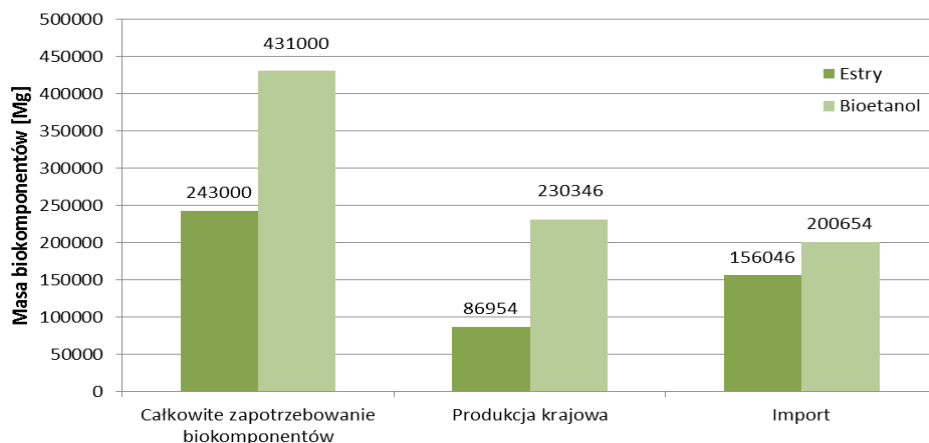
	2007	2008	2010	2020
Zmniejszenie zapotrzebowania ropy naftowej z tytułu produkcji paliw [tys. Mg]	47,6	1 283,8	2 469,4	5 804,9
Zmniejszenie wydatków z tytułu zakupu ropy naftowej [mln zł]	87,2	2 382,9	4 583,5	1 074,5

Należy zaznaczyć, że firmy paliwowe wprowadziły na polski rynek w 2008 roku ok. 674 tys. Mg biokomponentów [99], w tym 243 tys. Mg etanolu – jako komponentu benzyny silnikowej i 431 tys. Mg estrów metylowych – jako 5% dodatku do ON oraz zawartych w biopaliwach B20 i B100.

Porównując wielkości produkcji biopaliw oraz ich konsumpcji (rys. 3.1), należy stwierdzić, że dla skutecznego wypełnienia Narodowego Celu Wskaźnikowego, znaczący udział stanowił import (nabycie wewnątrzspółnotowe i pozawspółnotowe). Analiza realizacji wskaźników NCW w kolejnych latach wykazała podobną relację wielkości produkcji krajowej i importu biokomponentów.

Wprowadzenie do polskiego prawa pojęcia „wybrane floty” umożliwia zaawansowane zwiększenie użycia biokomponentów w paliwach ciekłych proporcjonalnie do bieżącej koniunktury ekonomicznej, a zwłaszcza świadomości ekologicznej i technicznej użytkowników pojazdów napędzanych tłokowymi silnikami spalinowymi.

Reasumując, przyjęte przez Polskę zobowiązania ekologiczne w zakresie ochrony klimatu ziemskiego narzucają podjęcie działań mających na celu materializację



Rys. 3.1. Realizacja Narodowego Celu Wskaźnikowego w 2008 r. [99]

rozwiązań technologicznych i opracowań patentowych. Wiąże się to z poniesieniem określonych kosztów (6% redukcja CO₂ kosztowała Polskę ok. 12 mld EUR) związanych z reformą przemysłu energetycznego i maszynowego. W Polsce należy liczyć się ze wzrostem emisji CO₂ wynikającej z intensyfikacji produkcji i zużycia surowców energetycznych, spowodowanej koniecznością osiągnięcia poziomu dochodu narodowego podobnego do poziomu w innych krajach UE.

Potencjał usytuowania geopolitycznego, a zwłaszcza zasoby przyrodnicze Polski z wysokim wskaźnikiem – 0,4 ha urodzajnej ziemi na mieszkańca (w „starej” UE 0,25 ha/mieszkańca), ok. 984 tys. ha odłogów i ugorów na gruntach ornych (GUS 2006, od 2007 r. włączono je do tzw. „gruntów pozostałych”) – jednoznacznie wskazują na celowość wytwarzania roślinnych (a także pochodzenia zwierzęcego) biopaliw ciekłych i gazowych w ekoenergetyce i transporcie.

Autor jest zdania, że szczególnego znaczenia może nabrać wytwarzanie wieloskładnikowych biopaliw do tłokowych silników o ZS z racjonalnym jednoczesnym wykorzystaniem olejów roślinnych i odpadowych tłuszczów zwierzęcych stanowiących surowiec do produkcji estrów etylowych i metylowych wyższych kwasów tłuszczowych oraz roślin bogatych w węglowodany, np. w skrobię – stanowiących surowiec do produkcji etanolu.

3.2. Charakterystyka biopaliw silnikowych

Wyniki dotychczasowych prac własnych [124–138], a także analiza literatury światowej [11–13, 17, 26, 38, 94, 106, 113, 115–120, 144, 147, 148–150, 155, 156] upoważniają do następujących tez i twierdzeń:

1. Procesy wytwarzania estrów metylowych i etylowych wyższych kwasów tłuszczowych zawierają się w obszarach działań zmierzających w kierunku zrównoważenia systemów energetycznych w zakresie emisji składników wpływających na stan środowiska naturalnego.

2. Estry metylowe wyższych kwasów tłuszczowych produkowane dotychczas na bazie olejów roślinnych (surowiec odnawialny) i bezwodnego alkoholu metylowego – nie są w 100% odnawialnym nośnikiem energetycznym. Zgodnie ze znanymi technologiami metanol na skalę przemysłową jest pozyskiwany głównie z surowców kopalnych, a więc nie jest surowcem odnawialnym. Byłby odnawialnym wówczas, gdyby pozyskiwano go np. z biometanu.

3. Zastosowanie bezwodnego etanolu wytworzonego z biomasy, zwanego czasem bioetanolem, daje natomiast produkt transestryfikacji całkowicie odnawialny w postaci estrów etylowych wyższych kwasów tłuszczowych REE (*Rapeseed Ethyl Esters*). Estry metylowe będą mogły spełnić ten warunek tylko wtedy, kiedy zaczniemy produkować metanol na skalę przemysłową z biomasy.

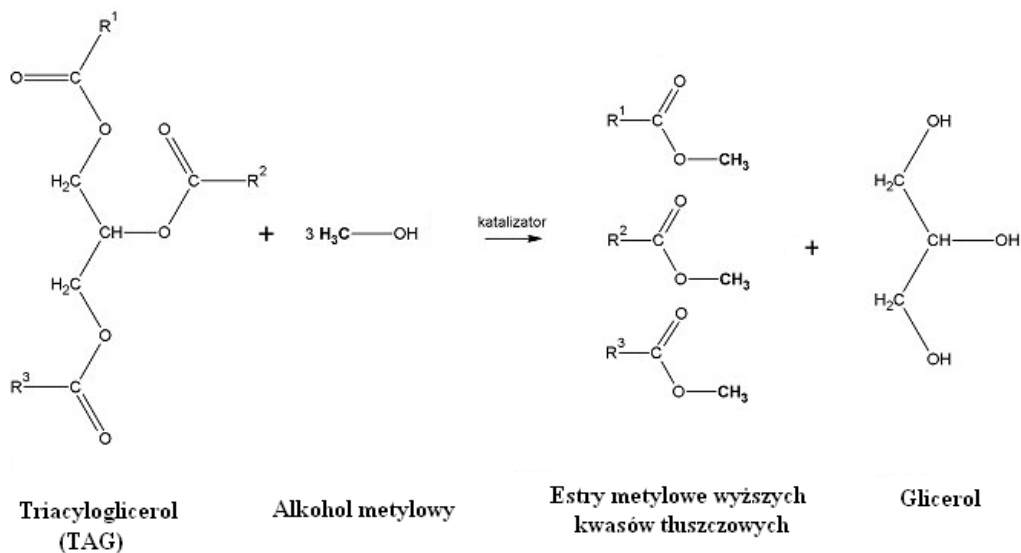
4. W polskiej literaturze pojawiła się informacja, która jest w istocie dezinformacją [9], jakoby mieszanina węglowodorów z estrami alkilowymi wyższych kwasów tłuszczowych i alkoholem alkilowym wykazywała silne właściwości hydrofilowe. Jest to prawdopodobnie wynikiem rutynowego podejścia do problemu, które zwykle zakłada, że gdziekolwiek i kiedykolwiek mamy do czynienia z bezwodnym alkoholem alkilowym niezależnie od środowiska, w jakim się znajduje, musi to powodować wzrost właściwości hydrofilowych. Nie zawsze tak jest! Prace kierowane przez autora w zakresie badań pochłaniania wody wykazały, że mieszaniny węglowodorów alifatycznych z estrami etylowymi wyższych kwasów tłuszczowych i bezwodnym alkoholem etylowym, są znacznie mniej hydrofilowe niż mieszaniny tych samych węglowodorów z bezwodnym alkoholem etylowym, co ma istotne znaczenie eksploatacyjne [128].

3.3. Estry etylowe i metylowe wyższych kwasów tłuszczowych

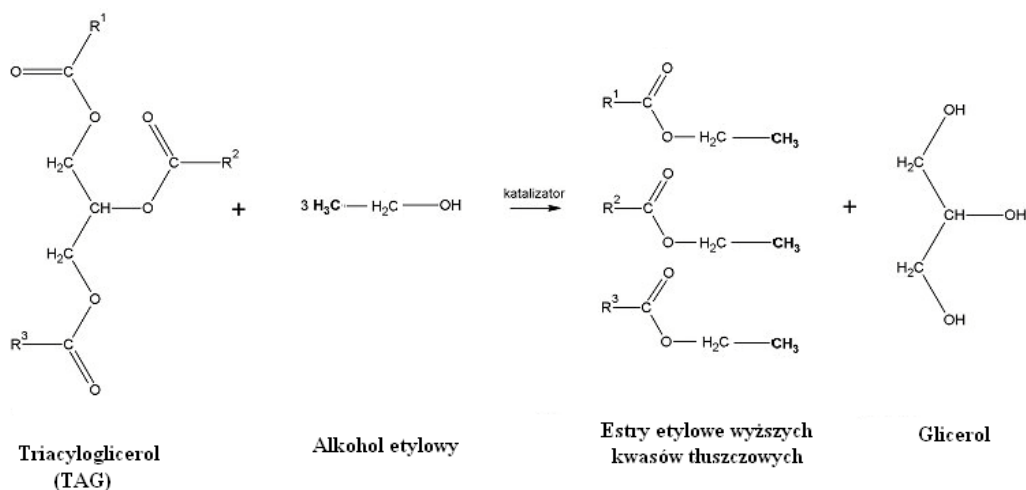
W podstawowym ustawodawstwie europejskim (i polskim) jako biokomponenty paliw do silników o ZS oraz jako samoistne paliwa określa się estry metylowe wyższych kwasów tłuszczowych (RME, FAME) i estry etylowe wyższych kwasów tłuszczowych (REE, FAEE). Jednak dla estrów etylowych, pomimo stosunkowo dużej wartości energetycznej, nie opracowano dotychczas unormowań prawnych w zakresie cech fizykochemicznych.

Większa wartość opałowa estrów etylowych w stosunku do estrów metylowych jest wynikiem reakcji triacylogliceroli (TAG) z etanolem (podstawnik etylowy)

mającym dodatkową grupę CH_2 , w stosunku do metanolu (podstawnik metylowy) (rys. 3.2 i 3.3).



Rys. 3.2. Schemat transestryfikacji z użyciem metanolu [120, 127]



Rys. 3.3. Schemat transestryfikacji z użyciem etanolu [127]

Wykorzystanie do zasilania silników estrów (zarówno etylowych, jak i metylowych) w porównaniu do standardowych paliw węglowodorowych w znacznym stopniu redukuje zawartość sadzy i tlenku węgla w spalinach silników ZS. Dodatkowo re-

dukuje lub całkowicie eliminuje zawartość dwutlenku siarki [138]. Estry te różnią się jednak produktami niecałkowitego spalania, które są wynikiem nieodpowiedniej temperatury i ciśnienia w komorze spalania. W trakcie procesu niecałkowitego spalania estrów metylowych wydzielają się toksyczne substancje, np. rodniki formaldehydu, które nie występują w przypadku niecałkowitego spalania estrów etylowych. Spaliny silników o ZS zasilanych RME zawierają kilkakrotnie więcej wolnych rodników metylowych niż spaliny silników zasilanych REE [139].

Wydaje się, że jedynym powodem, dla którego estry metylowe zdominowały rynek ekopaliw w Europie i na świecie są względy ekonomiczne, metanol bowiem jest tańszy od etanolu. Jednak postęp w rozwoju nowoczesnych procesów inżynierii chemicznej daje nadzieję na produkcję etanolu w procesach ciągłych, co spowoduje, że w przyszłości prawdopodobnie cena alkoholu etylowego będzie konkurencyjna do obecnej ceny metanolu.

Te argumenty, a także niewielka liczba światowych doniesień w literaturze, przemawiają za prowadzeniem intensywnych prac dotyczących wytwarzania i kształtowania właściwości wieloskładnikowych biopaliw z użyciem estrów etylowych zamiast metylowych.

3.4. Charakterystyki silników w stanach ustalonych i nieustalonych

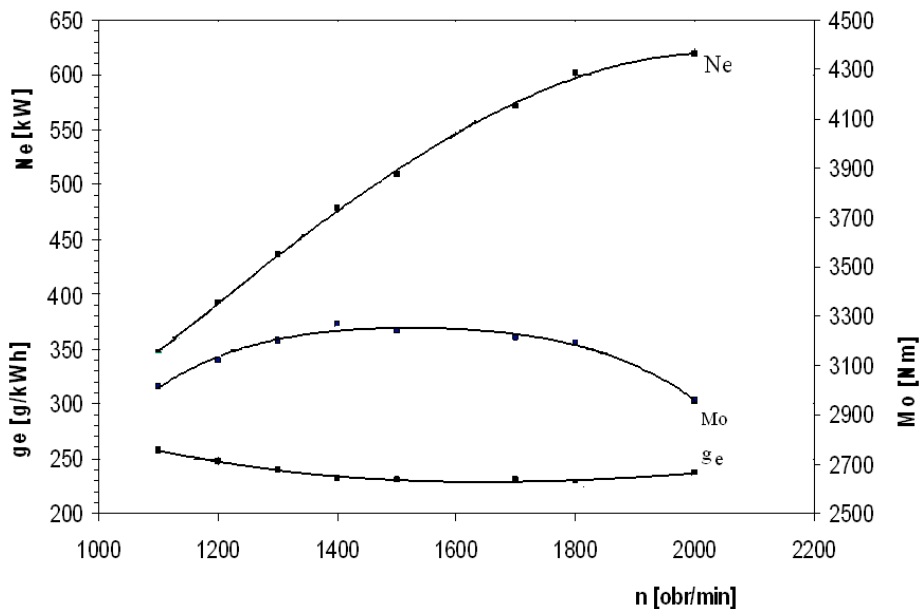
Wzajemne zależności podstawowych parametrów pracy silnika (N_e , M_o , p_e , G_e , T_{spal} , g_e , λ i n) lub zależność tych parametrów od regulacji układu zasilania i zapłonu silnika dotyczą ustalonych warunków pracy. Powszechnie przedstawiane charakterystyki silnika (prędkościowe, obciążeniowe, regulacyjne, regulatorowe, biegu luzem, ogólne, porównawcze, detonacyjne), opracowywane są po ustabilizowaniu się parametrów mierzonych i otoczenia, są więc charakterystykami statycznymi.

Kryterium stałości stanów pracy silnika w tych warunkach można sformułować jako [97, 120]:

$$\frac{dM_o}{dt} = 0, \quad \frac{dn}{dt} = 0, \quad \frac{dQ}{dt} = 0 \quad (3.1)$$

gdzie: M_o – moment obrotowy silnika, n – prędkość obrotowa wału korbowego, Q – ciepło doprowadzone wraz z paliwem.

Przykładową charakterystykę prędkościową silnika S-12U (czołgu PT91 Twardy) w stanach ustalonych przedstawiono na rysunku 3.4.



Rys. 3.4. Charakterystyka prędkościowa silnika S-12U zasilanego ON (badania własne)

Z zasady działania tłokowego silnika spalinowego wynika, że układ równań (3.1) nie jest spełniony ze względu na sposób doprowadzania paliwa (ciepła) w postaci oddzielnych dawek i zmian wartości chwilowych momentu obrotowego i prędkości obrotowej wału korbowego silnika. Kryterium stałości warunków pracy silnika może być określone jako [97]:

$$M_o, n, q = \text{const} \quad (3.2)$$

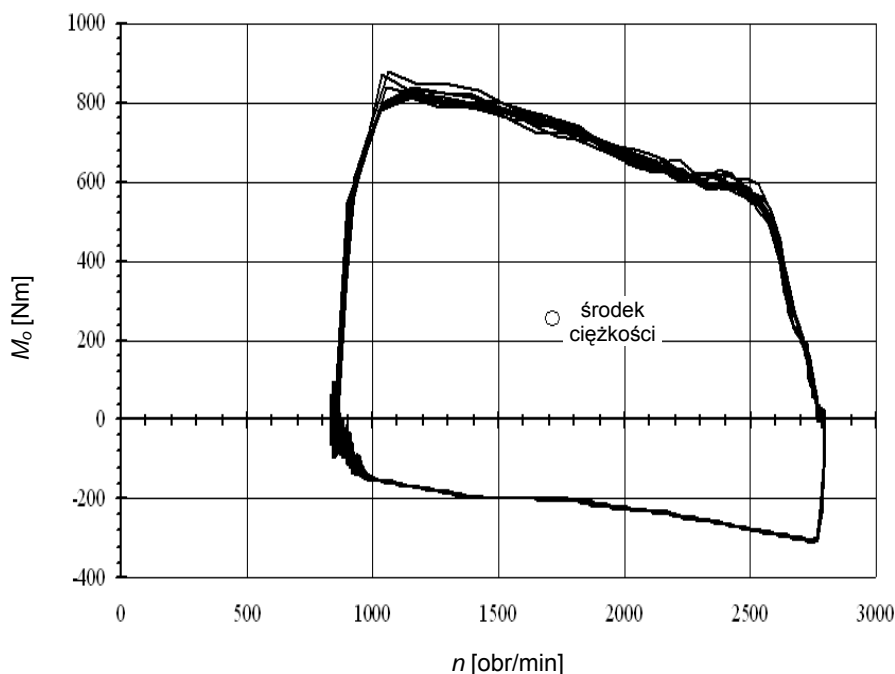
gdzie: M_o , n , q – średnie wartości momentu obrotowego, prędkości obrotowej i dawki paliwa przypadającej na jeden obieg pracy.

W przypadku gdy chociaż jedno z równań określonych w zależnościach (3.1) lub (3.2) nie jest spełnione – silnik pracuje w stanach nieustalonych. Ponadto analiza rzeczywistych warunków pracy silników będących jednostkami napędowymi pojazdów wykazuje, że efektywna praca podczas ruchu pojazdów odbywa się niemal ciągle w stanach nieustalonych na skutek zmian prędkości obrotowej silnika oraz zmian obciążenia wymuszanych przez warunki zewnętrzne.

Charakter pracy silnika w stanach nieustalonych można określić na podstawie jego charakterystyki dynamicznej [97], która przedstawia zmianę momentu obrotowego wytwarzanego przez silnik z jednoczesną zmianą jego prędkości obrotowej spowodowanej szybkim dostarczeniem do cylindrów paliwa prawie w całości przeznaczonego do pokonania oporów bezwładności silnika. Zmianę momentu obrotowego wytwarzanego w silniku opisuje równanie:

$$\frac{dM_o}{dt} = J \frac{d\omega}{dt} = J\varepsilon \quad (3.3)$$

gdzie: J – biegunowy moment bezwładności mas wirujących silnika, ε – przyspieszenie wału korbowego silnika.



Rys. 3.5. Środek ciężkości pola podaży energii generowanej przez silnik UTD – 20 (badania własne)

Na rysunku 3.5 przedstawiono figurę płaską odwzorowującą pole podaży energii silnika nazwaną przez autora cyklodyną. Cyklodyna ograniczona jest linią powstałą jako efekt cyklicznie powtarzających się zależności M_o i n w dynamicznych zmianach podczas przyspieszania i opóźniania prędkości obrotowej wału korbowego silnika. Cechą znaną takiego przedstawienia efektywności silnika jest zaproponowany przez autora środek ciężkości cyklodyny w aspekcie wartości jego współrzędnych.

Zdaniem autora znajomość kształtu linii ograniczającej cyklodynę, wielkości pola powierzchni, a zwłaszcza usytuowania jej środka ciężkości według algorytmu jego określania zaproponowanego przez autora, daje szansę na precyzyjniejsze dokonanie procesów analitycznych pracy silnika zasilanego paliwami o zróżnicowanych cechach fizykochemicznych i energetycznych.

3.5. Ocena stanu wiedzy, wybór kierunków badań: paliw samoistnych, paliw 2-komponentowych, paliw 3-komponentowych

Biopaliwa samoistne

Paliwami samoistnymi, stosownie do polskich (i europejskich) unormowań prawnych [29, 30], alternatywnymi do paliw pochodzenia mineralnego są m.in.: estry, bioetanol, biometanol, eter dimetylowy oraz czysty olej roślinny. Z dotychczasowych doświadczeń autora wynika, że do silników „klasycznych” o ZS samoistne paliwa alternatywne pochodzenia roślinnego stanowić mogą głównie surowy olej roślinny oraz jego estry.

Istotnym procesem w silniku o ZS decydującym o efektywności jego pracy, zużyciu paliwa i toksyczności spalin jest proces tworzenia mieszaniny palnej. Proces ten obejmuje zarówno przemiany fizyczne (wytworzenie strugi paliwa, jej podgrzanie, odparowanie oraz dyfuzję par), jak i reakcje chemiczne prowadzące do utworzenia związków chemicznych niezbędnych do zaistnienia samozapłonu i procesu spalania.

A. Olej roślinny

O wyborze rodzaju rośliny jako bazy paliwowej decyduje strefa klimatyczna, w której znajduje się uprawa danej rośliny oleistej. W Europie Środkowej najbardziej efektywne są uprawy rzepaku, w Hiszpanii słonecznika, w USA soi, a w Malezji i Tajlandii palm kokosowych. Można wykorzystać także inne oleje, m.in. rycynowy, bawełniany, kukurydziany, arachidowy, oliwkowy. Surowiec stanowić mogą także odpadowe tłuszcze zwierzęce, a w ostatnim czasie coraz bardziej nabierają znaczenia prace doświadczalne dotyczące produkcji biopaliw z biomasy jatrofy i mikroalg [62, 145].

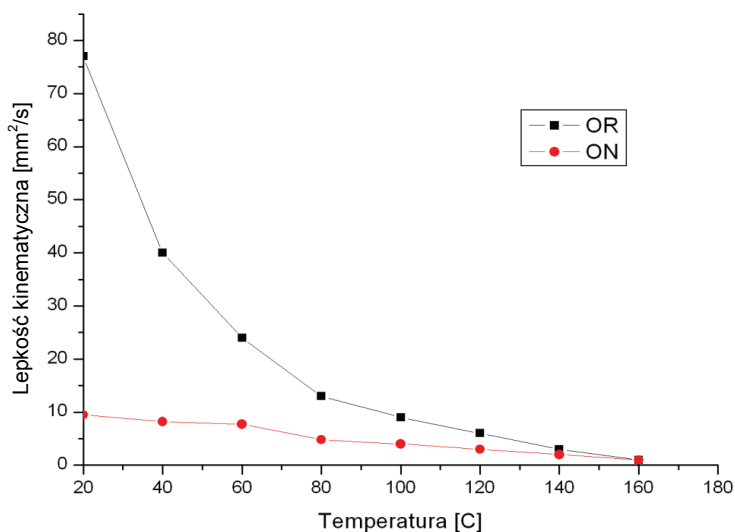
Triacyloglicerole (TAG), będące głównym składnikiem surowego oleju roślinnego (60%) [15, 105], zawierają 14–24 (najczęściej 16–18) atomów węgla w cząsteczce. Związki te mają skomplikowane układy cząsteczkowe o znacznie większej masie molowej w porównaniu do składników tradycyjnego oleju napędowego. Różnią się pomiędzy sobą długością łańcucha węglowodorowego i stopniem nasycenia (liczba wiązań podwójnych), czego naturalną konsekwencją dla niskonasasyconych jest m.in. niższa temperatura krzepnięcia, mniejsza lepkość oraz mniejsza stabilność (zależna od czasu i warunków magazynowania) w porównaniu z wysokonasasyconymi olejami. Tlen obecny w estrowej grupie funkcyjnej (COO^-) stanowi podstawę zróżnicowania właściwości fizykochemicznych w porównaniu z olejem napędowym (tab. 3.6).

Jednorodna budowa łańcuchów węglowodorowych tworzących TAG implikuje jednak wąski zakres wrzenia olejów roślinnych (270–360 °C) w stosunku do ON (170–360 °C). Małą lotność olejów roślinnych poprawiają wiązania nienasycone, jednak w trakcie ich rozpadu powstają niskowrzące związki łatwo ulegające zapłonowi,

co jest przyczyną powstawania powłok polimerowych na powierzchniach rozpylaczy i w komorze spalania.

Tabela 3.6. Porównanie wybranych właściwości ON i OR (badania własne)

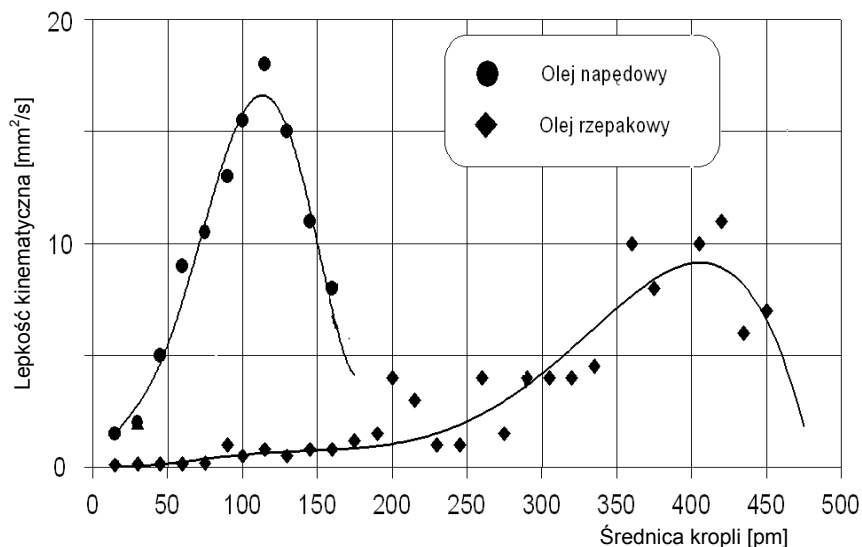
Parametr	Jednostka	Olej napędowy [ON]	Naturalny olej rzepakowy [OR]
Lepkość kinematyczna $T_o = 40^\circ\text{C}$	mm^2/s	2–4,50	20
Wartość opałowa masowa	MJ/kg	42–43	36–38
Liczba cetanowa		min 51	40–50
Teoretyczne zapotrzebowanie powietrza	kg/kg	14,4–14,6	12,2–13
Gęstość $T_o = 15^\circ\text{C}$	kg/dm^3	0,8–0,845	0,90
Napięcie powierzchniowe $T_o = 20^\circ\text{C}$	N/m	$24 \cdot 10^{-3}$	$36 \cdot 10^{-3}$
Temperatura mętnienia	$^\circ\text{C}$	-12	18
Temperatura zablokowania zimnego filtra	$^\circ\text{C}$	-31 (IZ 40)	+9
Temperatura krzepnięcia	$^\circ\text{C}$	-40	+4
Zawartość siarki	%	0,001	0,0002
Pozostałość po koksowaniu	%	0,01	0,17–0,5
Temperatura zapłonu	$^\circ\text{C}$	>55	200–300
Temperatura początku wrzenia	$^\circ\text{C}$	175	300
Średni skład elementarny	O	% m/m	86,4
	C	% m/m	13,4
	H	% m/m	–



Rys. 3.6. Lepkość kinematyczna OR i ON [120]

Oleje roślinne odznaczają się znacznie większą zmianą lepkości w funkcji temperatury (zależność wykładnicza) w stosunku do ON (rys. 3.6). Lepkość ma bezpośredni wpływ na wielkość oporów przepływu w przewodach, filtrach i otworach rozpylaczy, co kształtuje przebieg wtrysku.

Duża lepkość w zakresie niskiej temperatury powoduje zmniejszenie stopnia rozpylenia, zwiększenie zasięgu strugi w komorze spalania, co wynika z wymiarów i kształtu kropeł (rys. 3.7) [142].



Rys. 3.7. Widma rozpylenia ON i nieprzetworzonego OR [142]

Wszystkie te właściwości powodują, że olej roślinny jako samoistne paliwo do współczesnych konstrukcji silników o ZS nie powinien być stosowany, co potwierdzają badania własne [135] i doniesienia z literatury m.in. [42, 120, 157].

Dotychczas znane możliwości zastosowania w silnikach wymagają zmian konstrukcji silnika i/lub modyfikację jakościową oleju roślinnego. Prace nad przystosowaniem silnika do spalania surowego oleju roślinnego prowadził m.in. Elsbett [34]. W swoim rozwiązaniu konstrukcyjnym zastosował m.in. odmienne układy zasilania, chłodzenia i smarowania, a wtrysk nieprzetworzonego paliwa roślinnego realizowany był do specjalnie przystosowanej komory spalania. Wynikiem takiej organizacji procesu spalania było zmniejszenie emisji PM i wzrost stężenia CO, HC i NO_x w spalinach [9, 15, 120]. Badania przeprowadzone w zespole Wajand–Stelmasiak w latach 1985–1990 na silnikach SW680 wolno ssących i doładowanych oraz na silniku SB3.1 wskazywały, że zastosowanie nieprzetworzonego oleju roślinnego prowadzi do zmniejszenia stężenia NO_x w spalinach. Wzrost stężenia CO i HC może być związany z regulacją konkretnego silnika badawczego.

Innym rozwiązaniem jest zastosowanie instalacji dwupaliwowej z układem podgrzewania OR. Istota systemu zasilania silnika cechuje się tym, że do cylindrów dostarczany jest ON tylko podczas procesów rozruchu i unieruchamiania silnika, a w pozostałym zakresie pracy silnik zasilany jest surowym OR podgrzewanym w specjalnie zaprojektowanym wymienniku ciepła [31, 109].

Modernizacje konstrukcyjne silników są zwykle kosztownymi rozwiązaniami. Dlatego stosuje się takie metody przetwarzania oleju roślinnego, aby uzyskać właściwości fizykochemiczne zbliżone do cech oleju napędowego [15, 123].

B. Estry wyższych kwasów tłuszczowych

Zmiany cech oleju stanowiącego surowiec paliwa następują głównie na drodze transestryfikacji umożliwiającej wytworzenie estrów wyższych kwasów tłuszczowych. Transestryfikacja realizowana jest z użyciem alkoholu (alkoholiza) lub kwasu karboksylowego (acydoliza). Najczęściej w celu wytworzenia estrów stosuje się alkoholizę TAG metanolem za pomocą katalizatora kwasowego lub zasadowego. W Europie ze względów klimatycznych i agrotechnicznych wytwarza się głównie estry metylowe oleju rzepakowego w wyniku reakcji metanolu z olejem rzepakowym z użyciem wodorotlenków KOH lub NaOH jako katalizatora. Porównanie właściwości fizykochemicznych RME i OR przedstawiono w tabeli 3.7.

Tabela 3.7. Porównanie najważniejszych parametrów OR, RME (badania własne)

Parametry	Jednostka	Nieprzetworzony olej rzepakowy [OR]	Ester metylowy oleju rzepakowego [RME]
Lepkość kinematyczna $T_o = 40\text{ °C}$	mm ² /s	20	4,32
Wartość opałowa masowa	MJ/kg	36–38	36–38
Liczba cetanowa		40–50	50–55
Teoretyczne zapotrzebowanie powietrza	kg/kg	12,2–13	13,4–13,8
Gęstość $T_o = 15\text{ °C}$	kg/dm ³	0,90	0,88
Napięcie powierzchniowe $T_o = 20\text{ °C}$	N/m	$36 \cdot 10^{-3}$	–
Temperatura mętnienia	°C	18	–9
Temperatura zablokowania zimnego filtra	°C	+9	(–9) do (–11)
Temperatura krzepnięcia	°C	+4	–15
Zawartość siarki	%	0,0002	0,0002
Pozostałość po koksowaniu	%	0,17–0,5	0,05
Temperatura zapłonu	°C	200–300	130
Temperatura początku wrzenia	°C	300	300
Średni skład elementarny	C	% m/m	77,6
	H	% m/m	11,7
	O	% m/m	10,5

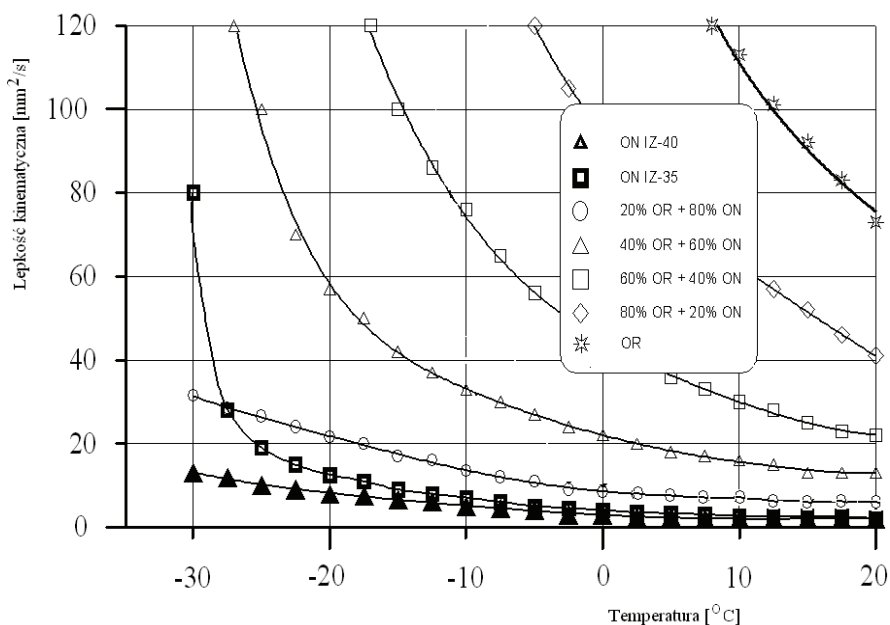
RME cechują się mniejszą masą molową w stosunku do OR, czego konsekwencją jest kilkakrotne mniejsza lepkość, a także większa liczba cetanowa. Dla zbliżo-

nych wartości gęstości RME w porównaniu do OR mają znacznie korzystniejsze właściwości niskotemperaturowe (w szczególności TZZF), jednak wartości temperatury TZZF w przedziale (-9) do (-11) °C są zdaniem autora niezadowalające w przypadku paliwa całorocznego. Cechą niekorzystną w stosowaniu samoistnych RME jest wąski zakres wrzenia z wysoką temperaturą początkową (300 °C). Niekorzystnym zjawiskiem są również procesy hydrolizy i utlenienia związków tworzących RME zachodzące podczas ich przechowywania [1, 3, 10, 15, 47, 51], a także wyjątkowo silne cechy rozcieńczalnikowe. Spaliny silników zasilanych RME zawierają nieco większe stężenia NO_x w stosunku do OR, przy zmniejszeniu emisji PM, CH. Wymienione niekorzystne cechy zasilania silników RME skutkują zdaniem autora ograniczonymi możliwościami ich zastosowania jako jednorodnego paliwa do zasilania silników o ZS.

Problemy badawcze w zakresie paliw 2-komponentowych

A. Mieszanki OR i ON

Przedstawione na rysunku 3.8 zależności lepkości paliwa od temperatury biopaliw dwuskładnikowych o różnych proporcjach OR i ON dowodzą o wielokrotnie większej lepkości tych mieszanek w stosunku paliwa bazowego (ON). Stanowić to może brak możliwości wytworzenia właściwej mieszanki palnej, a także główną przyczynę powstawania nagaru w komorze i na końcówkach wtryskiwaczy.



Rys. 3.8. Wpływ temperatury na lepkość kinematyczną wybranych paliw [141]

B. Mieszaniny ON + RME

2-komponentowe paliwo stanowiące mieszaninę RME i ON jest dotychczas podstawowym przedmiotem badań w aspekcie aplikacji. Komponowanie tego rodzaju biopaliwa realizuje się w celu poprawy właściwości użytkowych w stosunku do RME [15, 16, 33, 48, 129, 135]. W tabeli 3.8 przedstawiono obowiązujące w Polsce przykładowe zakresy normatywne wartości parametrów fizykochemicznych 2-komponentowego paliwa B20.

Wzrost zawartości ON w mieszaninie z estrami powoduje zmniejszenie gęstości oraz lepkości paliwa. Proporcjonalnemu polepszeniu (ze wzrostem zawartości ON) ulegają również właściwości niskotemperaturowe, powodując zmniejszenie wartości TZZF (zależnej od zawartości parafin i estrów). Dobre właściwości smarnościowe paliw 2-komponentowych kształtowane są właściwościami smarnościowymi RME. Zakres wielkości fazy opóźnienia samozapłonu paliw 2-komponentowych jest tym większy, im większy jest udział estru. Graniczna temperatura rozruchu silnika ulega natomiast zmniejszeniu ze wzrostem RME w paliwie.

Tabela 3.8. Właściwości biopaliwa zawierającego 20% estrów metylowych [30]

Właściwości	Jednostka	Zakres	
		minimum	maksimum
Zawartość estrów metylowych kwasów tłuszczowych (FAME)	% (v/v)	20±1	
Gęstość w temperaturze 15 °C	kg/m ³	820	860
Lepkość w temperaturze 40 °C	mm ² /s	2,00	4,50
Temperatura zapłonu	°C	powyżej 55	–
Zawartość siarki	mg/kg	–	10
Pozostałość po koksowaniu (z 10% pozostałości destylacyjnej)	% (m/m)	–	0,30
Liczba cetanowa		51,0	–
Indeks cetanowy		46,0	–
Zawartość wody	mg/kg	–	300
Zawartość zanieczyszczeń stałych	mg/kg	–	24
Badanie działania korodującego na miedzi (3 h w temperaturze 50 °C)	klasa	klasa 1	
Odporność na utlenianie	g/m ³	–	25
Wygląd zewnętrzny		Klarowna ciecz bez wody i osadów	
Liczba kwasowa	mg KOH/g	–	0,2
Smarność, skorygowana średnica śladu zużycia (WS 1,4) w temperaturze 60 °C	µm	–	460
Skład frakcyjny			
– do 250 °C destyluje	% (v/v)	–	< 65
– do 350 °C destyluje	% (v/v)	85	–
– 95% (v/v) destyluje do temperatury	°C	–	360
Temperatura zablokowania zimnego filtra (CFPP)	°C	–	0 -10 -20

Istotne różnice w zakresie cech fizycznych (zwłaszcza gęstość, lepkość) w stosunku do wymogów konstrukcyjnych współczesnych silników oraz cecha niecałkowitej odnawialności RME wskazują na ograniczony zakres użytecznych aplikacji tych kompozycji.

C. Mieszanki ON + EtOH

2-komponentowe mieszanki ON i EtOH wprawdzie mogą stanowić alternatywne paliwo do silników o ZS, jednak specyficzne cechy EtOH powodują konieczność rozwiązania wielu problemów związanych z przebiegiem procesu spalania i eksploatacją pojazdów [32, 40, 45, 76]. Do najważniejszych cech EtOH, mających wpływ na właściwości mieszanin z ON + EtOH, należą:

- mała wartość liczby cetanowej, a więc słaba zdolność do samozapłonu,
- duża wartość utajonego ciepła parowania, co jest powodem trudności rozruchu zimnego silnika,

Tabela 3.9. Układy zasilania silników o ZS alkoholami [142]

Paliwo	Układ zasilania	Zapłon	Zmiany w konstrukcji
Roztwór EtOH w ON	Standardowy układ zasilania silnika o ZS	Samoczynny	Zwiększenie dawkowania pompy wtryskowej
Emulsja (EtOH, ON + emulgator)	Standardowy układ zasilania silnika o ZS	Samoczynny	Zwiększenie dawkowania pompy wtryskowej
EtOH + dodatek zwiększający skłonność do samozapłonu	Standardowy układ zasilania silnika: wtrysk EtOH z dodatkami poprawiającymi samozapłon do komory spalania lub wtrysk EtOH do powietrza sprężonego w komorze spalania, zmieszanego z dodatkami poprawiającymi samozapłon	Samoczynny	Podwyższenie stopnia sprężania Wyposażenie silnika w system dozujący dodatki. Konieczność smarowania aparatury wtryskowej. Zwiększenie dawkowania pompy wtryskowej. Zwiększenie średnic otworów rozpylaczy
EtOH + ON	Pilotująca dawka ON dozowana standardowym układem zasilania silnika, a zasadnicza dawka EtOH dodatkowym układem wtryskowym do cylindra lub kolektora dolotowego lub mieszalnikiem	Samoczynny inicjowany dodatkową dawką ON	Dodatkowa instalacja paliwowa
EtOH	Standardowy układ zasilania silnika o ZS	Samoczynny wspomagany świecą żarową lub gorącą wkładką	Zwiększenie dawkowania pompy wtryskowej. Zwiększenie średnic otworów rozpylaczy. Konieczność smarowania aparatury wtryskowej. Dodatkowa instalacja elektryczna dla grzania świecy
EtOH	Wtrysk EtOH do kolektora dolotowego lub przygotowanie mieszanki alkohol-powietrze w mieszalniku	Iskrowy	Zmniejszenie stopnia sprężania. Wyposażenie silnika w układ zapłonowy. Układ zasilania paliwem alkoholowym

- mała wartość opałowa, co skutkuje wzrostem zużycia paliwa i koniecznością stosowania większych wydatków pomp wtryskowych,
- trudności w utworzeniu jednorodnej mieszaniny z ON i przejmowanie wilgoci z otoczenia, co wymaga stosowania odpowiednich emulgatorów,
- mała smarność, co powoduje, że dla zapewnienia prawidłowej pracy układu wtryskowego konieczne jest dodawanie środków smarnych, np. oleju silnikowego,
- korozyjność i działanie niszczące na gumę i niektóre tworzywa sztuczne;
- duża zawartość tlenu, co powoduje zmniejszenie emisji toksycznych składników spalin.

Zastosowanie znaczącego udziału EtOH w mieszaninach (lub jako samoistnego paliwa) wiąże się ze znaczącą ingerencją konstrukcyjną w układy zasilania paliwem silników o ZS (ewentualne układy zapłonu i smarowania), co przedstawiono w tabeli 3.9.

Jednak pomimo mniejszej wartości opałowej i dużego stopnia modyfikacji silnika, osiągnąć można porównywalne parametry efektywne silnika jak w zasilaniu ON na skutek entalpii parowania alkoholu, które schładzają ładunek, zwiększając jego gęstość, co pozwala na spalanie większych ilości paliwa [142].

Istotne różnice w zakresie cech fizycznych i chemicznych w stosunku do wymagań stawianych paliwom współczesnych konstrukcji silników, a zwłaszcza cechy rozwarstwiania się paliwa, hydrofilowość i korozyjność, powodujące konieczność znacznych zmian konstrukcyjnych wskazują na również ograniczony zakres użytecznych aplikacji tych kompozycji.

Problemy badawcze w zakresie paliw 3-komponentowych

Możliwość komponowania biopaliw 3-komponentowych stanowi podstawę do szerszego kształtowania pożądanych właściwości fizykochemicznych paliw w aspekcie efektywnościowym, a także proekologicznym i trwałościowym silników.

Dotychczasowy stan wiedzy przedstawiony w pracach [13, 24, 98, 103, 117–120, 124–138] upoważnia do twierdzenia o uniwersalności zastosowań tego rodzaju biopaliwa bez konieczności zmian konstrukcyjnych i regulacyjnych silnika. Rezultaty przedstawionych prac wskazują na możliwość minimalizacji udziału frakcji węglowodorowej pochodzenia kopalnego w tym paliwie. Jednak dobór optymalnych składów mieszanin wieloskładnikowych wymaga określenia cech charakterystycznych komponentów (zwłaszcza etylowych), ich wpływu na właściwości paliwa BIOXDIESEL, a także efektów zasilania paliwem silników o ZS.

4. Cel, tezy i zakres pracy

Przedmiotem pracy jest analiza i ocena wybranych zagadnień dotyczących cech biokomponentów oleistych i użycia biopaliw 3-komponentowych, a zwłaszcza określenie wpływu cech biokomponentów całkowicie odnawialnych w paliwie BIOXDIESEL na efektywność pracy silników o zapłonie samoczynnym, trwałość aparatury wtryskowej i emisję toksycznych składników spalin.

Zasadniczą częścią pracy jest określenie efektywności silników zasilanych paliwem BIOXDIESEL w stanach nieustalonych, za pomocą wyznaczenia cyklodyny i położenia jej środka ciężkości. W pracy zawarto także zagadnienia możliwości stosowania paliwa BIOXDIESEL w warunkach niskiej wartości temperatury i technologiczne aspekty użytkowe wytwarzania tego paliwa.

W świetle przedstawionej analizy stanu wiedzy (rozdz. 3) oraz wybranych kierunków badań (rozdz. 3.4), jak również oczekiwanych poznawczych i użytkowych aspektów, najważniejszym celem pracy jest:

- a) określenie wpływu zastosowania biopaliw, a w tym mieszanin węglowodorów alifatycznych z estrami alkilowymi i bezwodnym alkoholem etylowym na efektywność pracy w stanach nieustalonych,
- b) określenie wpływu zasilania silników biopaliwami złożonymi z mieszanin węglowodorów alifatycznych z estrami alkilowymi i bezwodnym alkoholem etylowym – na emisję składników toksycznych w gazach spalinowych,
- c) badania właściwości eksploatacyjnych i trakcyjnych silników zasilanych paliwem z biokomponentami etylowymi,
- d) określenie właściwości fizykochemicznych biopaliw z komponentami etylowymi,
- e) ocena wpływu cech fizykochemicznych biopaliw z komponentami etylowymi na właściwości eksploatacyjne i trakcyjne silników o ZS,
- f) określenie cech trwałościowych aparatury paliwowej silników zasilanych biopaliwami.

Tezy pracy

1. Możliwa jest ocena efektywności energetycznej pracy silnika spalinowego w stanach nieustalonych za pomocą empirycznie określonych cyklodyn, dla których miarodajnym kryterium oceny efektywności jest położenie środka ciężkości cyklodyny.

2. Silniki spalinowe o ZS zasilane biopaliwami, a zwłaszcza z komponentami etylowymi, pracujące w stanach nieustalonych, generują zbliżoną wartość pola podaży

energii jak podczas zasilania standardowym olejem napędowym, pomimo ich mniejszej wartości opałowej biopaliw.

3. Trwałość silników o zapłonie samoczynnym, a szczególnie aparatury wtryskowej, przy zasilaniu biopaliwami 3-komponentowymi (estry etylowe–etanol–olej napędowy oraz estry metylowe–etanol–olej napędowy) ulega zwiększeniu.

Zakres prac badawczych

- Wybór biokomponentów z określeniem ich cech fizykochemicznych, a w tym wytworzenie estrów etylowych REE.

- Określenie właściwości fizykochemicznych i wybór optymalnej mieszaniny 3-komponentowej przez skomponowanie i badania 4 mieszanin o różnym składzie biokomponentów i stałym udziale nieuszlachetnionego ON i analogicznie 4 mieszanin z zastosowaniem uszlachetnionego ON.

- Badania stanowiskowe parametrów efektywnych silnika w stanach nieustalonych z wyznaczeniem charakterystyk przepływowych paliwa, powietrza i zadymiania spalin.

- Badania porównawcze parametrów efektywnych silników eksploatacyjnych autobusów komunikacji miejskiej w stanach nieustalonych zasilanych ON i BIOXDIESEL.

- Hamowniane badania porównawcze parametrów efektywnych wielkopojemnościowego silnika zasilanego ON i RME.

- Badania zadymienia spalin z wykorzystaniem stacjonarnych stanowisk badawczych silników w stanach nieustalonych i ustalonych oraz mobilnych stanowisk badawczych w zakresie badań silników autobusów komunikacji miejskiej wozów bojowych zasilanych BIOXDIESEL, ON i RME.

- Badania emisji składników fabrycznych gazów spalinowych z wykorzystaniem hamownianego stanowiska silnika badawczego.

- Badania porównawcze zużycia energii przez pomiary zużycia biopaliw i ON z wykorzystaniem stacjonarnych stanowisk badawczych i hamownianych, a także w ramach nadzorowanej eksploatacji autobusów komunikacji miejskiej.

- Badania trwałości aparatury wtryskowej z wykorzystaniem stacjonarnego stanowiska badawczego umożliwiającego długotrwałą próbę funkcjonalną z dokonywaniem pomiarów geometrycznych i jakości współpracy elementów powierzchni precyzyjnych i ich mechanizmów napędzających na specjalistycznych stanowiskach pomiarowych.

- Cykliczne badania właściwości fizykochemicznych oleju silnikowego i zawartości produktów zużycia elementów aparatury wtryskowej.

- Badania koksowania wtryskiwaczy na hamowni silnikowej z obciążeniami symulacyjnymi warunków jazdy miejskiej silnika zasilanego ON, RME, REE i BIOXDIESEL.

- Badania rozruchowe silnika napędowego autobusu zasilanego paliwem BIOXDIESEL w niskiej temperaturze otoczenia z wykorzystaniem wielkogabarytowej komory termoklimatycznej.

- Przedstawienie aspektu aplikacyjnego procesu stanowiącego mobilną agrorafinerię umożliwiającą wytwarzanie biokomponentów i paliwa BIOXDIESEL.

5. Badania własne

5.1. Kompozycje i badania biopaliw

Podstawę doboru paliw do badań stanowiły: analiza dotychczasowych prac z zakresu tematu, założenia uniwersalności stosowania biopaliw bez zmian konstrukcyjnych i nastaw regulacyjnych silników spalinowych, warunki klimatyczne (T , ρ , φ), cechy logistyczne transportu, podaż surowców do produkcji biokomponentów, technologie wytwarzania biokomponentów i biopaliw, wymogi proekologiczne i ekonomia.

Przyjęto za główny przedmiot prac badawczych wytworzenie nowej generacji biopaliw 3-komponentowych zawierających 2 składniki całkowicie odnawialne, ich silnikową konwersję i określenie efektów konwersji. Do celów porównawczych w niektórych aspektach przedmiotem badań były także: ON, OR, RME i oczywiście REE.

5.1.1. Schemat procesu wytwarzania i badań paliw typu BIOXDIESEL

Całokształt prac wytwórczych i badawczych dotyczących wytwarzania komponentów i biopaliw, ich właściwości fizykochemicznych, konwersji energii biopaliw i jej efektów jakościowo-ilościowych przedstawiono w postaci 3 bloków strukturalnych na schemacie (rys. 5.1).

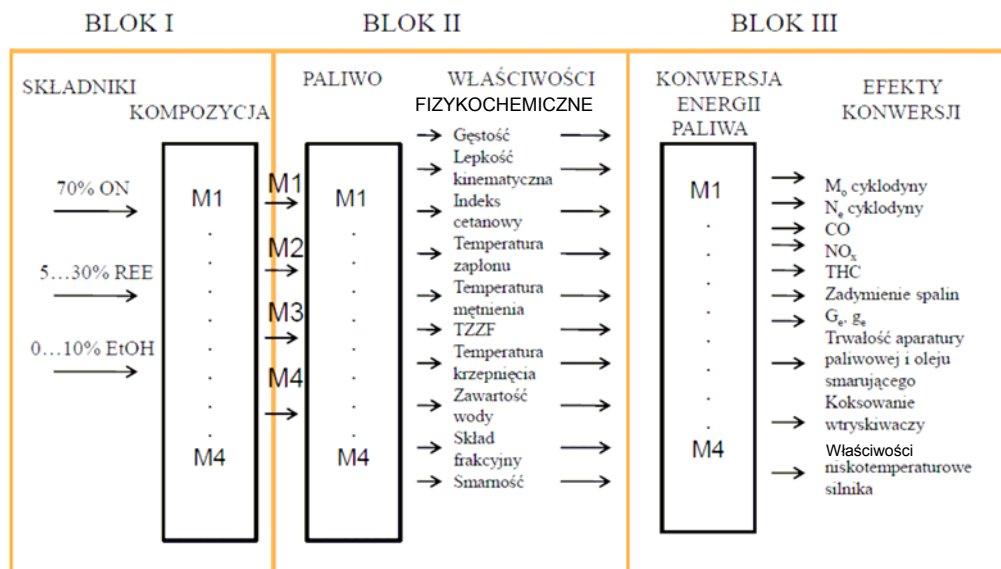
Podstawę cyklu obejmującego wytwarzanie komponentów i komponowanie biopaliw, badania zmian cech fizykochemicznych biopaliw, a także efektów konwersji energii w postaci osiągnięć silników i wpływu na środowisko stanowi łańcuch cybernetyczny BIOXDIESEL o następującej strukturze:

Blok I – komponowanie paliwa BIOXDIESEL,

Blok II – określenie cech paliwa,

Blok III – konwersja energii, efekty.

W bloku I przedstawiono komponenty paliwa BIOXDIESEL stanowiącego mieszaniny M1–M4, w których ON stanowi 70% m/m, REE– 5–30% m/m, a EtOH stanowi zawartość do 10% m/m.



Rys. 5.1. Schemat cybernetyczny łańcucha biopaliw BIOXDIESEL, analiza systemowa

W bloku II zawarto zakres tych właściwości fizycznych i chemicznych biopaliw, które mają istotny wpływ na jakość przygotowania mieszaniny palnej, proces spalania i trwałość silnika.

W bloku III, zawierającym efekty konwersji energii chemicznej zawartej w różnych mieszaninach M1–M4 paliwa BIOXDIESEL, przedstawiono zakres ich oceny w aspektach:

- parametrów efektywnych (cyklodyny, G_e, g_e);
- emisji składników toksycznych gazów spalinowych (CO, THC, NO_x , zadymienie);
- trwałości silnika (aparatura wtryskowa, olej);
- koksowania wtryskiwaczy;
- możliwości zastosowania w niskiej temperaturze otoczenia (właściwości niskotemperaturowe silnika).

5.1.2. Metodyka badań, eksperyment, modelowanie matematyczne

W teorii eksperymentu [41, 55, 68, 100] proces badany można przedstawić się jako „czarną skrzynkę”, gdzie wejściowymi wielkościami są parametry zmienne (czynniki badane), natomiast wyjściowymi wielkościami mierzone (parametry optymalizacji) (rys. 5.2).

Na rysunku 5.2 przedstawiono schemat ideowy obiektów badań (rys. 5.1), gdzie:

- V – czynniki wymuszające,
 - mierzalne i sterowalne,
 - tylko mierzalne,

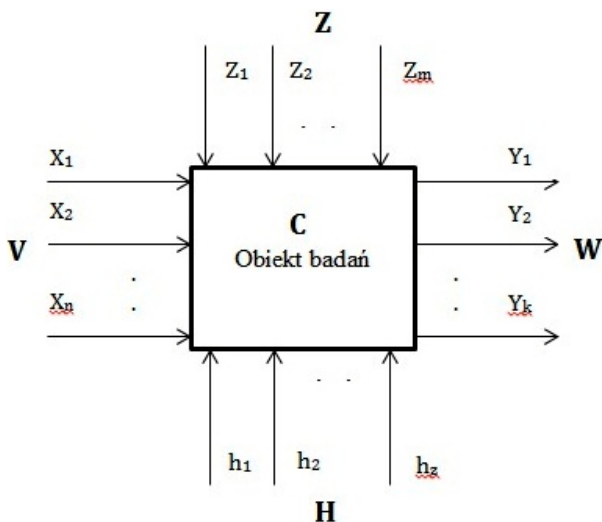
Z – niemierzalne, niesterowalne (zakłócenia),

C – cechy obiektu,

W – odpowiedzi obiektu,

H – parametry wejściowe, zakłócenia, szумы, nieokreślone;

gdzie po standaryzacji: X_1-X_n – czynniki badane, wejściowe, zmienne, Y_1-Y_k – wyjściowe wielkości mierzone, parametry optymalizacji, Z_1-Z_m – parametry wejściowe, stałe, h_1-h_z – parametry wejściowe, zakłócenia (szумы), nieokreślone.



Rys. 5.2. Schemat procesów badawczych, model obiektu badań [41, 55, 68, 100]

- Model matematyczny badanego procesu można zapisać ogólnie w postaci równania:

$$Y_k = f(X_1-X_n)Z_1-Z_m, h_1-h_z \quad (5.1)$$

gdzie: $Z_1-Z_m = \text{const}$, a h_1-h_z stanowią zakłócenia (szумы).

- Istota przyjętej metodyki i metodologii badań polega na tym, że nieznaną funkcją odpowiedzi:

$$Y_k = f(X_1 - X_n) \quad (5.2)$$

będąca najczęściej równaniem różniczkowym wyższego rzędu jest aproksymowaną sumą wielomianów drugiego stopnia, będącą częścią szeregu Taylora, określoną klasycznymi równaniami regresji stopnia drugiego i wyższymi [41, 55, 100].

Za podstawowy sposób opisu matematycznego analizowanych zjawisk przyjęto model nieliniowy w postaci równania regresji drugiego stopnia z interakcjami drugiego rzędu [41, 55, 57]:

$$Y_k = b_o + \sum_{i=1}^n b_i X_i + \sum_{i=1}^n b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} X_i^2 \quad (5.3)$$

W wyniku badań określa się współczynniki równania 5.3 (b_o , b_i , b_{ii}) indywidualnie dla każdego przypadku, np. rys. 5.57, 5.86–5.92.

5.2. Badania właściwości komponentów 3-komponentowych biopaliw typu BIOXDIESEL i technologia ich wytwarzania

5.2.1. Metodyka określania cech właściwości fizykochemicznych komponentów i biopaliw

Opierając się na przyjętej koncepcji pracy zmierzającej ostatecznie do optymalizacji wielokryterialnej biopaliwa 3-komponentowego o żądanych właściwościach i cechach użytkowych w trakcie badań mierzono (blok I i II, rys. 5.1):

- a) gęstość wg EN ISO 3675,
- b) indeks cetanowy określono obliczeniowo według PN-91/C-04031,
- c) lepkość kinematyczna [mm^2/s] według PN -EN ISO 3104:2004,
- d) temperaturę zapłonu w tyglu zamkniętym [$^{\circ}\text{C}$] według PN – EN ISO 2719:2007,
- e) temperaturę mętnienia [$^{\circ}\text{C}$] według PN ISO 3015,
- f) temperaturę krzepnięcia [$^{\circ}\text{C}$] według PN-EN ISO 3016,
- g) TZZF (temperatura zablokowania zimnego filtra) [$^{\circ}\text{C}$] według PN-EN 116,
- h) zawartość wody [mg/kg] według EN ISO 12937,
- i) skład frakcyjny według PN – EN ISO 3405:2004,
- j) smarność według HFRR i SL BOCLE odpowiednio według PN-EN-ISO 12156 i ASTM D 6078-99.

5.2.2. Właściwości fizykochemiczne REE

Określenie podstawowych właściwości fizykochemicznych estrów etylowych wyższych kwasów tłuszczowych oraz mieszanin paliwowych z ich udziałem.

Określenia właściwości fizykochemicznych estrów etylowych wyższych kwasów tłuszczowych (REE) (wytworzonych przez autora według unikatowej w Polsce technologii procesowej w ilości 15 m^3) wykonano za pomocą badań laboratoryjnych (normatywnych), zgodnie z odpowiednimi normami, w tym PN/EN 14214. Badania prowadzono na sześciu losowo wybranych materiałach badawczych wytworzonych estrów oleju rzepakowego o pojemności 1000 dm^3 każda (tab. 5.1).

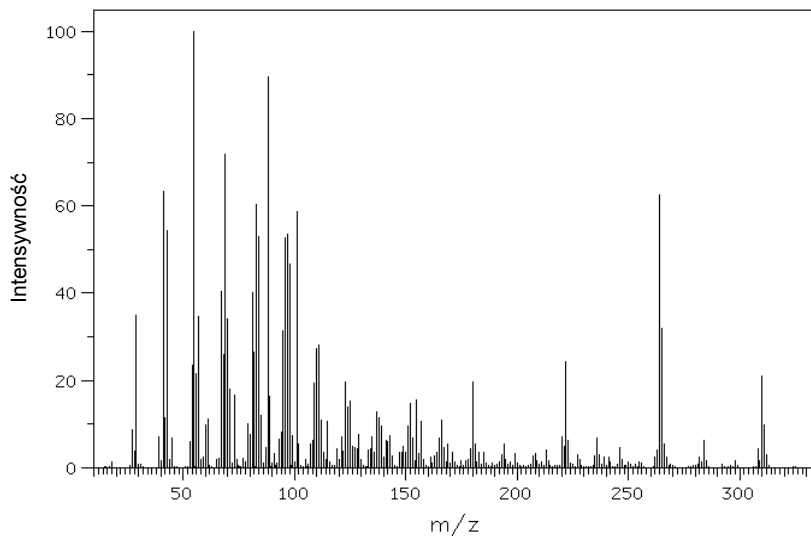
Tabela 5.1. Właściwości fizykochemiczne estrów etylowych wyższych kwasów (badania własne)

Rodzaj oznaczenia	Próba					
	1	2	3	4	5	6
Gęstość w 15 °C [kg/dm ³]	0,876	0,878	0,876	0,876	0,877	0,876
Gęstość w 20 °C [kg/dm ³]	0,873	0,874	0,875	0,873	0,874	0,873
Indeks cetanowy [-]	49	49,5	49	48,5	49	49
Lepkość kinematyczna [mm ² /s]	4,53	4,54	4,52	4,54	4,53	4,54
Temperatura zapłonu [°C]	135	133	134	136	135	135
Temperatura mętnienia [°C]	-12	-13	-12	-12	-12	-13
Temperatura krzepnięcia [°C]	-24	-25	-24	-24	-24	-25
Temperatura zablokowania zimnego filtra [°C]	-13	-13	-13	-13	-13	-13
Zawartość wody [mg/kg]	50	50	51	52	49	50
Zawartość ciał obcych	nie zawiera	nie zawiera	nie zawiera	nie zawiera	nie zawiera	nie zawiera
Skład frakcyjny	do 250 °C	0	0	0	0	0
	do 350 °C	90	90	90	90	90
	do 370 °C	-	-	-	-	-
Zawartość siarki	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Badania korodujące	1a	1a	1a	1a	1a	1a

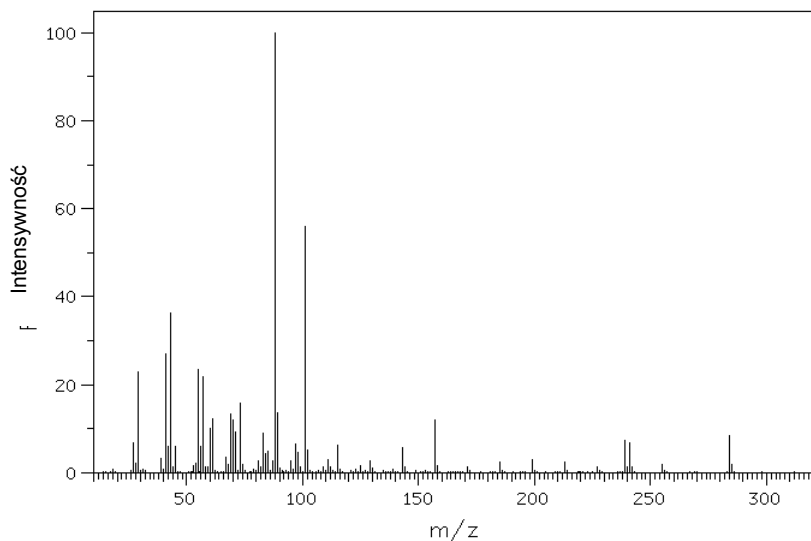
Tabela 5.2. Właściwości fizykochemiczne REE (badania własne)

Rodzaj oznaczenia	Wynik	Wymagania dla RME wg PN-EN 14214
Gęstość w 15 °C [kg/dm ³]	0,877	0,86–0,90
Gęstość w 20 °C [kg/dm ³]	0,874	-
Indeks cetanowy [-]	49	
Lepkość kinematyczna [mm ² /s]	4,53	3,5–5,0
Temperatura zapłonu [°C]	134,7	min. 101
Temperatura mętnienia [°C]	-12,3	-
Temperatura krzepnięcia [°C]	-24,3	-
Temperatura zablokowania zimnego filtra [°C]	-13	-
Zawartość wody [mg/kg]	50,3	500
Zawartość stałych ciał obcych, max	nie zawiera	24
Odporność oksydacyjna 110 °C [h]	9	
Liczba kwasowa [mg KOH/g]	0,3	0,5
Liczba jodowa [g I ₂ /100 g]	105	120
Zawartość kwasu linolenowego [% m/m]	9	
Zawartość estrów wielonienasyconych [% m/m]	0,5	
Zawartość etanolu [% m/m]	0,17	0,17
Zawartość całkowita gliceryny [% m/m], max	0,22	0,25
Zawartość potasu [mg/kg]	4	
Zawartość fosforu [mg/kg], max	10	10
Badanie korozyjności 3h w 50 °C	1a	1
Zawartość siarki [mg/kg], max	< 10	<10
Zawartość estrów etylowych WKT [% m/m], min	99,5	96,5

Uśrednione wartości parametrów właściwości fizykochemicznych z przedstawionych wyżej 6 prób (szarż) estrów etylowych przedstawiono w tabeli 5.2.

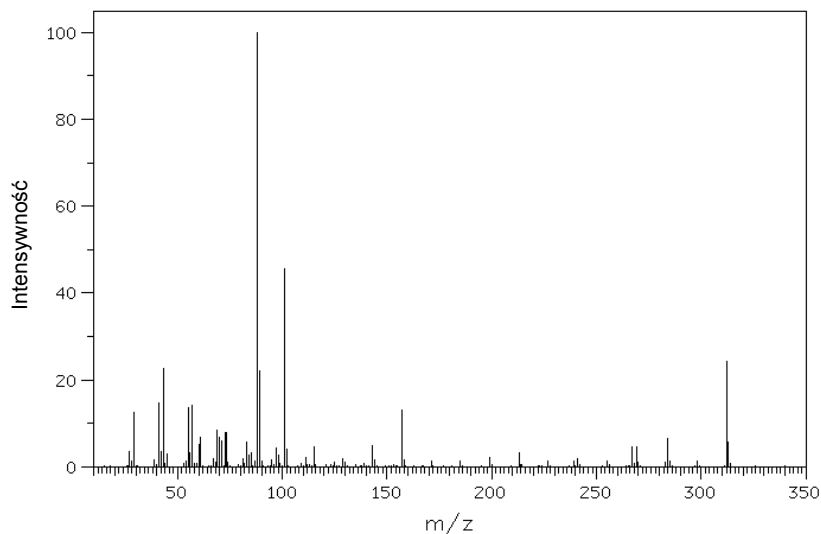


Rys. 5.3. Widmo MS estru etylowego kwasu Z-oktadeka-9-nowego (badania własne)



Rys. 5.4. Widmo MS estru etylowego kwasu heksadekanowego (badania własne)

Dodatkowo przeprowadzono również badania zawartości poszczególnych składników estrów, wykorzystując metody analityczne GC-MS (rys. 5.3–5.7). Oznaczenia wykonano dla wszystkich „szarż”, a otrzymane wyniki uśredniono.



Rys. 5.5. Widmo MS estru etylowego kwasu kwasu oktadecanowego (badania własne)

Określony skład estrów etylowych wyższych kwasów tłuszczowych przedstawiono w tabeli 5.3.

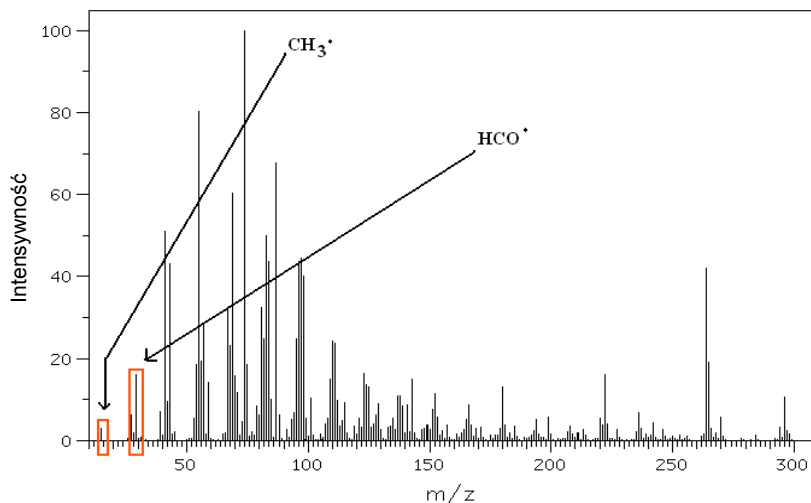
Tabela 5.3. Skład estrów etylowych wyższych kwasów tłuszczowych (badania własne)

Ester	Udział masowy [%]
Ester etylowy kwasu Z-oktadeka-9-enowego	87,30
Ester etylowy kwasu heksadecanowego	8,25
Ester etylowy kwasu cyklopentano- 2-hydroksydekanowego	2,25
Ester etylowy kwasu heptadecanowego	1,00
Ester etylowy kwasu oktadecanowego	0,98
Zawartość sumaryczna wolnych kwasów wyższych kwasów tłuszczowych	0,22

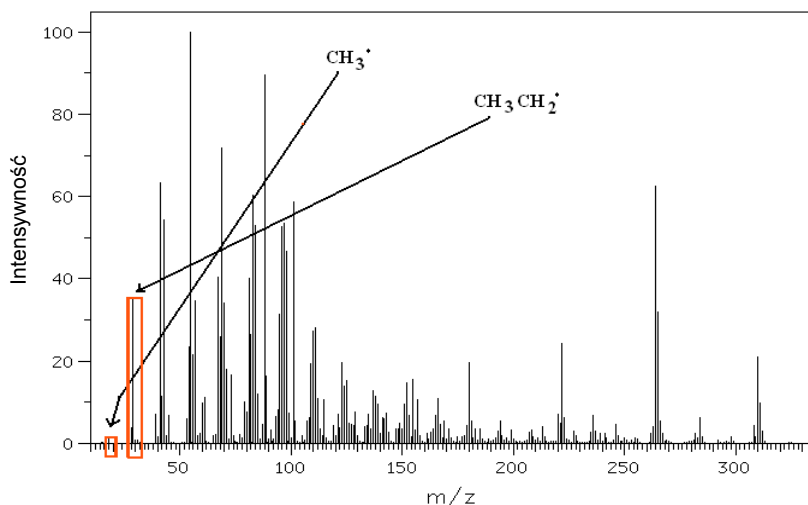
Analiza parametryczna właściwości estrów etylowych wyższych kwasów tłuszczowych wykazała, że REE kwalifikują się jako biokomponenty lub biopaliwa samostne do silnika o ZS podobnie jak aktualnie wytwarzane RME.

REE w porównaniu do RME cechują się:

- dużo lepszymi właściwościami niskotemperaturowymi (TZZF, temperatura mętnienia, krzepnięcia), czego efektem jest szerszy zakres możliwości ich stosowania w warunkach zimowych bez konieczności dodawania depresatorów,
- niższą temperaturą początku wrzenia, co poprawia zdolności rozruchowe silnika,
- większą wartością opałową, ze względu na dodatkową grupę CH_2 ,
- wyższą temperaturą zapłonu, co zwiększa zakres użytkowania w aspekcie bezpieczeństwa pożarowego i transportu.



Rys. 5.6. Widmo MS estru metylowego kwasu Z-oktadeka-9-nowego (badania własne)



Rys. 5.7. Widmo MS estru etylowego kwasu oktadeka-9-nowego (badania własne); oznakowanie: rodnik

Analizując widma MS (rys. 5.6 i 5.7) tych estrów, widać wyraźnie, że dla wartości m/z (masa/ladunek), równej 29, intensywność sygnału dla REE ma kilkakrotnie mniejszą wartość w stosunku do RME. Fakt ten oraz budowa chemiczna cząsteczek świadczą o tym, że produkty niepełnego spalania REE nie będą zawierały rodnika formaldehydowego, występującego podczas spalania RME. Również liczba rodnika metylowego o m/z równym 15, tworzącego się podczas procesu spalania REE, jest kilkakrotnie mniejsza w przypadku RME.

Analiza podanych cech właściwości fizykochemicznych i roślinne pochodzenie (C, H, O) uprawnia do stwierdzenia, że REE może stanowić podstawę bioodnawialnego paliwa umożliwiającego zamknięcie pełnego cyklu CO₂ w przyrodzie.

5.2.3. Analiza porównawcza właściwości fizykochemicznych biopaliw złożonych z biokomponentów etylowych i ON

Analiza charakterystyki wzrostu udziału biokomponentów w paliwach silnikowych (5,75% w 2010 r., 10% w 2020 r., 20% w 2030 r. – rozdz. 3.1) wykazuje ograniczoność wykorzystania surowców rolniczych do ich produkcji. Realizując optymistyczny wariant podaży biokomponentów w aspekcie utylitarnym niniejszej pracy, założono, że zawartość biokomponentów w paliwach do silników o ZS stanowić będzie sumarycznie 30% ich udziału masowego. W założeniu autora jest to paliwo wzorcowe (docelowe) dla aktualnie realizowanych procedur ciągłego wzrostu udziału biokomponentów (aktualnie 7% V/V FAME w ON) w ogólnej ilości paliw do silników o ZS.

Na bazie wytworzonych REE, odwodnionego bioetanolu (99,9% EtOH) i ON wytworzono mieszanki 3-komponentowe, które nazwano paliwem BIOXDIESEL.

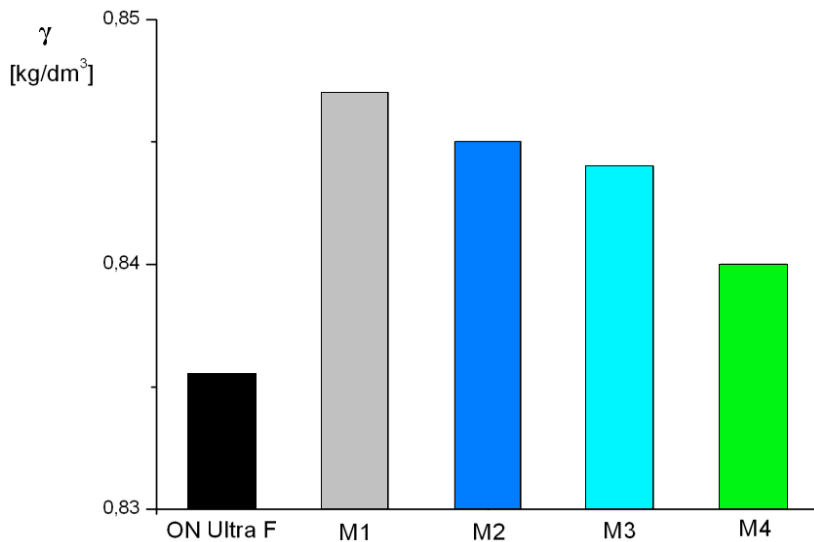
W pierwszej serii badań wykonano cztery mieszaniny złożone z REE o właściwościach przedstawionych w tabeli 5.2, bioetanolu i ON o właściwościach przedstawionych w tabeli 5.4.

Tabela 5.4. Właściwości fizyczne odwodnionego bioetanolu i ON (badania własne)

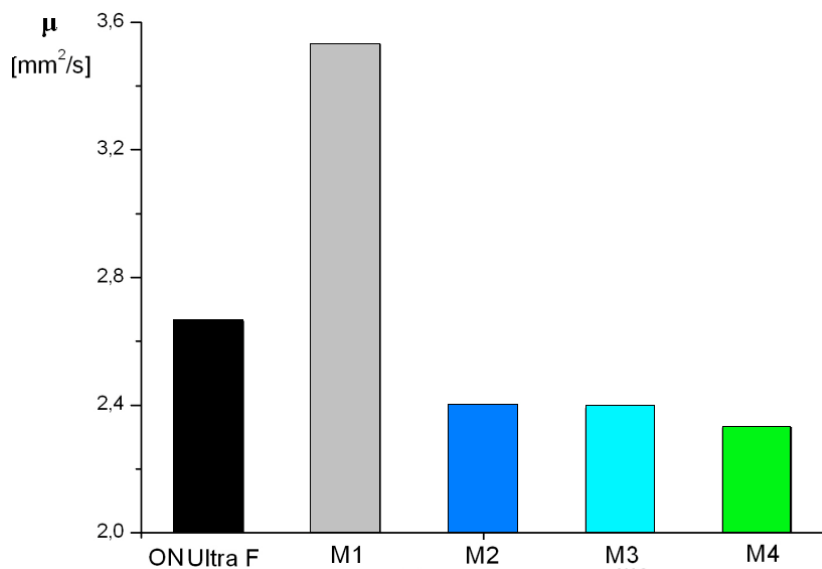
Parametr	Jednostka	Bioetanol 99,9%	ON wg EN PN 590
Gęstość w 15 °C	kg/dm ³	0,7900	0,8365
Lepkość kinematyczna w 40 °C	mm ² /s	0,899	2,661
Indeks cetanowy	–	8	52,6
Temperatura zapłonu	°C	12	65
Temperatura mętnienia	°C	–	–1
Temperatura zablokowania zimnego filtra	°C	–	–31
Temperatura krzepnięcia	°C	–114	–4
Zawartość wody	mg/kg	1	44,5
Skład frakcyjny do 250 °C	% V/V	100	36
Skład frakcyjny do 350 °C	% V/V	100	95,8

Paliwa BIOXDIESEL skomponowano z zastosowaniem następujących udziałów masowych komponentów:

- 70% ON + 30% REE (M1),
- 70% ON + 4% EtOH + 26% REE (M2),
- 70% ON + 6% EtOH + 24% REE (M3),
- 70% ON + 10% EtOH + 20% REE (M4).



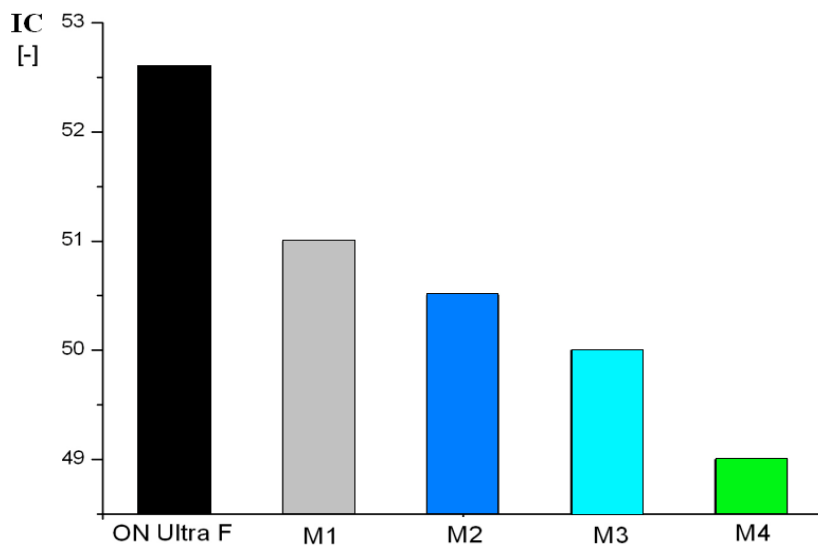
Rys. 5.8. Gęstość badanych paliw w temperaturze 15 °C



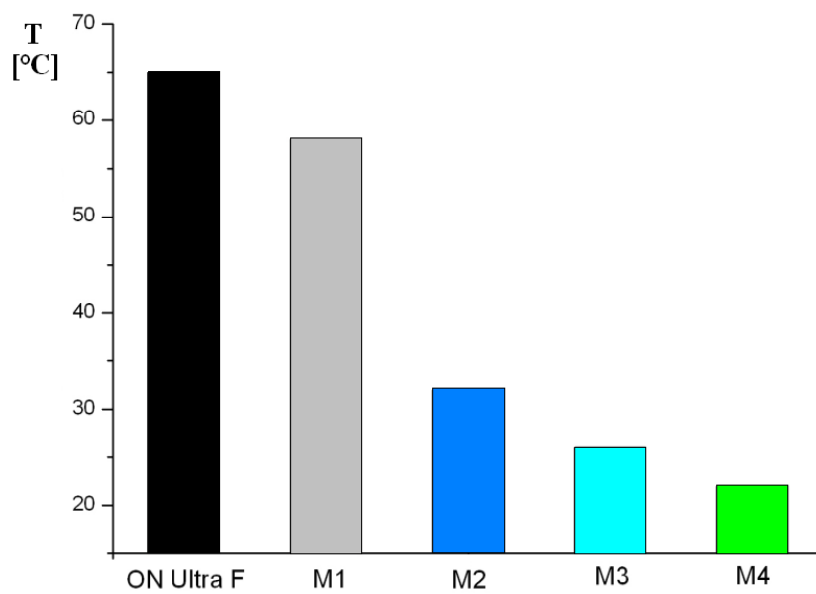
Rys. 5.9. Lepkość kinematyczna badanych paliw w temperaturze 40 °C

Właściwości biopaliw 3-składnikowych z komponentami etylowymi i olejem napędowym EKO-diesel Ultra F.

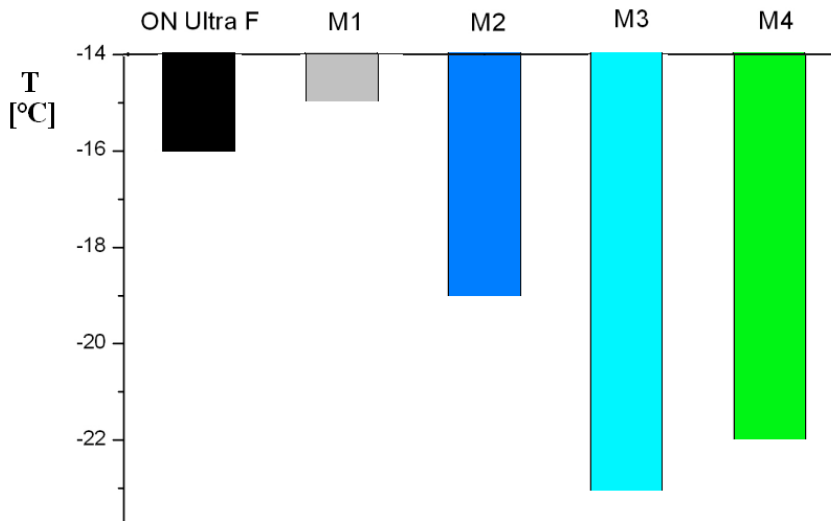
Wyniki badań fizykochemicznych tych mieszanin przedstawiono na rysunkach 5.8–5.17.



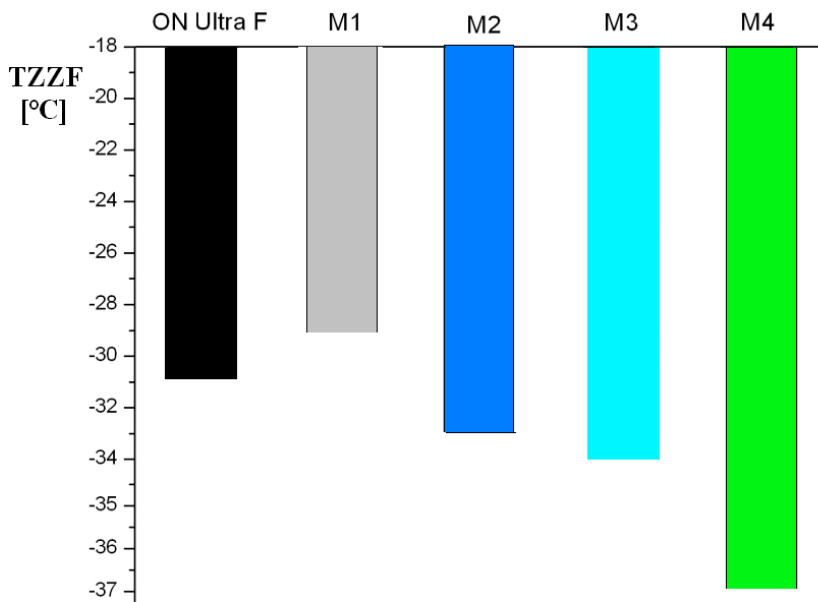
Rys. 5.10. Indeks cetanowy badanych paliw



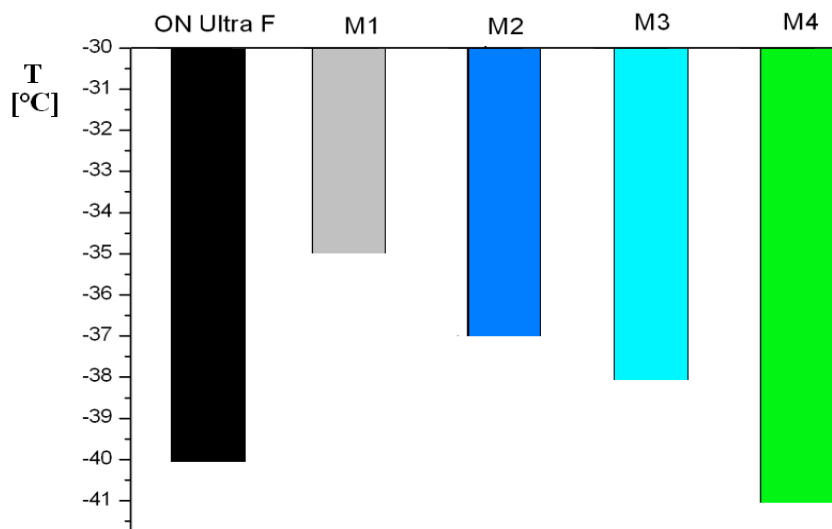
Rys. 5.11. Temperatura zapłonu badanych paliw



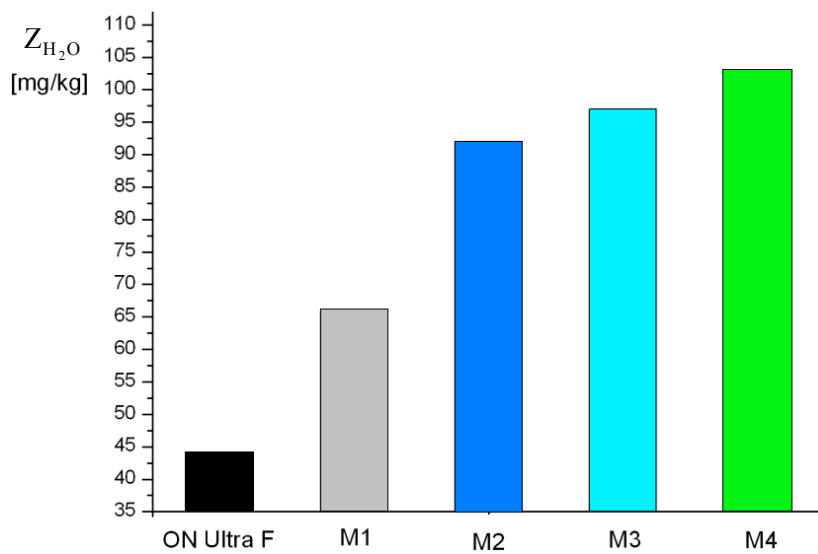
Rys. 5.12. Temperatura mętnienia badanych paliw



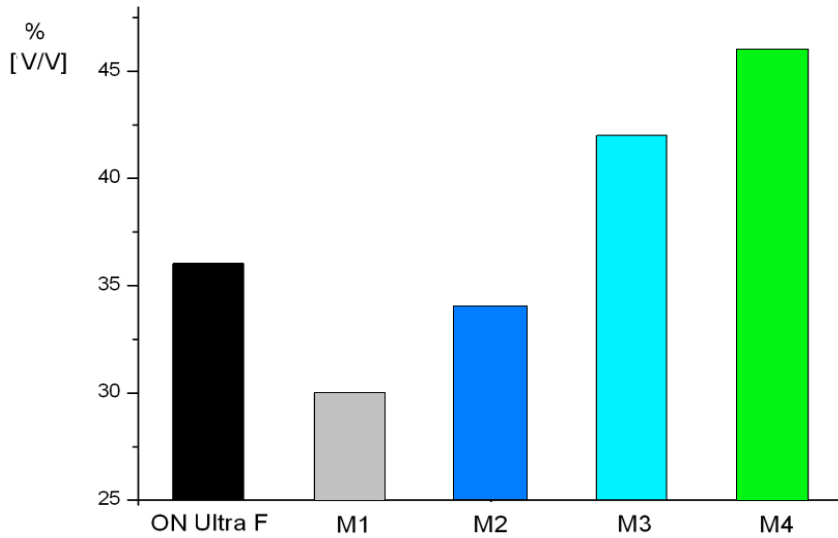
Rys. 5.13. Temperatura zablokowania zimnego filtra badanych paliw



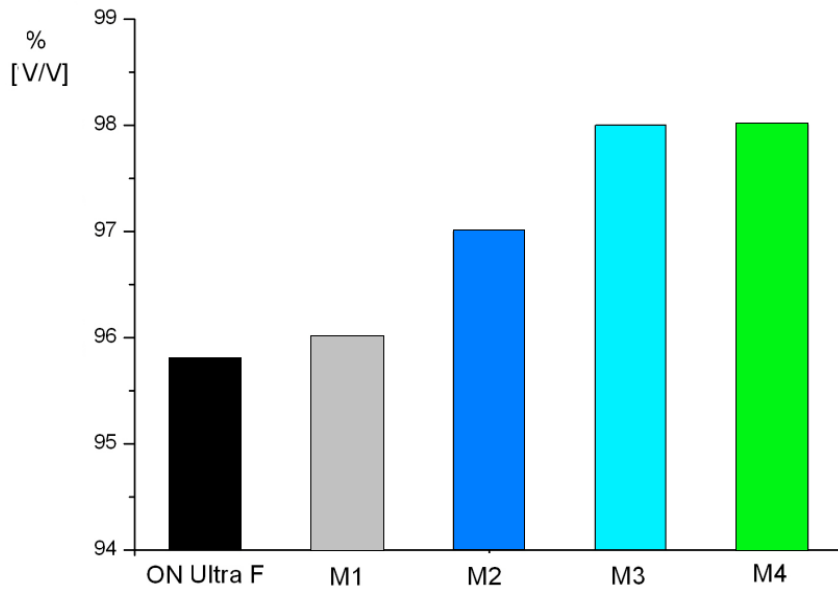
Rys. 5.14. Temperatura krzepnięcia badanych paliw



Rys. 5.15. Zawartość wody w badanych paliwach



Rys. 5.16. Objętość destylacji badanych paliw, $T \leq 250 \text{ }^\circ\text{C}$



Rys. 5.17. Objętość destylacji badanych paliw, $T \leq 350 \text{ }^\circ\text{C}$

Omówienie wyników badań

- Wartości gęstości paliwa 3-komponentowego (M2–M4) oznaczone zarówno w temperaturze otoczenia $15 \text{ }^\circ\text{C}$, jak i $20 \text{ }^\circ\text{C}$ są niewiele większe niż badanego ON

(o 0,5–1,4%) i zawierają się w korzystnym (ze względów efektywnościowych) zakresie wymagań silnika dla paliw standardowych. Wyniki te potwierdzają dokonany wcześniej właściwy dobór komponentów przez autora. Na uwagę zasługuje nieznacznie większa od normatywnych gęstość mieszaniny 2-komponentowej M1.

- Lepkości mieszanek BIOXDIESEL cechują się zbliżonymi wartościami do wartości standardowego paliwa Ekodiesel Ultra F i zawierają się w zakresie wymagań konstrukcyjnych silnika. Jednak zmniejszenie tych wartości o 10–12% w stosunku do ON może poprawić sprawność procesu rozpylania. Ponadto lepkość tak skomponowanych mieszanek BIOXDIESEL wskazuje na wystąpienie korzystniejszych efektów podczas uruchamiania silnika w niskiej temperaturze otoczenia.

- Zakres oddestylowania paliwa BIOXDIESEL w stosunku do oddestylowania ON Ekodiesel Ultra F jest zróżnicowany. Nieco mniejsza zdolność o ok. 5,5% dla M2 w zakresie temperatury do 250 °C i znacząco większe zdolności paliw M3 i M4 (odpowiednio o 17% i 27%) w tym zakresie temperatury. W przedziale temperatury destylacji do 350 °C wpływ EtOH i REE jest mniejszy, jednak wszystkie badane mieszanki paliwa BIOXDIESEL cechują się korzystniejszymi wskaźnikami wrzenia (w zakresie 1,2–2,3%).

- Wartości indeksu cetanowego paliw BIOXDIESEL są mniejsze dla wszystkich mieszanek w stosunku do ON zawartego w paliwie BIOXDIESEL, odpowiednio 4%, 5% i 7%. Należy zaznaczyć, że analizowane wartości paliwa BIOXDIESEL w przedziale 49–50,5 jednostek są zgodne z wymaganiami określonymi przez konstrukcje współczesnego silnika o ZS (min. 46).

- Logistyczny parametr jakościowy paliw w aspekcie bezpieczeństwa magazynowania, dystrybucji i transportu w przypadku tak skomponowanych paliw BIOXDIESEL obniża się do wartości 22–32 °C (dla ON Ekodiesel Ultra F – 65 °C). Podobnie jak w przypadku mieszanek badanych w poprzedniej serii jest to spowodowane zawartością EtOH w mieszankach. Należy tutaj podkreślić, że wartości te nie powodują znacząco zwiększenia wymagań bezpieczeństwa (dla porównania temperatura zapłonu benzyn silnikowych jest o 40–70 °C niższa).

- Eksploatacyjne właściwości niskotemperaturowe paliwa BIOXDIESEL z zawartością ON Ultra F, charakteryzowane głównie przez parametr TZZF (o wartościach (–33) do (–37) °C), są bardzo korzystne w stosunku do wyników badań poprzedniej serii. Uzyskane rezultaty są wynikiem bardzo dobrych właściwości niskotemperaturowych ON Ekodiesel Ultra F i zawartości EtOH. Należy zaznaczyć, że również pozostałe parametry określające właściwości niskotemperaturowe badanych w tej serii mieszanek są zdecydowanie korzystniejsze niż właściwości ON Ekodiesel Ultra F.

- Zawartość wody w mieszankach paliwa BIOXDIESEL z zawartością ON Ekodiesel Ultra F w zakresie 92–103 mg/kg świadczy (podobnie jak w przypadku mieszanin I serii) o hydrofobowości i jednorodności tych mieszanin. Należy zauważyć, że zawartość wody w odwodnionym etanolu wynosi 1000 mg/kg. Należy zaznaczyć, że wymagania konstrukcyjne współczesnego silnika o ZS dopuszczają zawartość wody w paliwie do 200 mg/kg.

Z przedstawionego omówienia wyników badań można wysnuć wniosek ogólny, że parametry fizykochemiczne mieszanin 3-komponentowych paliwa BIOXDIESEL, skomponowanych z udziałem ON Ekodiesel Ultra F, świadczą o korzystniejszych właściwościach tego paliwa w stosunku do ON w aspekcie przygotowania mieszanki palnej i spalania oraz stanowią dowód o poprawnym doborze jakościowym i ilościowym biokomponentów przez autora. Mniejsza wartość temperatury zapłonu (logistycznego parametru) wskazuje na konieczność opracowania zwiększonych wymagań w zakresie transportu i magazynowania w przedziale wymagań dla ON i benzyny silnikowej.

5.2.4. Badania właściwości smarnych paliw BIOXDIESEL, ON, REE

Badania właściwości smarnych wykonano według dwóch metod badawczych: europejskiej CEC F-06-A-96 (HFRR) [101] i amerykańskiej ASTM D 6078-97 (SL BOCLE) [77]. Badaniom poddano cztery mieszaniny złożone z ON, REE i odwodnionego etanolu w różnych proporcjach (M1, M2, M3, M4) oraz ON i REE. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 5.5.

Tabela 5.5. Wyniki badań właściwości smarnych paliw: BIOXDIESEL, ON oraz REE (badania własne)

Właściwości	Metoda badania	BIOXDIESEL				ON	REE
		M1	M2	M3	M4		
Smarność wg HFRR (średnica śladu zatarcia) [μm]	CEC F-06-A-96	173	190	198	204	491	160
Smarność według SL BOCLE (najwyższe obciążenie, gdy wartość współczynnika tarcia $> 0,175$) [G]	ASTM D 6078-97	3600	5100	4800	5500	2800	>6000

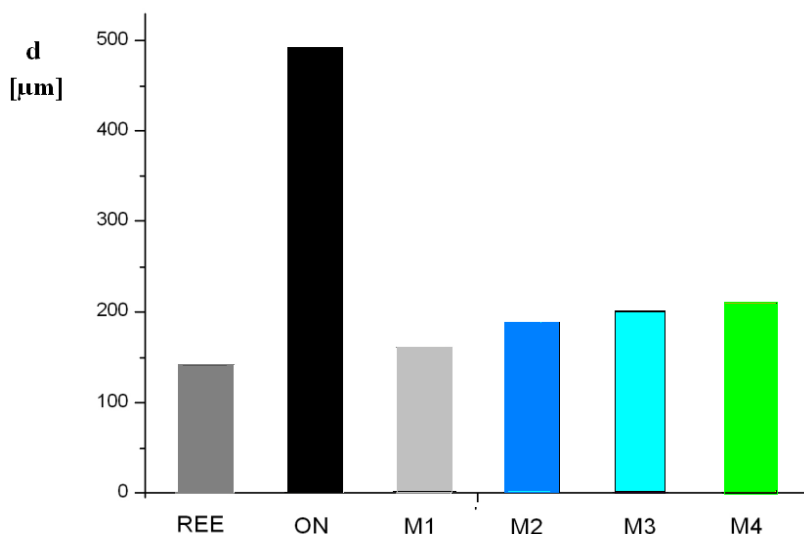
Na rysunku 5.20 przedstawiono cechy określające właściwości smarne paliwa BIOXDIESEL oraz ON i REE określone metodą HFRR, natomiast na rysunku 5.21 wyznaczone według metody SL BOCLE.

Na rysunkach 5.20 i 5.21 przedstawiono względną zmianę cech określających właściwości smarne paliwa BIOXDIESEL w porównaniu do ON ($\text{ON} = 1$).

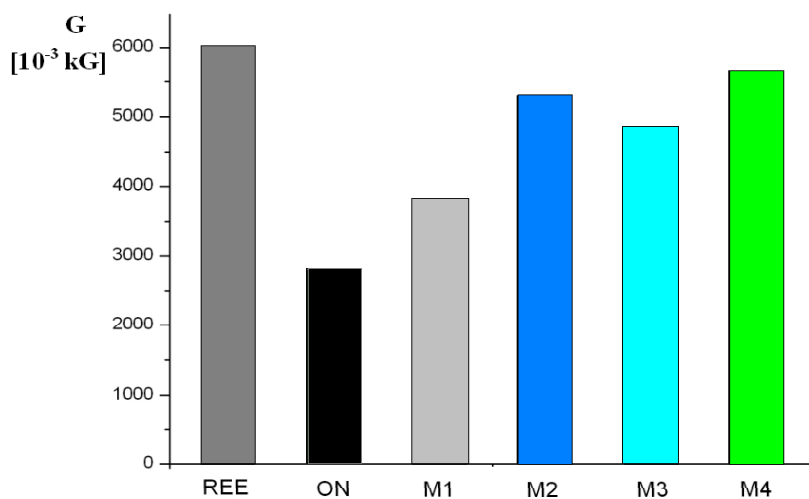
Uzyskane parametry określone metodą HFRR wskazują na poprawę smarności paliwa BIOXDIESEL – zakres 240–284% (rys. 5.20), a określone metodą SL BOCLE – zakres 128–196% (rys. 5.21) w stosunku do parametrów określonych dla ON.

Wyniki badań właściwości fizykochemicznych dotyczące smarności pozwalają sformułować następujące wnioski:

- Mieszaniny paliwa BIOXDIESEL cechują się znacznie lepszymi właściwościami smarności niż ON, mierzonymi zarówno metodą HFRR, jak i SL BOCLE, co ma bezpośredni wpływ na zwiększenie trwałości elementów aparatury paliwowej w zasilaniu silnika badanymi paliwami 3-komponentowymi.

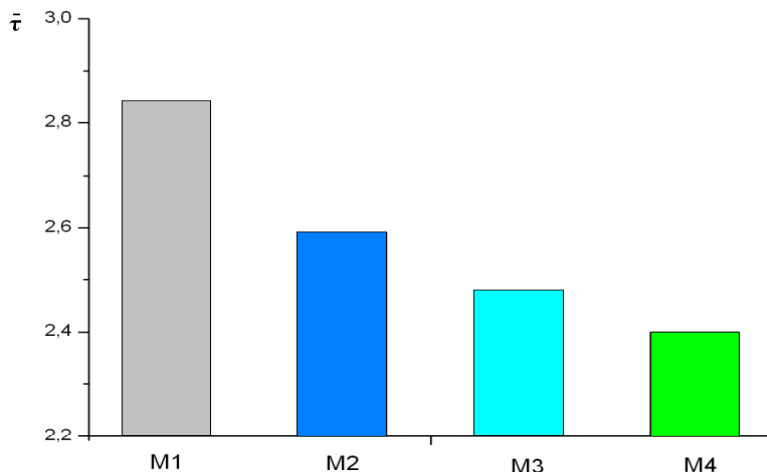


Rys. 5.18. Średnica śladu zatarcia (określona metodą HFRR)

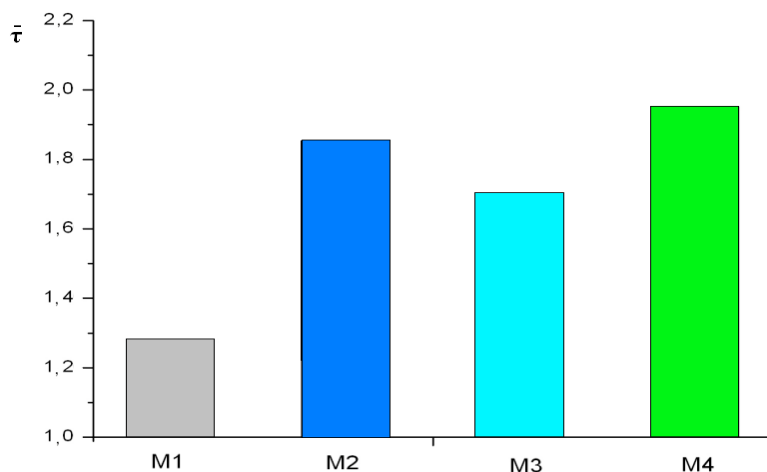


Rys. 5.19. Wartości obciążenia dla $\mu > 0,175$ (określone metodą SL BOCLE)

- Badane mieszaniny stanowiąc mogą paliwo o parametrach zgodnych z wymaganiami normatywnymi dla ON w aspekcie właściwości fizykochemicznych mających podstawowy wpływ na przygotowanie mieszaniny palnej i jej spalanie, z wyjątkiem



Rys. 5.20. Względna smarność paliwa BIOXDIESEL (metoda HFRR)



Rys. 5.21. Względna smarność paliwa BIOXDIESEL (metoda SL BOCLE)

temperatury zapłonu – parametru określającego paliwo w aspekcie logistyki (magazynowanie i transport). W tabeli 5.6 przedstawiono porównanie zmierzonych parametrów paliwa M3 z wymaganiami zawartymi w PN EN 590.

Na uwagę zasługują również bardzo korzystne parametry oddestylowania, niskotemperaturowe, gęstości i lepkości paliwa BIOXDIESEL, co wskazuje, że tak skomponowany przedmiot badań może stanowić efekt użyteczny pracy.

Tabela 5.6. Porównanie podstawowych parametrów paliwa BIOXDIESEL i ON (badania własne)

Parametr	BIOXDIESEL M3	Wymagania dla oleju napędowego wg PN EN 590
Gęstość w 15 °C [kg/dm ³]	0,844	0,820–0,845
Gęstość w 20 °C [kg/dm ³]	0,839	
Indeks cetanowy [-]	50	min 46
Lepkość kinematyczna [mm ² /s]	2,39	2–4,50
Temperatura zapłonu [°C]	26	> 55
Temperatura mętnienia [°C]	-23	-10
Temperatura krzepnięcia [°C]	-37	-24
Temperatura zablokowania zimnego filtra [°C]	-33	-20
Zawartość wody [mg/kg]	97	max 200
Skład frakcyjny		
– do 250 °C dest. [% V/V]	42	max 65
– do 350 °C dest. [% V/V]	98	min 85
Zawartość siarki [%]	< 0,01	< 0,01
Badania korozyjne	1a	1a
Smarność według HFRR [µm]	198	≤ 460

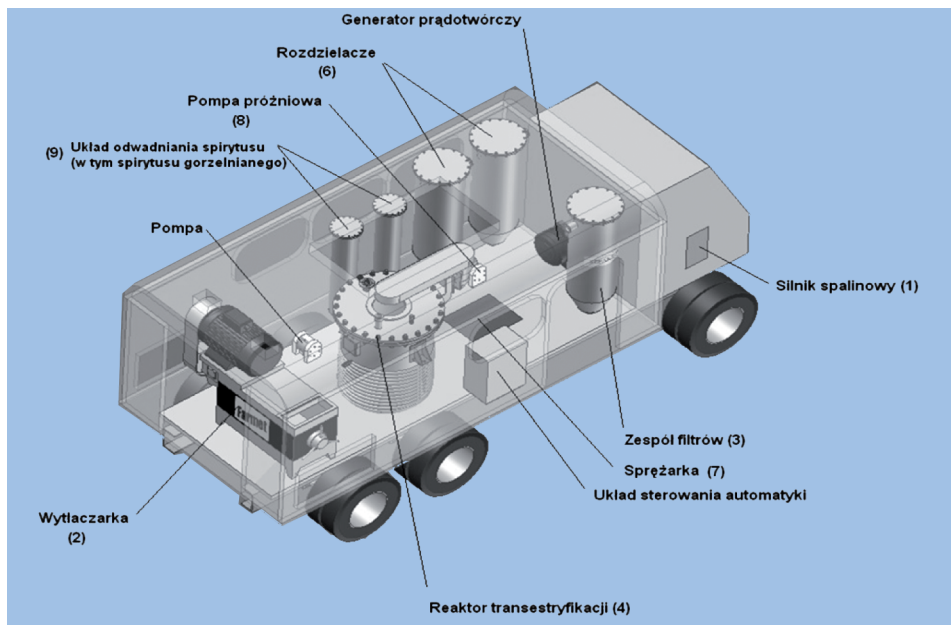
5.2.5. Przykładowa technologia wytwarzania biokomponentów etylowych i paliwa BIOXDIESEL

Obiecujące efekty wynikowe realizacji dotychczasowych prac dotyczących komponentów roślinnych – z jednej strony, a trudne do zrealizowania wymagania legislacyjno-logistyczne – z drugiej, skłoniły autora do wykonania mobilnej agrorafinerii.

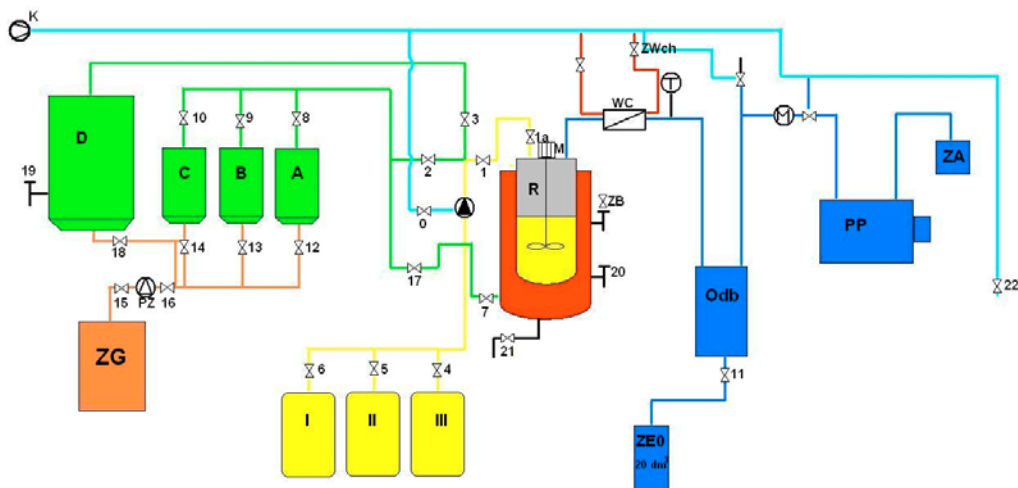
Wytwarzanie paliwa Biodiesel składa się z trzech zasadniczych procesów:

I. Proces odwadniania spirytusu

Otrzymany z gorzelnii rolniczych spirytus magazynowany jest w zbiorniku. Pompą tłoczącą dozowany jest do instalacji odwadniania bioetanolu. Technologia oparta jest na procesie adsorpcji zmiennociśnieniowej z odzyskaniem ciepła. Wykorzystany jest proces VPSA–AHR drugiej generacji realizowany w instalacji trójadsorberowej, charakteryzującej się małym zużyciem energii cieplnej. Surowcem do instalacji są surówki gorzelniane zgodne z normą PN-90/S-79529 o zawartości alkoholu nie mniejszej niż 90% obj. Surówki gorzelniane oraz recykulat z modułu VPSA–AHR są rektyfikowane w kolumnie rektyfikacyjnej. Alkohol jest zateżony do mocy 95% obj. Z kolumny odbiera się także spirytus porektyfikacyjny oraz fuzle. Rektyfikowany spirytus jest następnie osuszany w fazie gazowej trójadsorberowej instalacji VPSA–AHR, w której adsorbery pracują przemiennie w cyklu osuszania i regeneracji próżniowej. Wytworzony w procesie osuszania bezwodny alkohol jest skraplany i po uzyskaniu stężenia minimum 99,8% alkoholu odprowadzany do zbiornika magazynującego.



Rys. 5.22. Schemat mobilnej agrorafinerii (opracowanie własne [133])



Rys. 5.23. Schemat układu transestryfikacji (opracowanie własne)

II. Proces transestryfikacji

Proces rozpoczyna przygotowanie katalizatora w mieszalniku–reaktorze (będącym elementem modułu transestryfikacji). Przed wlewem etanolu przedmuchiwa się mieszalnik – reaktor R i dozownik I bezwodnym azotem.

Napełnianie reaktora R (transestryfikacji) po przedmuchu azotem zaczyna się od napełniania etanolem, a następnie włącza się mieszadło i dozowany jest olej, i mieszanina katalizująca.

Po zaistnieniu reakcji transestryfikacji pompa próżniowa odbiera nadmiar alkoholu do zbiornika technologicznego sekcji odpędu, a pozostała zawartość (estry etylowe z gliceryną) przepompowane są do trzech rozdzielaczy. Czas rozdziału w rozdzielaczach ok. 3 h, po czym REE kierowane jest do rozdzielaczy dobowych, a gliceryna do zbiornika gliceryny.

III. Wytworzenie BIOXDIESELA

Ze zbiornika magazynowego biokomponentów estrowych, a także ze zbiorników ON i etanolu/metanolu odpowiednie porcje mediów przesyłane są do zbiornika reakcyjnego. W czasie reakcji syntezy podstawowych komponentów paliwo BIOXDIESEL może być uszlachetniane.

5.3. Badania silnika zasilanego paliwem BIOXDIESEL

5.3.1. Metodyka pomiarów

Stosownie do przyjętej koncepcji pracy efekty konwersji badanych paliw (blok III, rys. 5.1) wyznaczono według kryteriów określających:

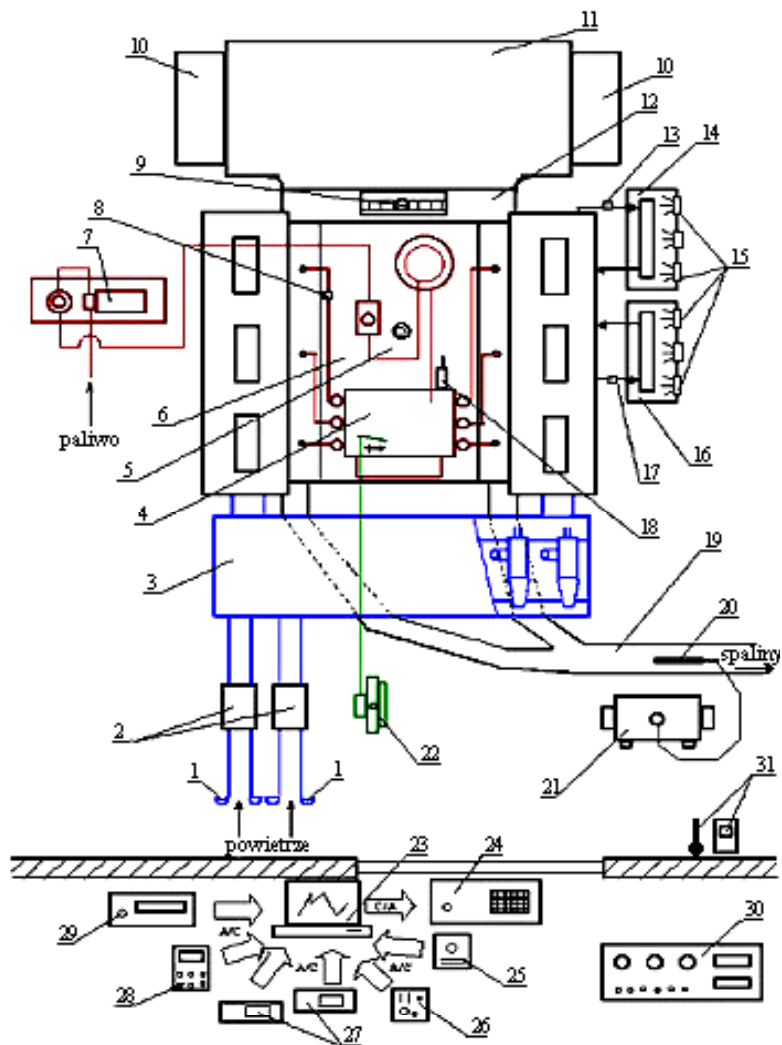
- a* – parametry efektywne silnika,
- b* – emisję składników toksycznych spalin,
- c* – jakości spalania biopaliw,
- d* – zużycie biopaliw BIOXDIESEL,
- e* – zmiany cech trwałościowych aparatury paliwowej,
- g* – zmiany przepustowości wtryskiwaczy,
- f* – zmiany jakości oleju smarującego,
- h* – niskotemperaturowe właściwości rozruchowe silnika.

Parametry efektywne M_o i N_e (cyklodyny, pola podaży energii) wyznaczono według metody określonej na unikatowym stanowisku badawczym wykonanym celowo dla tych badań z udziałem autora w WAT Warszawa. Schemat funkcjonalny stanowiska z obiektem badań przedstawiono na rysunku 5.24.

5.3.1.1. Stanowisko badawcze silnika w stanach nieustalonych

Stanowisko zaprojektowano i wykonano do oceny właściwości dynamicznych silników o ZS zasilanych różnymi mieszaninami paliwa BIOXDIESEL oraz ich porównania z parametrami właściwości dynamicznych silnika zasilanego standardowym ON.

Cechą charakterystyczną stanowiska jest precyzyjny pomiar chwilowej prędkości obrotowej (i przyspieszenia kąтового) wału korbowego silnika, stanowiących podstawę



Rys. 5.24. Schemat stanowiska badawczego konwersji energii zawartej w biopaliwach i przepływu mediów w stanach nieustalonych: 1 – lemniskata dolotowa, 2 – przepływomierze powietrza, 3 – filtr powietrza, 4 – pompa wtryskowa, 5 – czujnik ciśnienia oleju, 6 – silnik, 7 – przepływomierz paliwa, 8 – czujnik piezoelektryczny, 9 – czujnik prędkości obrotowej, 10 – planetarny mechanizm skrzętu, 11 – skrzynia przekładniowa, 12 – sprzęgło główne, 13 – czujnik temperatury cieczy chłodzącej, 14 – wymiennik ciepła układu chłodzenia, 15 – elektrozapory, 16 – wymiennik ciepła układu smarowania, 17 – czujnik temperatury oleju, 18 – czujnik położenia listwy zębatej, 19 – układ wylotowy spalin, 20 – sonda poboru spalin, 21 – dymomierz, 22 – serwomechanizm, 23 – komputer z kartami pomiarowymi, 24 – sterownik serwomechanizmu, 25 – wzmacniacz ładunku, 26 – przetwornik czujnika przemieszczeń, 27 – panel odczytowy przepływomierza powietrza, 28 – panel odczytowy dymomierza, 29 – panel odczytowy przepływomierza paliwa, 30 – tablica przyrządów kontrolno-pomiarowych i sterujących, 31 – zestaw do pomiaru parametrów otoczenia (p_o , T_o , φ)

tworzenia charakterystyk silnika w stanach nieustalonych z automatyzacją sterowania listwy pompy wtryskowej. Wyposażenie stanowiska zapewnia także automatyczny pomiar masowego natężenia przepływu paliwa i powietrza oraz zadymienia spalin.

Obiektem badań był 6-cylindrowy, 24-zaworowy silnik UTD-20 o układzie widlastym cylindrów i pojemności skokowej 15,9 dm³.

Położenie listwy zębatej pompy wtryskowej rejestrowano za pomocą przetwornika przemieszczeń typ CL-70 o następującej charakterystyce: zakres pomiarowy czujnika przemieszczeń 0–25 mm, maksymalny błąd czujnika 0,1%, czułość przetwornika 0,2 V/mm, błąd sumaryczny 0,2%.

- Masowe natężenie przepływu powietrza zasysanego do cylindrów silnika mierzono za pomocą dwóch przepływomierzy (z gorącym drutem) podłączonych równolegle na wejściu do filtra powietrza. Zakres pomiarowy każdego z nich wynosi 10–1200 kg/h, dokładność wskazań 4% w zakresie 30–1200 kg/h.

- Przepływomierz HFAM-1000 do pomiaru natężenia przepływu, gdy korzysta się z zależności wielkości utraty ciepła z ogrzanego ciała od prędkości przepływu gazu, (powietrza) składa się z modułu pomiarowego (czujnika) oraz panelu odczytowego. Czujnik przepływomierza zawiera sondę służącą do pomiaru przepływu i sondę pomiaru temperatury powietrza (czujnik kompensacyjny).

- Do pomiaru zadymienia spalin zastosowano dymomierz absorpcyjny MDO-2 (optyczny) o częściowym przepływie spalin. Sondę dymomierza do poboru spalin o średnicy wewnętrznej 27 mm umieszczono w prostoliniowym odcinku instalacji odprowadzenia spalin. Średnica wewnętrzna tego odcinka ok. 120 mm i długość (przed miejscem umieszczenia sondy poboru spalin) ok. 600 mm. Zakres pomiarowy dymomierza 0–99,99 m⁻¹, dokładność wskazań współczynnika pochłaniania 0,01 m⁻¹.

- Warunki otoczenia (temperaturę, ciśnienie oraz wilgotność względną powietrza) rejestrowano za pomocą termohigrometru LB-701 z panelem odczytowym LB-705. Zastosowany zestaw ma następującą charakterystykę: zakres mierzonej temperatury 0–70 °C (rozdzielczość 0,1 °C, dokładność 0,4 °C), zakres mierzonej wilgotności względnej 0,1–0,95 w temperaturze do +40 °C (rozdzielczość 0,001; dokładność 0,015). Ciśnienie otoczenia mierzono sondą do pomiaru ciśnienia atmosferycznego z zestawu pomiarowego TESTO-400 o zakresie 0–2000 hPa i dokładności 1%.

System sterowania prądem podgrzewającym czujnik przepływu powietrza utrzymuje stałą, niezależną od natężenia przepływającego powietrza temperaturę tego czujnika. Miarą masowego natężenia przepływu powietrza przez przepływomierz jest prąd podgrzewający czujnik przepływu.

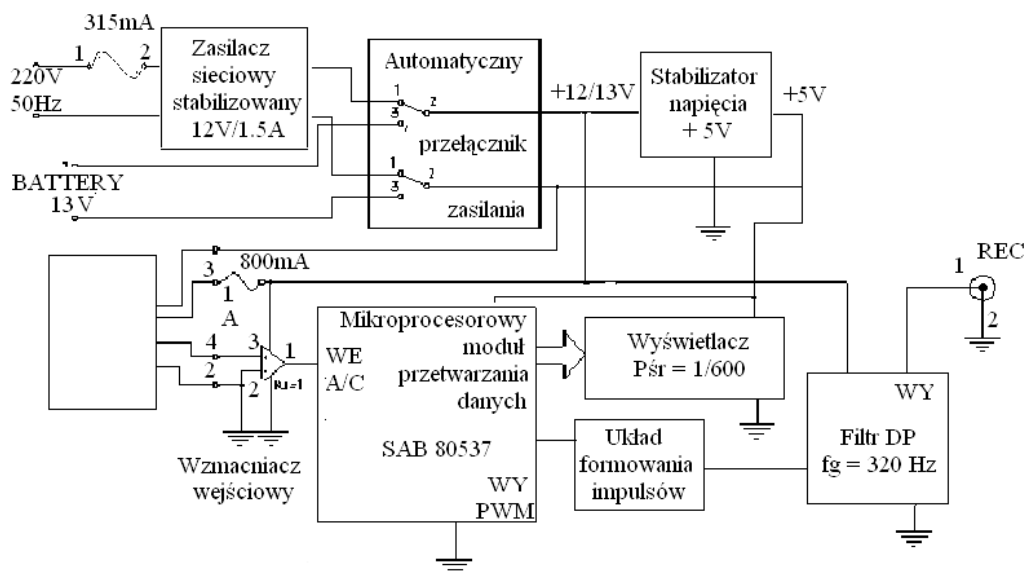
Przepływomierz ma wyjście rejestracyjne typu napięciowego umożliwiające ciągłą liniową rejestrację.

Podstawowe dane techniczne przepływomierza HFAM-1000:

- zakres mierzonych przepływów: 10–1200 kg/h; dokładność pomiaru odniesiona do wartości mierzonej: w zakresie 10–30 kg/h ±6%; w zakresie 30–1200 kg/h ±4%,
- temperatura pracy: (–30)–(+80) °C,

- spadek ciśnienia na czujniku: $< 1,5$ kPa,
- pobór prądu: (0,25–0,80) A,
- dopuszczalne przyspieszenie drgań czujnika: 150 m/s²,
- stała wyjścia rejestracji REC: 200 kg/V,
- czas nagrzewania przyrządu przed pomiarem – 30 minut.

Schemat blokowy przepływomierza HFAM-1000 przedstawiono na rysunku 5.25. Napięcie pomiarowe z czujnika przepływu BOSCH 0 280 217 801 wzmacniane jest wstępnie we wzmacniaczu nieodwracającym o wzmocnieniu $k_u = 1,104$. Dopasowuje on sygnał mierzony do poziomu wymaganego przez przetwornik A/C mikroprocesorowego układu przetwarzania danych SAB 80C537. Ustala jednocześnie zakres mierzzonego przepływu na $9,9 = 999,9$ kg/h. Sygnał napięciowy próbkowany jest co $416,7$ μ s i przyporządkowywany każdorazowo stabilaryzowanej w pamięci EPROM wartość masowego natężenia przepływu.



Rys. 5.25. Schemat blokowy przepływomierza HFAM-1000

Na wyświetlaczu wskazywana jest średnia wartość przepływu z 600 kolejnych próbek, przy czym jeżeli przynajmniej jeden pomiar w serii 600 próbek znajduje się poza zakresem pomiarowym przepływomierza, cykl zbierania danych do obliczenia średniej jest powtarzany do początku.

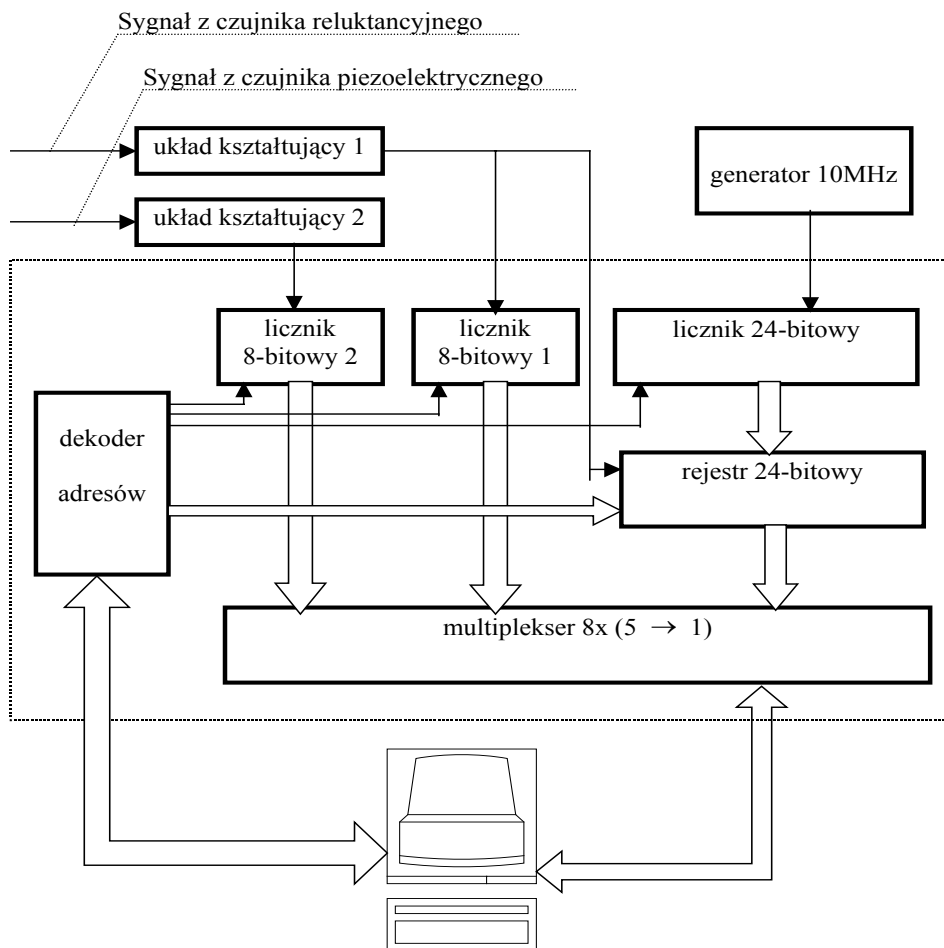
Pierwotnym źródłem sygnału analogowego jest prostokąt na wyjściu mikroprocesora o okresie $416,7$ μ s i zmiennym współczynniku wypełnienia (wyjście PWM). Sygnał ten, po uformowaniu, podany jest na wejście potrójnego filtra DP z potrójnym biegunem dla częstotliwości $f_g \approx 320$ Hz. Filtr ten generuje wartość średnią

(składowa stała) sygnału prostokątnego. Mierzone napięcie analogowe spełnia zależność:

$$U_{sr} = \frac{5}{1000} m_A \quad (5.4)$$

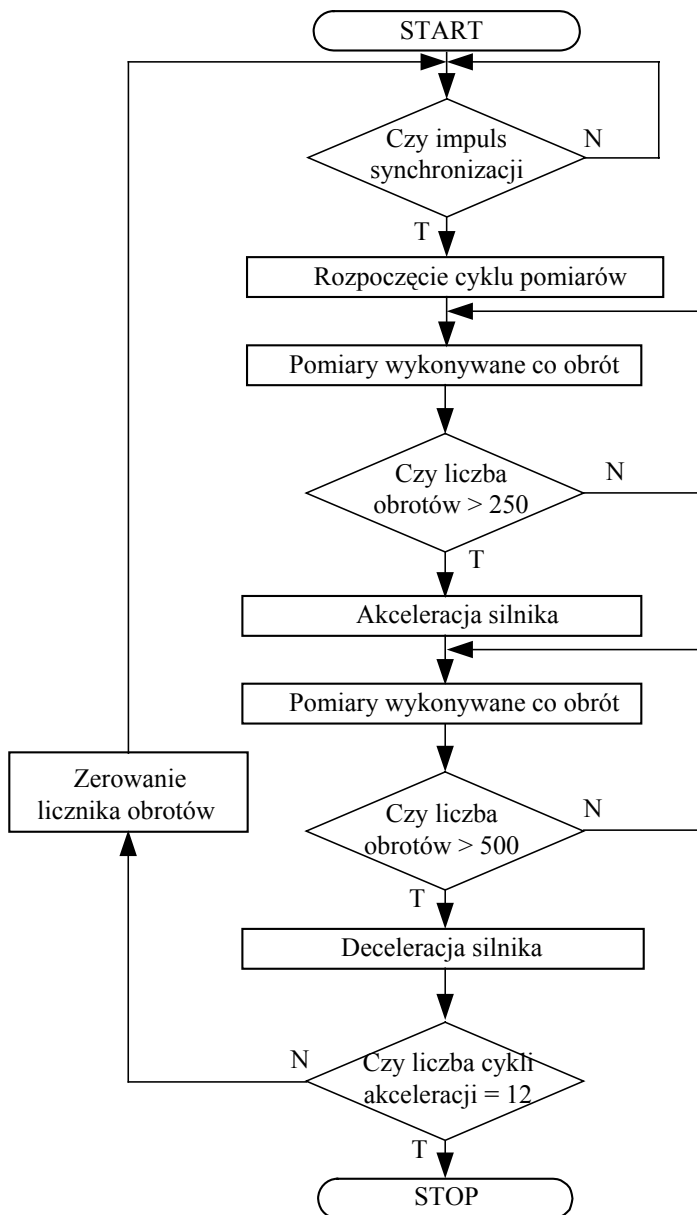
co odpowiada przyrostowi

$$\Delta V = 5 \left[\frac{\text{m} \cdot \text{V} \cdot \text{h}}{\text{kg}} \right] \quad (5.5)$$



Rys. 5.26. Schemat funkcjonalny karty pomiarowej

• Akwizycję wyników dokonywano za pomocą komputera wyposażonego w dwie karty pomiarowe. Zastosowano wielofunkcyjną kartę pomiarową PCL 818 oraz 3-kanalową kartę do pomiaru odstępów czasu. Odpowiednie wejścia połączono ekranowanymi przewodami



Rys. 5.27. Algorytm pomiarów

z czujnikami lub wyjściami analogowymi przyrządów pomiarowych. Sygnały analogowe z paliwomierza, dymomierza i przepływomierza powietrza podawane były na wejścia A/C karty PCL 818, natomiast sygnały z czujnika reluktancyjnego i piezoelektrycznego podawane były do karty mierzącej odstęp czasu, co umożliwiało precyzyjne określenie wartości prędkości obrotowej i przyspieszenia kąowego wału korbowego silnika.

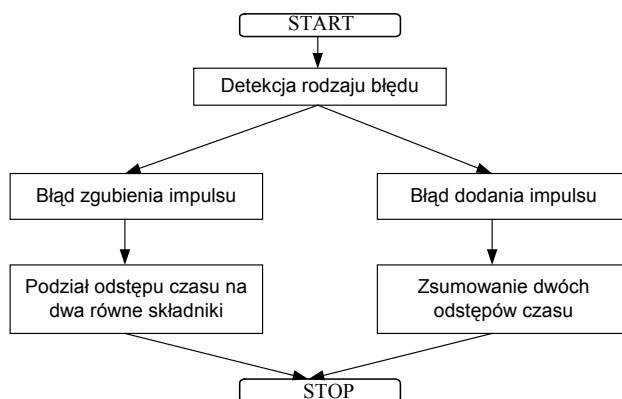
Karta rejestrowała czas przejścia zboczy narastających kolejnych impulsów w rejestrze. Komputer odczytywał w czasie rzeczywistym wartości rejestrów karty i umieszczał dane pomiarowe w pamięci operacyjnej. Dodatkowo odczytywał moment przyjścia sygnału z czujnika piezoelektrycznego, umożliwiającego synchronizację sygnału ze zwrotem GMP pierwszego cylindra. Po zakończeniu pomiarów, w wyniku cyfrowego przetwarzania danych, obliczany był przebiegi chwilowej prędkości obrotowej i przyspieszenia kąowego, stanowiących podstawę tworzenia charakterystyk silnika w stanach nieustalonych.

Sterowanie listwą pompy paliwowej zapewniała wartość napięcia z karty pomiarowej, co umożliwiło pełną automatyzację kolejnych serii pomiarowych.

- Algorytm pomiarowy przedstawiono na rysunku 5.27.

• Efektem badań były przebiegi czasowe sygnałów napięciowych z przyrządów pomiarowych zużycia paliwa, zużycia powietrza, zadymienia spalin oraz czasu trwania kolejnych prędkości obrotowych silnika. Charakterystyki zużycia paliwa, zużycia powietrza i zadymienia spalin otrzymuje się przez przekształcenie odpowiednich przebiegów napięciowych, natomiast zmierzony czas trwania poszczególnych obrotów silnika jest podstawą opracowań efektywnościowych.

• Eliminacja błędów grubych polega na detekcji rodzaju błędu grubego oraz odpowiednio podzieleniu odstępu czasu na dwa składniki w razie „zgubienia” impulsu lub zsumowania dwóch przedziałów w przypadku dodania impulsu. Algorytm tej eliminacji przedstawiono na rysunku 5.28.



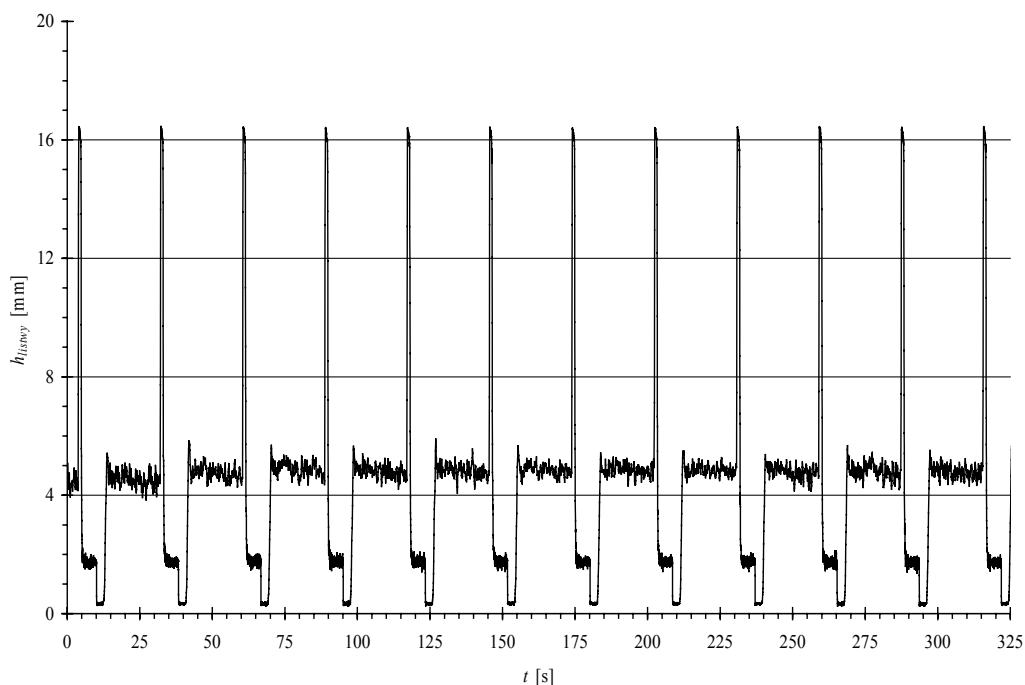
Rys. 5.28. Algorytm eliminacji błędów grubych (nadmiernych) [89]

Po wyeliminowaniu błędów grubych przystępuje się do ograniczenia wpływu błędów przypadkowych na przebieg sygnałów pomiarowych. Warunkiem uzyskania nie-

znieszczonego sygnału jest redukcja częstotliwości zakłóceń z widma sygnału z jednoczesnym zachowaniem amplitud częstotliwości składowych rzeczywistego sygnału przyspieszenia kąowego. Opracowano 13-stopniowy, dolnoprzepustowy filtr cyfrowy, który umożliwia skuteczną redukcję zakłóceń. Efektem badania były przebiegi wartości chwilowych przyspieszeń i momentu obrotowego, stanowiących podstawę tworzenia figur geometrycznych umożliwiających porównanie właściwości dynamicznych silników zasilanych paliwami o różnych cechach fizykochemicznych.

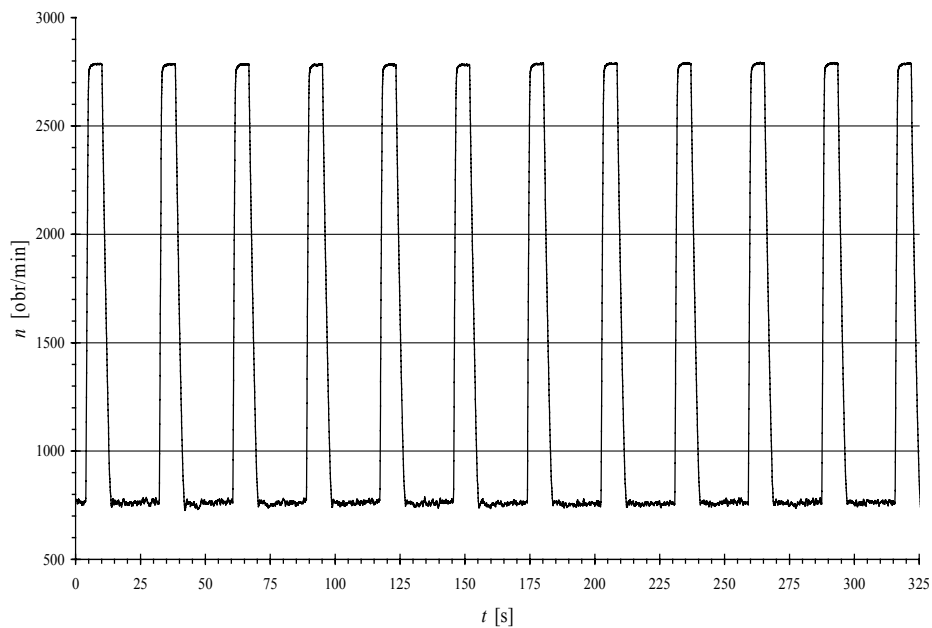
5.3.1.2. Charakterystyki przepływów powietrza i paliwa, zmian prędkości obrotowej wału korbowego silnika oraz zadymienia spalin w stanach nieustalonych (przejściowych)

A. Charakter powtarzalności sterowania natężeniem przepływu paliwa i efektów zadymienia spalin.

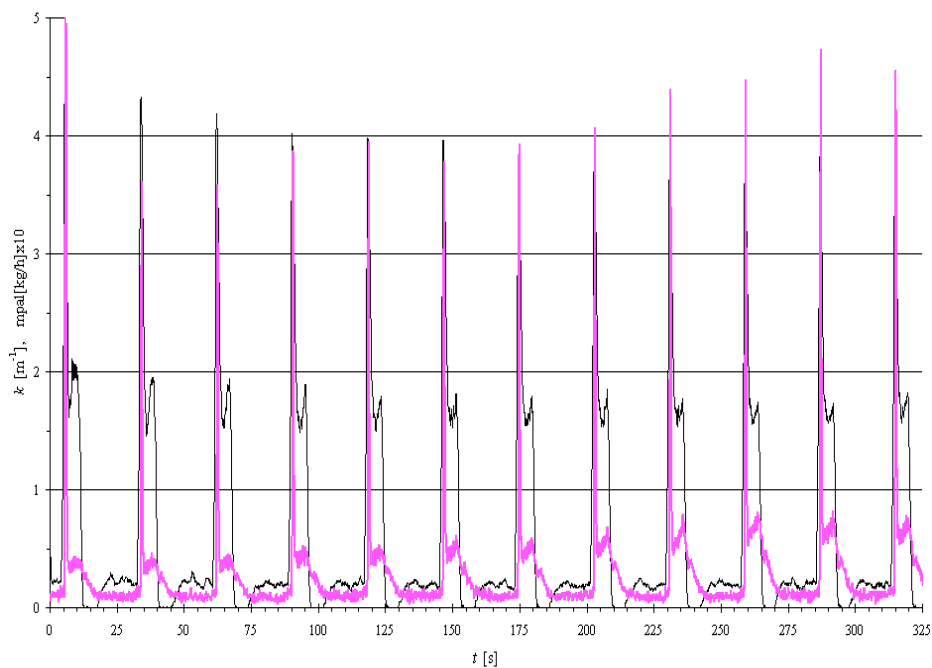


Rys. 5.29. Charakterystyka wysuwu listwy zębatej w funkcji czasu

Na rysunku 5.29 przedstawiono graficznie powtarzalność zmian położenia listwy zębatej w 12-cyklowym systemie badawczym silnika, a na rysunku 5.30 odpowiadające im powtarzalności zmian prędkości obrotowej wału. Porównanie powtarzalności wykresów poszczególnych cykli pomiarowych świadczy o dobrym „dopasowaniu” automatycznych elementów sterujących (mierzalnych czynników wymuszających) i wykonawczych (odpowiedzi obiektu). Na rysunku 5.32 przedstawiono charakterystyki cyklicznych powtarzalności oraz zależności dawkowania paliwa i zadymienia spalin.

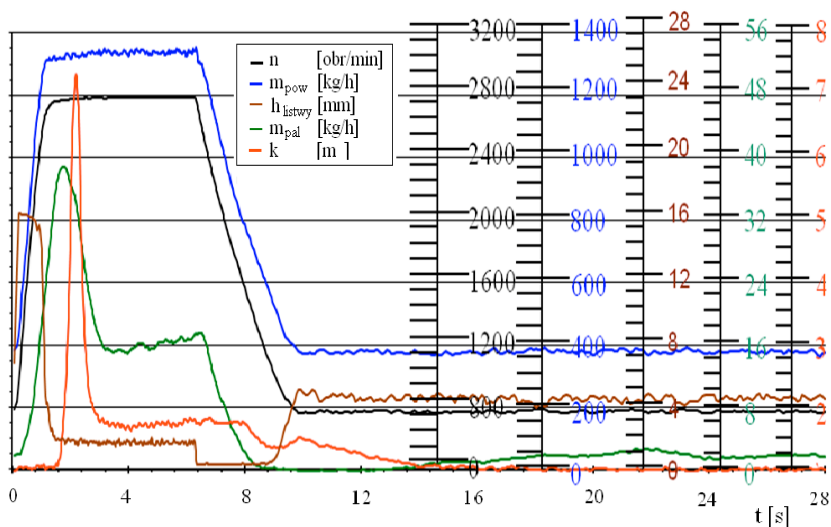


Rys. 5.30. Charakterystyka prędkości obrotowej wału korbowego silnika w funkcji czasu

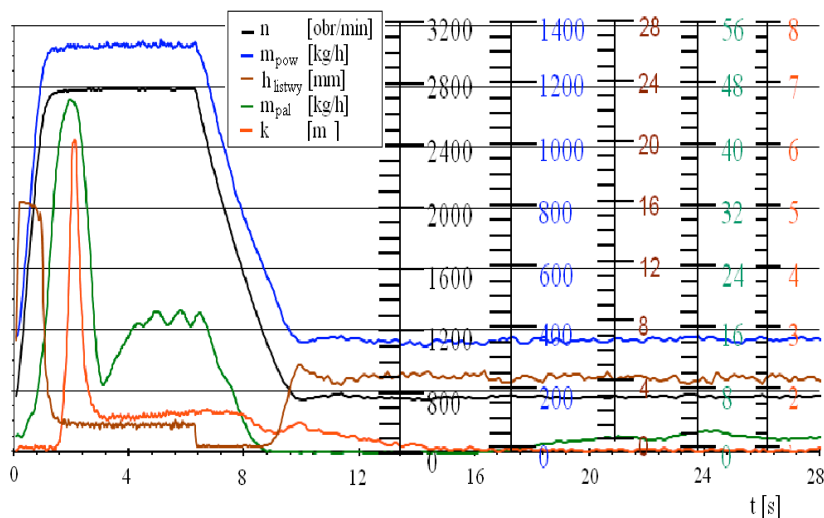


Rys. 5.31. Charakterystyki masowego natężenia przepływu paliwa (linia czarna) i współczynnika ekstynkcji (linia różowa) w funkcji czasu dla 12-cyklowego systemu pomiarowego

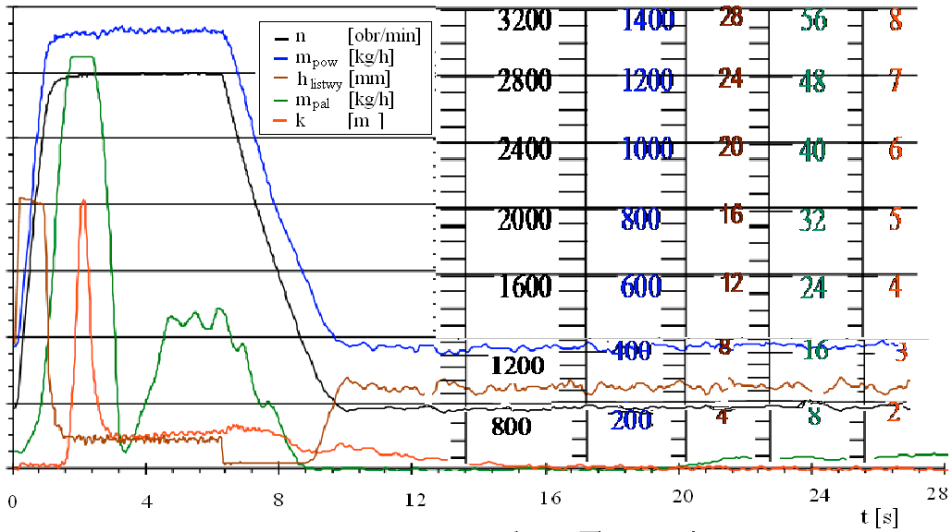
B. Charakterystyki przepływu czynników w układach silnika i zmian prędkości obrotowej wału korbowego silnika zasilanego paliwem BIOXDIESEL.



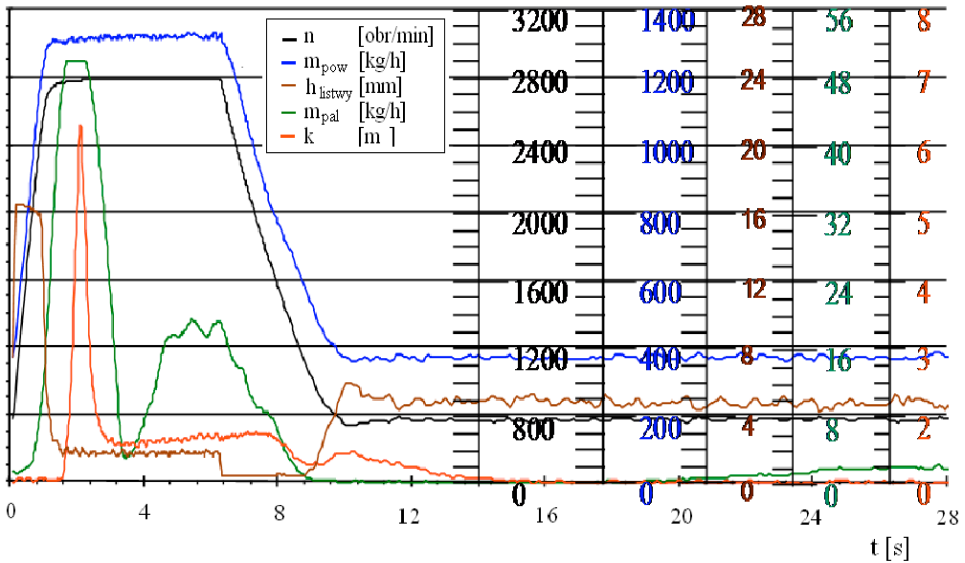
Rys. 5.32. Masowe natężenie przepływów powietrza \dot{m}_{pow} i paliwa \dot{m}_{pal} , przebieg prędkości obrotowej wału korbowego n , zadymienie spalin k i położenie listwy zębatej h_{listwy} w stanach nieustalonych podczas zasilania silnika paliwem M1



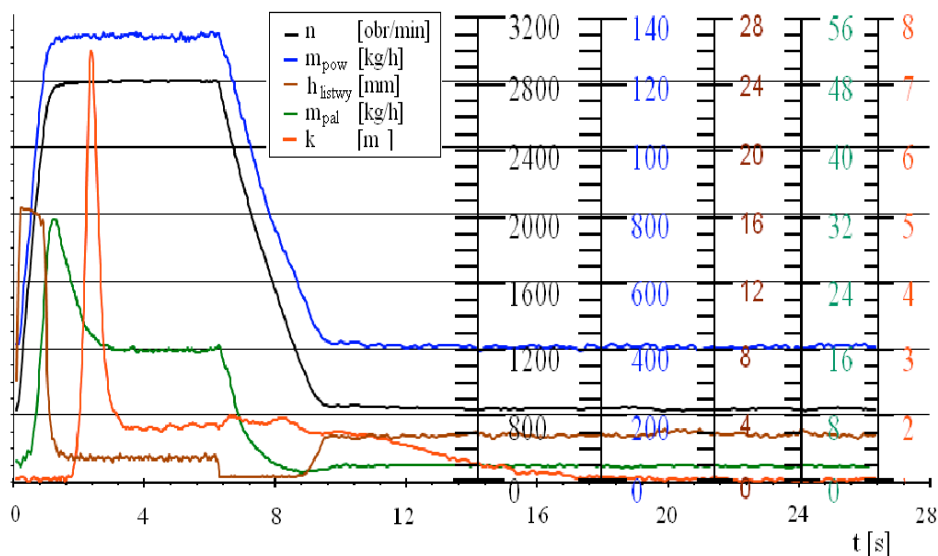
Rys. 5.33. Masowe natężenie przepływów powietrza \dot{m}_{pow} i paliwa \dot{m}_{pal} , przebieg prędkości obrotowej wału korbowego n , zadymienie spalin k i położenie listwy zębatej h_{listwy} w stanach nieustalonych podczas zasilania silnika paliwem M2



Rys. 5.34. Masowe natężenie przepływów powietrza \dot{m}_{pow} i paliwa \dot{m}_{pal} , przebieg prędkości obrotowej wału korbowego n , zadymienie spalin k i położenie listwy zębatej h_{listwy} w stanach nieustalonych podczas zasilania silnika paliwem M3



Rys. 5.35. Masowe natężenie przepływów powietrza \dot{m}_{pow} i paliwa \dot{m}_{pal} , przebieg prędkości obrotowej wału korbowego n , zadymienie spalin k i położenie listwy zębatej h_{listwy} w stanach nieustalonych podczas zasilania silnika paliwem M4



Rys. 5.36. Masowe natężenie przepływów powietrza \dot{m}_{pow} i paliwa \dot{m}_{pal} , przebieg prędkości obrotowej wału korbowego n , zadymienie spalin k i położenie listwy zębatej h_{listwy} w stanach nieustalonych podczas zasilania silnika paliwem ON

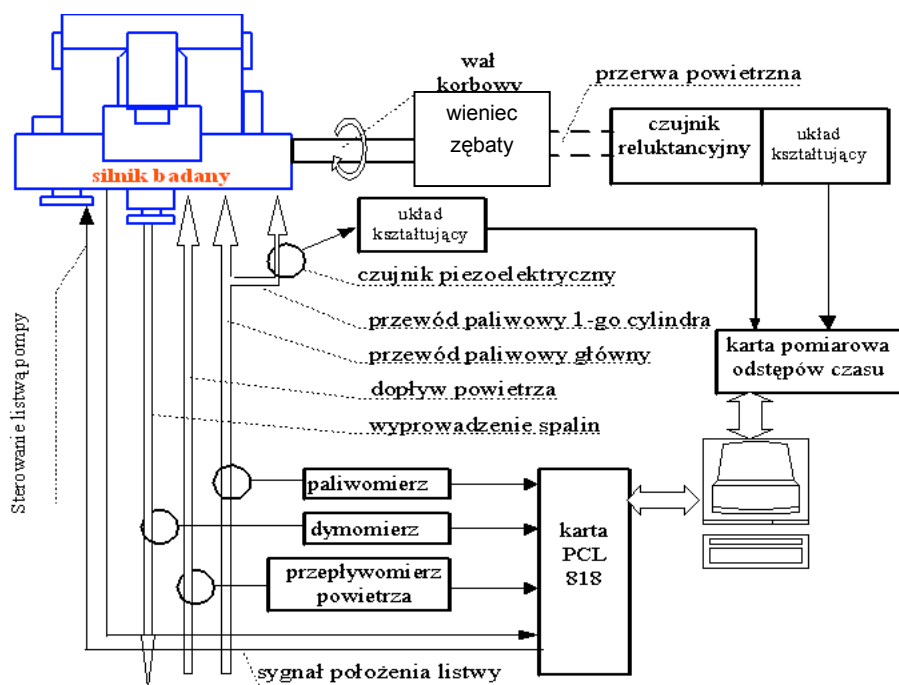
Na rysunkach 5.30–5.34 przedstawiono wyniki pojedynczych cykli pomiarowych, zawierających przyspieszanie wału korbowego silnika $n = \text{const}$, opóźnianie prędkości obrotowej i pracę silnika na biegu jałowym przed kolejnym cyklem badawczym. Przedstawione na poszczególnych rysunkach wykresy umożliwiają porównanie mierzonych parametrów silnika oraz mediów w układzie dolotowym i wylotowym silnika zasilanego paliwami BIOXDIESEL.

Wnioski

- We wszystkich analizowanych cyklach pomiarowych zmiany czasowe położenia listwy były identyczne, co wynikało z założonej metodologii badań.
- Z prezentowanych wykresów wynikają quasi-identyczne przebiegi masowego natężenia przepływu powietrza położenia listwy zębatej, natomiast przebiegi masowego natężenia paliwa i współczynnika pochłaniania k różnią się zdecydowanie, co jest wynikiem zmian właściwości fizycznych poszczególnych mieszanek BIOXDIESEL.
- Skład paliwa BIOXDIESEL ma istotny wpływ na wielkość zadymienia spalin i zużycie paliwa. Wraz ze wzrostem zawartości etanolu w mieszaninie M1→M3 maleje współczynnik k zadymienia spalin, wzrasta natomiast masowe natężenie przepływu paliwa. Podczas zasilania paliwem o zawartości etanolu 10% (M4) wzrasta wartość współczynnika k zadymienia spalin w stosunku do M3, co świadczyć może o zmniejszeniu wpływu C_2H_5OH na utlenianie składników i celowości zmniejszenia udziału etanolu w paliwie BIOXDIESEL.

5.3.2. Cyklodyna (pole podaży energii) i środek ciężkości cyklodyny

Pomiary parametrów właściwości dynamicznych silnika zasilanego paliwem BIOXDIESEL i ON wykonywane na stanowisku pokazanym na rysunku 5.24, którego schemat funkcjonalny w zakresie określania efektywności przedstawiono na rysunku 5.37, realizowane były według algorytmu przedstawionego na rysunku 5.27.



Rys. 5.37. Schemat funkcjonalny systemu pomiarowego efektywności silnika

Uwzględniając potrzeby badawcze przyjęto założenie, że pojedyncze badanie obejmuje dwanaście pełnych cykli charakterystyki dynamicznej, czyli dwanaście cykli przyspieszania i opóźniania prędkości obrotowej silnika. Pojedynczy cykl składał się z 600 obrotów silnika podzielonych na 4 fazy: bieg jałowy (ok. 250 obrotów), przyspieszanie i maksymalna prędkość obrotowa (ok. 250 obrotów) i opóźnianie. W celu uzyskania porównywalnych wyników każdy cykl pomiarowy był synchronizowany impulsem zwrotu zewnętrznego pierwszego cylindra.

Efektom badań pomiarowych były przebiegi czasowe sygnałów napięciowych z przyrządów pomiarowych zużycia paliwa, masowego natężenia przepływu powietrza, zadymienia spalin oraz czas trwania kolejnych obrotów silnika (rys. 5.30–5.34).

Charakterystyki masowego zużycia paliwa i powietrza oraz zadymienia spalin stanowią odrębny temat rozważań. Na podstawie natomiast pomierzonego czasu trwania po-

szczególnych obrotów wału korbowego silnika obliczono chwilowy moment obrotowy i chwilową moc w funkcji prędkości obrotowej, które stanowią podstawę dokonania efektywnościowych porównań właściwości energetycznych poszczególnych paliw.

Moment obrotowy określa się z zależności:

$$M = \varepsilon J = \varepsilon J = \varepsilon J \quad (5.6)$$

gdzie: J – biegunowy moment mas wirujących silnika, ε – chwilowe przyspieszenie wału korbowego silnika, przy czym

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \right] \quad (5.7)$$

gdzie: J – biegunowy moment mas wirujących silnika, ω – prędkość kątowna wału korbowego.

Prędkość kątowną obliczono ze wzoru:

$$\omega = \frac{d\alpha}{dt} \quad (5.8)$$

gdzie: α – kąt obrotu wału korbowego, t – czas.

$$\omega_i = \frac{2\Pi}{t_i} \quad (5.9)$$

gdzie: ω_i – prędkość kątowna wału korbowego w [rad/s], t_i – dyskretna wartość czasu.

Prędkość obrotową obliczono ze wzoru:

$$n_i = \frac{\omega_i}{2\Pi} = \frac{\omega_i}{2\Pi} \quad (5.10)$$

$$\omega_i = 2\Pi n_i = 2\Pi n_i \quad (5.11)$$

gdzie: n_i – chwilowa prędkość obrotowa wału korbowego wyrażona w [obr/s].

Wartość chwilową przyspieszenia kątownego można wyrazić wzorem:

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta\omega_i}{\Delta t_i} = 2\Pi \frac{\Delta n_i}{\Delta t_i} \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \right] \quad (5.12)$$

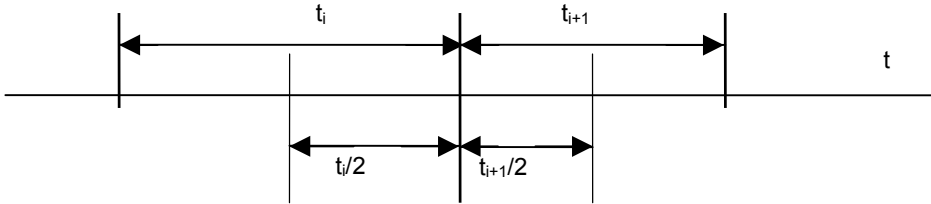
gdzie: ε_i – wartość chwilowa przyspieszenia kątownego.

Zmiana prędkości obrotowej obliczana pomiędzy kolejnymi pomiarami wynosi:

$$\Delta n_i = n_{i+1} - n_i \quad (5.13)$$

$$\Delta t_i = \frac{t_{i+1} + t_i}{2} \quad (5.14)$$

Uzasadnienie wzoru (5.14) zilustrowano na rysunku 5.47.



Rys. 5.38. Ilustracja mierzonych przedziałów czasu

Po podstawieniu do wzoru (5.12) zależności (5.13) i (5.14) otrzymuje się

$$\varepsilon_i = 4\Pi \frac{n_{i+1} - n_i}{t_{i+1} + t_i} = 4\Pi \frac{t_{i+1} - t_i}{t_{i+1}t_i(t_{i+1} + t_i)} \quad (5.15)$$

Uwzględniając, że

$$M_i = \varepsilon_i J \quad (5.16)$$

Chwilowy moment obrotowy określa się jako:

$$M_i = 4\Pi \frac{t_{i+1} - t_i}{t_{i+1}t_i(t_{i+1} + t_i)} J \quad (5.17)$$

natomiast wartość mocy chwilowej

$$Ne_i = M_i \omega_i \quad (5.18)$$

Bardzo istotną ze względu na analizę właściwości energetycznych silnika (i paliwa) w stanach nieustalonych jest charakterystyka stanowiąca ilustrację momentu obrotowego w funkcji prędkości obrotowej wału korbowego silnika obciążonego jedynie momentem bezwładności mas ruchomych silnika. Tworzy ją przez przyporządkowanie każdemu obrotowi współrzędne wartości prędkości obrotowej i wartości momentu obrotowego. Przedstawiona na rysunku 5.39 charakterystyka składa się z cyklu pomiarowego odpowiadającego poszczególnym fazom pracy silnika (przyspieszanie + opóźnianie). Efektem cyklicznie powtarzających się zależności M_o i n w dynamicznych zmianach podczas przyspieszania i opóźniania jest zamknięta figu-

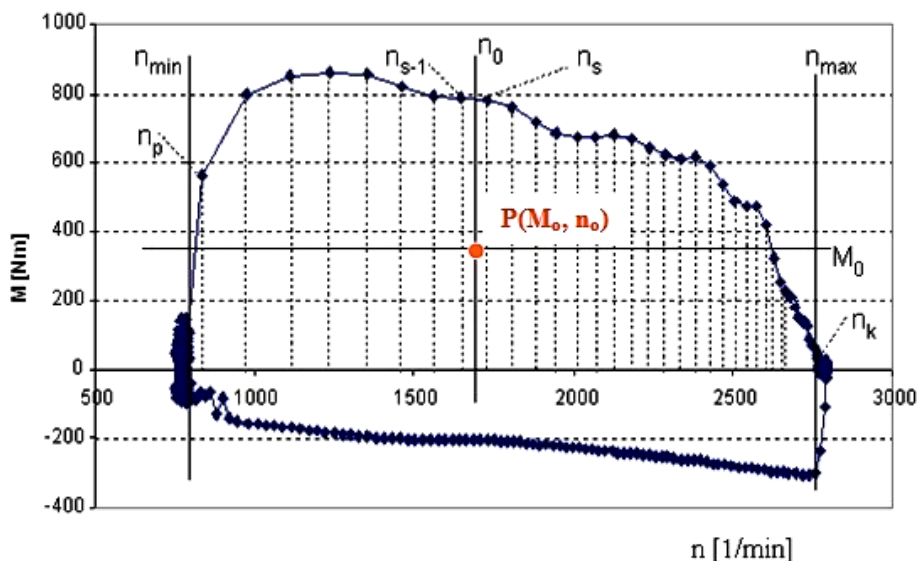
ra geometryczna, stanowiąca pole podaży energii silnika, którą nazwano **cyklodyną silnika**.

Istotne informacje o charakterze pracy silnika w stanach nieustalonych wnoszą wartości współrzędnych środka pola cyklodyny, który nazwano **środkiem ciężkości cyklodyny** (analogicznie do *point of gravity* w działaniach operacyjnych).

5.3.2.1. Parametry cyklodyny badanego silnika

Na podstawie analizy poszczególnych cyklodyn można ocenić jakość silnika i (lub) właściwości energetyczne paliwa. Badaniom porównawczym poddano:

- pola powierzchni cyklodyny dla dodatnich i ujemnych wartości momentu obrotowego,
- współrzędne środka ciężkości dodatniej części cyklodyny.



Rys. 5.39. Cyklodyna silnika UTD-20: n_{\min} – prędkość obrotowa minimalna, czyli największa prędkość przedziału biegu jałowego, n_{\max} – prędkość obrotowa maksymalna, czyli najmniejsza prędkość przedziału wahań maksymalnych prędkości obrotowej, n_p – prędkość odpowiadająca punktowi pomiarowemu po przekroczeniu n_{\min} , n_k – prędkość odpowiadająca punktowi pomiarowemu po przekroczeniu n_{\max} , n_o – prędkość obrotowa odpowiadająca środkowi ciężkości dodatniej części cyklodyny, M_o – moment obrotowy środka ciężkości dodatniej części cyklodyny

Ze względu na fakt, że kształt oraz wartości powierzchni ujemnej części cyklodyny są niezmiennie i zależne jedynie od stanu technicznego silnika (wartości tribologicznych) – co potwierdzono badaniami, wygodne jest wyznaczanie środka ciężkości dla dodatniej części cyklodyny. W dalszych rozważaniach środek ciężkości dodatniej części cyklodyny przedstawiany jest jako środek ciężkości cyklodyny.

Do określania pola powierzchni cyklodyny dla dodatnich wartości momentu obrotowego zastosowano:

$$S_n = \int_{n_{\min}}^{n_{\max}} M(n) dn \quad (5.19)$$

Zależność (5.19) w praktyce można zastosować do funkcji ciągłych. Ponieważ w rzeczywistości S_n jest obliczona numerycznie, więc całka jest sumą pól składowych. Pole dodatnie (odpowiadające fazie przyspieszenia) jest określane jako:

$$S_d = \sum_{i=p}^{k+1} S_i \quad (5.20)$$

gdzie: S_i – pole trapezu ograniczonego podstawami n_i i n_{i+1} , osią $0-n$ oraz prostą przechodzącą przez punkty $M(n_i)$ i $M(n_{i+1})$.

Uwzględniając specyfikę pomiarów oraz przebiegu charakterystyki, wyprowadzono zależność, która umożliwiła obliczenie powierzchni S_d

$$S_d = S_p + \sum_{i=p+1}^{k-1} \frac{M(n_{i-1}) + M(n_i)}{2} (n_i - n_{i-1}) + S_k \quad (5.21)$$

gdzie: S_p i S_k oblicza się na podstawie zależności (5.22) i (5.23).

$$S_p = \left(M(n_{p-1}) + M(n_p) + \frac{(M(n_p) - M(n_{p-1}))(n_{\min} - n_{p-1})}{n_p - n_{p-1}} \right) \frac{n_p - n_{\min}}{2} \quad (5.22)$$

$$S_k = \left(M(n_{k-1}) + M(n_k) + \frac{(M(n_k) - M(n_{k-1}))(n_{\max} - n_{k-1})}{n_k - n_{k-1}} \right) \frac{n_{\max} - n_{k-1}}{2} \quad (5.23)$$

Obliczanie rozpoczyna się od momentu przekroczenia górnej granicy przedziału prędkości biegu jałowego. Zakładamy wówczas, że silnik rozpoczął fazę przyspieszenia. Program identyfikuje więc stan pracy silnika, sprawdza czy została przekroczona wartość prędkości obrotowej n_{\min} i oblicza sumę pól S_p i kolejnych pól S_i . Algorytm kończy się po przekroczeniu przez prędkość obrotową silnika wartości n_{\max} , czyli prędkości, dla której fazę akceleracji uznajemy za zakończoną. Otrzymana wartość S_d sumy wszystkich pól składowych jest polem cyklodyny zawartym pomiędzy krzywą momentu obrotowego uzyskaną w fazie przyspieszenia i osią n – prędkości obrotowej. Analogicznie obliczono ujemne pola cyklodyny i pole całkowite.

Kształt cyklodyny, jako pola podaży energii wyrażający charakter zmian wartości momentu obrotowego od prędkości obrotowej wału korbowego silnika, może być

reprezentowany przez usytuowanie w tych samych współrzędnych (M_o, n) jego środka (środka ciężkości cyklodyny). Do obliczenia parametrów współrzędnych centrum powierzchni cyklodyny można wykorzystać właściwość prostej przechodzącej przez środek ciężkości dzielącej powierzchnię na dwie równe połowy. Stąd wynikają zależności:

$$\int_{n_{\min}}^{n_0} M(n)dn = \int_{n_0}^{n_{\max}} M(n)dn = \frac{1}{2} \int_{n_{\min}}^{n_{\max}} M(n)dn = \frac{1}{2} S_d \quad (5.24)$$

$$\int_{n_{\min}}^{n_{mp}} M(n)dn + (n_{mk} - n_{mp})M_o + \int_{n_{mk}}^{n_{\max}} M(n)dn = \int_{n_{mp}}^{n_{mk}} (M(n) - M_o)dn \quad (5.25)$$

Dla wartości dyskretnej wszystkie całki zastępuje się sumą pól. W przypadku obliczania współrzędnej n_o korzystamy więc z zależności:

$$S_p + \sum_{i=p+1}^{s-1} S_i + S_s(n_o) = \frac{1}{2} S_d \quad (5.26)$$

Po przekształceniach i podstawieniach otrzymuje się równanie:

$$S_s(n_o) = \left(2M(n_{s-1}) + \frac{(M(n_s) - M(n_{s-1}))(n_o - n_{s-1})}{n_s - n_{s-1}} \right) \frac{n_o - n_{s-1}}{2} \quad (5.27)$$

Z zależności (5.27) można obliczyć n_o jako dodatni pierwiastek równania kwadratowego $An^2 + Bn + C = 0$, gdzie odpowiednio:

$$A = M(n_s) - M(n_{s-1}) \quad (5.28)$$

$$B = 2M(n_{s-1})(n_s - n_{s-1}) + (M(n_{s-1}) - M(n_s))n_{s-1} \quad (5.29)$$

$$C = -2(n_s - n_{s-1})(S_s(n_o) + M(n_{s-1})n_{s-1}) + (M(n_{s-1}) - M(n_s))(n_{s-1})^2 \quad (5.30)$$

Algorytm obliczający współrzędną środka ciężkości n_o musi być poprzedzony obliczeniem dodatniego pola powierzchni S_d . Początek procedury obliczania n_o jest analogiczny do algorytmu obliczania S_d . Po przekroczeniu prędkości n_{\min} sumowane są wartości pól trapezów, których wierzchołki określają współrzędne kolejnych punktów pomiarowych. Po przekroczeniu przez sumę S wartości połowy pola dodatniego cyklodyny uzyskujemy informację, że środek ciężkości znajduje się wewnątrz ostatnio sumowanego pola S_s . Obliczenie dokładnej wartości n_o jest możliwe w wyniku roz-

wiązania równania kwadratowego, którego współczynniki są określone wzorami (5.28–5.30). Dodatni pierwiastek równania odpowiada szukanej wartości n_o .

Określenie środka ciężkości wymaga także obliczenia jego drugiej współrzędnej M_o . Przechodząc z wartości ciągłych na dyskretne na podstawie (5.25), otrzymamy:

$$\sum_{i=p-1}^k S'_i = \sum_{i=mp}^{mk} S''_i = \frac{1}{2} S_d \quad (5.31)$$

gdzie: S'_i – pola powierzchni trapezów lub prostokątów ograniczonych od góry prostą $M = M_o$, S''_i – pola powierzchni trapezów zawarte pomiędzy krzywą $M(n)$ i prostą $M = M_o$.

Pola powierzchni S'_i stanowią w sumie pole składowe S_i . W zależności od wartości $M(n_i)$ pola oblicza się według wzorów: dla $M(n_{i-1}) < M_o$ i $M(n_i) < M_o$:

$$S'_i = \frac{M(n_{i-1}) + M(n_i)}{2} (n_i - n_{i-1}) \quad (5.32)$$

- dla przypadku $M(n_{i-1}) > M_o$ i $M(n_i) > M_o$

$$S'_i = M_o (n_i - n_{i-1}) \quad (5.33)$$

- jeżeli $M(n_{i-1}) < M_o$ i $M(n_i) > M_o$ lub $M(n_{i-1}) < M_o$ i $M(n_i) > M_o$, to

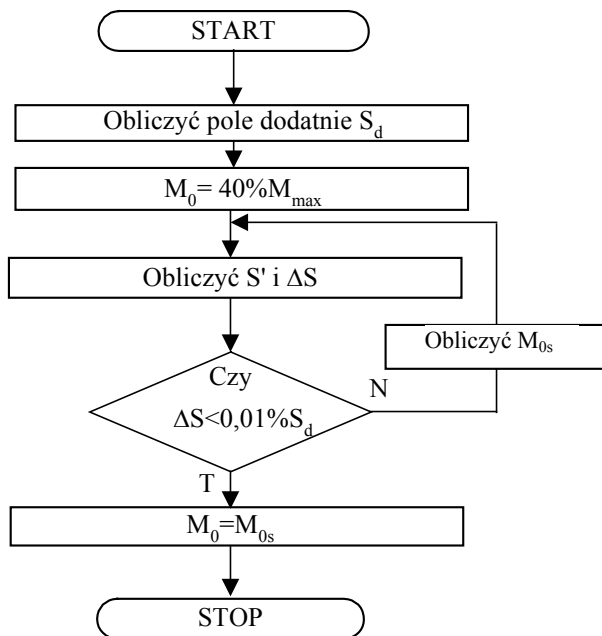
$$S'_i = \frac{M(n_{i-1}) + M_o}{2} (n_{mp} - n_{i-1}) + M_o (n_i - n_{mp}) \quad (5.34)$$

gdzie n_{mp} oblicza się z zależności:

$$n_{mp} = n_{i-1} + \frac{M_o - M(n_{i-1})}{M(n_i) - M(n_{i-1})} (n_i - n_{i-1}) \quad (5.35)$$

Aby obliczyć pola na podstawie zależności (5.32)–(5.35), konieczna jest znajomość wartości M_o , która z założenia jest wielkością szukaną. Do obliczeń należy więc przyjąć pewną wartość M_o , obliczyć sumy pól S'_i i pole niezrównoważenia ΔS

$$\Delta S = \sum_{i=p-1}^k S'_i - \frac{1}{2} S_d \quad (5.36)$$



Rys. 5.40. Algorytm obliczania współrzędnej M_o środka ciężkości (opracowanie własne)

a następnie odpowiednio skorygować wartość M_o . Obliczenia należy powtarzać do momentu uzyskania wartości ΔS mniejszej od założonej. W ten sposób otrzymuje się przedstawiony na rysunku 5.40 iteracyjny algorytm obliczania wartości współrzędnej środka ciężkości M_{os} , w którym wykorzystano przedstawione zależności (5.21–5.35). Do obliczania skorygowanej wartości M_{os} zastosowano zależność:

$$M_{os} = M_o \left(1 - \frac{\Delta S}{S_d} \right) \quad (5.37)$$

Algorytm musi być poprzedzony obliczeniem pola dodatniego cyklodyny. Przyjmujemy wartość początkową M_o na poziomie 40% M_{max} i obliczamy pole cyklodyny zawarte pomiędzy prostymi $M = M_o$ i $M = 0$ jako sumę pól, których powierzchnie obliczamy według jednego ze wzorów: (5.32–5.34). Następnie sprawdzamy, czy obliczone pole różni się od połowy dodatniego pola cyklodyny o mniej niż 0,01%. Jeżeli warunek nie jest spełniony, to obliczamy nową wartość M_o ze wzoru (5.35) i powtarzamy obliczenia pola S' . Jeżeli warunek jest spełniony, to kończymy procedurę, przyjmując końcową wartość M_o jako przybliżoną wartość współrzędnej M środka ciężkości dodatniej części cyklodyny.

W wyniku obliczeń otrzymujemy więc pola powierzchni cyklodyny S_d , S_u , i S_c oraz współrzędne punktu środka ciężkości $P(n_o, M_o)$, ponieważ całe badanie obejmowało

12 cykli przyspieszania, przeto podane parametry można określić dla 12 cyklodyn. Można także ewentualnie powtórzyć badanie, co daje 24 lub nawet więcej cykli pomiarowych dla identycznych parametrów pracy.

Usytuowanie centrum powierzchni cyklodiny lub jego „dodatniej” części może określać właściwości energetyczne silnika (np. z zastosowaniem różnych rodzajów paliw). Przykładowe wyniki pomiarów silnika zasilanego ON przedstawiono w tabeli 5.7. Natomiast na rysunkach 5.41–5.43 przedstawiono zestawy cyklodyn wytworzone podczas zasilania silnika paliwem BIOXDIESEL.

Tabela 5.7. Wartości pól powierzchni (S_D – pole dodatniej części, S_U – pole ujemnej części, S_C – pole całkowite) i parametrów środka ciężkości cyklodiny podczas zasilania ON (badania własne)

Cyklodyna Numer	Pole powierzchni			Współrzędne środka ciężkości	
	S_D	S_U	S_C	n_o	M_o
1	691,9	211,1	903,0	1696,9	378,2
2	682,0	210,2	892,3	1715,7	377,15
3	669,4	209,5	878,8	1714,5	374,2
4	663,6	20,8,5	872,0	1711,7	368,5
5	680,3	209,8	890,1	1713,9	375,5
6	678,3	209,3	887,6	1710,9	377,3
7	677,4	209,4	886,8	1719,7	374,45
8	677,4	209,4	886,8	1711,5	374,6
9	670,2	209,8	879,9	1707,3	375,2
10	672,2	209,6	881,8	1710,8	374,2
11	676,6	209,1	885,8	1715,3	374,05
12	680,1	211,4	891,4	1704,9	375,4
Wartość średnia	676,6	209,8	886,4	1711,1	374,95
Odchylenie standardowe	7,2	0,8	7,8	6,8	3,7

Szczególnie interesujący jest rozkład punktów ciężkości na płaszczyźnie n , M_o .

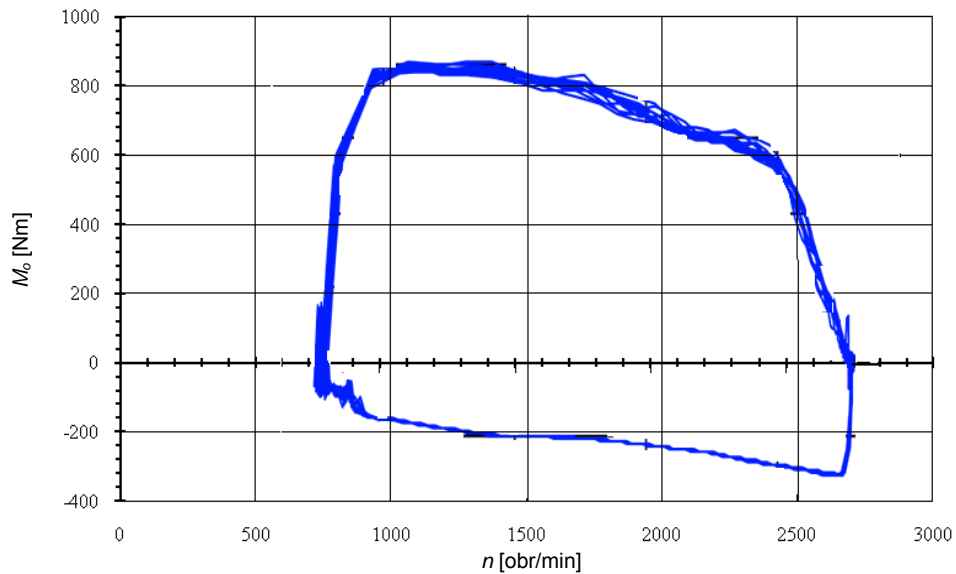
Przyjmując, że różnice mierzonych wartości współrzędnych są efektem procesów losowych oraz niepewności pomiaru, można założyć normalny rozkład dla każdej ze współrzędnych.

$$\bar{M}_o = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} M_o \quad (5.38)$$

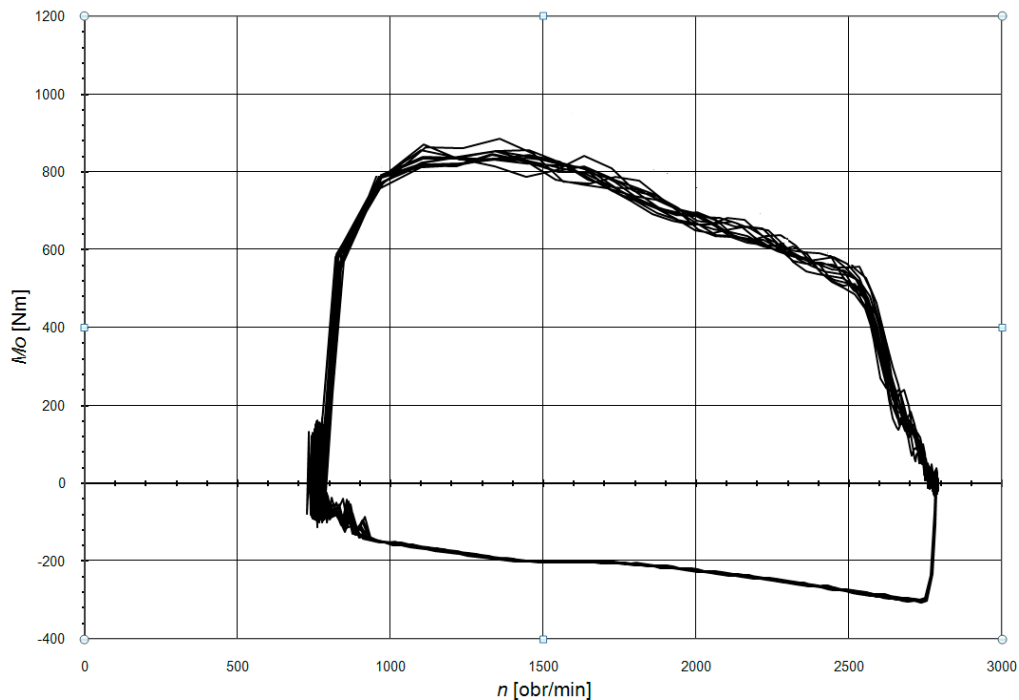
- \bar{M}_o – wartość średnia współrzędnej M_o .

$$\sigma_M = \sqrt{\frac{1}{11} \sum_{i=1}^{12} (M_o - \bar{M}_o)^2} \quad (5.39)$$

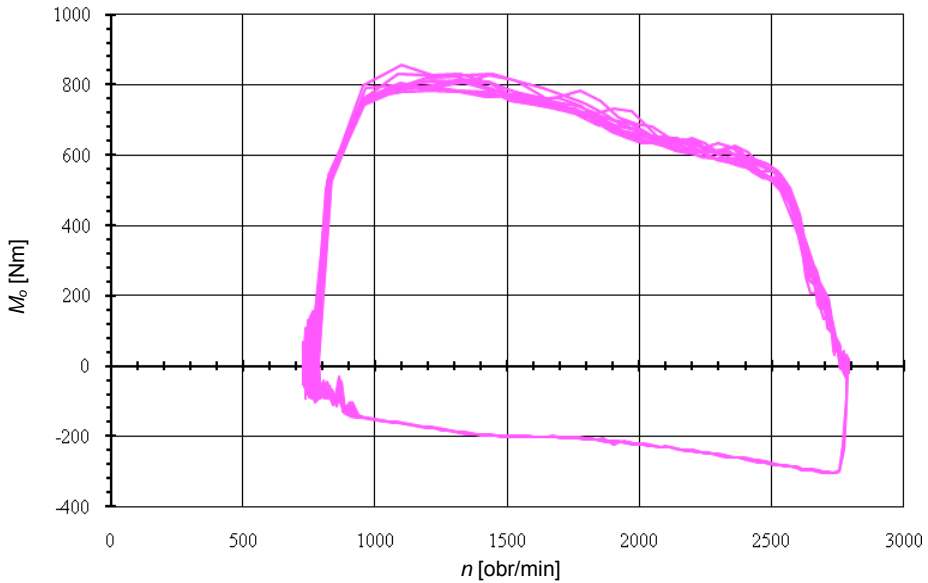
- σ_M – odchylenie standardowe współrzędnej M_o .



Rys. 5.41. Zbiór cykłodyn dla wariantu M2 paliwa BIOXDIESEL (badania własne)



Rys. 5.42. Zbiór cykłodyn dla wariantu M3 paliwa BIOXDIESEL (badania własne)



Rys. 5.43. Zbiór cyklodyn dla wariantu M4 paliwa BIOXDIESEL (badania własne)

$$\bar{n}_o = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} n_o \quad (5.40)$$

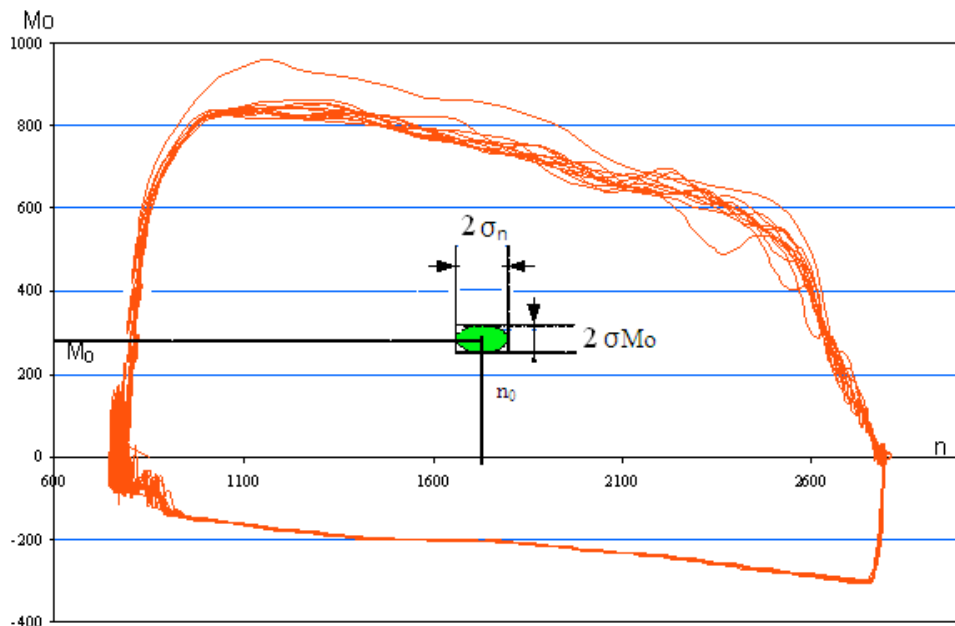
- \bar{n}_o – wartość średnia współrzędnej n_o .

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{1}{11} \sum_{i=1}^{12} (n_o - \bar{n}_o)^2} \quad (5.41)$$

- σ_n – odchylenie standardowe współrzędnej n_o .

Stosując obliczenia statystyczne, można obliczyć parametry rozkładu pomierzonych współrzędnych środka ciężkości ze wzorów (5.38–5.41), a następnie określić obszar na płaszczyźnie nM_o w postaci elipsy o środku $P(\bar{n}_o, \bar{M}_o)$ i średnicach $2\sigma_n$ i $2\sigma_M$. Obszar ten odpowiada rozkładowi punktów ciężkości dodatniej powierzchni cyklodiny. Analogicznie można obliczyć, a następnie wykreślić obszary położenia środków ciężkości dodatniego pola cyklodyn dla poszczególnych serii pomiarowych.

Brak części wspólnej wykreślonych obszarów położenia środka ciężkości umożliwia przyjęcie, że odpowiadają one różnym cechom paliwa zasilającego silnik, różnym egzemplarzom danego typu silnika lub zróżnicowanym warunkom pracy tego samego silnika, co w konkretnym przypadku pozwala na przyjęcie, że odpowiadają one różnym cechom paliwa.



Rys. 5.44. Przykładowe usytuowanie środka ciężkości dla pliku kilkunastu cyklodyn

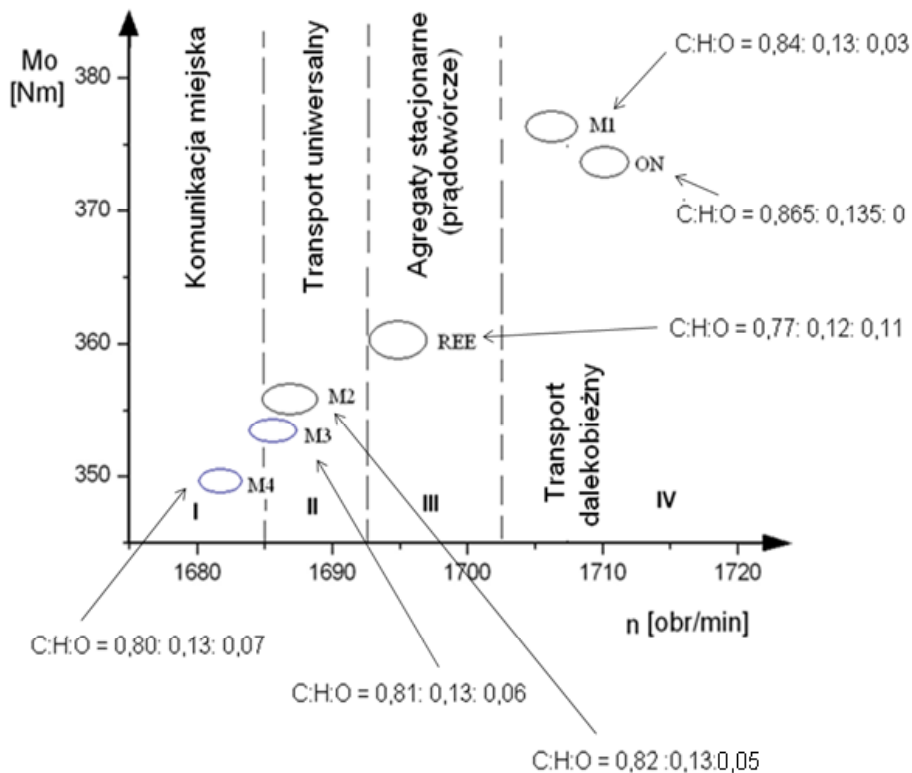
Tabela 5.8. Współrzędne środków ciężkości cyklodyn i rozkłady statystyczne (badania własne)

Lp.	Paliwo	n_o	M_o	$n_o \text{ śr}$	$M_o \text{ śr}$	δ_n	δ_m
1	Olej napędowy	1713,97	371,85	1711,10	374,95	6,8	3,7
2		1709,86	378,24			4,4	1,7
3	M4	1680,70	352,70	1682,80	349,81	7,0	3,3
4		1684,90	346,92			6,1	4,8
5	M3	1685,23	356,74	1686,12	353,92	7,1	2,7
6		1687,01	351,09			6,5	3,6
7	M2	1684,33	353,56	1687,91	356,70	6,4	3,4
8		1691,49	359,79			6,2	2,9
9	M1	1708,30	378,05	1706,50	377,10	5,8	3,4
10		1704,70	376,20			6,7	2,3
9	REE	1652,53	361,11	1694,72	360,21	8,1	5,2
10		1649,9	359,31			4,6	2,8

Parametry współrzędnych środków ciężkości i obliczone ich wartości parametrów statystycznych dla badanych paliw przedstawiono w tabeli 5.8. Graficzne zobrazowanie usytuowania środków ciężkości przedstawiono na rysunku 5.44.

Charakter eksploatacji różnych pojazdów, w których jednostkę napędową stanowił ten sam silnik może być przesłanką do rekomendacji zasilania go różnymi paliwami

umożliwiający uzyskać najlepsze usytuowanie środka ciężkości cyklodyny – rys. 5.45.



Rys. 5.45. Zbiór środków ciężkości cyklodyn dla silnika UTD-20 zasilanego różnymi paliwami (badania własne)

Ze względu na konieczność częstych zatrzymań pojazdu, ruszania z miejsca i przyspieszeń proponuje się do zasilania silnika pojazdu miejskiego zastosowanie biopaliwa o największej zawartości etanolu i estru skutkującego usytuowaniem środka ciężkości w pobliżu wartości prędkości obrotowej M_{omax} i znaczącymi efektami proekologicznymi.

Eksploatacja pojazdów transportu dalekobieżnego (międzymiastowego) cechuje duża prędkość przy stosunkowo małej liczbie przełożeń w skrzyni przekładniowej, co wskazuje na zastosowanie biopaliwa skutkującego usytuowaniem środka ciężkości cyklodyny możliwie najbliższej prędkości obrotowej odpowiadającej N_{emax} .

Eksploatacja silnika napędzającego agregat stacjonarny, np. prądotwórczy cechuje się największą koncentracją gazów spalinowych w miejscu pracy, co wymaga biopaliw o najlepszych właściwościach proekologicznych i usytuowaniem środka ciężkości możliwie blisko wartości n odpowiadającej N_{emax} .

Paliwa kształtujące usytuowanie środków ciężkości w przedziale n zawartym między $n_{M_{\text{omax}}}$ i $n_{N_{\text{emax}}}$ rekomendowane są do transportu uniwersalnego.

Omówienie wyników badań

Z analizy rysunku 5.52 wynika, że obszary środków ciężkości testowanych paliw są rozłączne, co oznacza, że parametry energetyczne tych paliw są różne.

Wnioski poznawcze:

- Usytuowanie środków ciężkości cyklodyn badanych paliw w wąskich przedziałach M_o (350–375 N·m) i n_o (1680–1710 obr/min.) świadczy o trafnym doborze jakościowym i ilościowym biokomponentów komponowanych biopaliw trójskładnikowych.

- Zróżnicowanie usytuowania środków ciężkości może pozwolić na rekomendację charakteru eksploatacji konkretnego silnika: komunikacja miejska, transport użytkowy (uniwersalny), agregaty, transport dalekobieżny.

5.3.2.2. Wskaźnik konwersji biopaliwa

W świetle uzyskanych wyników badań znajomość środków ciężkości cyklodyn może umożliwić określenie efektywności względnej konwersji energii zawartej w paliwie na energię mechaniczną generowaną przez silnik. Proponuje się ocenę jakości paliwa przez wyznaczanie stosunku wzajemnego usytuowania środka ciężkości badanego biopaliwa i ON jako paliwa wzorcowego. Efektywność względną konwersji badanego paliwa BIOXDIESEL wygodnie można określić za pomocą biopaliwowego wskaźnika efektywności konwersji, który w analizowanym przedziale (M_o, n) zdefiniowano przez autora jako:

$$BWK = \frac{M_{o(\text{BIOXD})} n_{o(\text{BIOXD})}}{M_{o(\text{ON})} n_{o(\text{ON})}} = \frac{N_{e(\text{BIOXD})}}{N_{e(\text{ON})}} \quad (5.42)$$

gdzie: BWK – biopaliwowy wskaźnik konwersji, $M_{o(\text{BIOXD})}$, $n_{o(\text{BIOXD})}$ – współrzędne środka ciężkości cyklodiny paliwa BIOXDIESEL, $M_{o(\text{ON})}$, $n_{o(\text{ON})}$ – współrzędne środka ciężkości cyklodiny ON (jako paliwa wzorcowego).

Tabela 5.9. Biopaliwowy wskaźnik konwersji biopaliw wieloskładnikowych

Rodzaj paliwa	Biopaliwowy Wskaźnik Konwersji (BWK)
M1	1,003
M2	0,938
M3	0,930
M4	0,918

Mając na względzie możliwość uniwersalnego charakteru zastosowania takiej metody do efektywności energetycznej innych paliw alternatywnych, proponuje się uogólnioną postać jako:

$$WK = \frac{M_{o(pb)} n_{o(pb)}}{M_{o(ps)} n_{o(ps)}} \quad (5.43)$$

gdzie: WK – względny wskaźnik konwersji, $M_{o(pb)}$, $n_{o(pb)}$ – współrzędne środka ciężkości cyklodiny badanego paliwa (zmiany warunków pracy konwertera energii), $M_{o(ps)}$, $n_{o(ps)}$ – współrzędne środka ciężkości cyklodiny paliwa standardowego (standardowego stanu konwertera energii).

Wnioski uylitarne

- Opisana metoda badawcza może służyć do testowania przydatności nowych typów paliw, a zwłaszcza paliw odnawialnych. Może służyć również do optymalizacji proporcji i składu komponentów paliwa zasilającego silnik. Jest to szczególnie istotne w przypadku używania tego samego silnika w szczególnych warunkach eksploatacji, np. w komunikacji miejskiej, gdzie praca silników charakteryzuje się stosunkowo częstą pracą na biegu jałowym i rozpędzeniami autobusów. Taki charakter pracy wymaga silników z charakterystykami, w których wartość maksymalna momentu obrotowego, a tym samym środek ciężkości cyklodiny, znajduje się możliwie najbliżej wartości prędkości obrotowych biegu jałowego (obszar I, rys. 5.45). Natomiast ten sam silnik użyty w transporcie międzynarodowym w pojazdach przemieszczających się w dużej części autostradami powinien cechować się lokalizacją środków powierzchni cyklodiny możliwie blisko maksymalnej prędkości obrotowej wału korbowego (obszar IV, rys. 5.45);

- Środki ciężkości usytuowane w obszarze III, rys. 5.45, wskazują na możliwości korzystnego zastosowania estrów wyższych kwasów tłuszczowych w silnikach stacyjnych, np. agregatach prądotwórczych, zwłaszcza w silnikach o znacznym przebiegu.

5.3.3. Metodyka weryfikacji stanowiskowej i eksploatacyjnej doboru komponentów biopaliwa

5.3.3.1. Moment obrotowy i moc użyteczna silników zasilanych różnymi paliwami

A. Badania w stanach nieustalonych

Przebieg momentu obrotowego, w czasie przyspieszenia i opóźnienia prędkości obrotowej silnika, określano na podstawie zadanego wymuszenia jednostkowego skoku listwy zębatej pompy wtryskowej. Nagły skok wychylenia listwy powodujący wzrost natężenia doprowadzonego paliwa skutkuje przyspieszeniem prędkości obrotowej, a zmniejszenie skoku, równoznaczne ze zmniejszeniem ilości paliwa – opóźnieniem prędkości obrotowej wału korbowego silnika.

Do określenia chwilowego momentu obrotowego M_o wykorzystano moment bezwładności mas ruchomych silnika zgodnie z zależnością (5.63).

Ten sposób wyznaczania M_o silnika pracującego w stanach nieustalonych z wykorzystaniem specjalistycznego mobilnego komputerowego zestawu diagnostycznego, zbudowanego na podstawie stanowiska badawczego (rozdz. 5.3.1) z udziałem autora, umożliwił porównanie osiągnięć silnika zasilanego różnymi rodzajami paliwa – ON i BIOXDIESEL.

Porównania efektywności silników dokonano w ramach badań eksploatacyjnych trzech pojazdów komunikacji miejskiej:

- autobusów Volvo 7000A, nr inwent. 8057 i 8059, których jednostki napędowe stanowią silniki Volvo D7C275(290),
- autobusu Jelcz 120MM, nr inwent. 9023, którego jednostką napędową jest silnik MAN D0826LUH05.

Podstawowe parametry badanych silników podano w tabeli 5.10.

Tabela 5.10. Podstawowe parametry silników autobusów poddanych badaniom eksploatacyjnym

Parametr	Silnik	
	Volvo D7C275(290)	MAN D0826LUH05
Układ i liczba cylindrów	rzędowy, stojący, 6	rzędowy, leżący, 6
Pojemność skokowa [dm ³]	7,284	6,871
Moment maksymalny [Nm]/przy prędkości [obr/min]	1200/1200	850/(1300-1500)
Moc maksymalna [kW]/przy prędkości [obr/min]	213/2200	169/2400
Rodzaj wtrysku	wtrysk bezpośredni	wtrysk bezpośredni
Rodzaj komory spalania	toroidalna w denku tłoka	toroidalna w denku tłoka
Stopień sprężania	19,5:1	17:1
Rodzaj układu chłodzenia	cieczowy, o wymuszonym obiegu	cieczowy, o wymuszonym obiegu

Pomiary wykonano oddzielnie podczas zasilania silników ON i paliwem eksperymentalnym BIOXDIESEL M3, przy quasi-stałych warunkach eksploatacyjnych. Wykonano 20 rozpędzeń każdego silnika obciążonego własnym momentem bezwładności, z których wyznaczono cyklodynę oraz uśredniony przebieg momentu efektywnego i momentu oporów własnych silnika, a także mocy efektywnej badanego silnika.

Dokładność pomiaru prędkości obrotowej i wielkości pochodnych (przyspieszenia kąowego, momentu obrotowego, mocy efektywnej) jest zależna przede wszystkim od dokładności pomiaru liczby impulsów pomiarowych L_i , a w zasadzie od dokładności wyznaczenia przedziałów czasu T_i . Dla opisanego układu pomiarowego błąd pomiaru chwilowej prędkości obrotowej jest mniejszy niż 0,05%, a przyspieszenia kąowego (momentu obrotowego silnika) wynosi ok. 2%. Wyniki pomiarów przedstawiono w rozdziale 5.3.4.1.

B. Badania w stanach ustalonych

Do celów porównawczych dokonano również stanowiskowych badań efektywności silnika zasilanego ON i RME w stanach ustalonych. Celem badań było porównanie efektywności pracy silnika o dużej mocy w zasilaniu RME i ON, co umożliwiło pewniejsze wnioskowanie o różnicy wskaźników pracy silników o ZS zasilanych paliwem bazowym i roślinnym. Silnik ten stanowi jednostkę napędową polskiego czołgu PT-91 Twardy.

Obiektem badań był doładowany mechanicznie silnik S-12U o następujących parametrach:

Układ i liczba cylindrów	V60,12
N_{emax}	625 kW przy 2000 m ⁻¹
V_{ss}	38,88 dm ³
M_{omax}	3340Nm przy 1300 m ⁻¹
Nr seryjny	12AR034U
Pompa wtryskowa	NK15M
Olej smarujący	Dragon 20W50
Wtryskiwacze	AM10
Kąt wtrysku	35°

Silnik był przygotowany do badań według WT OS-11-9PM/ZW-U. Do początku próby porównawczej silnik przepracował 60 godzin. Jako paliwo bazowe zastosowano ON typu IZ-40 o następujących właściwościach:

- gęstość właściwa w temperaturze 20 °C 0,828 g/cm³,
- lepkość kinematyczna w temperaturze 40 °C 3,3 cSt,
- temperatura zapłonu 58 °C,
- zawartość wody wartości śladowe,
- wartość opałowa ok. 43 MJ/kg.

Paliwem, które podlegało ocenie porównawczej, był RME o następujących właściwościach:

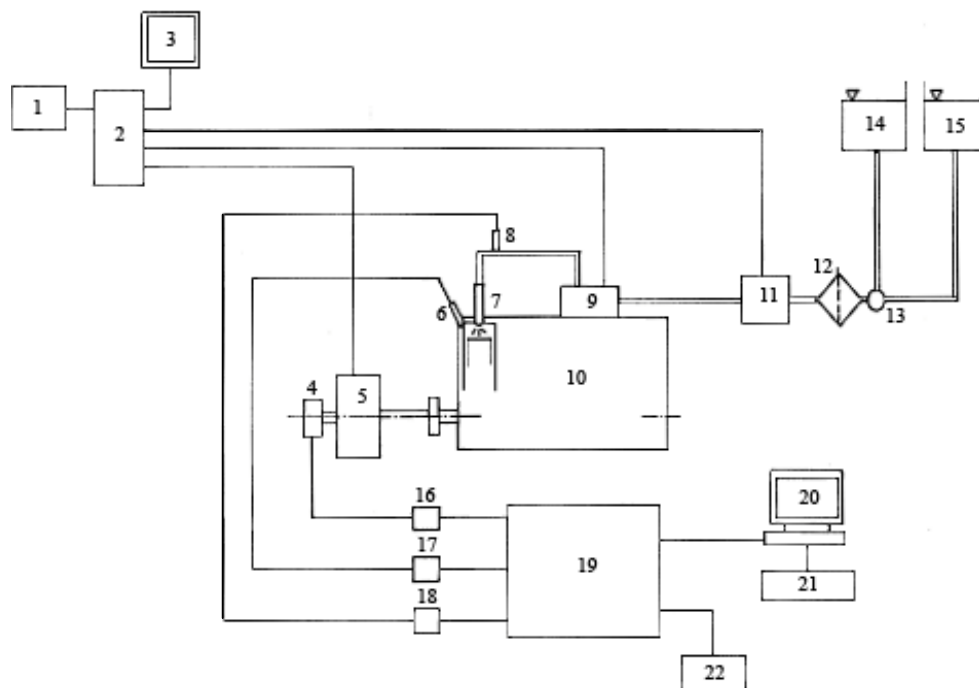
- gęstość właściwa w temperaturze 20 °C 0,864 g/cm³,
- lepkość kinematyczna w temperaturze 40 °C 4,3 cSt,
- temperatura zapłonu 180 °C,
- zawartość wody wartości śladowe,
- wartość opałowa ok. 38 MJ/kg.

Sposób realizacji pomiaru

Pomiary wykonane były przez autora w Z.M. PZL-„WOLA” S.A. Układ umożliwiający wykonanie pomiarów oparty został na standardowym wyposażeniu hamowni badawczej (rys. 5.46). W związku z koniecznością pomiaru parametrów termodynamicznych standardowe wyposażenie hamowni uzupełnione zostało o cyfrowy analizator AVL 650, który po przyłączeniu do niego odpowiednio skonfigurowanych torów pomiaru umożliwił ocenę przebiegu ciśnienia spalania, maksymalnego ciśnienia wtrysku, wzniosu iglicy, twardości pracy.

Tor pomiaru p_z – w gnieździe komory spalania zamontowano czujnik piezokwarcowy (6) dający na wyjściu sygnał ładunku elektrycznego proporcjonalny do wielkości mierzonego ciśnienia. Ładunek ten przetwarzano na sygnał napięciowy we wzmacniaczu (17) i kierowano na wyjście pomiarowe komputera AVL (19). Całość toru, przed pomiarem, cechowana była za pomocą wzorcowego manometru. Zakres pomiarowy toru 0-14 MPa.

Tor pomiaru ciśnienia p_w – podobny w strukturze jak tor pomiaru, p_z – czujnik piezokwarcowy (8) umieszczony przed wtryskiwaczem roboczym (7) i wzmacniacz ładunku (18) formujący sygnał analogowy na wejście pomiarowe komputera AVL (19). Zakres pomiarowy toru 0–60 MPa.



Rys. 5.46. Schemat blokowy stanowiska pomiarowego (badania własne): 1 – drukarka zapisów stanów ustalonych, 2 – pulpit sterowania stoiskiem firmy Schenck, 3 – monitor stoiskowy, 4 – znacznik kąta AVL, 5 – hamulec wodny, 6 – czujnik piezokwarcowy pomiaru ciśnienia w komorze spalania, 7 – wtryskiwacz, układ pomiaru i rejestracji przemieszczenia iglicy, 8 – czujnik piezokwarcowy pomiaru ciśnienia w przewodzie wtryskowym, 9 – pompa wtryskowa, 10 – silnik S-12U, 11 – waga pomiaru zużycia paliwa, 12 – zestaw filtrów stoiskowych, 13 – zawór przełączania rodzaju paliwa, 14 – zbiornik oleju napędowego, 15 – zbiornik RME, 16 – przetwornik znacznika kąta, 17 i 18 – przetwornik ładunek–napięcie, 19 – cyfrowy system pomiarowy AVL, 20 – monitor AVL, 21 – klawiatura sterowania AVL, 22 – drukarka AVL

Tor pomiaru wzniosu iglicy – element pomiarowy umieszczono w gnieździe wtryskiwacza (7). Metodą indukcyjną mierzono przemieszczenie iglicy. Po przetworzeniu analogowy sygnał napięciowy wprowadzono na wejście pomiarowe komputera AVL (19).

Tor pomiaru przemieszczenia kąтового wału silnika – realizowany był znacznikiem kąta AVL (4), którego głównym elementem jest wirująca – sprzęgnięta z wałem silnika, przezroczysta tarcza z naniesioną co $0,6^\circ$ podziałką kątową. Sygnał wyjściowy w standardzie TTL – około 60 kHz o prędkości 2000 obr/min, formowany na drodze optoelektronicznej z przetworzeniem, wprowadzony był na wejście pomiarowe komputera AVL (19). Tor ten umożliwił rejestrację kąta obrotu wału silnika jako funkcji czasu i stanowił pośrednio podstawę czasu dla wspomnianych wielkości mierzonych (p_z, p_w, h_w).

Zgodnie z dotychczasową wiedzą autora, badania silnika S12U zasilanego alternatywnym paliwem roślinnym wykonano po raz pierwszy i jak dotychczas jedyny, a wyniki przedstawiono w rozdz. 5.3.4.2.

5.3.3.2. Zadymienie spalin

Wartość zadymienia spalin silnika określano z wykorzystaniem:

- a) stacjonarnego stanowiska badawczego przedstawionego w rozdz. 5.3.1.1,
- b) stacjonarnego stanowiska specjalistycznego wyposażonego w silnik SB3.1,
- c) silników Volvo i MAN autobusów komunikacji miejskiej z użyciem mobilnego dymomierza,
- d) silnika UTD-20 zabudowanego w pojeździe z zastosowaniem specjalnie zbudowanego stanowiska przedstawionego na rysunku 5.47. i metodologii określającej wielkości zadymienia zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej [112].

Specjalnie opracowana metoda badań dotycząca silnika napędowego BWP wynika z tego, że w układzie wylotowym silnika UTD-20 spaliny usuwane są z kolektorów wylotowych do skrzyni eżeckcyjnej, w której zabudowano dosyć ciasno kilka innych elementów, co wyklucza umieszczenie sondy poboru spalin bezpośrednio w kolektorach wylotowych tego silnika. Spaliny ze skrzyni wydostają się na zewnątrz wozu poprzez kratkę (z siatką). Umieszczenie sondy poboru spalin w tym miejscu jest niemożliwe, nie tylko z ww. powodu, ale także dlatego, że niespełnione byłyby wymagania odnośnie do miejsca poboru spalin. Z uwagi na bardzo duże pole powierzchni otworu wylotowego spalin, z eżecktora niemożliwe jest spełnienie wymagania dotyczącego stosunku przekroju sondy i rury wydechowej. Konieczne jest więc zbudowanie instalacji pomiarowej o przekroju kołowym, odpowiedniej długości i mniejszym polu przekroju. W celu wyeliminowania tych problemów do kratki wylotu spalin BWP-1 zamontowano specjalnie opracowaną z udziałem autora nasadkę dwururową (rys. 5.47).



Rys. 5.47. Pomiar zadymienia spalin wozu bojowego

Metodyka pomiarów zadymienia spalin silników bojowych wozów piechoty

Badania zadymienia spalin silnika UTD-20, bojowego wozu piechoty, obejmowały trzykrotny pomiar wartości maksymalnej współczynnika pochłaniania światła dla każdego rodzaju paliwa (BIOXDIESEL i ON) w czasie 4 kolejnych przyspieszeń wału korbowego silnika. Podczas pracy silnika na biegu jałowym szybko, lecz nie gwałtownie przemieszczano pedał przyspieszenia, tak aby uzyskać pełny wydatek pompy wtryskowej. Pozycja pełnego wydatku była utrzymywana do czasu uzyskania przez silnik maksymalnej prędkości obrotowej i zadziałania regulatora. Bezpośrednio po uzyskaniu maksymalnej prędkości obrotowej WKS zwalniano pedał przyspieszenia do stanu prędkości obrotowej biegu jałowego i wskazań dymomierza odpowiadającym prędkości biegu jałowego. Wyniki badań przedstawiono w rozdz. 5.3.4.3.

5.3.3.3. Emisja toksycznych składników spalin

Emisję składników toksycznych gazów spalinowych (CO , NO_x , THC) mierzono na stanowisku hamownianym silnika badawczego SB 3.1 wyposażonego w zestaw analizatorów AVL.

Badania toksyczności i zadymienia gazów spalinowych wykonano dla charakterystyk obciążeniowych.

Do pomiaru gazowych składników spalin (CO , THC, NO_x) stosowano aparaturę pomiarową firmy AVL typu CEB II, zawierającą m.in.:

- analizator absorpcji w podczerwieni NDIR do pomiaru stężenia tlenku węgla CO ,

- analizator chemiluminescencyjny CLD z drogą grzaną do pomiaru koncentracji tlenków azotu NO_x ,
 - grzany detektor płomieniowo-jonizacyjny FID z drogą grzaną do pomiaru ilości nie spalonych węglowodorów THC,
 - analizator magnetoptyczny PMD do pomiaru stężenia tlenu O_2 ,
 - analizator absorpcji w podczerwieni NDIR do pomiaru stężenia dwutlenku węgla CO_2 ,
 - grzaną drogę próbkowania spalin z grzanym filtrem wstępnym,
 - moduł określania sprawności konwersji NO_2/NO ,
 - dzielnik stężenia gazów kalibrujących do określania funkcji linearyzującej dla stosowanych analizatorów (używano 16 gazów linearyzujących o stężeniach od 0 do stężenia maksymalnego, tj. stężenia gazu kalibrującego),
 - tester interferencji dla analizatorów CO i CO_2 .
- Wyniki pomiarów przedstawiono w rozdz. 5.3.4.4.

5.3.3.4. Zużycie energii

Zużycie paliwa przez silniki określano z wykorzystaniem stanowiska badawczego przedstawionego w rozdz. 5.3.3.1, wyniki podano na rys. 5.32–5.36; hamowni silnikowej wyposażonej w hamulec elektrowirowy SCHENCK 450, przedstawionej w rozdz. 5.3.3.7, a także w ramach nadzorowanej eksploatacji floty autobusów MPK Wrocław – rozdz. 5.3.5B.

5.3.3.5. Trwałość aparatury wtryskowej

Badania trwałości aparatury wtryskowej wykonano na specjalnie zaprojektowanym i zbudowanym pod kierunkiem autora w WSO im. T. Kościuszki stanowisku badawczym przedstawionym na rysunkach 5.46, 5.47. Badania oleju smarującego silnik zrealizowano w ramach nadzorowanej eksploatacji autobusów MPK Wrocław.

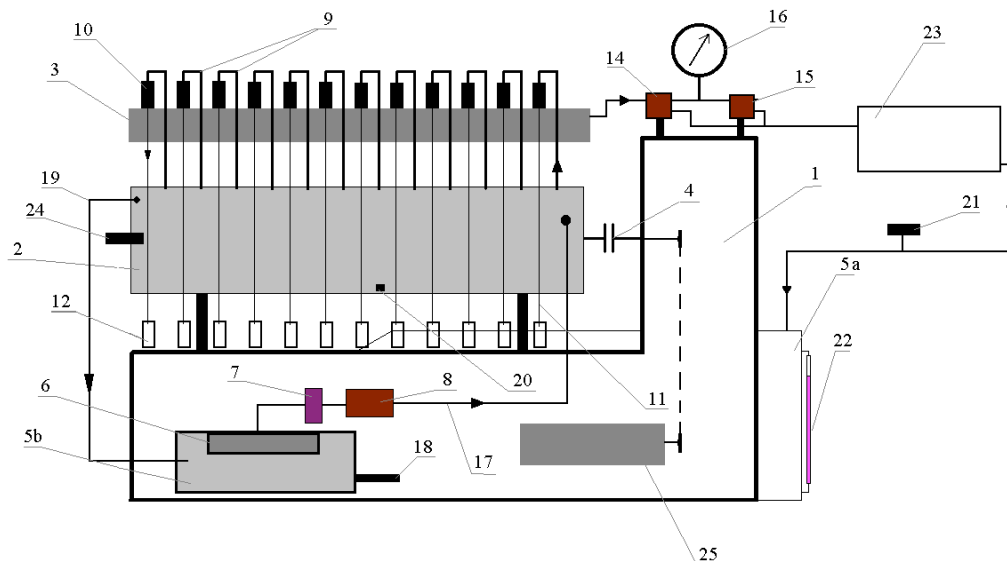
Stanowisko do badań trwałościowych aparatury paliwowej silników napędowych czołgów rodziny T

W celu uzyskania warunków pracy aparatury paliwowej zbliżonych do naturalnych, w układzie podawania paliwa do pompy wtryskowej i jego filtrowania zastosowano oryginalne elementy z układu paliwowego silnika rodziny W. Paliwo wtryskiwano do rury, gdzie ciśnienie wynosiło $p = 3 \pm 0,1$ MPa.

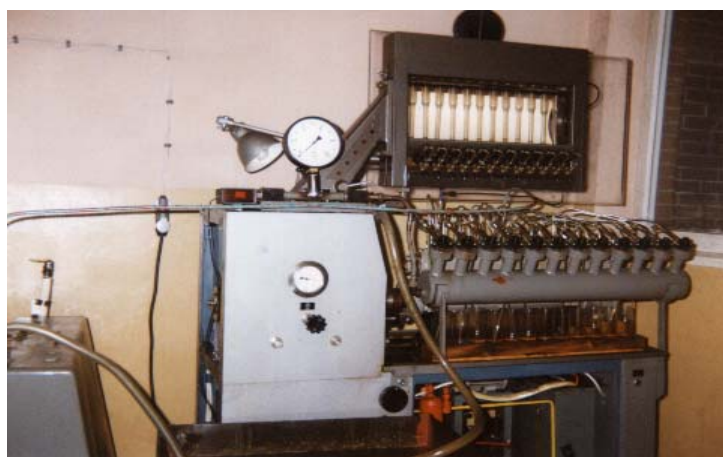
Opisane stanowisko umożliwia m.in.: prowadzenie długotrwałych badań trwałościowych oryginalnych układów wtryskowych 1–12-cylindrowych silników o ZS.

W badaniach stosowano następujące zasady:

- symulowanie rzeczywistych warunków pracy realizowano przez wtryskiwanie paliwa do rury, w której panuje ciśnienie o wartości zbliżonej do ciśnienia w końcu suwu sprężania,
- stabilizację temperatury paliwa (zarówno jego podgrzewanie, jak i chłodzenie),



Rys. 5.48. Schemat stanowiska do badań trwałościowych aparatury paliwowej (oprac. własne):
 1 – stół zbiornik paliwa, 2 – pompa wtryskowa, 3 – rura przeciwcisnieniowa, 4 – sprzęgło,
 5a – główny zbiornik paliwa, 5b – pomocniczy zbiornik paliwa, 6 – filtr wstępnego oczyszczenia paliwa,
 7 – pompa podająca, 8 – filtr dokładnego oczyszczenia paliwa, 9 – przewody wysokiego ciśnienia,
 10 – wtryskiwacze, 11 – odprowadzenie przecieków paliwa z wtryskiwaczy, 12 – zbiorniczki na paliwo
 przeciekowe z wtryskiwaczy, 13 – spływ paliwa, 14 – zawór spustowy, 15 – zawór bezpieczeństwa,
 16 – manometr, 17 – doprowadzenie paliwa do pompy wtryskowej, 18 – grzałka z termostatem,
 19 – odprowadzenie nadmiaru paliwa z pompy wtryskowej, 20 – otwór pomiarowo-kontrolny poziomu
 oleju smarującego w pompie wtryskowej, 21 – termometr, 22 – pomiar poziomu paliwa,
 23 – chłodnica, 24 – regulacja położenia listwy zębatej, 25 – silnik napędowy



Rys. 5. 49. Widok stanowiska badawczego

- pracę bezpieczną dla obsługi i otoczenia (aby rozpylane paliwo nie przedostało się do atmosfery),
- wyznaczenie parametrów użytkowych wybranych elementów układu paliwowego (np.: ciśnienie tłoczenia i ssania pompy podającej paliwo).

Cel i przedmiot badań trwałościowych

Celem badań było wyznaczenie wielkości i charakteru zmian parametrów geometrycznych i wzajemnej współpracy elementów par precyzyjnych podczas pracy aparatury paliwowej zasilanej paliwem o odmiennych parametrach fizykochemicznych od ON.

Obiekty badań

Przedmiotem badań były 12-sekcyjne rzędowe pompy wtryskowe 327-00-13BX i 327-00-45 wraz z elementami tłoczącymi i zaworami odcinającymi oraz kompletne zestawy nowych wtryskiwaczy wraz z rozpylaczami. Elementami poddanymi szczególnej analizie były pary precyzyjne pompy wtryskowej (elementy tłoczące i zawór odcinający) oraz wtryskiwacze (iglica i gniazdo rozpylacza).

Program i metodyka badań

Długotrwałą próbę funkcjonalną aparatury wtryskowej wykonano według cyklu opisanego w tabeli 5.11 – zgodnego z zaleceniami producenta badanej aparatury wtryskowej (WUZETEM Warszawa).

Tabela 5.11. Cykl badań trwałościowych aparatury wtryskowej

Prędkość obrotowa wału korbowego pompy wtryskowej	Skok roboczy listwy zębatej [mm]	Czas pracy w poszczególnych fazach [h]			
		Faza I		Faza II	
[obr/min]		Pompa			
		327-00-13Bx	327-00-45	327-00-13Bx	327-00-45
975±25	8	10	15	10	15
	10	20	30	20	30
	12	30	45	30	45
	14	115	160	115	160
	Łączny czas pracy:	175	250	175	250

Program prowadzonych badań obejmował:

I. Wykonanie pomiarów geometrycznych elementów par precyzyjnych i ich mechanizmów napędzających i sterujących, stanowiących bazę do dalszej analizy.

II. Pracę aparatury wtryskowej zasilanej estrem metylovym oleju rzepakowego w obiegu zamkniętym według założonego cyklu pracy na stanowisku badawczym z okresowym badaniem parametrów użytkowych pompy i wtryskiwaczy.

III. Określenie parametrów użytkowych oraz stopnia zużycia podstawowych elementów pomp i wtryskiwaczy po zakończeniu założonej próby trwałościowej.

W celu wyznaczenia bazowych parametrów geometryczno-funkcjonalnych wykonano:

A. Pompa wtryskowa

- badania makroskopowe krzywek wałka krzywkowego, rolek popychaczy, tłoczków i cylinderków elementów tłoczących, grzybków i gniazd zaworów tłoczących, łożysk ślizgowych wałka krzywkowego,

- pomiary geometryczne krzywek, elementów tłoczących, zaworów tłoczących, popychaczy,

- pomiary szczelności elementów tłoczących,

- pomiary szczelności zaworów tłoczących,

- pomiar skoku wstępnego,

- pomiary kątów między początkami tłoczenia poszczególnych sekcji pompy,

- charakterystykę zewnętrzną pompy,

- charakterystykę biegu jałowego.

B. Wtryskiwacze i rozpylacze:

- badania makroskopowe rozpylaczy, powierzchni filtra szczelinowego, drążka i sprężyn wtryskiwaczy,

- pomiary mikrometryczne rozpylaczy (liniowość oraz kołowość stożka w korpusie i na igle rozpylacza), drążków wtryskiwaczy i sprężyn,

- pomiary wypływu pneumatycznego przez otworki rozpylające,

- pomiary charakterystyk rozpylaczy w funkcji wzniosu iglicy rozpylacza,

- pomiary wypływu hydraulicznego rozpylaczy,

- ocenę jakości rozpylania,

- ocenę wypływu hydraulicznego kompletu wtryskiwaczy.

Podczas pracy aparatury paliwowej na stanowisku badawczym według programu (tab. 5.11) wykonywano:

- cykliczny pomiar objętości estru metylowego przeciekającego do oleju smarującego pompę wtryskową,

- cykliczne badania lepkości oleju smarującego o objętości stałej,

- wyznaczenie podstawowych parametrów fizykochemicznych estru metylowego oleju rzepakowego (co 100 h).

Przed przystąpieniem do badań trwałościowych wykonano charakterystyki bazowe przed cyklami badań trwałościowych (tab. 5.11). Charakterystyki dawkowania pompy 327-00-13Bx wykonano po przebiegu 350 h, a charakterystyki pompy 327-00-45 po przebiegu 500 h.

C. Warunki badań

Sprawdzenie parametrów funkcjonalnych i wykonanie pomiarów mikrometrycznych wybranych elementów pompy wtryskowej i wtryskiwaczy przeprowadzono w Laboratorium Aparatury Paliwowej Zakładu Rozwoju Techniki WUZETEM Warszawa.

Pompę wtryskową badano na stanowisku probierczym 12H100 firmy FuM. Elementy tłoczące sprawdzano na stanowisku PKD-284. Wtryskiwacze i rozpylacze pod względem funkcjonalnym sprawdzono na próbniku PRW-3. Pomiary wypływu przez otwórki rozpylające rozpylaczy 7×0,25 przeprowadzono na stanowisku Solex. Pomiary wypływu hydraulicznego z rozpylaczy i wtryskiwaczy przeprowadzono na stanowisku do badań jednolitości hydraulicznej 9.04.267.0051. Pomiary mikrometryczne przeprowadzono w Izbie Pomiarów WUZETEM oraz WKJ-30.

5.3.3.6. Parametry fizykochemiczne silnikowego oleju smarującego

Badania oleju w ramach stanowiskowych badań trwałościowych

Próbki oleju smarującego pompę wtryskową pobierano co 50 h pracy stanowiska. Badania lepkości kinematycznej próbek oleju silnikowego Superol CB-50 15W/20, rozcieńczonego przeciekającym paliwem rzepakowym, wykonano w Okręgowym Laboratorium Materiałów Pędnych i Smarów we Wrocławiu.

Lepkość kinematyczną określono w temperaturze 40 °C i 100 °C zgodnie z PN-81/C-04011. Również zgodnie z tą normą obliczono lepkość dynamiczną. Wskaźnik lepkości obliczono zgodnie z PN-79/C-04013.

Do przeprowadzenia badań wykorzystano następującą aparaturę badawczą:

- łąźnię termostatyczną KUTESZ TYP 655,
- uwierzytelnione termometry słupkowe zgodne z ASTM typ 120 °C i 121 °C,
- kalibrowane lepkościomierze kapilarne UBBELOHE' A o różnych stałych dostosowane do odpowiednich lepkości.

Weryfikacja parametrów eksploatacyjnych właściwości oleju w ramach badań eksploatacyjnych (w eksploatacji)

Celem badań była weryfikacja wpływu zasilania silnika o ZS paliwem BIOXDIESEL na parametry eksploatacyjne smarującego oleju silnikowego.

A. Przedmiot badań stanowił olej silnikowy wielosezonowy TITAN UNIWERSAL HD 15W-40 (tab. 5.12)

Tabela 5.12. Podstawowe cechy oleju silnikowego (wg badań laboratorium FUCHS Gliwice)

Parametry	Jednostka	Wartość	Według PN
Wskaźnik lepkości		min. 135	PN-79/C-04013
Gęstość w temperaturze 15°C	kg/dm ³	0,880–0,890	PN-EN ISO 12185
Lepkość kinematyczna w 40°C	mm ² /s	95–110	PN-EN ISO 3104
Lepkość kinematyczna w 100°C	mm ² /s	13,0–14,5	PN-EN ISO 3104
Temperatura zapłonu	°C	min 200	PN-EN ISO 2592
Temperatura utraty płynności	°C	max –33	PN-55/C-04016
Całkowita liczba zasadowa TBN	mg KOH/g	8,3–10,1	PN-C-04163

Olej miał zagwarantowane przez producenta pożądane cechy dla przebiegu 25 000 km (silniki o ZS).

B. Obiekt badań

Obiekt badań stanowiły silniki RABA MAN z bezpośrednim wtryskiem paliwa (wtryskiwacze jednootworowe) do komory spalania w denku tłoka (komora kulista–system HM) o następujących cechach:

Typ silnika	RABA-MAN D 2156 HM 6U
Pojemność skokowa	10 349 cm ³
Masa własna	865 kg
Moc maksymalna	141 kW/192 KM przy 2100 obr/min
Maksymalny moment obrotowy	697 N·m przy 1 300 obr/min
Jednostkowe zużycie paliwa	224 g/kWh przy ok. 1200 obr/min
Stopień sprężania	17:1
Prędkość obrotowa biegu jałowego	500 do 550 obr/min

C. Zakres i metodyka badań

Badania eksploatacyjne prowadzono z wykorzystaniem trzech autobusów IKARUS Miejskiego Przedsiębiorstwa Komunikacyjnego we Wrocławiu. Badane pojazdy charakteryzowały się zbliżonymi stanami technicznymi silników napędowych. Pojazdy eksploatowane były w warunkach miejskich, w okresie lato–jesień.

Wszystkie silniki przed rozpoczęciem eksploatacyjnego testu badawczego poddane zostały badaniom diagnostycznym (charakterystyka dynamiczna silnika, zadymienie spalin) podczas zasilania zarówno ON, jak i paliwem BIOXDIESEL.

W czasie badań eksploatacyjnych silniki pojazdów zasilane były paliwem typu BIOXDIESEL M3.

Próbki oleju smarującego pobierane były w czterech okresach eksploatacyjnych:
I–III. Po przebiegu kolejnych 1000 km,
IV. Po przebiegu kolejnych 5000 km.

W celach porównawczych pobrano także próbkę oleju o przebiegu 10 000 km z pojazdu, którego silnik zasilano ON. Pomiary podstawowych parametrów fizykochemicznych oleju smarującego silnik (Titan Uniwersal HD 15W-40) przeprowadzono w Wojskowym Ośrodku Badawczo-Rozwojowym Materiałów Pędnych i Smarów w Warszawie, oznaczając następujące parametry:

- lepkość kinematyczna w 100 °C,
- całkowita liczba zasadowa TBN,
- zawartość paliwa,
- zawartość pierwiastków pochodzących z dodatków,
- zawartość pierwiastków pochodzących z konstrukcji silnika.

5.3.3.7. Koksowanie wtryskiwaczy

Badania koksowania wtryskiwaczy zostały wykonane na stanowisku badawczym przedstawionym na rysunku 5.50. Badania przeprowadzono na Politechnice Warszawskiej według standardów CEC PF 023 z wykorzystaniem silnika PSA XUD9 w ramach prac prowadzonych pod kierownictwem autora.



Rys. 5.50. Hamownia silnikowa z hamulcem elektrowirowym SCHENCK 450

Badania wykonywano na podstawie testu CEC PF-023 opracowanego i wprowadzonego przez CEC (*Coordinating European Council* – Koordynacyjna Rada Europejska):

- Przed przystąpieniem do próby dokonuje się pomiaru natężenia przepływu powietrza przez dyszę każdego z czterech nowych wtryskiwaczy przy wzniosach iglicy: 0,05 mm, 0,1 mm, 0,2 mm, 0,3 mm, 0,4 mm i 0,5 mm.

- Montaż wtryskiwaczy do silnika i jego praca z obciążeniem cyklicznie zmieniającym przez okres 10 godzin na hamowni silnikowej.

- Obciążenie silnika symuluje warunki jazdy miejskiej. Parametry pracy silnika w kolejnych czterech fazach cyklu, podane w konwencji nr fazy/czas/prędkość obrotowa silnika/obciążenie moment obrotowy są następujące:

I – 30 s/1200 obr/min/1 N·m,

II – 60 s/3000 obr/min/50 N·m,

III – 60 s/1300 obr/min/35 N·m,

IV – 120 s/1850 obr/min/50 N·m.

• Po zrealizowaniu testu na hamowni silnikowej dokonuje się ponownie pomiarów natężenia przepływu powietrza każdego z czterech wtryskiwaczy przy wzniosach iglicy: 0,05 mm, 0,1 mm, 0,2 mm, 0,3 mm, 0,4 mm i 0,5 mm.

Skłonność paliwa do koksowania końcówek wtryskiwaczy wyrażona jest procentową redukcją przepływu powietrza przez dysze każdego z 4 wtryskiwaczy dla podanych wartości wzniosu iglicy.

Wynik badania stanowi średnia wartość procentowej redukcji przepływu powietrza dla wszystkich 4 rozpylaczy przy wzniosie iglicy 0,1 mm.

Tabela 5.13. Właściwości fizykochemiczne badanych paliw (badania własne)

Parametry	Jednostka	ON (Ekodiesel Ultra F)	RME	REE	BIOXDIESEL M3
Gęstość w temp. 15°C	kg/m ³	820–845	885	877	840
Gęstość w temp. 20°C	kg/m ³			874	836
Lepkość kinematyczna w temp. 40°C	mm ² /s	2–4,5	4,8	4,53	2,33
Wartość opałowa	MJ/kg	42,8	38	39	–
Temperatura zapłonu	°C	min.55	200	135	22
Liczba cetanowa	–	min 51	55	55	49
CFPP	°C	max +5	–10	–13	–33
Zawartość siarki	mg/kg	50	<10	<10	<50
Popiół	%(m/m)	0,01	–	–	–
Zawartość wody	mg/kg	max 200	max 500		103
Skład frakcyjny: – początek destylacji IBP – temperatura destylacji %(v/v), E50	°C	176 290	320 350	– –	70 –

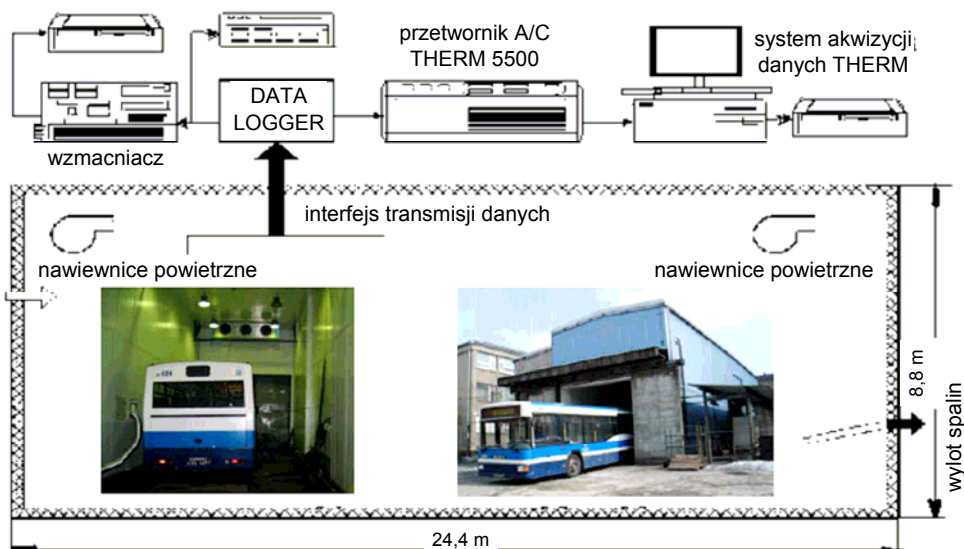
5.3.3.8. Właściwości rozruchowe silnika w niskiej temperaturze

Badania właściwości rozruchowych silnika w niskiej temperaturze otoczenia zrealizowano w wielkogabarytowej komorze termoklimatycznej, znajdującej się na terenie Politechniki Krakowskiej.

Celem badań była weryfikacja właściwości niskotemperaturowych paliwa zawartych w tab. 5.6 (rozdz. 5.2) przez określenie możliwości rozruchu silnika D08_MAN autobusu Jelcz M121M, zasilanego paliwem BIOXDIESEL M3 w warunkach obniżonej temperatury do –31 °C w komorze termoklimatycznej (rys. 5.51). Realizacja badań, w tym wykonanie niezbędnych pomiarów, prowadzona była przez zespół badawczy zgodnie z wymaganiami normy BN-74/1345-09.

Dane techniczne komory termoklimatycznej:

- zakres stabilizowanych temperatur granicznych: od $-37\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- dokładność stabilizacji temperatury na wybranym poziomie: $\pm 1\text{ deg}$,
- wymiary wnętrza: $24\text{ [m]} \times 6\text{ [m]} \times 7(9)\text{ [m]}$,
- zakres wilgotności: sterowanie półautomatyczne,
- zakres prędkości ruchu powietrza w komorze: $0\text{--}3\text{ [m/s]}$,
- zakres stabilizowanych ujemnej temperatury granicznej: do $-37\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- dokładność stabilizacji temperatury na wybranym poziomie: $\pm 1\text{ deg}$.



Rys. 5.51. Stanowisko badawcze – wielkogabarytowa komora termoklimatyczna z systemem akwizycji danych pomiarowych

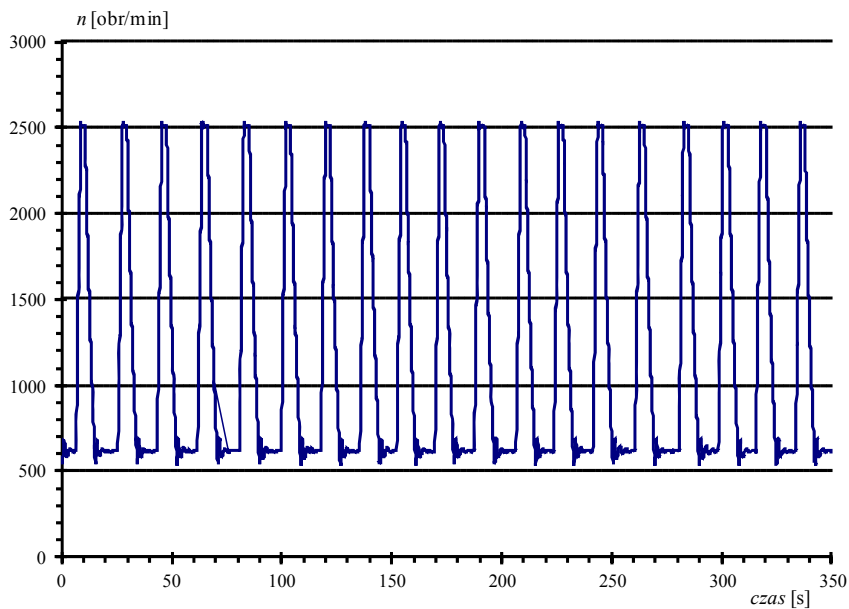
5.3.4. Wpływ udziału biokomponentów w paliwie BIOXDIESEL na efekty konwersji energii

5.3.4.1. Parametry efektywne silników eksploatacyjnych zasilanych paliwem BIOXDIESEL i ON w stanach nieustalonych

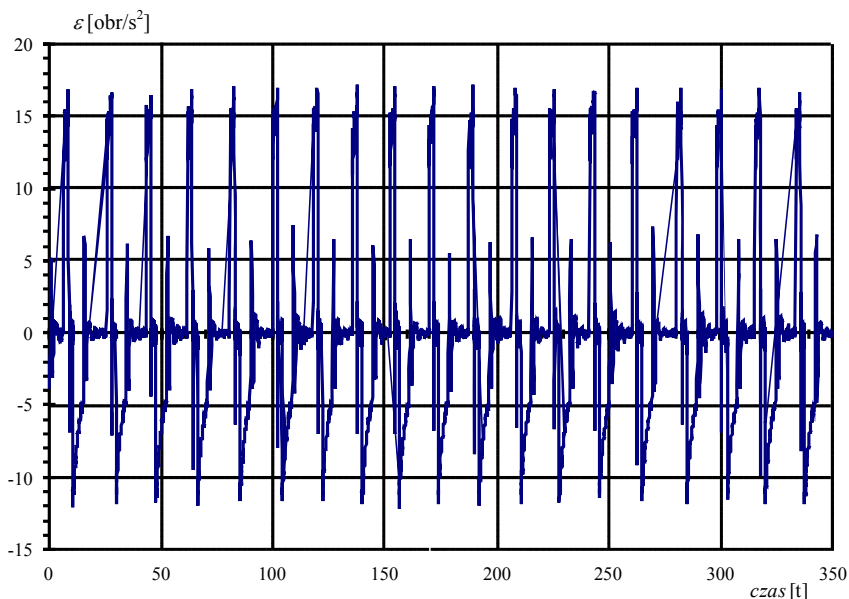
Przebiegi prędkości obrotowych i ich wielkości pochodnych: przyspieszenia kątownego oraz cyklodyny silnika zasilanego paliwem BIOXDIESEL M3 przedstawiono na rysunkach 5.52–5.54.

Porównanie przebiegu M_o i momentu oporów własnych (wartości uśrednione) oraz mocy użytecznej N_e silników zasilanych ON i paliwem BIOXDIESEL M3 przedstawiono na rysunkach 5.55 i 5.56 (silnik Volvo D7C275(290) autobusu Volvo 7000A, nr inwent. 8057), na rysunkach 5.57 i 5.58 (silnika Volvo D7C275(290) autobusu

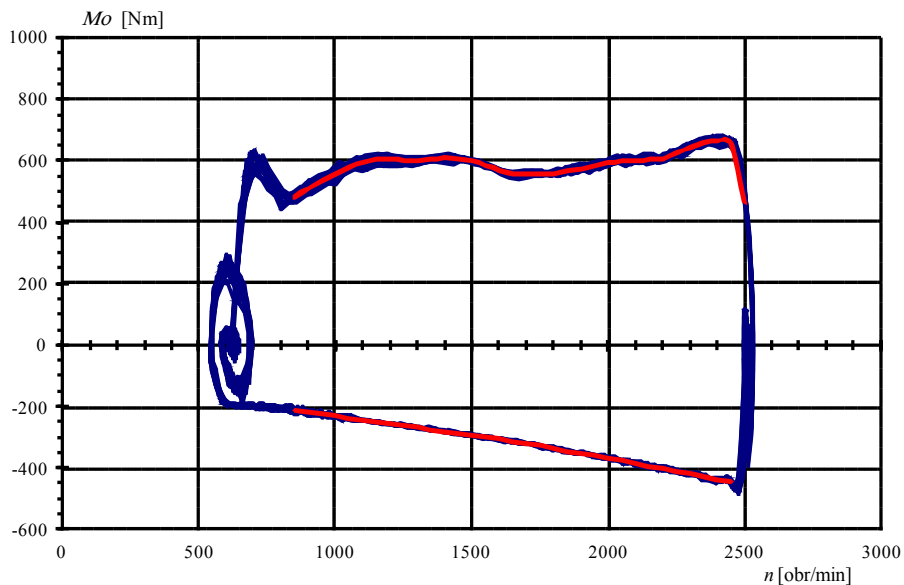
Volvo 7000A, nr inwent. 8059) i na rysunkach 5.68 i 5.69 (silnika MAN D0826LUH05 autobusu Jelcz 120MM, nr inwent. 9023).



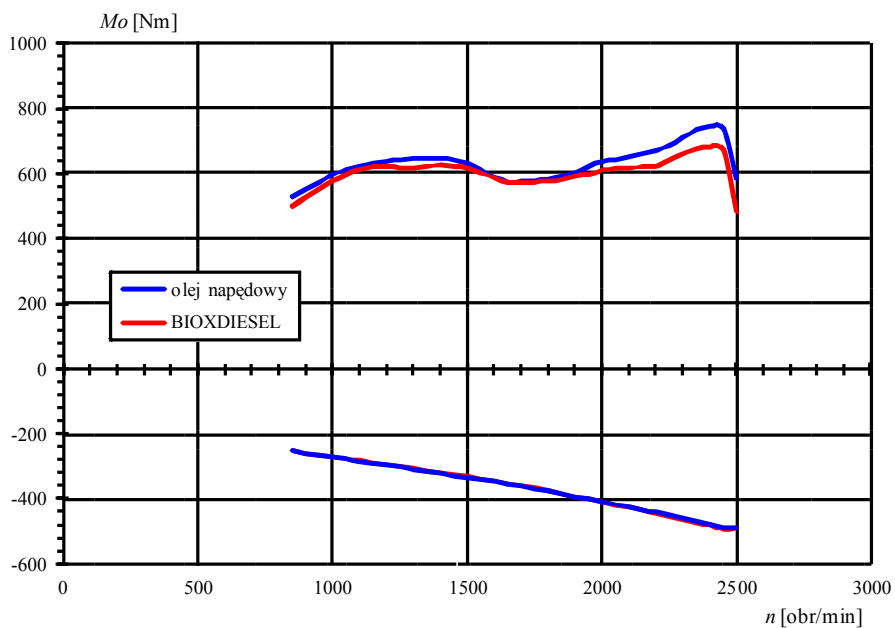
Rys. 5.52. Przebieg prędkości obrotowej WKS Volvo D7C275(290)- BIOXDIESEL M3



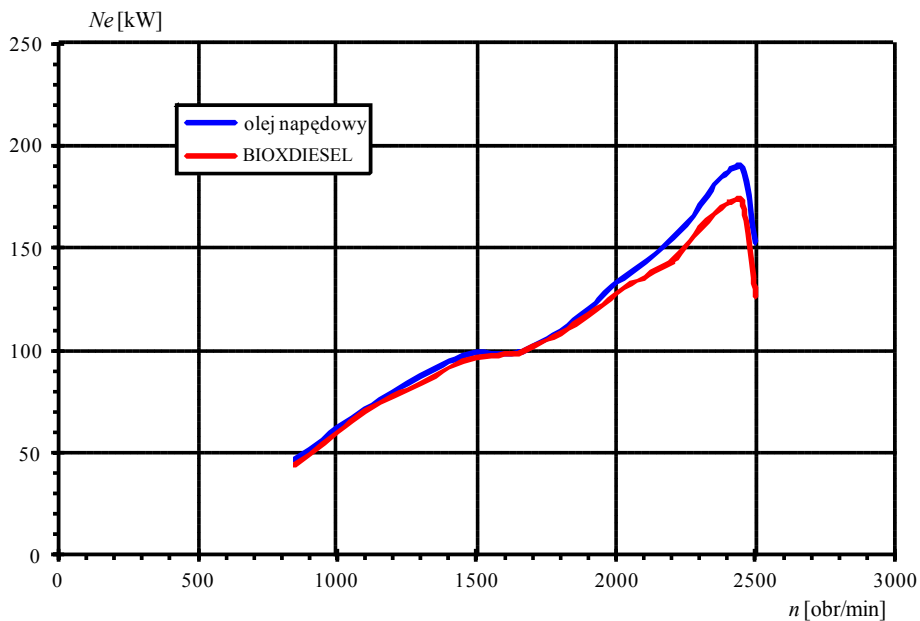
Rys. 5.53. Przebieg obliczonego numerycznie przyspieszenia kąowego WKS Volvo D7C275(290)- BIOXDIESEL M3



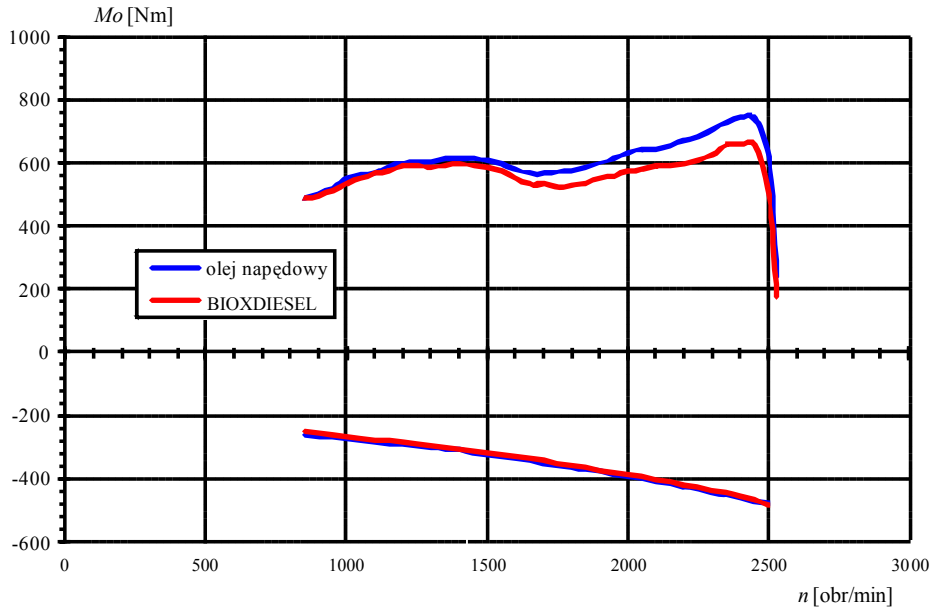
Rys. 5.54. Cyklodyna (pole podaży energii) silnika Volvo D7C275(290)-BIOXDIESEL M3, kolorem czerwonym zaznaczono uśredniony przebieg momentu efektywnego i oporów własnych (odpowiednio linia górna i dolna)



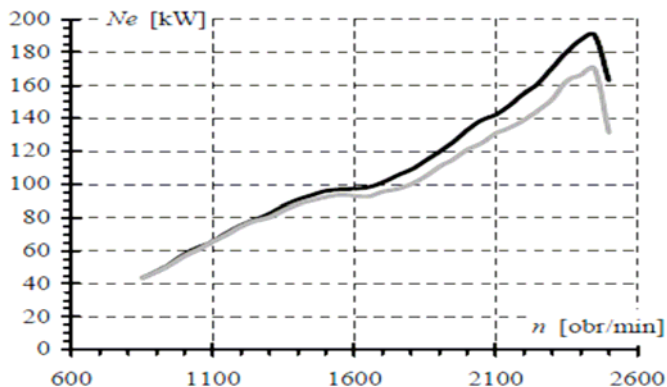
Rys. 5.55. Porównanie wartości uśrednionego momentu efektywnego i uśrednionego momentu oporów własnych silnika Volvo D7C275(290) autobusu Volvo 7000A, nr inwent. 8057



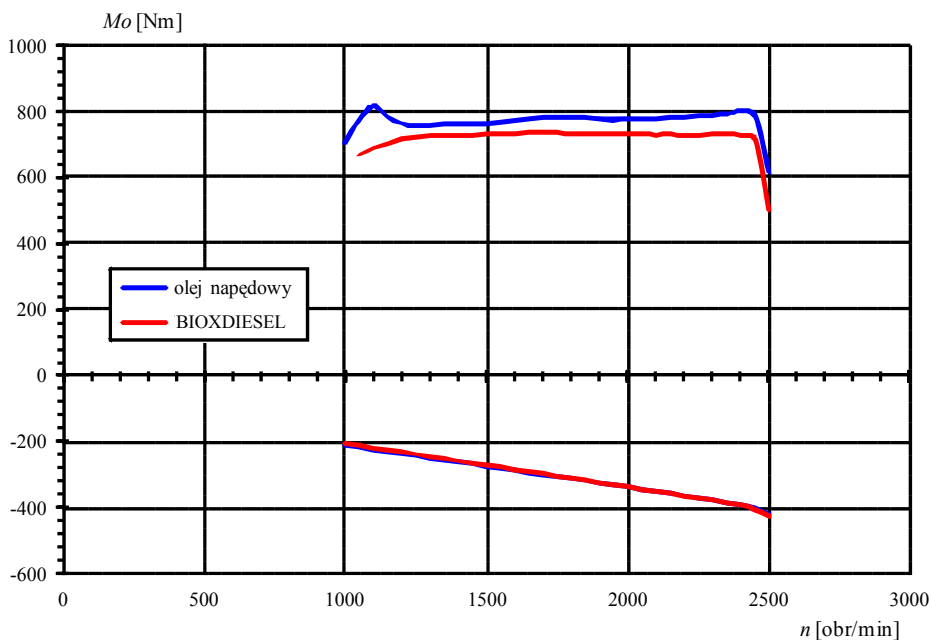
Rys. 5.56. Porównanie wartości mocy efektywnej silnika Volvo D7C275(290) autobusu Volvo 7000A, nr invent. 8057



Rys. 5.57. Porównanie wartości momentu efektywnego i momentu oporów własnych silnika Volvo D7C275(290) autobusu Volvo 7000A, nr invent. 8059



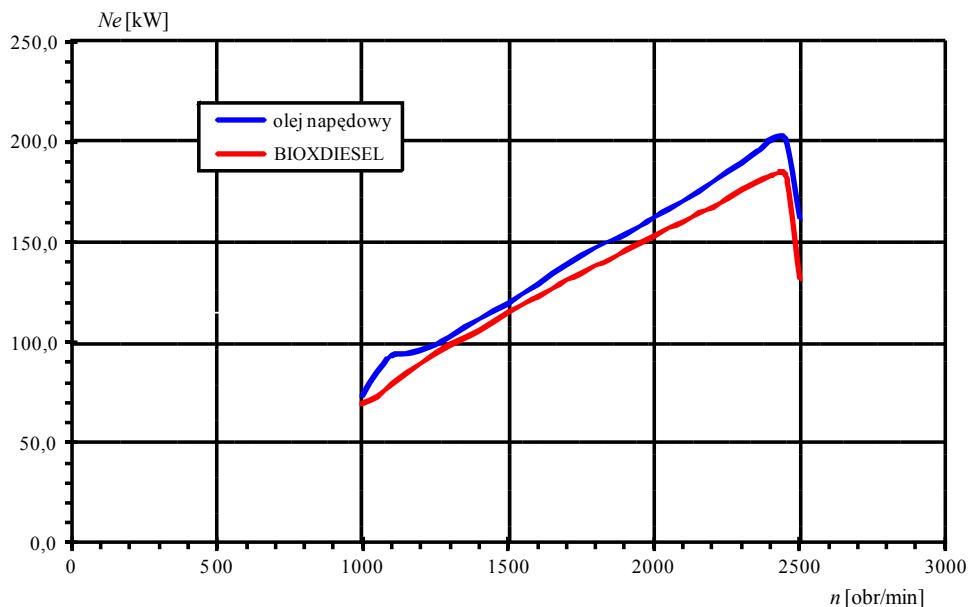
Rys. 5.58. Porównanie wartości mocy efektywnej silnika Volvo D7C275(290) autobusu Volvo 7000A, nr inwent. 8059



Rys. 5.59. Porównanie wartości momentu efektywnego i momentu oporów własnych silnika Man D0826LUH05 autobusu Jelcz 120MM, nr inwent. 9023

Analiza otrzymanych wyników wskazuje, że w chwili wykonywania pomiarów silniki były w podobnym stanie technicznym. Świadczą o tym zbliżone wartości przebiegów momentów oporów własnych podczas zasilania tego samego silnika różnymi paliwami. Dla wszystkich silników moc użyteczną i moment obrotowy silnika zasilanego ON i BIOXDIESEL M3 są porównywalne w zakresie prędkości

obrotowej silników odpowiadającej M_{omax} . Dla większych prędkości obrotowych obserwuje się niewielkie zmniejszenie parametrów efektywnych silników zasilanych paliwem BIOXDIESEL w stosunku do zasilania ON, co jest wynikiem znacznie mniejszej wartości opałowej.



Rys. 5.60. Porównanie wartości mocy efektywnej silnika Man D0826LUH05 autobusu Jelcz 120MM, nr inwent. 9023

Zmniejszenie parametrów pracy silnika (mocy i momentu obrotowego) zasilanego paliwem BIOXDIESEL M3 w porównaniu do tych samych parametrów podczas jego zasilania ON w przedziale prędkości obrotowych 1000–2450 obr/min wynosi średnio:

- 3,5% (dla silnika Volvo D7C275(290)), autobusu Volvo 7000A, nr inwent. 8057),
- 6,1% (dla silnika Volvo D7C275(290)), autobusu Volvo 7000A, nr inwent. 8059),
- 6,3% (dla silnika MAN D0826LUH05, autobusu Jelcz 120MM, nr inwent. 9023).

5.3.4.2. Parametry użyteczne silnika zasilanego ON i RME w stanach ustalonych

Opracowanie wyników badań opisanych w rozdziale 5.3.3.1B wykonano z zastosowaniem firmowego oprogramowania SAD-C/E.

Przebiegi poszczególnych wielkości w stanach ustalonych po zredukowaniu zmierzonych wartości do warunków normalnych według WT OS-11-9PM/ZM-U tj.:

- ciśnienie otoczenia – 101,32 kPa,
 - temperatura otoczenia – 288 K,
 - temperatura paliwa – 293 K, wilgotność – 70%,
- zestawiono w tab. 5.14 i tab. 5.15 i na rys. 5.61.

Należy podkreślić, że każdy z przedstawionych punktów pomiarowych wielkości p_z , p_w , h_w to wynik uśrednień 24 pojedynczych pomiarów obrobionych odpowiednim programem statystycznym AVL. Aproksymacje uzyskanych w ten sposób pomiarów wykonane zostały wielomianami drugiego rzędu podczas obróbki matematycznej (rozdz. 5.1.2).

Tabela 5.14. Zestawienie uzyskanych wyników podczas zasilania silnika S12U standardowym ON (badania własne)

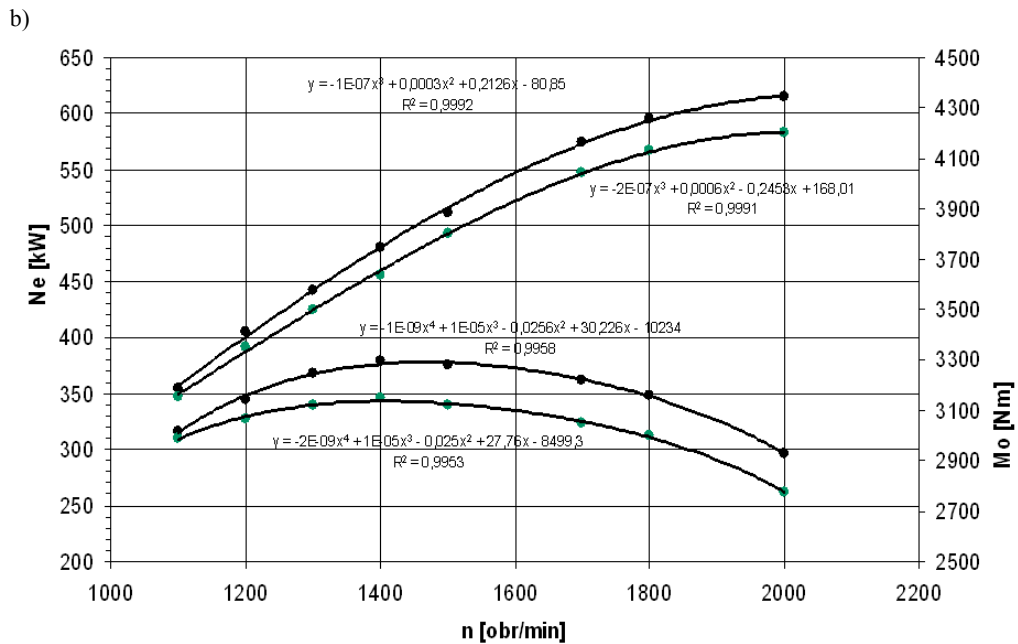
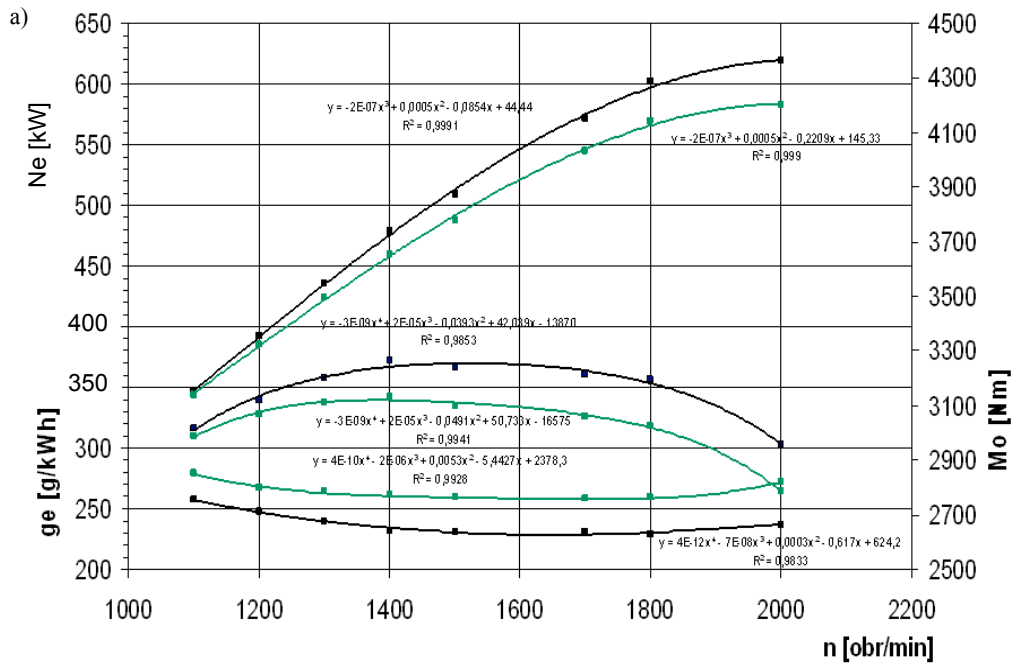
Parametr	n [obr/min]							
	1100	1200	1300	1400	1500	1700	1800	2000
M_{ONz} [Nm]	3015	3123	3202	3266	3241	3215	3194	2958
N_{eON} [kW]	347	392	436	479	509	572	602	619
G_{ON} [kg/h]	89	97	105	111	118	132	138	147
g_{eON} [g/kWh]	257	248	240	232	231	231	229	237
T_{sfrON} [$^{\circ}$ C]	546	554	555	556	556	567	559	560
p_{zON} [MPa]	12,3	12,3	12,0	12,4	12,8	12,1	12,0	12,2
d_{pON}/d [bar/st]	25,79	22,40	16,20	17,70	20,31	15,70	17,21	11,22
p_{wON} [MPa]	31,6	35,2	37,5	40,6	46,6	48,0	48,8	54,9

n – prędkość obrotowa silnika, M_{ON} – moment obrotowy silnika podczas zasilania olejem napędowym, N_{eON} – moc silnika podczas zasilania olejem napędowym, G_{ON} – godzinowe zużycie paliwa podczas zasilania olejem napędowym, g_{eON} – jednostkowe zużycie paliwa podczas zasilania olejem napędowym, T_{sfrON} – średnia temperatura spalin podczas zasilania olejem napędowym, p_{zON} – ciśnienie spalania podczas zasilania olejem napędowym, d_{pON}/d – maksymalne twardości biegu podczas zasilania olejem napędowym, p_{wON} – maksymalne ciśnienie wtrysku dla oleju napędowego

Tabela 5.15. Zestawienie danych podczas zasilania silnika paliwem rzepakowym (RME) (badania własne)

Parametr	n [obr/min]							
	1100	1200	1300	1400	1500	1700	1800	2000
M_{oRME} [Nm]	2988	3067	3111	3135	3101	3060	3026	2785
N_{eRME} [kW]	344	385	424	460	487	545	570	583
G_{RME} [kg/h]	96	103	112	120	126	141	148	159
g_{eRME} [g/kWh]	279	267	264	261	259	258	259	272
T_{sfrRME} [$^{\circ}$ C]	528	535	537	539	537	540	532	513
p_{zRME} [MPa]	11,5	12,23	12,3	12,09	12,06	11,08	11,18	11,46
d_{pRME}/d [bar/st]	15,6	18,09	17,17	16,95	15,6	9,93	8,74	8,08
p_{wRME} [MPa]	35,7	39,5	42,1	44,6	50,0	50,9	54,4	61,4

n – prędkość obrotowa silnika, M_{RME} – moment obrotowy silnika podczas zasilania RME, N_{eRME} – moc silnika podczas zasilania RME, G_{RME} – godzinowe zużycie paliwa podczas zasilania RME, g_{eRME} – jednostkowe zużycie paliwa odniesione do mocy podczas zasilania RME, T_{sfrRME} – średnia temperatura spalin podczas zasilania RME, p_{zRME} – ciśnienie spalania podczas zasilania RME, d_{pRME}/d – maksymalne twardości biegu podczas zasilania RME, p_{wRME} – maksymalne ciśnienie wtrysku dla RME



Rys. 5.61. Charakterystyka prędkościowa silnika S-12U zasilanego olejem napędowym (kolor czarny) i estrem metylowym (kolor zielony) oleju rzepakowego dla kąta wyprzedzenia wtrysku: a) 35° i b) 33°

Porównanie charakterystycznych wielkości wymiany ładunku i spalania paliwa odniesienia ON i RME dla prędkości obrotowej maksymalnego momentu obrotowego i maksymalnej mocy dla standardowej wartości kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa przedstawiono w tabeli 5.16.

Tabela 5.16. Porównanie parametrów efektywnych silnika S-12U gdy n_{Momax} i n_{Nemax}

Parametr	M_o [Nm]		N_e [kW]		G_e [kg/h]		g_e [g/kWh]		T_{sp} [°C]		P_z [MPa]		P_w [MPa]	
	przy n (min ⁻¹)		przy n (min ⁻¹)		przy n (min ⁻¹)		przy n (min ⁻¹)		przy n (min ⁻¹)		przy n (min ⁻¹)		przy n (min ⁻¹)	
	1300	2000	1300	2000	1300	2000	1300	2000	1300	2000	1300	2000	1300	2000
ON	3202	2958	436	619	105	147	240	237	555	560	12,0	12,2	37,5	54,9
RME	3111	2785	424	583	112	159	264	272	537	513	12,3	11,46	42,1	61,4
Zmiana RME/ON (%)	-2,9	-5,9	-2,8	-5,9	+6,7	+8,2	+10	+14,8	-3,3	-8,4	+2,5	-6,1	+12,3	+11,8

Analiza wartości zawartych w tabeli 5.16, a także kształtu krzywych wynikających z korekty kąta wyprzedzenia wtrysku (rys. 5.61 b) upoważnia do stwierdzenia, że istnieje możliwość alternatywnego zasilania silnika o ZS paliwem roślinnym (RME), zwłaszcza w zastosowaniach stacjonarnych. W przypadku standardowych nastaw regulacyjnych układu zasilania i silnika podczas zasilania RME występuje:

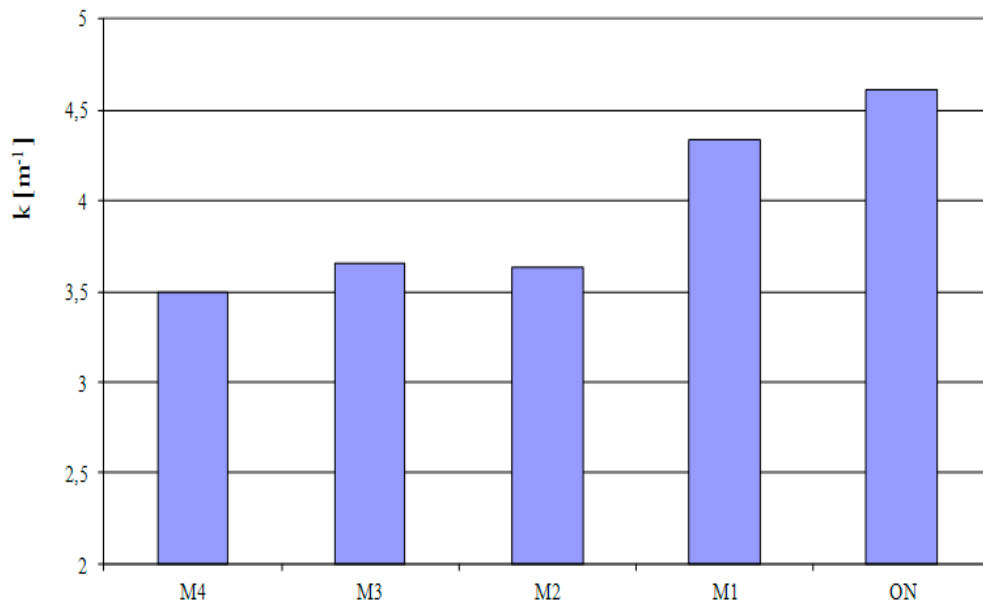
- niewielkie zmniejszenie roboczych parametrów efektywnych (o 2,8–5,9%),
- wzrost godzinowego zużycia paliwa (o 6,7–8,2%),
- znaczący wzrost jednostkowego zużycia paliwa (o 10–14,8%),
- zmniejszenie temperatury spalin (o 3,3–8,4%),
- znaczący wzrost ciśnienia wtrysku (o 11,8–12,3%) wynikający z większych wartości gęstości i lepkości RME.

5.3.4.3. Wpływ biokomponentów w paliwie BIOXDIESEL na zadymienie spalin

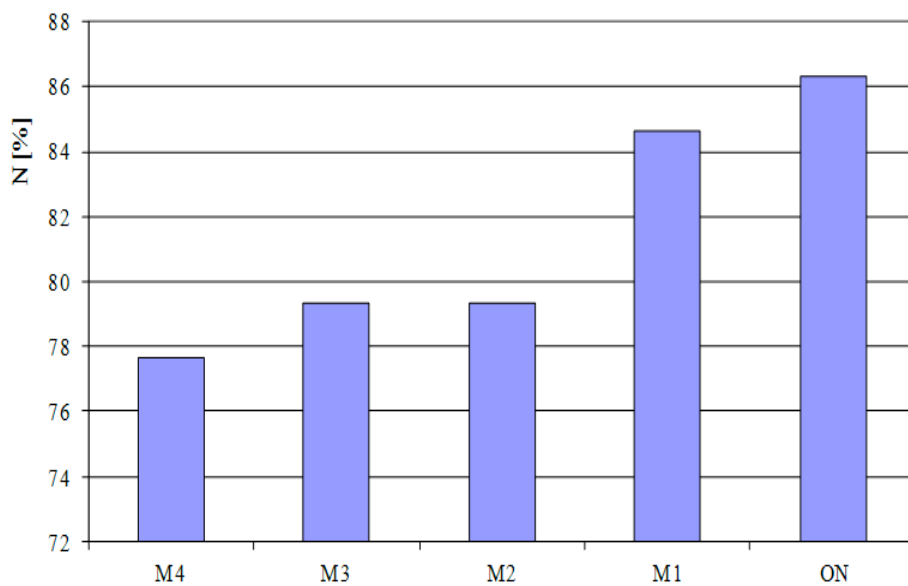
Zadymienie spalin określone dla paliw BIOXDIESEL na stanowisku badawczym (rozdz. 5.3.1.1) przedstawiono na rysunkach 5.32–5.36, natomiast w tabeli 5.17 podano uzyskane wyniki przeprowadzonych pomiarów zadymienia spalin silników wozów bojowych. W tabeli podano dodatkowo wartość średnią współczynnika pochłaniania światła – k [m⁻¹] i nieprzepuszczalności – N [%] uzyskaną z trzech kolejnych pomiarów.

Tabela 5.17. Zadymienie spalin silnika zasilanego paliwami typu BIOXDIESEL i ON

	Mieszanina M1		Mieszanina M2		Mieszanina M3		Mieszanina M4		ON	
	k [m ⁻¹]	k [m ⁻¹]	k [m ⁻¹]	N [%]	k [m ⁻¹]	N [%]	k [m ⁻¹]	N [%]	k [m ⁻¹]	N [%]
1	4,49	86	3,57	79	3,74	80	3,42	77	4,26	84
2	4,12	83	3,57	79	3,63	79	3,63	79	4,74	87
3	4,41	85	3,74	80	3,63	79	3,42	77	4,83	88
Średnia	4,34	84,66	3,63	79,33	3,66	79,33	3,49	77,66	4,61	86,33



Rys. 5.62. Zadymienie spalin silnika UTD-20 zasilanego paliwami typu BIOXDIESEL i ON wyrażone współczynnikiem pochłaniania światła



Rys. 5.63. Zadymienie spalin silnika UTD-20 zasilanego paliwami typu BIOXDIESEL i ON wyrażone współczynnikiem nieprzepuszczalności

Na rysunku 5.62 i 5.63 przedstawiono zadymienie spalin silnika UTD-20 zasilane go paliwami typu BIOXDIESEL i olejem napędowym. Wartości współczynnika pochłaniania światła k zmieniały się od $k = 4,61 \text{ m}^{-1}$ – dla czystego ON, do $k = 3,49 \text{ m}^{-1}$ – dla mieszaniny M4. Natomiast współczynnik nieprzepuszczalności N uległ zmianie w zakresie od $N = 86,33\%$, dla czystego ON, do $N = 77,66\%$ dla mieszaniny M4.

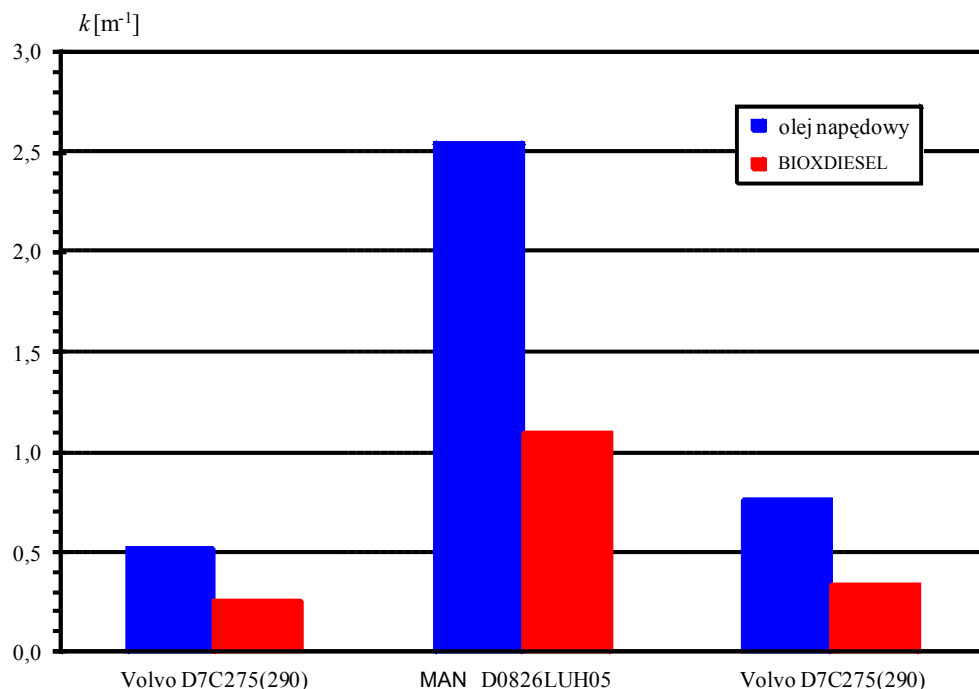
Na uwagę zasługuje duży wpływ etanolu w 30% mieszaninie M4 biokomponentów na zmniejszenie zadymienia spalin.

Porównanie zadymienia spalin silników autobusów MPK zasilanych ON i BIOXDIESEL M3

Tabela 5.18. Wyniki pomiarów zadymienia spalin silników badanych autobusów zasilanych różnymi rodzajami paliwa (metoda swobodnego rozprężania)

Rodzaj paliwa		Olej napędowy			BIOXDIESEL		
Nr inwent. autobusu		8057	9023	8059	8057	9023	8059
Silnik		Volvo D7C275(290)	MAN D0826LUH05	Volvo D7C275(290)	Volvo D7C275(290)	MAN D0826LUH05	Volvo D7C275(290)
Nr pomiaru	1	0,52	2,31	0,86	0,25	1,15	0,35
	2	0,61	2,96	0,73	0,25	1,04	0,32
	3	0,55	2,31	0,70	0,27	1,15	0,35
	4	0,55	2,96	0,73	0,27	1,11	0,38
	5	0,41	2,65	0,73	0,22	1,15	0,32
	6	0,49	2,80	0,76	0,25	1,19	0,38
	7	0,52	2,02	0,83	0,27	1,07	0,27
	8	0,52	2,13	0,76	0,27	1,00	0,32
	9	0,55	2,80	0,73	0,22	1,07	0,32
	10	0,49	2,58	0,80	0,25	1,07	0,32
Śr. $k_{\max}[\text{m}^{-1}]$		0,52	2,55	0,76	0,25	1,10	0,33

Badania potwierdziły, że rodzaj silnika i jego stan techniczny wpływają na wartość zadymienia spalin. Dla silnika MAN D0826LUH05 uzyskano średnie wartości współczynnika ekstynkcji odpowiednio $2,55 \text{ m}^{-1}$ (podczas zasilania olejem napędowym) i $1,10 \text{ m}^{-1}$ (podczas zasilania silnika paliwem badawczym). Obie wartości są mniejsze niż wartość maksymalna dopuszczalna tego współczynnika, obowiązująca podczas badań technicznych pojazdów (dla silnika turbodoładowanego 3 m^{-1}). Można przypuszczać, że na tak dużą wartość zadymienia (zwłaszcza dla oleju napędowego) wpływ miał przede wszystkim nie najlepszy stan aparatury wtryskowej tego silnika. W przypadku pozostałych dwóch badanych silników [Volvo D7275(290)] uzyskane wartości współczynnika ekstynkcji są znacznie mniejsze i nie przekraczają $0,8 \text{ m}^{-1}$.



Rys. 5.64. Wartości średnie zadymienia spalin (współczynnika ekstynkcji k) silników trzech autobusów zasilanych różnymi paliwami (metoda swobodnego rozpędzania)

Analiza wyników badań wskazuje również na dużą niepowtarzalność wyników pomiarów współczynnika k_{\max} , uzyskiwanych podczas kolejnych procesów rozpędzania, co jest charakterystyczne dla tego rodzaju badań i wynika z niepowtarzalności stosowanego wymuszenia o charakterze skoku jednostkowego, a tym samym kolejnych procesów rozpędzania. Współczynnik zmienności mieści się w przedziale od 5,4% (silnik MAN zasilany paliwem eksperymentalnym) do 13,4% (silnik MAN zasilany olejem napędowym).

Tabela 5.19. Względna zmiana zadymienia spalin podczas zasilania silnika paliwem badawczym w stosunku do zasilania olejem napędowym

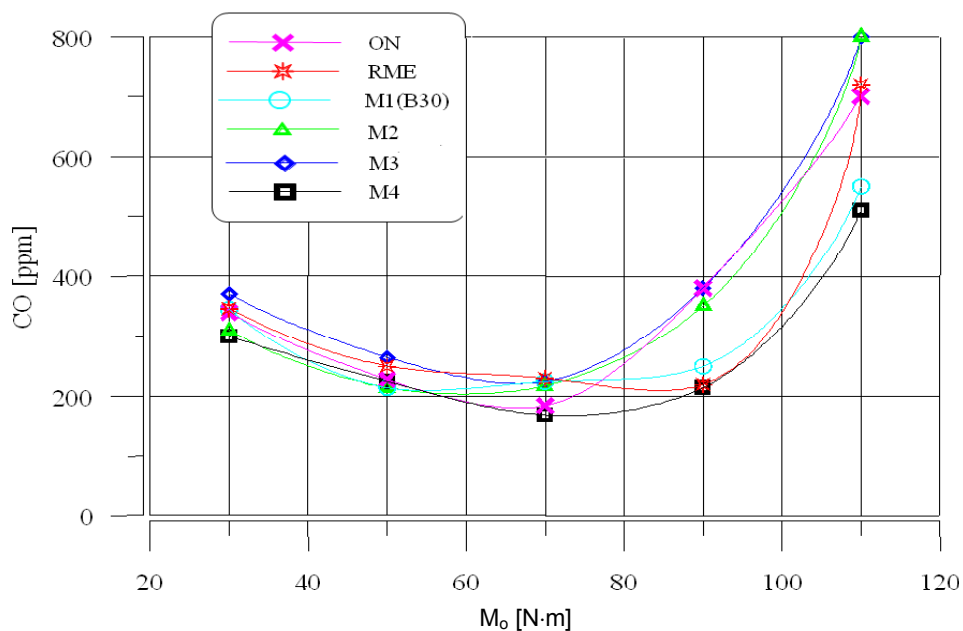
Numer inwentarzowy autobusu	8057	9023	8059
Silnik	Volvo D7C275(290)	MAN D0826LUH05	Volvo D7C275(290)
k_{bd}/k_{on} [%]	48,4	43,1	43,6

Wykonane badania wykazały, że podczas zasilania badanych silników paliwem badanym zadymienie spalin jest znacznie mniejsze niż przy zasilaniu tego samego silnika olejem napędowym. Uzyskana średnia wartość zadymienia spalin (współczynni-

ka ekstynkcji) jest dla wszystkich silników zasilanych paliwem badawczym o ponad 50% (tab. 5.19) mniejsza niż wartość średnia zadymienia spalin (współczynnika ekstynkcji) uzyskana dla oleju napędowego.

5.3.4.4. Wpływ udziału biokomponentów w paliwie BIOXDIESEL na emisję składników toksycznych gazów spalinowych

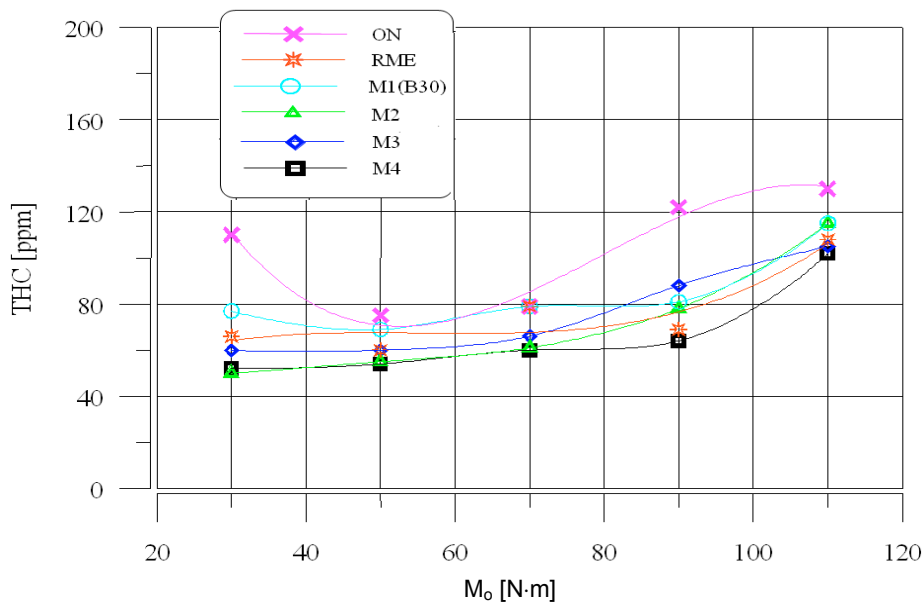
Na rysunkach 5.65–5.68 przedstawiono wybrane wyniki badań emisji składników gazów spalinowych silnika badawczego.



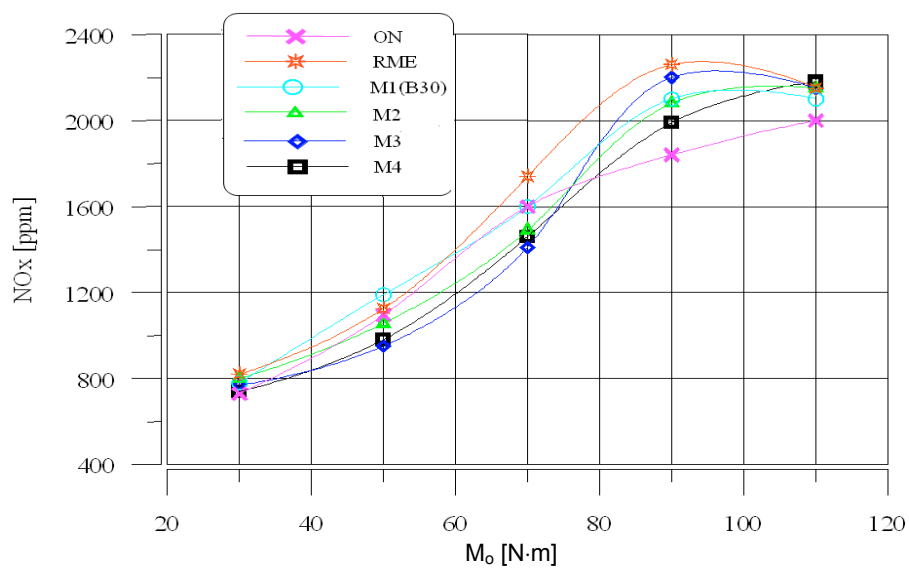
Rys. 5.65. Stężenie tlenku węgla CO w spalinach w funkcji obciążenia silnika SB 3.1 ($n = 1600$ obr/min)

Z przeprowadzonych badań można wyciągnąć następujące wnioski:

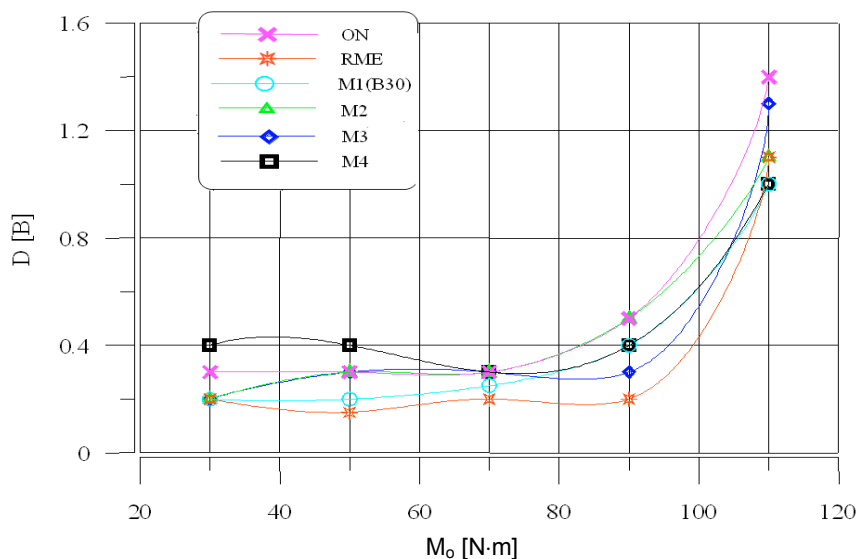
- stężenie O_2 i CO_2 w spalinach badanych paliw (ON, RME i BIOXDIESEL) jest niemal identyczne,
- najmniejsze wartości zadymienia zaobserwowano w spalinach paliwa rzepakowego RME, natomiast największe oleju napędowego; na uwagę zasługuje znaczący wpływ etanolu na zmniejszenie zadymienia w zakresie większych obciążeń,
- najmniejsze stężenie CO, THC i NO_x w funkcji obciążenia stwierdzono w spalinach paliwa typu BIOXDIESEL.



Rys. 5.66. Stężenie niespalonych węglowodorów THC w spalinach w funkcji obciążenia silnika ($n = 1600$ obr/min)



Rys. 5.67. Stężenie tlenków azotu NO_x w spalinach w funkcji obciążenia silnika ($n = 1600$ obr/min)



Rys. 5.68. Zadymienie spalin w funkcji obciążenia silnika ($n = 1600$ obr/min)

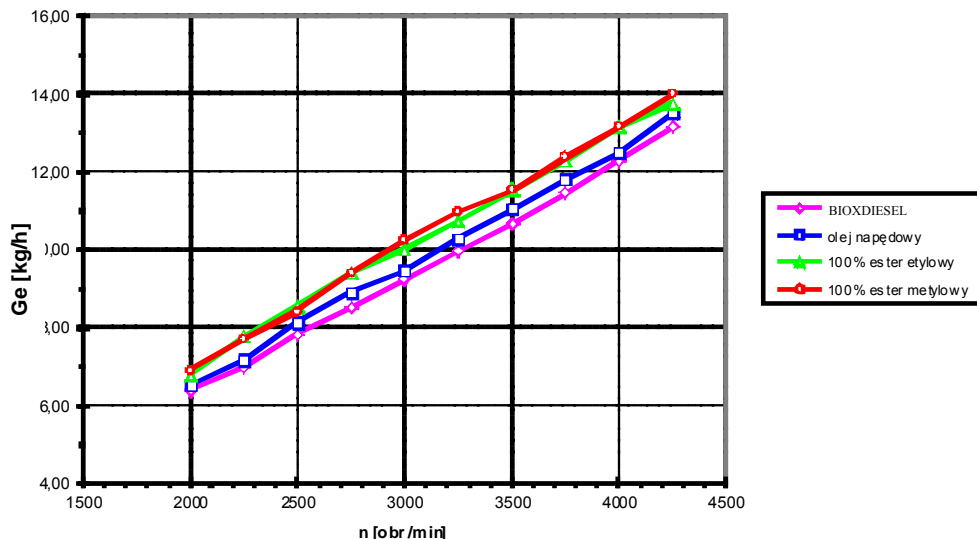
5.3.5. Porównanie zużycia paliwa

A. Stanowiskowe badania – hamowniane

Pomiary zużycia paliwa ON, RME, REE i BIOXDIESEL M3 przez silnik PSA XUD9 (Peugeot, Citroen) o pojemności skokowej $1,9 \text{ dm}^3$ zrealizowano na hamowni silnikowej wyposażonej w hamulec elektrowirowy Schenck 450 obciążony momentem zewnętrznym.

Z analizy usytuowania charakterystyk wynika, że:

- wartości zużycia RME i REE w przedziale prędkości obrotowych $2000 \leq n \leq 4300$ są podobne, przy czym zużycie RME jest większe o ok. 2% w przedziale $n = 2750\text{--}3500$ obr/min i o ok. 1,5% dla 4300 obr/min – co wynika z mniejszej wartości opałowej RME w stosunku do REE,
- zużycie REE i RME w stosunku do ON jest większe o ok. 5% dla $n = 2000$ obr/min, o ok. 8,5% dla $n = 3000$ obr/min i ok. 4% dla $n = 4300$ obr/min – co wynikać może z mniejszej wartości opałowej estrów w stosunku do W_p ON,
- zużycie BIOXDIESEL w stosunku do ON jest mniejsze w całym zakresie prędkości obrotowej wału korbowego dla $n = 2000$ obr/min jest niższe o ok. 1,5%, dla 3000 obr/min o ok. 1% i dla 4300 obr/min o ok. 1,5%, co może być wynikiem doskonałego procesu spalania BIOXDIESEL.



Rys. 5.69. Charakterystyki zużycia paliwa silnika PSA XUD9 zasilanego różnymi paliwami

B. Weryfikacja eksploatacyjna zużycia paliwa

Eksploatacyjne zużycie paliwa M3 w stosunku do normy fabrycznej określonej dla ON jest nieco korzystniejsze, ponieważ normatywne zużycie ON dla autobusu Volvo, nr ewidencyjny 8057, przewiduje zużycie w ruchu miejskim do $59,0 \text{ dm}^3/100 \text{ km}$. W okresie badań autobus ten, zasilany paliwem M3, zużył $53,62\text{--}53,94 \text{ dm}^3/100 \text{ km}$. Natomiast autobus Jelcz nr ewid. 9023, którego norma przewiduje zużycie w ruchu miejskim do $36,0 \text{ dm}^3/100 \text{ km}$, w okresie badań wykazał zużycie paliwa M3 w przedziale $33,67\text{--}52,66 \text{ dm}^3/100 \text{ km}$. Jednak z porównań dokumentacji eksploatacyjnej i wyników badań obydwu autobusów, zużycie paliwa BIOXDIESEL było o $\sim 6,3\text{--}8,7\%$ mniejsze niż zużycie ON.

Analiza dokumentacji zużycia paliwa silnika autobusu Volvo (nr ewid. 8059) wykazała bardzo duże zróżnicowanie, sięgające ponad 30% w analogicznych okresach i przebiegach eksploatacyjnych. Świadczyć to może o nieuprawnionej ingerencji kierowców w system badawczy uniemożliwiającej dokonanie analizy porównawczej w stosunku do zasilania ON.

W czasie użytkowania i obsługiowania nie stwierdzono istotnych usterek w pracy silnika, wynikających lub przypisywanych układowi zasilania paliwem.

5.3.6. Wpływ biokomponentów paliwa BIOXDIESEL na koksowanie wtryskiwaczy

Określenie wpływu użytego paliwa na tworzenie osadów oceniano na podstawie testów CEC PF-023 (opisanych w rozdz. 5.3.3.7) z wykorzystaniem kompletów nowych rozpylaczy dla każdego badanego paliwa.

5.3.6.1. Wyniki badań koksowania paliwa ON, RME, REE

Wyniki badań rozpylaczy silnika XUD9 w zakresie tworzenia osadu z przepływającego oleju napędowego oraz estrów metyloowych i etyloowych przedstawiono w formie tabelarycznej i graficznej.

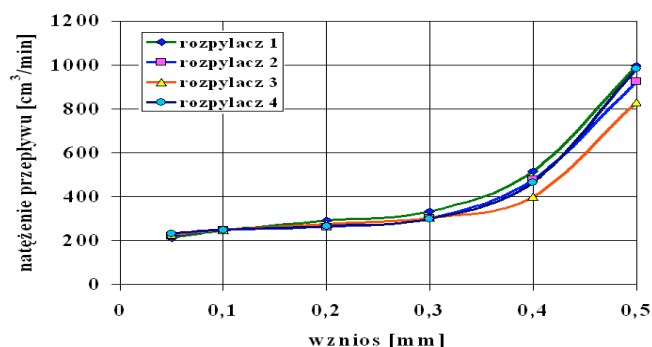
Wyniki badań koksowania ON

Tabela 5.20. Wyniki pomiaru natężenia przepływu powietrza przez nowe rozpylacze

Wznios iglicy [mm]	Rozpylacz 1 [cm ³ /min]	Rozpylacz 2 [cm ³ /min]	Rozpylacz 3 [cm ³ /min]	Rozpylacz 4 [cm ³ /min]
0,05	213,3	220,8	228,3	233,3
0,1	246,7	248,3	250,0	250,0
0,2	291,7	263,3	276,7	266,7
0,3	333,3	301,7	305,0	300,0
0,4	516,7	478,3	400,0	466,7
0,5	996,7	925,0	833,3	983,3

Tabela 5.21. Wyniki obliczeń procentowej redukcji przepływu powietrza przez rozpylacze po badaniu paliwa ON

Wznios iglicy [mm]	Rozpylacz 1 [%]	Rozpylacz 2 [%]	Rozpylacz 3 [%]	Rozpylacz 4 [%]	Wartość średnia [%]
0,05	62,5	41,9	61,3	63,6	57,3
0,1	64,2	41,6	54,7	60,7	55,3
0,2	63,4	41,1	56,6	59,4	55,1
0,3	60,0	33,7	53,6	55,6	50,7
0,4	48,1	36,9	42,1	53,6	45,2
0,5	33,1	24,3	32,0	37,3	31,7



Rys. 5.70. Natężenie przepływu powietrza w funkcji wzniosu iglicy rozpylacza przed testem CEC PF-023 – paliwo ON

Wyniki badań koksowania paliwa RME

Tabela 5.22. Wyniki pomiaru natężenia przepływu powietrza przez nowe rozpylacze

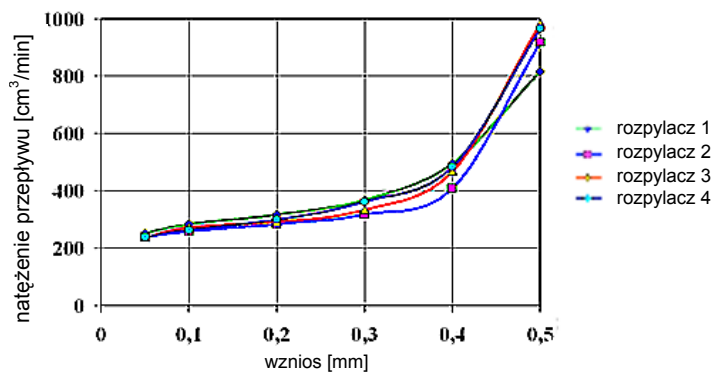
Wznios iglicy [mm]	Rozpylacz 1 [cm ³ /min]	Rozpylacz 2 [cm ³ /min]	Rozpylacz 3 [cm ³ /min]	Rozpylacz 4 [cm ³ /min]
0,05	251,7	238,3	238,3	240,0
0,1	283,3	258,3	273,3	263,3
0,2	316,7	283,3	291,7	300,0
0,3	368,3	316,7	333,3	361,7
0,4	495,0	408,3	468,3	483,3
0,5	816,7	916,7	983,3	966,7

Tabela 5.23. Wyniki pomiaru natężenia przepływu powietrza przez rozpylacze po teście CEC PF-23 – RME

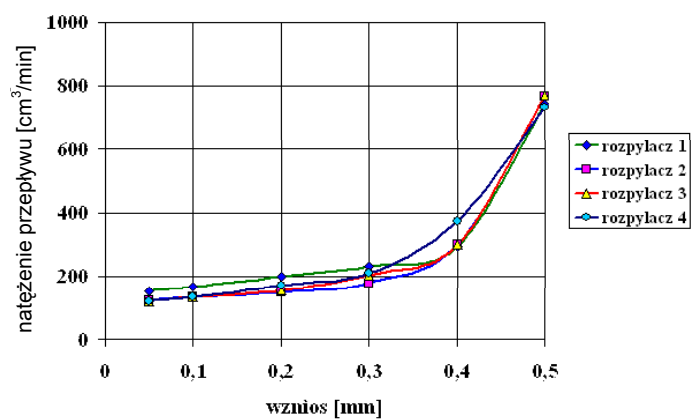
Wznios iglicy [mm]	Rozpylacz 1 [cm ³ /min]	Rozpylacz 2 [cm ³ /min]	Rozpylacz 3 [cm ³ /min]	Rozpylacz 4 [cm ³ /min]
0,05	153,3	125,0	121,7	121,7
0,1	166,7	133,3	133,3	133,3
0,2	200,0	150,0	155,0	171,7
0,3	231,7	180,0	205,0	210,0
0,4	295,0	300,0	300,0	375,0
0,5	741,7	766,7	770,0	733,3

Tabela 5.24. Wyniki obliczeń procentowej redukcji przepływu powietrza przez rozpylacze po badaniu paliwa RME

Wznios iglicy [mm]	Rozpylacz 1 [%]	Rozpylacz 2 [%]	Rozpylacz 3 [%]	Rozpylacz 4 [%]	Wartość średnia [%]
0,05	39,1	47,6	49,0	49,3	46,2
0,1	41,2	48,4	51,2	49,4	47,5
0,2	36,8	47,1	46,9	42,8	43,4
0,3	37,1	43,2	38,5	41,9	40,2
0,4	40,4	26,5	35,9	22,4	31,3
0,5	9,2	16,4	21,7	24,1	17,8



Rys. 5.71. Natężenie przepływu powietrza w funkcji wzniosu iglicy rozpylacza przed testem CEC PF-023 – paliwo RME



Rys. 5.72. Natężenie przepływu powietrza w funkcji wzniosu iglicy rozpylacza po teście CEC PF-023 – paliwo RME

Wyniki badania koksowania REE

Tabela 5.25. Wyniki pomiaru natężenia przepływu powietrza przez nowe rozpylacze

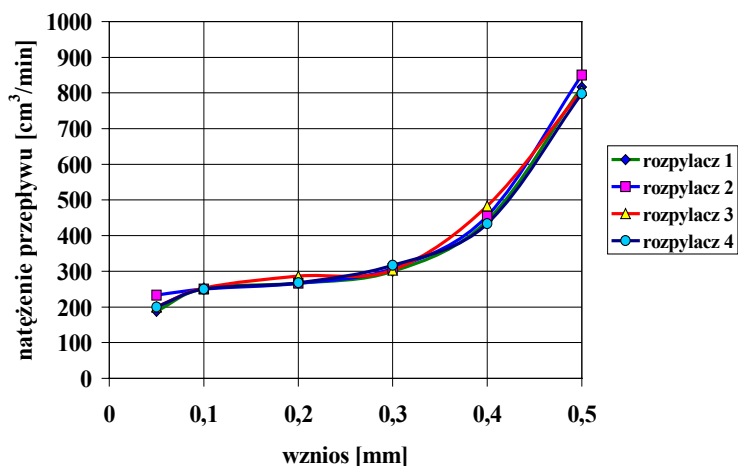
Wznios iglicy [mm]	Rozpylacz 1 [cm ³ /min]	Rozpylacz 2 [cm ³ /min]	Rozpylacz 3 [cm ³ /min]	Rozpylacz 4 [cm ³ /min]
0,05	187,5	233,3	200,0	200,0
0,1	251,7	250,0	253,3	250,0
0,2	266,7	266,7	286,7	268,3
0,3	300,0	308,3	303,3	316,7
0,4	441,7	455,0	483,3	433,3
0,5	816,7	850,0	806,7	798,3

Tabela 5.26. Wyniki pomiaru natężenia przepływu powietrza przez rozpylacze po teście CEC PF-023

Wznios iglicy [mm]	Rozpylacz 1 [cm ³ /min]	Rozpylacz 2 [cm ³ /min]	Rozpylacz 3 [cm ³ /min]	Rozpylacz 4 [cm ³ /min]
0,05	91,7	122,5	138,3	133,3
0,1	101,7	130,8	146,7	145,0
0,2	108,3	143,3	155,0	175,0
0,3	166,7	183,3	221,7	233,3
0,4	233,3	325,0	300,0	283,3
0,5	625,0	650,0	666,7	630,0

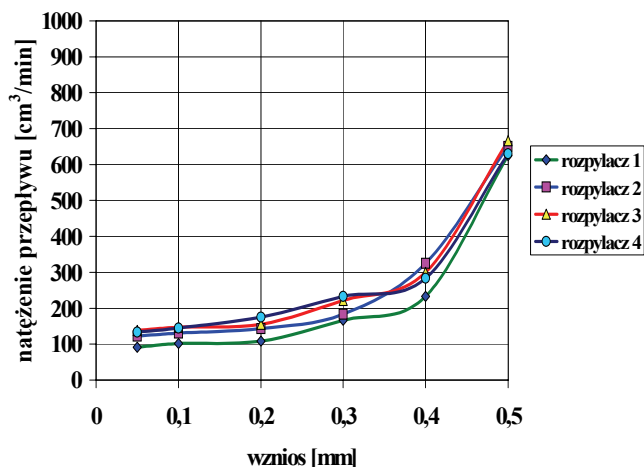
Tabela 5.27. Wyniki obliczeń procentowej redukcji przepływu powietrza po teście CEC PF-023

Wznios iglicy [mm]	Rozpylacz 1 [%]	Rozpylacz 2 [%]	Rozpylacz 3 [%]	Rozpylacz 4 [%]	Wartość średnia [%]
0,05	51,1	47,5	30,8	33,3	40,7
0,1	59,6	47,7	42,1	42,0	47,8
0,2	59,4	46,3	45,9	34,8	46,6
0,3	44,4	40,5	26,9	26,3	34,6
0,4	47,2	28,6	37,9	34,6	37,1
0,5	23,5	23,5	17,4	21,1	21,4



Rys. 5.73. Natężenie przepływu powietrza w funkcji wzniosu iglicy rozpylacza przed testem CEC PF-023 – paliwo REE

Wyniki porównawcze badań koksowania poszczególnych paliw przedstawiono na rysunku 5.76. Średnia wartość procentowej redukcji natężenia przepływu powietrza przez rozpylacze przed badaniem danego paliwa i po badaniu dla wzniosu iglicy 0,1 mm



Rys. 5.74. Natężenie przepływu powietrza w funkcji wzniosu iglicy rozpylacza po teście CEC PF-023 – paliwo REE

5.3.6.2. Wyniki badania koksowania paliwa BIOXDIESEL

Tabela 5.28. Wyniki pomiaru natężenia przepływu powietrza przez nowe rozpylacze

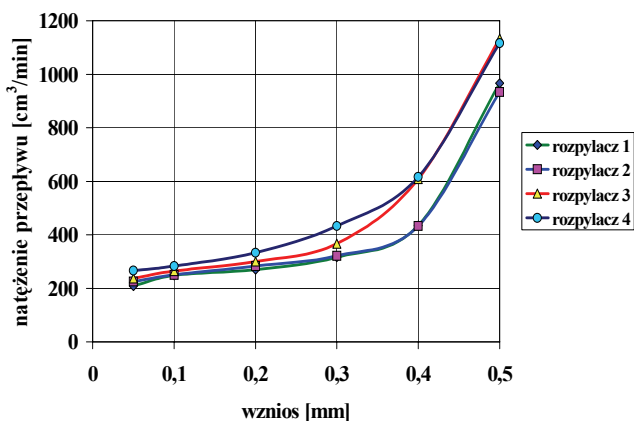
Wznios iglicy [mm]	Rozpylacz 1 [cm³/min]	Rozpylacz 2 [cm³/min]	Rozpylacz 3 [cm³/min]	Rozpylacz 4 [cm³/min]
0,05	208,3	225,0	236,7	266,7
0,1	248,3	250,0	265,0	283,3
0,2	270,0	283,3	300,0	333,3
0,3	316,7	321,7	366,7	433,3
0,4	435,0	433,3	608,3	616,7
0,5	966,7	933,3	1133,3	1116,7

Tabela 5.29. Wyniki pomiaru natężenia przepływu powietrza przez rozpylacze po teście CEC PF-023 – paliwo BIOXDIESEL M3

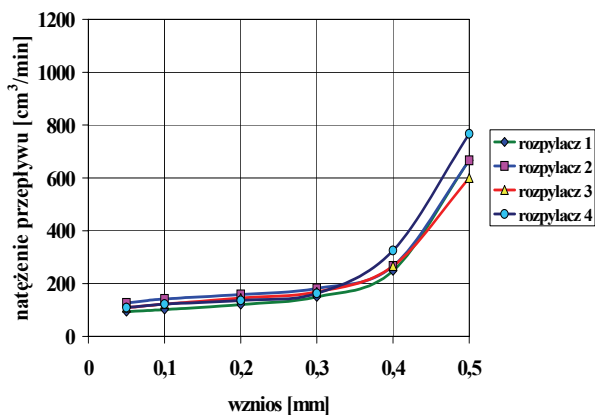
Wznios iglicy [mm]	Rozpylacz 1 [cm³/min]	Rozpylacz 2 [cm³/min]	Rozpylacz 3 [cm³/min]	Rozpylacz 4 [cm³/min]
0,05	93,3	126,7	108,3	108,3
0,1	101,7	141,7	121,7	121,7
0,2	120,0	158,3	145,0	136,7
0,3	150,0	181,7	168,3	163,3
0,4	248,3	266,7	266,7	325,0
0,5	666,7	666,7	600,0	766,7

Tabela 5.30. Wyniki obliczeń procentowej redukcji przepływu powietrza przez rozpylacze po teście CEC PF-023 – paliwo BIOXDIESEL M3

Wznios iglicy [mm]	Rozpylacz 1 [%]	Rozpylacz 2 [%]	Rozpylacz 3 [%]	Rozpylacz 4 [%]	Wartość średnia [%]
0,05	55,2	43,7	54,2	59,4	53,1
0,1	59,1	43,3	54,1	57,1	53,4
0,2	55,6	44,1	51,7	59,0	52,6
0,3	52,6	43,5	54,1	62,3	53,1
0,4	42,9	38,5	56,2	47,3	46,2
0,5	31,0	28,6	47,1	31,3	34,5



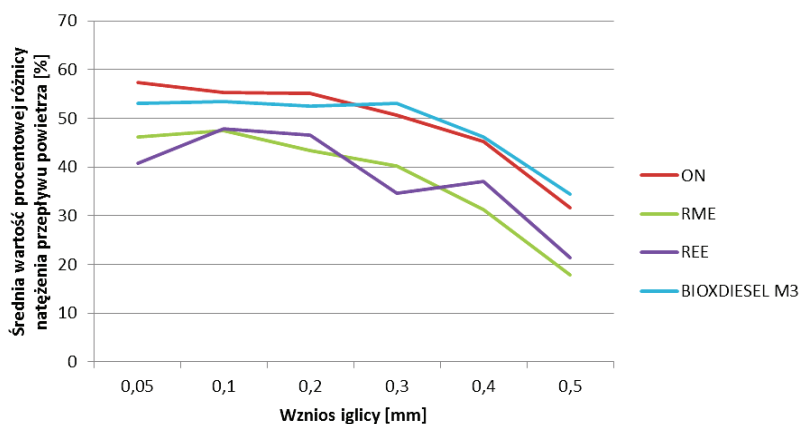
Rys. 5.75. Natężenie przepływu powietrza w funkcji wzniosu iglicy rozpylacza przed testem CEC PF-023



Rys. 5.76. Natężenie przepływu powietrza w funkcji wzniosu iglicy rozpylacza po teście CEC PF-023 – paliwo BIOXDIESEL M3

była mniejsza od dopuszczalnej, która wynosi 85%. Średnie wartości blokowania przepływu powietrza po zasilaniu:

- ON – 55,3%
- RME – 47,5%
- REE – 47,8%
- BIOXDIESEL M3 – 53,4%.



Rys. 5.77. Charakterystyka średniej procentowej wartości różnicy natężenia przepływu powietrza przez wtryskiwacze w funkcji wzniosu iglicy rozpylaczy dla badanych paliw: ON, RME, REE, BIOXDIESEL M3

Mniejsza skłonność paliw estrowych do koksowania wynika z ich bardzo dobrych właściwości rozpuszczających i skutkuje możliwością dłuższej żywotności wtryskiwaczy w eksploatacji.

Na podstawie przeprowadzonego testu CEC PF-023 stwierdzono, że poziom zanieczyszczenia końcówek badanych wtryskiwaczy jest mniejszy dla RME o 14%, REE – 13,6%, a dla paliwa BIOXDIESEL – 3,5% w stosunku do zasilania ON.

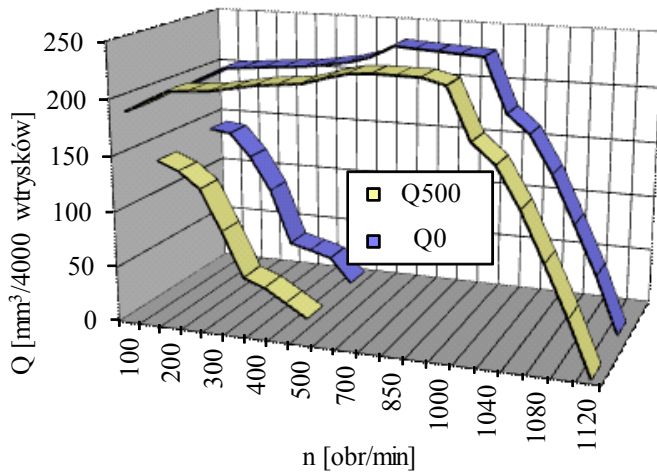
5.3.7. Wpływ estrów oleju rzepakowego na trwałość aparatury wtryskowej i lepkość kinematyczną oleju smarującego

Wyniki badań aparatury wtryskowej

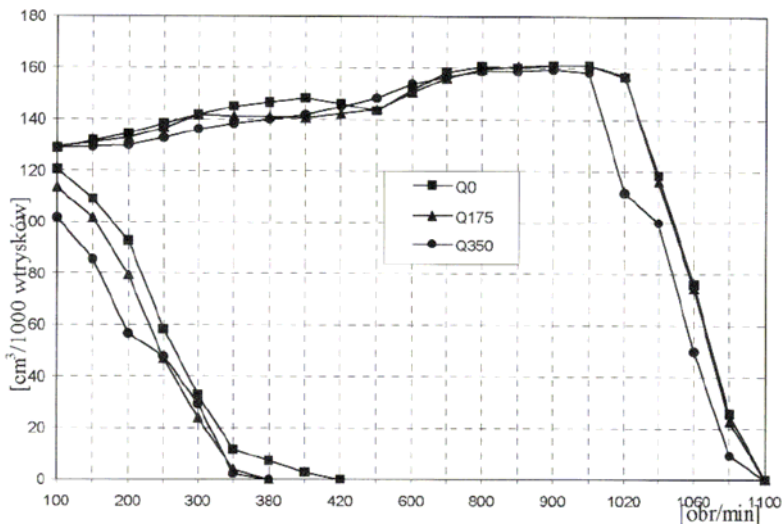
Zestawienie charakterystyk pracy i biegu jałowego (wolnych obrotów) dla pompy typu 327-00-45 przedstawiono na rys 5.78, a na rys. 5.79 dla pompy typu 327-00-13Bx.

Po próbie trwałościowej stwierdzono:

- Pomiar skoku wstępnego oraz kątów między początkami tłoczenia poszczególnych sekcji wykazały nieznaczne zmiany w granicach błędów pomiaru.



Rys. 5.78. Charakterystyka zewnętrzna i biegu jałowego pompy wtryskowej 327-00-45 zasilanej RME (kolor niebieski – bazowa, przed próbą trwałościową, kolor żółty – po próbie trwałościowej)



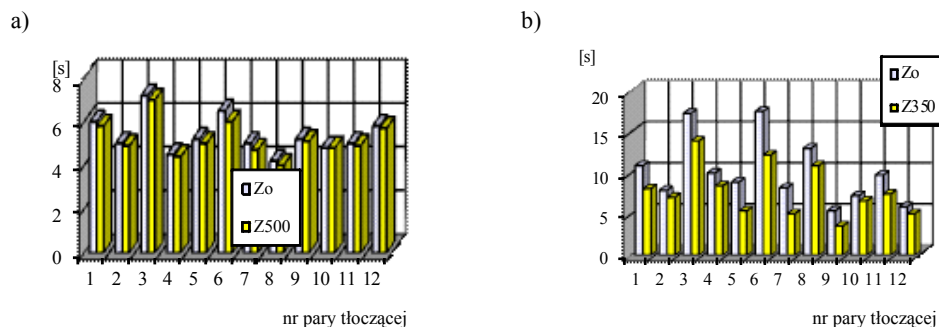
Rys. 5.79. Charakterystyka zewnętrzna i wolnych obrotów (bazowa Q0, po 175 h i po 350 h) pompy wtryskowej 327-00-13Bx zasilanej RME

- Oględziny makroskopowe krzywek i łożysk ślizgowych wałka krzywkowego, rolek i korpusów popychaczy, tłoczków i cylinderek elementów tłoczących, grzybków i gniazd zaworów tłoczących oraz miski i kul regulatora nie wykazały widocznych śladów zużycia, rys i zatarć na współpracujących powierzchniach.

- Pomiary uśrednionych, rzeczywistych wzniosów środków rolek popychaczy w części roboczej wznoszącej zarysu krzywek wałka krzywkowego wykazały zmniejszenie wzniosu środka rolki popychacza o 0,01 mm.

- Pomiaru mikrometryczne popychaczy polegały na wykonaniu pomiarów: średnic zewnętrznych korpusu popychaczy, rolek popychaczy, sworznia popychacza, igiełek popychacza oraz średnic otworów na popychacze w korpusie pompy. Na wszystkich elementach stwierdzono średnie zużycie na poziomie 0,01 mm.

- Pomiaru szczelności elementów tłoczących wykazały dla pompy 327-00-45 spadek szczelności elementów tłoczących o 0,18 s, co stanowi 3,26% wartości bazowej (rys. 5.80a). Natomiast dla pompy 327-00-13Bx wyniósł 2,35 s (23,17% wartości bazowej) – rys. 5.80b.



Rys. 5.80. Zmiana szczelności elementów tłoczących pomp zasilanych RME: a) zmiana szczelności elementów tłoczących dla pompy 327-00-45: Zo – bazowa, Z500 – po 500 h, b) zmiana szczelności elementów tłoczących dla pompy 327-00-13Bx: Zo – bazowa, Z350 – po 350 h

- Pomiaru luzów między cylinderkiem a tłoczkiem w części sterującej i prowadzącej pozwoliły na stwierdzenie wzrostu luzu w części sterującej o 0,62 μm i o 0,42 μm w części prowadzącej pompy 327-00-13Bx. Tak więc w części sterującej nastąpił przyrost luzu pomiędzy cylinderkiem a tłoczkiem o wartości 32% większy niż w części prowadzącej. W pompie 327-00-45 stwierdzono średni wzrost luzu w części sterującej o 0,21 μm . Natomiast w części prowadzącej średni wzrost luzu wyniósł 0,2 μm .

- Pomiar zaworów tłoczących (szczelności na stożku, luzu na pasku odciążenia i skoku odciążenia) wykazał, że szczelność na stożku po 350 h pracy podczas zasilania RME nie uległa zmianie. Wszystkie zawory spełniały normy producenta. Skok odciążenia nie uległ zmianie w znaczący sposób. Natomiast luz na pasku odciążenia uległ nieznacznemu wzrostowi średnio o 0,1 działki.

- Badania funkcjonalne kompletnych wtryskiwaczy obejmujące pomiary szczelności wewnętrznej (na przewodzeniu) – czas spadku ciśnienia z 20 MPa do 16 MPa, na przyłgni w ciągu 10 s (szczelność statyczna) i dynamicznej oraz wyznaczenie dławienia, jakości rozpylenia, jakości dźwięku wtrysku i ciśnienia początku wtrysku, wykazały:

- średni spadek szczelności wewnętrznej po 350 h w teście pracy – 4,58 s.

- średni spadek ciśnienia otwarcia wtryskiwacza o 0,88 MPa w pierwszym 175 h cyklu, a w drugim 175 h cyklu o 1,11 MPa. Wzrost dynamiki spadku ciśnienia otwarcia wtryskiwacza w drugim cyklu pracy świadczy o postępującej zmianie charakterystyki

styki sprężyn wtryskiwaczy. Po 350 h w pracy wyraźnie pogorszył się pod względem funkcjonalnym wtryskiwacz nr 8 – nieuszczelny na przyłgni stożka (podciekał), dławił przepływ i miał nieodpowiednie rozpylenie i dźwięk.

- Porównując wypływ hydrauliczny przez kompletne wtryskiwacze na stanowisku do badań jednolitości hydraulicznej, stwierdzono w porównaniu do pomiarów bazowych powiększenie wypływu. Jest to wynikiem powiększenia otworków rozpylających rozpylaczy. Średni wzrost wypływu po 350 h pracy wyniósł 2,74%.

- W wyniku przeprowadzonych oględzin makroskopowych rozpylaczy, powierzchni filtrów szczelinowych, drążków i sprężyn wtryskiwaczy stwierdzono, że na powierzchniach współpracujących nie ma żadnych śladów korozji, zarysowań i pęknięć. Nie stwierdzono również istotnych zmian kołowości i liniowości na części prowadzącej igły i w korpusie rozpylacza.

- Luzy pomiędzy korpusem a iglicą mierzono na trzech wysokościach korpusu: 6 mm, 12 mm i 18 mm. W porównaniu do pomiarów bazowych stwierdzono różne wielkości średnie przyrostu luzu pomiędzy iglicą a korpusem rozpylacza. Na wysokości 6 mm średnie powiększenie luzu wyniosło 7,77%, na wysokości 12 mm – 11,41%, a na wysokości 18 mm – 8,72%. Tak nierównomiernie rozłożony przyrost luzu pomiędzy igłą rozpylacza a korpusem rozpylacza świadczy o nierównomiernym zużywaniu się powierzchni współpracujących igły i otworu prowadzącego w korpusie. Było to konsekwencją tego, że średnie luzy bazowe różniły się od siebie w zależności od wysokości, na jakiej były mierzone. I tak na wysokości 6 mm średni luz bazowy wynosił – 3,43 μm , na 12 mm – 3,36 μm , a na wysokości 18 mm – 3,25 μm . W związku z takim zróżnicowaniem średnich luzów bazowych podczas pracy według ustalonego testu nastąpiła największa dynamika zużycia, a co za tym idzie – przyrostu luzu w miejscach, w których ten luz był najmniejszy.

- Pomiar wypływu pneumatycznego przez otworki rozpylaczy potwierdziły powiększenie otworków rozpylających, jak to wynikało z pomiarów hydraulicznych kompletnych wtryskiwaczy. Stwierdzono 2% wzrost wypływu przez otworki rozpylaczy, co jest skutkiem erozyjnego powiększenia otworków.

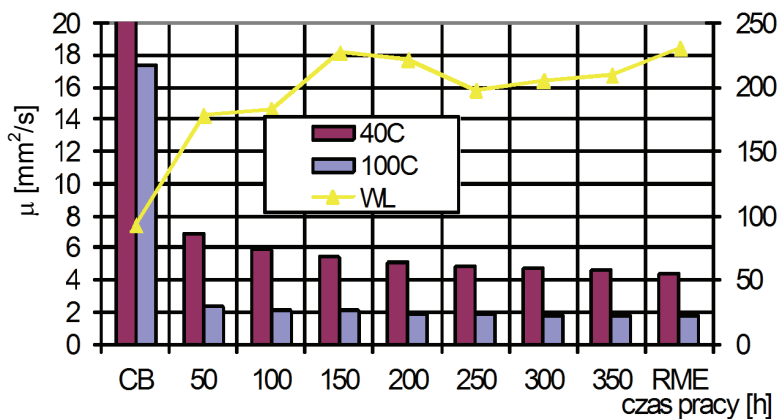
- Pomiar charakterystyk wypływu rozpylaczy w funkcji wzniosu iglicy wykazały nieznaczny wzrost wypływu po 350 h pracy w porównaniu do bazowego.

- Pomiar wypływu hydraulicznego przez otworki z iglicą i bez iglicy wykonano na stanowisku do badania jednolitości hydraulicznej 9.04.267.0051 według warunków PERKINSA pod ciśnieniem 2,81 MPa. Średni wzrost wypływu hydraulicznego rozpylaczy bez igły wyniósł 25 $\text{cm}^3/30 \text{ s}$, co stanowi 4,2% średniego wypływu bazowego. Natomiast dla rozpylaczy z iglicą średnie powiększenie wypływu wyniosło 7,5 $\text{cm}^3/30 \text{ s}$, co stanowi 1,3% średniego wypływu bazowego. Tak więc wzrost wypływów hydraulicznych potwierdził zwiększenie przekrojów czynnych otworów rozpylających.

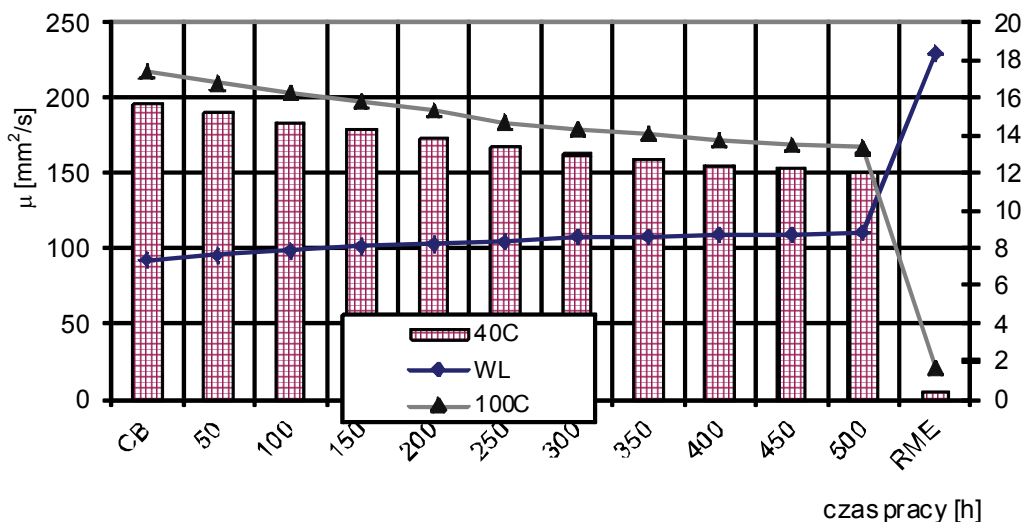
Wniosek: Dokonane pomiary i badania funkcjonalne dowodzą, że nie występuje istotny wpływ RME na procesy zużycia badanej aparatury wtryskowej silników.

Lepkość kinematyczna

Zmianę lepkości kinematycznej oleju Superol CB 50 15W/40 smarującego wałek krzywkowy pompy wtryskowej 327-00-13Bx dla 40 °C i 100 °C oraz wskaźnika lepkości W_L w czasie trwania testu badawczego dla pompy 327-00-13Bx przedstawiono na rysunku 5.81.



Rys. 5.81. Zmiana lepkości kinematycznej oleju Superol CB 50 w temperaturze 40 °C i 100 °C oraz wskaźnika lepkości W_L w pompie 327-00-13Bx zasilanej paliwem RME



Rys. 5.82. Zmiana lepkości kinematycznej oleju Superol CB 50 w temperaturze 40 °C i 100 °C oraz wskaźnika lepkości W_L w pompie 327-00-45 zasilanej paliwem RME

Na rysunku 5.82 oznaczono lepkość czystego oleju Superol CB 50 w temperaturze 40 °C i 100 °C w słupku – CB, a czystego estru metylowego oleju rzepakowego w słupku – RME. Z rysunku 5.81. wynika, że już po 60 h testu wartość lepkości oleju spadła wielokrotnie, co spowodowane jest znacznym przeciekaniem paliwa do przestrzeni wałka krzywkowego. W pierwszych 175 h testu dynamika narastania przecieków estru metylowego OR do przestrzeni wałka krzywkowego pompy wtryskowej 327-00-13Bx była dość duża, a w następnych 175 h testu zarejestrowano 10-krotny spadek przyrostu dynamiki. Świadczyć to może o tym, że po 175 h pracy nastąpiło dopasowanie współpracujących ze sobą elementów tłoczących. Należy zauważyć, że wartości przecieków w tego typu pompie są znaczne, co wynika ze specyfiki konstrukcji. Wartość przecieków w pompie 327-00-45 wynosiła jedynie 3% w stosunku do wielkości przecieków pompy 327-00-13Bx i była mniejsza o około 7% niż przy zasilaniu paliwem bazowym.

Parametry fizykochemiczne estrów oleju rzepakowego mogą mieć korzystny wpływ na parametry funkcjonalne aparatury paliwowej i trwałościowe jej elementów.

Uzyskane rezultaty świadczą o możliwości zwiększenia efektywności pracy aparatury paliwowej, zasilanej estrami wyższych kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego w porównaniu do zasilania ON.

Rozwiązania konstrukcyjne pompy wtryskowej 327-00-13Bx umożliwiają intensywne przecieki paliwa, co powoduje bardzo duży spadek lepkości kinematycznej oleju smarującego wałek krzywkowy, zarówno podczas zasilania RME, jak i ON. Tego typu konstrukcje nie powinny być zasilane RME.

W przypadku kiedy olej smarujący pompy jest jednocześnie czynnikiem smarującym całego silnika, należy uwzględnić wpływ rozcieńczania tego oleju również przez paliwo przeciekające poprzez elementy tłoczące pompy wtryskowej.

Badane pompy pod względem geometrycznego dopasowania spełniają wymagania określone przez producenta, a różnice pomiędzy pomiarami bazowymi i po przebiegu według założonego testu wynikają tylko z normalnego zużycia. Ich zakres nie różni się znacząco od wartości uzyskanych przez producenta na paliwie bazowym.

5.3.8. Wpływ paliwa BIOXDIESEL na właściwości fizykochemiczne silnikowego oleju smarującego

W tabelach 5.31–5.33 przedstawiono zestawienie wyników pomiarów wybranych parametrów fizykochemicznych, oleju silnikowego Titan Uniwersal HD I5W-40 poddanego badaniom eksploatacyjnym, charakteryzujących zużycie oleju. Próbkę pobrano z zasilanych paliwem BIOXDIESEL w ramach badań trakcyjnych autobusów MPK we Wrocławiu.

Pomiary wykonano w Wojskowym Ośrodku Badawczo-Rozwojowym Materiałów Pędnych i Smarów w Warszawie.

Tabela 5.31. Wyniki badań fizykochemicznych oleju Titan Uniwersal 15W-40 (silnik nr 5304) (opr. własne)

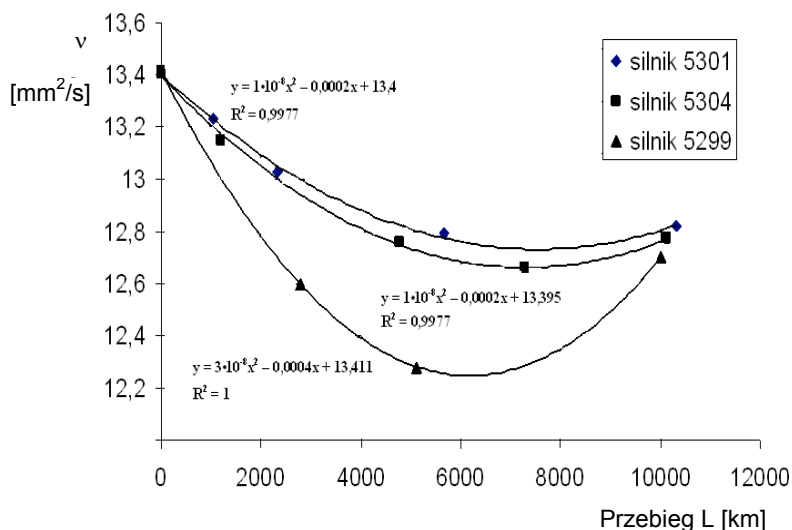
Lp.	Badany parametr (norma)	Jednostka miary	Próbka oleju pobrana po przebiegu (km)				
			0	1198	4783	7282	10131
1	Lepkość kinematyczna w temperaturze w 100 °C (PN-C-4011:1981)	mm ² /s	13,41	12,95	12,76	12,66	12,77
2	Zawartość paliwa (PN-C-083:1955)	%(m/m)	–	0,80	0,80	0,8	0,80
3	Liczba zasadowa (PN-C-63:1976)	mg KOH/g	9,66	9,64	9,41	9,17	8,60
4	Zawartość pierwiastków pochodzących z dodatków: Ca, Zn, P (ASTM D 951)	% (m/m)	0,2734	0,2734	0,2728	0,2512	0,2532
			0,1107	0,1197	0,1239	0,1057	0,1071
			0,1019	0,1089	0,1066	0,0910	0,0917
5	Zawartość pierwiastków pochodzących z elementów silnika: Fe, Cu, Pb (ASTM D 5185:1995)	ppm	–	114,71	205,08	373,0	389,73
				10,21	19,25	31,65	39,73
				4,99	11,63	18,23	25,16

Tabela 5.32. Wyniki badań fizykochemicznych oleju Titan Uniwersal 15W-40 (silnik nr 5301) (opr. własne)

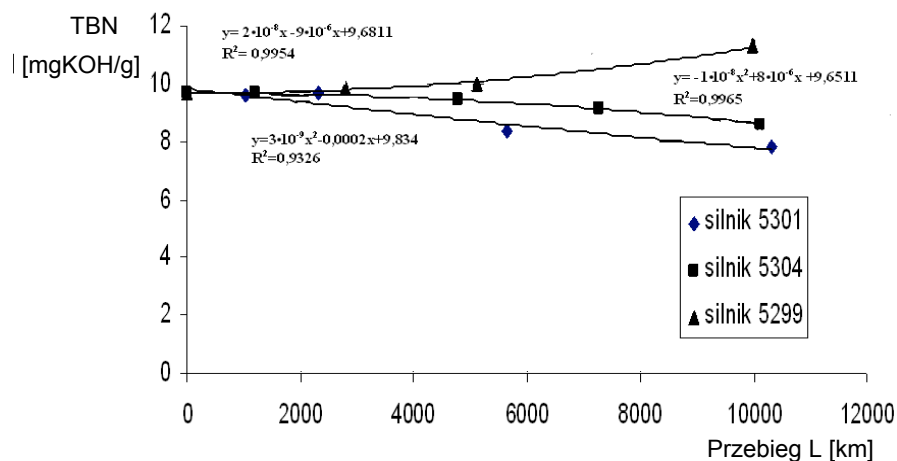
Lp.	Badany parametr (norma)	Jednostka miary	Próbka oleju pobrana po przebiegu (km)				
			0	1033	0225	5663	10327
1	Lepkość kinematyczna w temperaturze w 100 °C (PN-C-04011:1981)	mm ² /s	13,41	13,53	13,03	12,79	12,82
2	Zawartość paliwa (PN-C-04083:1955)	%(m/m)	–	0,80	0,80	0,80	0,80
3	Liczba zasadowa (PN-C-04163:1976)	mg KOH/g	9,66	9,62	9,64	8,35	7,79
4	Zawartość pierwiastków pochodzących z dodatków: Ca, Zn, P (ASTM D 4951)	% (m/m)	0,2734	0,2512	0,2401	0,2784	0,2656
			0,1107	0,1049	0,1031	0,1296	0,1089
			0,1019	0,1042	0,0955	0,1110	0,0997
5	Zawartość pierwiastków pochodzących z elementów silnika: Fe, Cu, Pb (ASTM D 5185:1995)	ppm	–	95,4	96,11	143,26	141,87
				15,04	17,26	24,12	24,56
				22,47	24,09	24,94	30,57

Tabela 5.33. Wyniki badań fizykochemicznych oleju Titan Uniwersal 15W-40 (silnik nr 5299) oraz oleju pobranego z silnika zasilanego olejem napędowym o przebiegu 10000 km (opr. własne)

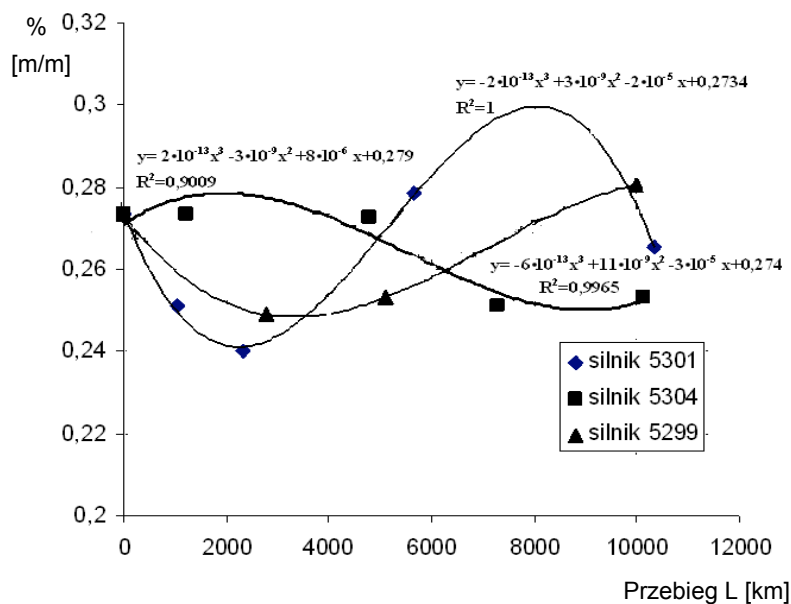
Lp.	Badany parametr (norma)	Jednostka miary	Próbka oleju pobrana po przebiegu (km)			
			0	2787	5112	ok. 10 000
1	Lepkość kinematyczna w temperaturze w 100 °C (PN-C-04011:1981)	mmWs	13,41	12,60	12,28	12,70
2	Zawartość paliwa (PN-C-04083:1955)	% (m/m)	–	0,80	0,80	0,80
3	Liczba zasadowa (PN-C-04163:1976)	mg KOH/g	9,66	9,85	10,02	11,27
4	Zawartość pierwiastków pochodzących z dodatków: Ca, Zn, P (ASTM D 4951)	% (m/m)	0,2734	0,2489	0,2532	0,2808
			0,1107	0,1075	0,1127	0,1376
			0,1019	0,0934	0,1002	0,1230
5	Zawartość pierwiastków pochodzących z konstrukcji silnika: Fe, Cu, Pb (ASTM D 5185:1995)	ppm	–	101,12 8,94 14,64	166,6 15,12 19,45	204,411 84,93 132,25



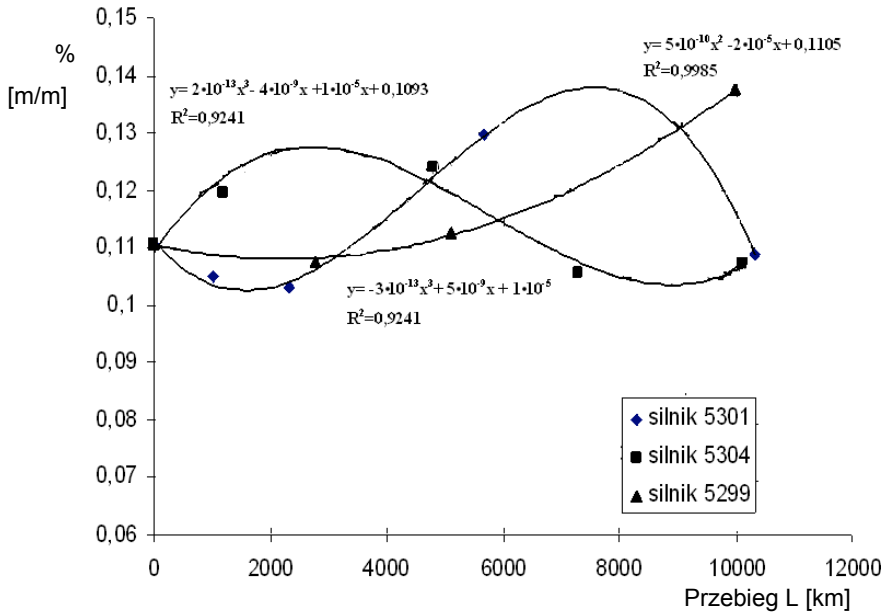
Rys. 5.83. Charakter eksploatacyjnych zmian lepkości kinematycznej oleju silnikowego w silnikach autobusowych zasilanych BIOXDIESEL



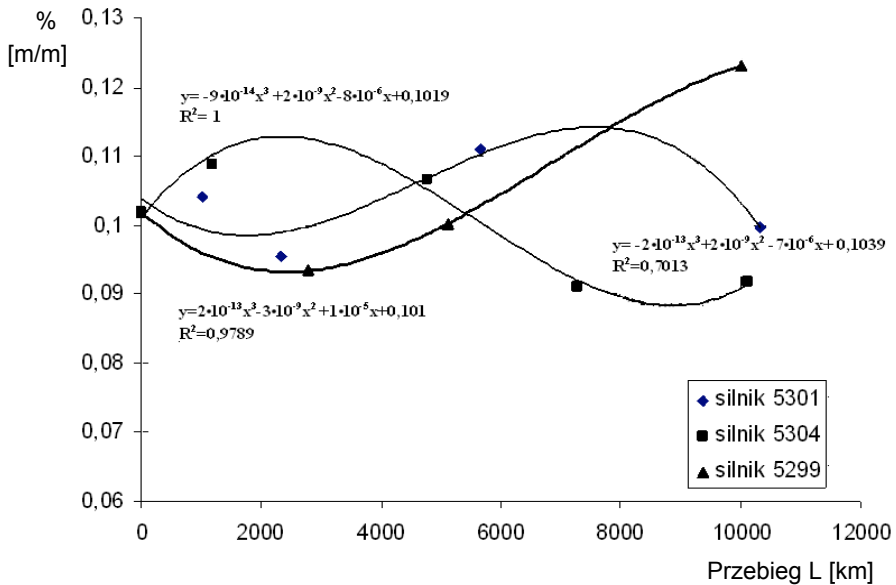
Rys. 5.84. Charakter eksploatacyjnych zmian liczby zasadowej oleju silnikowego w silnikach autobusowych zasilanych BIOXDIESEL



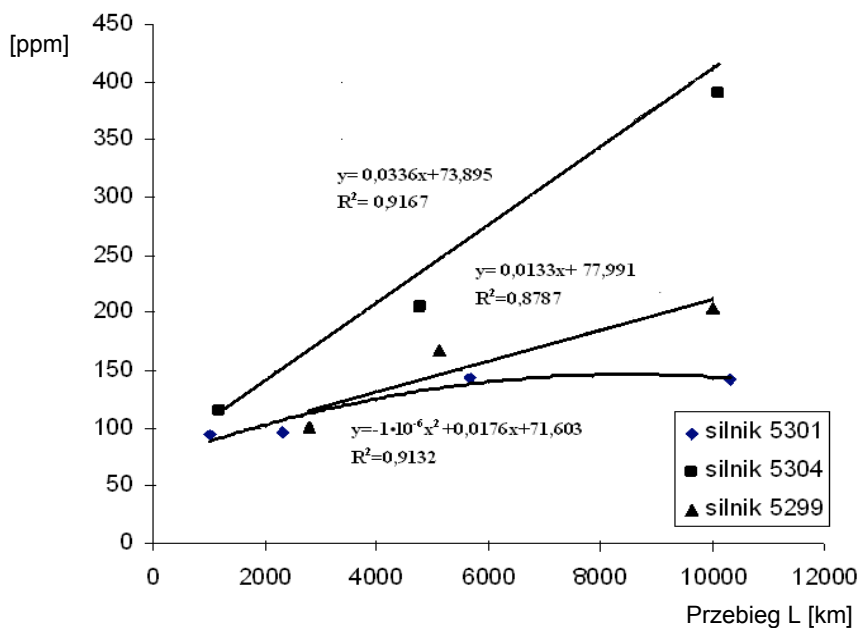
Rys. 5.85. Zmiana zawartości wapnia w oleju silnikowym autobusowych silników zasilanych BIOXDIESEL



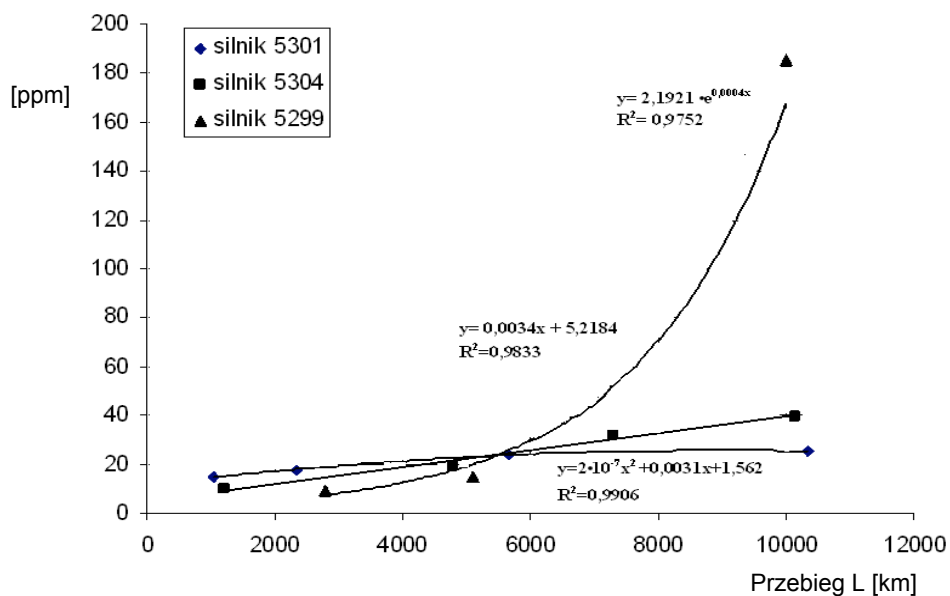
Rys. 5.86. Zmiana zawartości cynku w oleju silnikowym autobusowych silników zasilanych BIOXDIESEL



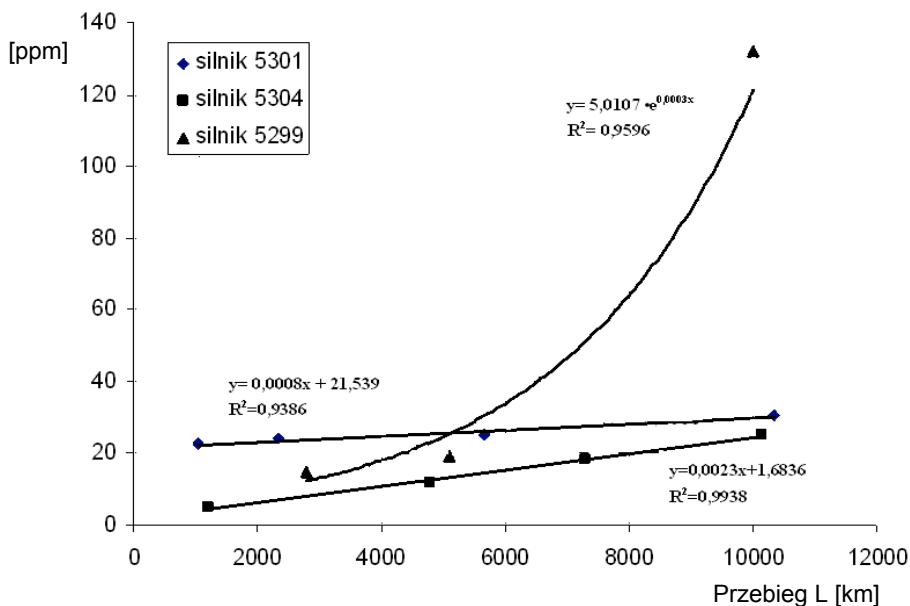
Rys. 5.87. Zmiana zawartości fosforu w oleju silnikowym autobusowych silników zasilanych BIOXDIESEL



Rys 5.88. Zmiana zawartości żelaza w oleju silnikowym autobusowych silników zasilanych BIOXDIESEL



Rys. 5.89. Zmiana zawartości miedzi w oleju silnikowym autobusowych silników zasilanych BIOXDIESEL



Rys. 5.90. Zmiana zawartości ołowiu w oleju silnikowym autobusowych silników zasilanych BIOXDIESEL

Wnioski

Dotychczasowe badania wskazują, że:

- alternatywne zasilanie paliwem BIOXDIESEL silnika nie ma znaczącego wpływu na jakość oleju smarującego silnik;

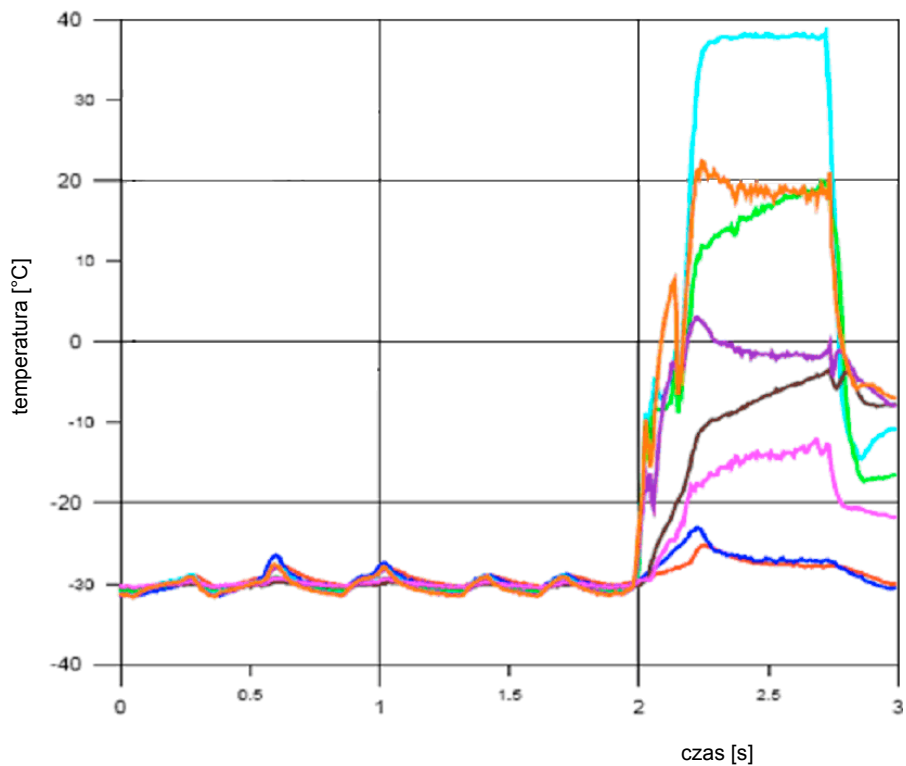
- jednak w celu uogólnienia wniosków konieczne byłoby zwiększenie czasu eksploatacji oleju silnikowego do kilkudziesięciu tysięcy kilometrów (zakres mierzonych parametrów jest wystarczający); ze względu na ograniczenia sprzętowe, materiałowe i finansowe niemożliwe było dokonanie badań na taką skalę, dlatego można dokonane badania określić mianem wstępnych wyznaczających kierunek dalszych badań.

5.3.9. Wpływ paliwa BIOXDIESEL na rozruch silnika w niskiej temperaturze otoczenia

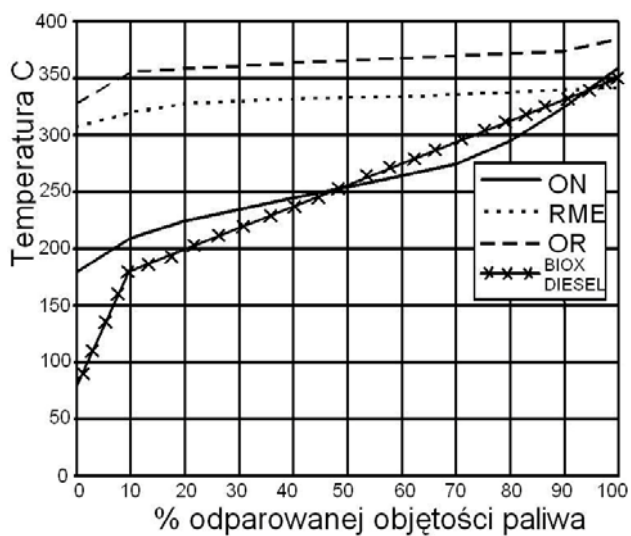
Możliwości rozruchowe silnika w $T_o = -31\text{ }^\circ\text{C}$ przedstawiono na rysunku 5.91.

Znakomite wyniki możliwości i czasu rozruchu silnika o ZS należy uzasadnić szerokim zakresem wrzenia komponentów paliwa BIOXDIESEL (rys. 5.92).

Należy zaznaczyć, że podczas całego okresu prowadzonych prób w tej fazie badań, temperatura testowanego paliwa, a także zasysanego przez silnik powietrza,



Rys. 5.91. Przebieg uruchamiania silnika MAN autobusu Jelcz w komorze termoklimatycznej



Rys. 5.92. Zakresy wrzenia ON i biopaliw (opracowanie własne)

były ustabilizowane na wymaganym poziomie ($-31\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$). Na tej podstawie można uznać, że poddane badaniom paliwo BIOXDIESEL może być wykorzystywane w warunkach zimowych jako alternatywne paliwo do silników napędowych o zapłonie samoczynnym.

Podczas badań autobusu w komorze termoklimatycznej umieszczono pobrane przed przystąpieniem do badania próbki paliwa z biokomponentami. Zaobserwowano, że paliwo umieszczone w szklanych pojemnikach zachowało płynność nawet w warunkach temperatury do $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$, co może świadczyć, że spełnia ono kryterium pompowności i nie będzie powodować zjawiska zablokowania zimnego filtra.

5.4. Ośrodki badawcze, w których realizowano pracę

Badania doświadczalne zamieszczone w pracy przeprowadzono w następujących ośrodkach badawczych (w ramach prac pod kierunkiem autora monografii):

1. Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny: Grant MNiSzW nr 50203431/3871, Grant MNiSzW nr 509571939.

2. Wyższa Szkoła Oficerska im. T. Kościuszki we Wrocławiu i w Wyższa Szkoła Oficerska Wojsk Lądowych we Wrocławiu im. T. Kościuszki (Działalność Statutowa – DS., Badania Własne – BW).

3. Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, Wydział Mechaniczny – staż habilitacyjny (BW WSOWL).

4. Politechnika Krakowska im. T. Kościuszki, Wydział Mechaniczny (BW WSO).

5. Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny (BW WSO).

6. Uniwersytet Wrocławski, Wydział Chemii (BW WSO, granty MNiSW).

7. Uniwersytet Warmińsko-Mazurski, Wydział Nauk Technicznych (BW WSO, granty MNiSW).

8. AGH Kraków, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki (BW WSO).

9. Zakłady Mechaniczne Wola Warszawa (BW WSO).

10. Miejskie Przedsiębiorstwo Komunikacji Wrocław (BW WSO).

11. Miejskie Zakłady Komunikacyjne Kraków (BW WSO).

12. Zakłady Mechaniczne WUZETEM Warszawa (BW WSO).

13. Wojskowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Służby MPS Warszawa (BW WSO).

14. Wojskowy Ośrodek Materiałów Pędnych i Smarów Wrocław (BW WSO).

15. 34. Brygada Kawalerii Pancerniej Żagań (BW WSO).

16. 11. Batalion Remontowy Żagań (BW WSO).

17. Centrala Produktów Naftowych Orlen (BW WSO).

18. Instytut Chemii Przemysłowej Warszawa (BW WSO).

6. Wnioski z badań własnych

Część badawcza pracy dotyczy analizy wpływu mieszanin oleju napędowego z biokomponentami oraz estrów wyższych kwasów tłuszczowych jako paliw samoistnych na właściwości eksploatacyjne, trwałościowe i emisję składników toksycznych silników o ZS.

- Stanowiskowe prace badawcze poprzedzane były analizą struktury i właściwości fizykochemicznych estrów etylowych i 3-komponentowych biopaliw wytwarzanych z użyciem zaprojektowanej przez autora mobilnej agrorafinerii. Analizę strukturalną estrów etylowych oraz badania porównawcze właściwości fizykochemicznych mieszanin zawierających te estry dokonano z wykorzystaniem znormalizowanych procedur, a w badaniach właściwości estrów etylowych wykorzystano podstawowe procedury badawcze estrów metylowych.

- Ocenę efektywności konwersji energii zawartej w różnych biopaliwach i oleju napędowym dokonano z wykorzystaniem stacjonarnego stanowiska badań silników w stanach nieustalonych według metody opracowanej przez autora, a także silników pojazdów trakcyjnych za pomocą mobilnego zestawu stanowiącego aplikację badań stanowiskowych. Ocenę względną efektywności silnika wielkopojemnościowego zasilanego olejem napędowym i estrami dokonano na hamowni silnikowej według standardowych procedur (w stanach ustalonych).

- Badania wpływu biopaliwa na zużycie aparatury paliwowej silnika dokonano na zaprojektowanym i wykonanym pod kierunkiem autora stanowisku długotrwałych badań trwałościowych, a jego ocenę przez określenie parametrów funkcjonalnych i wymiarowych z wykorzystaniem specjalistycznego oprzyrządowania.

- Wpływ zróżnicowanego składu komponentowego biopaliw na emisję składników toksycznych dokonano z wykorzystaniem stanowiska wyposażonego w silnik badawczy, a wpływ na zadymienie spalin określono za pomocą zaprojektowanego stanowiska i procedury badawczej silników wozów bojowych oraz dymomierzy stanowiących wyposażenie hamowni silnikowych i stanowiska badań w stanach nieustalonych.

- Ocenę względną wpływu użycia samoistnych biokomponentów (estrów metylowych i etylowych) oraz mieszaniny 3-komponentowej na koksowanie wtryskiwaczy

dokonano z wykorzystaniem stanowiska hamownianego, gdzie silnik poddany był obciążeniom symulującym warunki jazdy miejskiej.

- Weryfikację efektów konwersji 3-komponentowego biopaliwa BIOXDIESEL stanowiły badania trakcyjne autobusów komunikacji miejskiej w warunkach naturalnej eksploatacji, a ocenę właściwości rozruchowych silnika napędowego autobusu w niskich temperaturach otoczenia zrealizowano z wykorzystaniem wielkogabarytowej komory termoklimatycznej.

6.1. Wnioski dotyczące przyjętych tez pracy

- Istnieje możliwość oceny efektywności pracy silnika w stanach nieustalonych za pomocą cyklodyn – według metody opracowanej przez autora – dla których miarodajny jest ich środek ciężkości. Podczas zasilania silników paliwa o różnych składach komponentowych i zbliżonych wartościach opałowych uzyskano rozłączność elips o środku P (\bar{n}, \bar{M}_o) i średnicach $2\delta_n$ i $2\delta_{M_o}$ stanowiących środki ciężkości powierzchni figur (cyklodyn), powstających jako efekt cyklicznie powtarzających się zależności M_o i n .

- Wykonane badania silników i analizy cyklodyn (pola powierzchni, położenie środka ciężkości) potwierdziły, że silniki spalinowe o ZS zasilane biopaliwami, a zwłaszcza z komponentami etylowymi, pracujące w stanach nieustalonych generują porównywalne pole podaży energii jak przy zasilaniu standardowo olejem napędowym, pomimo ich mniejszej wartości energetycznej.

- Przeprowadzone badania aparatury paliwowej w zakresie trwałości par precyzyjnych, nagarowania (koksowania), a także właściwości smarnych ON i biopaliw wykazały korzystny wpływ biopaliw na badane parametry w stosunku do zasilania olejem napędowym. Rokuje to zwiększoną trwałość aparatury wtryskowej.

- Zrealizowane badania pojazdów eksploatacyjnych – zasilanych paliwem BIOXDIESEL i ON w zakresie efektywności zadymiania spalin, zużycia paliwa, zmian cech oleju smarującego silnik, zdolności rozruchowych w niskich temperaturach – potwierdziły korzystny wpływ biokomponentów na trwałość i żywotność badanych silników.

Podane wnioski stanowią podstawę do sformułowania wniosku ogólnego: silniki spalinowe o ZS, a zwłaszcza ich aparatura wtryskowa podczas zasilania biopaliwami, przede wszystkim mieszaninami zawierającymi estry etylowe, etanol i olej napędowy, a także mieszaninami zawierającymi estry metylowe, etanol i olej napędowy, mogą mieć nie mniejszą trwałość w stosunku do ich zasilania standardowego (olejem napędowym).

6.2. Wnioski szczegółowe

- Na podstawie quasi-identycznych przebiegów prędkości obrotowej (i przyspieszeń) wału korbowego silnika w każdej fazie kolejnych 12 cykli badawczych – obejmujących bieg jałowy, przyspieszanie i maksymalną prędkość obrotową oraz jego opóźnianie – można twierdzić o dużej dokładności i powtarzalności pomiarów cechującej opracowany algorytm pomiarowy w stanach nieustalonych pracy silnika o zapłonie samoczynnym.

- Usytuowanie środków ciężkości cyklodyn badanych biopaliw i ON w wąskim przedziale M_o (350–375 N·m) i n_o (1680–1720 obr/min) świadczy o porównywalnym polu podaży energii jak podczas zasilania standardowo ON pomimo mniejszych wartości opałowych biopaliw. Efekt ten wynika z właściwości fizykochemicznych biopaliw, które charakteryzują się następującymi cechami:

1. Wartość gęstości paliwa 3-komponentowego (M2–M4) oznaczone zarówno w temperaturze otoczenia 15 °C, jak i 20 °C są niewiele większe niż badanego ON (o 0,5–1,4%) i zawierają się w korzystnym (ze względów efektywnościowych) zakresie wymagań silnika dla paliw standardowych. Wyniki te potwierdzają dokonany wcześniej właściwy dobór komponentów przez autora. Na uwagę zasługuje nieznacznie większa od normatywnych wymagań silnika wartość gęstości mieszaniny 2-komponentowej M1.

2. Lepkość mieszanek BIOXDIESEL cechuje się zbliżonymi wartościami do wartości standardowego paliwa Ekodiesel Ultra F i zawiera się w zakresie wymagań silnika. Jednak mniejsze ich wartości o 10–12% w stosunku do ON mogą mieć wpływ na poprawę sprawności procesu pompowania i rozpylania. Ponadto lepkość tak skomponowanych mieszanek BIOXDIESEL jest korzystna podczas uruchamiania silnika w niskiej temperaturze otoczenia.

3. Zakres oddestylowania paliwa BIOXDIESEL w stosunku do oddestylowania ON Ekodiesel Ultra F jest zróżnicowany. Nieco mniejsza zdolność o ok. 5,5% dla M2 w zakresie temperatury do 250 °C i znacząco większe zdolności paliw M3 i M4 (odpowiednio o 17% i 27%) w tym zakresie temperatury. W przedziale temperatury destylacji do 350 °C wpływ EtOH i REE jest mniejszy, jednak wszystkie badane mieszanki paliwa BIOXDIESEL odznaczają się korzystniejszymi wskaźnikami wrzenia.

4. Wartości indeksu cetanowego paliw BIOXDIESEL są mniejsze dla wszystkich mieszanek w stosunku do ON zawartego w paliwie BIOXDIESEL odpowiednio 4%, 5% i 7%. Należy zaznaczyć, że analizowane wartości paliwa BIOXDIESEL w przedziale 49–50,5 jednostek są zgodne z wymaganiami określonymi przez konstrukcje współczesnego silnika o ZS (minimum 46).

- Badania efektywności silników pojazdów trakcyjnych (Volvo, MAN) w stanach nieustalonych, zasilanych paliwem BIOXDIESEL z 30% udziałem biokomponentów, wykazywały spadek M_o i N_e o 3,5–6,3% w całym zakresie prędkości obrotowej wału

korbowego, natomiast w przedziale eksploatacyjnym dla warunków miejskich prędkość n – 800–1500 obr/min, różnica wynosi ok. 0,5%.

- Badania właściwości smarnych standardowego oleju napędowego, mieszanin 2-komponentowych (ON + REE) i 3-komponentowych (ON + REE + EtOH) wykazały wzrost smarności biopaliw o 140–184% według metody HFRR i wzrost smarności biopaliw o 28–96% według metody SLBOCE w stosunku do smarności ON. Wartość smarności estrów w stosunku do smarności ON wynosi ponad 300%. Korzystniejsze wartości smarności biopaliw mogą spowodować zwiększenie trwałości aparatury wtryskowej i niemniejszej trwałości silników w stosunku do ich standardowego zasilania.

- Przeprowadzone badania trwałościowe oraz szeroki zakres pomiarów i badań funkcjonalnych elementów składowych aparatury wtryskowej i pomp wtryskowych wykazały znacząco mniejszą dynamikę zużywania się elementów składowych z użyciem RME w stosunku do ON, a funkcjonalność aparatury po długotrwałej próbie twardościowej uległa zmianie o ok. 1%.

- Badania zmian lepkości kinematycznej oleju smarującego na skutek przecieków pomp wtryskowych wykazały, że wpływ użycia RME do zasilania silników na jakość oleju jest zróżnicowany i wynika z ich „doskonałości” technicznej i technologicznej:

- podczas zasilania pomp 327-00-13 Bx „o niedoskonałej konstrukcji” występuje 5-krotny spadek wartości lepkości,

- podczas zasilania pomp 327-00-45 wartość przecieków wyniosła jedynie 3% w stosunku do wielkości przecieków pompy 327-00-13 Bx, a zmniejszenie lepkości oleju wynosiło 25% po 500 h badaniach trwałościowych.

W przypadku kiedy olej smarujący pompę jest jednocześnie czynnikiem smarującym silnik należy uwzględnić wpływ rozcieńczenia tego oleju przez paliwo na skutek przecieków.

- Badania wpływu paliwa BIOXDIESEL na jakość oleju smarującego silnik, dokonane w ramach badań frakcyjnych autobusów komunikacji miejskiej, wykazały 4,5–5,5% spadek lepkości po przebiegu 10 tys. km.

- Analiza kwasowości oleju i zawartości pierwiastków wynikających z dodatków uszlachetniających (Ca, Zn, P) oraz pierwiastków produktów zużycia silnika (Fe, Cu, Pb) wskazują, że mechanizmy procesów zmian cech oleju smarującego mogą mieć podobny charakter podczas zasilania ON i BIOXDIESEL.

- Względna redukcja zadymienia spalin silników komunikacji miejskiej, wózów bojowych oraz silników stanowiskowych zasilanych paliwem BIOXDIESEL w stosunku do zasilania ON wynosiła 43,6–52%, natomiast emisja składników toksycznych stwierdzona na stanowisku badawczym była mniejsza o 40–80%, z wyjątkiem NO_x , którego emisja wykazywała zbliżony poziom jak w zasilaniu ON.

- Badania właściwości rozruchowych silnika napędowego autobusu komunikacji miejskiej w niskiej temperaturze otoczenia wykazały, że paliwo BIOXDIESEL speł-

niało kryterium pompowalności w warunkach temperatury otoczenia $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$, nie powodując zjawiska blokowania filtra paliwa.

- Przeprowadzone próby rozruchu silnika w temperaturze $T_o = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$ wykazały wystąpienie pierwszych zapłonów w cylindrach po 2 s obrotów wału korbowego, co uzasadniać należy szerokim zakresem wrzenia komponentów w przedziale $80\text{--}360\text{ }^{\circ}\text{C}$ (dla porównania zakres wrzenia ON wynosi $180\text{--}360\text{ }^{\circ}\text{C}$). Uzyskane efekty stanowią weryfikację laboratoryjnych wyników temperatury zablokowania zimnego filtra (*TZZF*) w przedziale od -33 do $-37\text{ }^{\circ}\text{C}$.

- Zawartość wody w mieszankach paliwa BIOXDIESEL w zakresie $92\text{--}103\text{ mg/kg}$ wskazuje na hydrofobowość i jednorodność tych mieszanin.

6.3. Wnioski poznawcze

- Stwierdzono zależność usytuowania środków ciężkości cyklodyn od wzajemnych relacji C:H:O zawartych w biopaliwie, przy czym zwiększający się udział tlenu w mieszaninie wieloskładnikowej powoduje ich przesunięcie w kierunku prędkości obrotowej maksymalnego momentu obrotowego silnika zasilanego ON.

- Estrы etylowe wyższych kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego cechują się korzystniejszymi właściwościami fizykochemicznymi i energetycznymi w stosunku do aktualnie stosowanych estrów metylowych.

6.4. Wnioski użyltarne

W ramach przeprowadzonych prac:

- opracowano nowy rodzaj biopaliwa wieloskładnikowego o cechach fizycznych podobnych jak ON, złożonego z biokomponentów całkowicie odnawialnych i podano rozwiązanie technologii transestryfikacji etanolowej i wytworzenia paliwa BIOXDIESEL;

- opracowano nową metodę przyspieszonych badań silników w stanach nieustalonych, która ma charakter ogólny; metodę tę można wykorzystać do badań energetyczności paliw i parametrów efektywnych silnika spalinowego o ZS w miejscu postoju podczas naturalnej eksploatacji.

Metoda ta umożliwia przez wyznaczenie wskaźnika konwersji szybko względną weryfikację alternatywnego paliwa, a także rekomendację charakteru eksploatacji silnika.

6.5. Proponowane kierunki dalszych badań

- Określenie wpływu zastosowania paliwa BIOXDIESEL z biokomponentami całkowicie odnawialnymi na rozcieńczanie (dilution) oleju smarującego.
- Określenie charakteru zmian zawartości estrów etylowych w paliwie BIOXDIESEL i emisji rodników podczas procesów niecałkowitego i zupełnego spalania.
- Opracowanie przedziałów wartości wskaźnika konwersji energii (*WK*) dla różnych typów silników o ZS.
- Zastosowanie opracowanej metody oceny efektywności silnika do kreowania nowych biopaliw i oceny nowych konstrukcji silnika (Downsizing, nowe rodzaje zasilania).
- Zastosowanie metody do optymalizacji sterowania silnikami i zespołami napędowymi, z wykorzystaniem sztucznej inteligencji – sterowania silnikiem i użyciem Fuzzy logic – sterowania zespołami napędowymi (napędy hybrydowe).
- Dokonanie szerokich badań weryfikacyjnych uzyskanych rezultatów w pracy w ramach nadzorowanej eksploatacji naturalnej pojazdów.

Bibliografia

- [1] Abrysowska-Tymińska E., Chwaja W., Kozłowski J., 1993, *Techniczne i ekonomiczne aspekty stosowana paliw roślinnych jako substytutu oleju napędowego*, Paliwa alternatywne do silników spalinowych – materiały na konferencję naukową, IBMER, Warszawa.
- [2] Adamczyk A., 1991, *Opracowanie i wdrożenie technologii otrzymywania substytutu oleju napędowego z surowców roślinnych*, Politechnika Radomska, Radom.
- [3] Adiwari K., Batts B., 1994, *The effect of aliphatic olefins on the stability of diesel fuel*, 5th International Conference on Stability and Handling of Liquid Fuels. Rotterdam, Netherlands 3–7 October.
- [4] Alptekin E., Canakci M., 2009, *Characterization of the key fuel properties of methyl ester–diesel fuel blends*, Fuel 88: 75–80.
- [5] Ambrozik A., 2006, *Wybrane zagadnienia procesów cieplnych w tłokowych silnikach spalinowych*, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce.
- [6] Ambrozik A., Kruczyński S., Jakóbiec J., Orliński S., 2006, *Wpływ zasilania silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym paliwem mineralnym i roślinnym na kąt wyprzedzenia wtrysku i charakterystyki wydzielania ciepła*, 32 International Scientific Congress on Powertrain and Transport Means European, KONGRES, Warsaw–Lublin–Nałęczów, Poland.
- [7] ASTM D 2500: Standard Test Method for Cloud Point of Petroleum Products.
- [8] ASTM D 8600: Standard Test Method for Distillation of Petroleum Products at Atmospheric Pressure.
- [9] Baczewski K., Kałdoński T., 2004, *Paliwa do silników o zapłonie samoczynnym*, WKŁ, Warszawa.
- [10] Bajer J., Janecki J., 2002, *Zmiany chemiczne podczas utleniania oleju rzepakowego*, Problemy Eksploatacji nr 3.
- [11] Bang-Quan He, Jian-Xin Wang, Ji-Ming Hao, Xiao-Guang Yan, Jian-Hua Xiao, 2003, *A study on emission characteristics of an EFI engine with ethanol blended gasoline fuels*, Atmospheric Environment 37(7): 949–957.
- [12] Bang-Quan He, Shi-Jin Shuai, Jian-Xin Wang, Hong He, 2003, *The effect of ethanol blended diesel fuels on emissions from a diesel engine*, Atmospheric Environment, 37(35): 4965–4971.
- [13] Barabás I., Todoruț A., Băldean D., 2010, *Performance and emission characteristics of an CI engine fueled with diesel–biodiesel–bioethanol blends*, Fuel 89(12): 3827–3832.
- [14] Bernhardt M., Kruczyński S., 1982, *Praca silnika w warunkach nieustalonych*, część I–VII, Technika Motoryzacyjna, 2–7.
- [15] Bocheński C.I., 2003, *BIODIESEL paliwo rolnicze*, Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- [16] Bocheński C.I., 1999, *Nowe możliwości zmniejszenia zagrożenia środowiska naturalnego w czasie eksploatacji silników wysokoprężnych*, II Konferencja Naukowo-Techniczna: Pojazd a środowisko, Jedlnia–Letnisko.
- [17] Bondioli P., Gasparoli A., Della Bella L., Tagliabue S., Guido Toso G., 2003, *Biodiesel stability under commercial storage conditions over one year*, European Journal of Lipid Science and Technology, 105(12): 735–741.

- [18] Borges M.E., Díaz L., Gavín J., Brito A., 2011, *Estimation of the content of fatty acid methyl esters (FAME) in biodiesel samples from dynamic viscosity measurements*, Fuel Processing Technology, 92(3): 597–599.
- [19] BP Austria Limited – Fuels news – Long term storage of Diesel ADF 1402, GEN 506, 14.02.2002.
- [20] Canoira L., García Galeán J., Alcántara R., Lapuerta M., García-Contreras R., 2010, *Fatty acid methyl esters (FAMES) from castor oil: Production process assessment and synergistic effects in its properties*, Renewable Energy, 35(1): 208–217.
- [21] Chavanne G., 1937, *Procedure for the transformation of vegetable oils for their uses as fuels*, Patent 422.877.
- [22] Chuck Ch.J., Bannister Ch.D., Jenkins R.W., Lowe J.P., Davidson M.G., 2012, *A comparison of analytical techniques and the products formed during the decomposition of biodiesel under accelerated conditions*, Fuel 96: 426–433.
- [23] Cisek J., Zabłocki M., 1993, *Analiza wpływu oleju rzepakowego na działanie aparatury wtryskowej silnika wysokoprężnego*, Konferencja IBMER „Paliwa alternatywne do silników spalinowych”. Warszawa.
- [24] Dattatray Bapu Hulwan, Satishchandra V. Joshi, 2011, *Performance, emission and combustion characteristic of a multicylinder DI diesel engine running on diesel–ethanol–biodiesel blends of high ethanol content*, Applied Energy 88: 5042–5055.
- [25] De Jong E., Vijlbrief T., Hijkoop R., Gruter G.J., van der Waal J.C., 2012, *Promising results with YXY Diesel components in an ESC test cycle using a PACCAR Diesel engine*, Biomass and Bioenergy 36: 151–159.
- [26] Demirbas A., 2003, *Biodiesel fuels from vegetable oils via catalytic and non-catalytic supercritical alcohol transesterifications and other methods: a survey*, Energy Conversion and Management 44: 2093–2109.
- [27] Demirbas A., 2009, *Progress and recent trends in biodiesel fuels*, Energy Conversion and Management 50: 14–34.
- [28] Dz.U. z dnia 17.10.2005 r., Protokół z Kioto do Ramowej Konwencji Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu.
- [29] Dz.U. 2006 nr 169 poz. 1199, Ustawa z dnia 25 sierpnia 2006 r. o biokomponentach i paliwach ciekłych.
- [30] Dz.U. 2006 nr 169 poz. 1200, Ustawa z dnia 25 sierpnia 2006 r. o systemie monitorowania i kontrolowania jakości paliw.
- [31] Dzieniszewski G., 2008, *Wybrane problemy stosowania biopaliw do zasilania silników o zapłonie samoczynnym*, Inżynieria rolnicza 10/108.
- [32] Egeback E-K., Pettersson E., 1996, *Research and development of a compression ignition engine fuelled with ethanol*, 11th International Symposium on Alcohol Fuels, S. Africa, 14–17 April.
- [33] Ejim C.E., Fleck B.A., Amirfazli A., 2007, *Analytical study for atomization of biodiesels and their blends in a typical injector: Surface tension and viscosity effects*, Fuel 86(10–11): 1534–1544.
- [34] Elsbett L., 1986, *The Elsbett concept for diesel engines*, Manuscript for KOSS. Wrocław, September 24–29.
- [35] Frąckowiak P., 2002, *Technika i technologia produkcji na małą skalę biopaliwa rzepakowego do silników o zapłonie samoczynnym*, 5th International Scientific Conference on Combustion Engines KONSSPAL, Wrocław.
- [36] Gardyński L., Kiernicki Z., 2002, *Wybrane właściwości smarne mieszanin oleju napędowego i rzepakowego*, 5th International Scientific Conference on Combustion Engines KONSSPAL, Tadeusz Kościuszko Military Academy, Wrocław.
- [37] Gardyński L., Kiernicki Z., Jakóbiec J., 2002, *Wpływ stopnia mieszanin oleju napędowego i rzepakowego oraz lekkich olejów opałowych na zużycie elementów aparatury wtryskowej*, 28th International Scientific Conference on Combustion Engines KONES, Politechnika Gdańska, Jurata–Gdynia.

- [38] Gnutek Z., 2002, *Biomasa jako odnawialne źródło energii i ekologiczne paliwo przyszłości. Paliwa ekologiczne w Polsce i na świecie*, III Sympozjum Petrochemia – Blachownia, Kędzierzyn Koźle.
- [39] Gnutek Z. i in. 2010, *Badania niestechiometrycznego spalania mieszanek wzbogaconych w tlen w silnikach ciepłych o zapłonie iskrowym*, XIV Sympozjum Wymiany Ciepła i Masy SWCiM, Wydawnictwo ZUT, Szczecin.
- [40] Górski K., Olszewski W., Lotko W., 2008, *Alkohole i etery jako paliwa dla silników o zapłonie samoczynnym*, Czasopismo Techniczne, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków.
- [41] Górecka R., 1996, *Teoria i technika eksperymentu*, Politechnika Krakowska, Kraków.
- [42] Gunter H. Hohl, 1995, *Rape Oil Methyl Ester (RME) and Used Cooking Oil Methyl Ester (UOME) as Alternative Fuels*, Proceedings of the 1995 SAE Alternative Fuels Conference, USA.
- [43] Gutsche B., 1997, *Technologie der Methylesterherstellung – Anwendung für die Biodieselproduktion*, Lipid – Fett 99 (12).
- [44] GVSET News Staff., 2012, *Ground vehicle systems engineering and technology news*, TARDEC, USA.
- [45] Hansen A. C., Harpe E. R., Dilmitis MM. P., 1996, *Ignition-improved ethanol as a fuel for diesel engines*, 11th International Symposium on Alcohol Fuels, South Africa, 14–17 April.
- [46] Hemmerlein N., Korte V., Richter H., Schroeder G., 1991, *Performance exhaust emissions and durability of modern diesel engines running on rapeseed oil*, SEA Technical Papers Series, nr 91, 0848.
- [47] Hodl P., Rodo-Cima M.T., Schindlbauer H., Simkowsky N., Tuechler W., 1997, *Oxidation stability of fatty acid methyl esters used as diesel fuel substitute*, 6th International Conference on Stability and Handling of Liquid Fuels, Vancouver, 12–17 October, 831–840.
- [48] Hoekmana S.K., Brocha A., Robbinsa C., Cenicerosa E., Natarajanb M., 2012, *Review of biodiesel composition, properties, and specifications*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 16: 143–169.
- [49] Idzior M., Merkisz J., 1993, *Olej rzepakowy jako ekologiczno-energetyczna alternatywa paliw do silników wysokoprężnych*, Materiały konferencyjne „Paliwa alternatywne do silników spalinyowych”, Warszawa.
- [50] Ivanov S.K., 2000, *Photoeffects during production, transportation, storage, analysis and exploitation of liquid fuels*, 7th International Conference on Stability and Handling Oil, Liquid Fuels, Linz, Austria.
- [51] Jakóbiec J., 2003, *Estry metylowe kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego jako komponent olejów napędowych*, II Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna BIOPALIWA 2003, Uprawy – technologia – zastosowanie, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Warszawa.
- [52] Jakóbiec J., Kruczyński D., 2004, *Wpływ zasilania silnika AD3.152 różnymi paliwami na parametry i wskaźniki cyklu pracy*, 30th International Scientific Conference on International Engines – KONES, Kraków–Zakopane.
- [53] Jilin Lei, Lizhong Shen, Yuhua Bi, Hong Chen, 2012, *A novel emulsifier for ethanol–diesel blends and its effect on performance and emissions of diesel engine*, Fuel 93: 305–311.
- [54] Kado N.Y., Okamoto R.A., Kuzmicky P.A., 1996, *Chemical and Bioassay Analyses of Diesel and Biodiesel Particulate Matter: Pilot Study*, Final report to the Montana State Department of Environmental Quality.
- [55] Kasprzak W., Łysik B., 1998, *Analiza wymiarowa. Algorytmiczne procedury obsługi eksperymentu*, WNT, Warszawa.
- [56] Keera S.T., El Sabagh S.M., Taman A.R., 2011, *Transesterification of vegetable oil to biodiesel fuel using alkaline catalyst*, Fuel 90: 42–47.
- [57] Klius O., Wasiliew I., Tyrłbwał S., 2002, *Wliwanie dodatków rastytelnowo masła na pokazateli dizelia i topliwnaj aparatury*, Sb. naucz. trudow. KGTU, Kaliningrad.
- [58] Knothe G., Steidley K. R., 2005, *Kinematic viscosity of biodiesel fuel components and related compounds. Influence of compound structure and comparison to petrodiesel fuel components*, Fuel 84: 1059–1065.

- [59] Koenig J.W., 1997, *Biodiesel an Environmental Blessing or a biodegradation Headache for Long Term Storage*, 6th International Conference on Stability and Handling of Liquid Fuels, Vancouver, Canada, 12–17 October, 841–849.
- [60] Kolanek C., Reksa M., 2003, *Zależność wybranych parametrów pracy i spalin od składu biopaliwa dla silników o ZS*, Biopaliwa: Uprawy – technologia – zastosowanie, SGGW, Warszawa.
- [61] Kostin A.K., Pugaczew B.P., Kociniec J.J., 1989, *Rabota diezjelji v usloviyakh ekspluatatsii*, Mashinostroenie, Leningrad.
- [62] Kouame S., 2011, *Comparative characterization of Jatropha, soybean and commercial biodiesel*, Journal of Fuel Chemistry and Technology 39(4).
- [63] Kowalewicz A., 2000, *Podstawy procesów spalania*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- [64] Kowalewicz A., 1990, *Systemy zasilania szybkoobrotowych silników spalinowych*, WKŁ, Warszawa.
- [65] Kozłowski S., 1997, *W drodze do ekorozwoju*, PWN, Warszawa.
- [66] Kruczyński S., Jakóbiec J., Orliński S., 2006, *Wpływ zasilania silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym paliwem mineralnym i roślinnym na kąt wyprzedzenia wtrysku i charakterystyki wydzielenia ciepła*, 32th International Scientific Congress on Powertrain and Transport Means European KONES, Warszawa–Lublin–Nałęczów.
- [67] Kruszewski H., Lejda K., Szlachta Z., 2004, *Analiza parametrów strugi paliw o różnych lepkościach rozpylonych przez wtryskiwacz klasyczny i z obrotowo-zwrotnym ruchem iglicy*, Silniki Spalinowe – Combustion Engines, nr 2.
- [68] Kukielka L., 2002, *Podstawy badań inżynierskich*, PWN, Warszawa.
- [69] Kulczyk J., Nowakowski T., Restel F., 2012, *Application of phasedmission model to analyze reliability of combined rail water transport system*, 11th International Probabilite saifety Assesment and Management Conference and Reliability Conference, PSAM 11 & ESREL, Finland, Helsinki.
- [70] Lei Zhu, Cheung C.S., Zhang W.G., Zhen Huang, 2011, *Combustion, performance and emission characteristics of a DI diesel engine fueled with ethanol–biodiesel blends*, Fuel 90: 1743–1750.
- [71] Lohmann G., Jungbluhl H., Bailey G., 2000, *Stability improvement of light healing oil*, International Conference on Stability and Handling of Liquid Fuels, Graz, Austria.
- [72] Lotko W., 1997, *Zasilanie silników wysokoprężnych paliwami węglowodorowymi i roślinnymi*, WNT, Warszawa.
- [73] Lotko W., Longwic R., 2004, *Dynamiczne własności pracy silnika o zapłonie samoczynnym zasilanego nowymi rodzajami paliw węglowodorowych*, Politechnika Radomska, Radom.
- [74] Lotko W., Luft S., 1995, *Wpływ paliwa roślinnego na podstawowe osiągi silników*, Auto Technika Motoryzacyjna, nr 2.
- [75] Lotko W., Luft S., Orliński S., 1994, *Wpływ zastosowania mieszanin oleju napędowego z olejami roślinnymi na wybrane parametry eksploatacyjne silnika 4C90*, KONMOT, Kraków.
- [76] Luft S., 1997, *Studium silnika o zapłonie samoczynnym zasilanego alkoholem metylowym*, Politechnika Radomska, Radom.
- [77] Majzner M., Kajdas C., Okulicz W., 1998, *Problem smarności olejów napędowych nowej generacji*, Trybologia: tarcie, zużycie, smarowanie.
- [78] Łukasik Z., 1995, *Estry metylowe kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego. Odporność na utlenianie i skuteczność działania dodatków przeciwutleniających*, Biuletyn ITN, nr 4.
- [79] Menard B. i in. 1989, Rapsol als Motorenkraftstoff. Mineralotechnik.
- [80] Merksiz J., 1999, *Ekologiczne problemy silników spalinowych*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań.
- [81] Merksiz J., Pielecha I., 2004, *Alternatywne paliwa i układy napędowe pojazdów*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań.
- [82] Merksiz J., Piekarski W., Słowik T., 2006, *Motoryzacyjne zanieczyszczenia środowiska*, Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie, Lublin.

- [83] Ministerstwo Gospodarki 2007, *Wieloletni program promocji biopaliw lub innych paliw odnawialnych na lata 2008–2014*, Warszawa.
- [84] Morón-Villarreyes J.A., Soldi C., de Amorim A.M., Pizzolatti M.G., de Mendonça Jr. A.P., D'Oca M.G.M., 2007, *Diesel/biodiesel proportion for by-compression ignition engines*, Fuel 86, (12–13): 1977–1982.
- [85] Murayama T., Oh Y., Miyamoto N., Chikahisa T., Talagi N., Itow K., 1984, *Low Carbon Flower Buildup, Low Smoke and Effecient Diesel Operation with Vegetable Oils by Conversion to Mono – Esters and Blending with Diesel Oil or Alcohols*, SAE Transactions, nr 84.
- [86] Mysłowski J., 1995, *Proekologiczne kierunki rozwoju silników o zapłonie samoczynnym*, Auto Technika Motoryzacyjna, nr 2.
- [87] Mysłowski J., Kołtun J., 2000, *Elastyczność tłokowych silników spalinowych*, WNT, Warszawa.
- [88] Olchowik W., 1999, *Metrologiczne aspekty diagnozowania silników o zapłonie samoczynnym na podstawie wartości chwilowej momentu obrotowego*, WAT, Warszawa.
- [89] Olchowik W., Struś M., 2003, *Metrologiczne aspekty badań silnika spalinowego o ZS zasilanego paliwami alternatywnymi w stanach nieustalonych. Paliwa roślinne do silników o ZS i eksploatacja zespołów napędowych – wybrane problemy*, WSOWL, Wrocław.
- [90] Olchowik W., Struś M., 2011, *Analiza wpływu składu chemicznego biopaliwa na właściwości eksploatacyjne silnika*, Biuletyn WAT, Vol. LX 1(661).
- [91] Pawelski Z., Pałczyński T., 2008, *Badania drogowe pojazdów w inteligentnych systemach transportowych z użyciem technologii INS i GPS*, Czasopismo Techniczne, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków.
- [92] Pagowski Z., Wiślicki Z., Krzyżanowski R., Zawadzki A., 1994, *Paliwo rzepakowe – alternatywy strategiczne*, Materiały II Sympozjum „Silniki spalinowe w zastosowaniach wojskowych”, Warszawa.
- [93] Pagowski Z., Wiślicki Z., Krzyżanowski R., Zdrodowska B., 1998, *Badania paliwa rzepakowego na samochodzie Polonez Caro Diesel*, Zbiór prac IV Sympozjum Ekodiesel 98.
- [94] Peng Ch. Y., Yang H.H., Lan Ch. H., Chien Sh., 2008, *Effects of the biodiesel blend fuel on aldehyde emissions from diesel engine exhaust*, Atmospheric Environment 42: 906–915.
- [95] Peterson C.L., 1997, *Commercialization of Biodiesel: Environmental and Health Benefits*, Proceedings of a biodiesel conference, National Center for Advanced Transportation Technology, University of Idaho.
- [96] Piekarski W. i in., 2004, *Rzepak z pola do baku*, PWRiL, Warszawa.
- [97] Piętaś A., 1998, *Diagnozowanie silników o ZS na podstawie przebiegów procesu przejściowego*, Politechnika Poznańska, Poznań.
- [98] Piętaś A., Struś M., Trawiński G., 2006, *The study of exploitation properties of municipal transport services powered by fuels containing ethylbiocomponents*, Journal of Kones Powertrain and Transport, Vol. 13, No. 3.
- [99] Pisarek M., 2009, *Polski rynek biopaliw płynnych – szanse i zagrożenia*, Polski Rynek Biopaliw – Debata, Krzyżowa.
- [100] Polański Z., 1984, *Planowanie doświadczeń w technice*, PWN, Warszawa.
- [101] PN-EN ISO 12156, 2001, *Oleje napędowe, Ocena smarności z użyciem aparatu o ruchu posuwisto-zwrotnym wysokiej częstotliwości (HFRR)*.
- [102] Prankl H., Schindlbauer H., 1999, *Oxidation stability of fatty acid methyl esters*, 10th European Conference on Biomass for Energy and Industry, Wurzburg, Germany.
- [103] Radkowski S. i in., 2006, *Wieloaspektowa analiza stosowania paliw alternatywnych w Polsce ze szczególnym uwzględnieniem biopaliw*, Politechnika Warszawska.
- [104] Ramirez-Verduzco L. P. i in., 2012, *Predicting cetane number, kinematic viscosity, density and higher heating value of biodiesel from its fatty acid methyl ester composition*, Fuel 91: 102–111.

- [105] Rand M., Peters J., Schroer B., 1993, *Running Cars on Vegetable Oils*, Chemlech.
- [106] Randazzo M. L., Sodr  J. R., 2011, *Exhaust emissions from a diesel powered vehicle fuelled by soybean biodiesel blends (B3–B20) with ethanol as an additive (B20E2–B20E5)*, Fuel 90: 98–103.
- [107] Rawski F., 1999, *Układy zasilania oraz sterowania procesami roboczymi w silnikach spalinowych*, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa.
- [108] Reglitzky A.A., Schneider H., Krumm H., 1992, *Chancen zur Emissionsminderung durch konventionelle und alternative Kraftstoffe*, VDI Berichte, nr 1020.
- [109] Reksa M., 1999, *Paliwa pochodzenia roślinnego – alternatywa czy konieczno c*, Proceedings of the 6 Polish–Danish Workshop on Biomass for Energy, Starbienino, Poland, December, Gdańsk.
- [110] Ritz G.P., 2003, *Biodiesel lub FAME (Fatty Acid Methyl Ester – Estry Metylowe Kwasów Tluszczowych): Oznaczanie zawartości estrów w oleju napędowym przy użyciu spektrofotometrii w zakresie średniej podczerwieni*, Paliwa, Oleje Smary w Eksploatacji, nr 110.
- [111] Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 15 czerwca 2007 roku w sprawie Narodowych Celów Wskaźnikowych na lata 2008–2013.
- [112] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 18 października 1984 w sprawie warunków technicznych i badań pojazdów (Dz.U. 116 z 1994r. poz. 557).
- [113] Satg  de Caro P. i in., 2001, *Interest of combining an additive with diesel–ethanol blends for use in diesel engines*, Fuel 80(4): 565–574.
- [114] Schmidt A., Gaupp K., 1934, *Pflanzenole als Dieselmotortoffe*, Tropenpflanzer 37, Breslau.
- [115] Sharafutdinov I. i in., 2012, *Cold flow properties and oxidation stability of blends of near zero sulfur diesel from Ural crude oil and FAME from different origin*, Fuel 96: 556–567.
- [116] Shi X., Yu Y., He H., Shuai S., Dong H., Li R., 2008, *Combination of biodiesel-ethanol-diesel fuel blend and SCR catalyst assembly to reduce emissions from a heavy-duty diesel engine*, Journal of Environmental Sciences 20(2): 177–18.
- [117] Sitnik L., 2005, *Strategia wdrażania ekopaliw*, Journal of KONES, Vol. 12.
- [118] Sitnik L., 2008, *New european biofuels for diesel engines*, Journal of KONES, Vol. 15.
- [119] Sitnik L., 2009, *New ecofuel for diesel engines*, Journal of Polish CIMAC, Vol. 4.
- [120] Sitnik L., 2004, *Ekopaliwa silnikowe*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- [121] Soriano N.U. JR., Migo V.P., Matsamura M., 2006, *Ozonized vegetable oil as pour point depressant for neat biodiesel*, Fuel 85.
- [122] Stavinoha L.L., Alfaro E.S., Tebbe J.M., Villahermosa L.A., 2003, *Biodiesel and Biodiesel Blend Properties Related to Epaot of Use*, IASH, The 8th International Conference on Stability and Handling of Liquid Fuels, Steamboat Springs, Colorado.
- [123] Stelmasiak Z., 2011, *Sterowanie spalaniem w dwupaliwowym silniku ZS przez podział dawki inicjującej*, Silniki Spalinowe, nr 3(146).
- [124] Stru  M., 2002, *Charakterystyki silnika spalinowego o ZS zasilanego paliwami alternatywnymi w procesach przejściowych*, 5th International Scientific Conference on Combustion Engines, KONSSPAL, WSO im. T. Kościuszki, Wrocław.
- [125] Struś M., 2005, *Efektywno c zastosowania biopaliw i biokomponentów do tlukowych silników spalinowych*, KONES, Polanica Zdrój.
- [126] Struś M., 2012, *Nowy rodzaj biopaliwa z odtwarzanymi całkowicie etylowymi komponentami w zasilaniu silników pojazdów flotowych*, Grant MNiSzW nr 509571939, kierownik projektu, Politechnika Wrocławska.
- [127] Struś M., 2003, *Paliwa roślinne do silników o ZS i eksploatacja zespołów napędowych – wybrane problemy*, Wyższa Szkoła Oficerska Wojsk Lądowych, Wrocław.
- [128] Struś M., 2007, *Studium o wplywie paliw odnawialnych na parametry eksploatacyjne silników o zapłonie samoczynnym*, kierownik projektu, Grant MNiSzW nr 50203431/3871, Politechnika Wrocławska.

- [129] Struś M., 2011, *The biofuel Biodiesel with ethyl components in feeding diesel engines*, Silniki Spalinowe R. 50, nr 3.
- [130] Struś M. i in., 2001, *Efektywność pojazdów wojskowych i agregatów prądotwórczych w aspekcie stosowania paliw OXYDIESEL i katalizatorów spalin oraz zmian konstrukcyjnych*, WSOWL Wrocław (kierownik projektu, praca niepublikowana).
- [131] Struś M. i in., 2003, *Efektywność pojazdów wojskowych i agregatów prądotwórczych w aspekcie stosowania paliw BIOXDIESEL i katalizatorów spalin oraz zmian konstrukcyjnych*, WSOWL Wrocław (kierownik projektu, praca niepublikowana).
- [132] Struś M. i in., 1999, *Ekologizacja wozów bojowych i samochodów przez wykorzystanie alternatywnych paliw i modernizację układów silników*, WSO im. T. Kościuszki. Konkurs „Wojsko chroni środowisko naturalne”, MON, MOŚ ZNiL, Warszawa.
- [133] Struś M. i in., 2011, *Mobilna wytwórnia biokomponentów i biopaliw do silników spalinowych*, Patent nr 207660.
- [134] Struś M. i in., 2004, *Tribologiczne i logistyczne aspekty stosowania mieszanin składników organicznych i mineralnych do zasilania pojazdów i maszyn wojskowych*, WSOWL Wrocław (kierownik projektu, praca niepublikowana).
- [135] Struś M. i in., 1998, *Ocena przecieków par precyzyjnych pomp wtryskowych silników wielkopojemnościowych zasilanych RME*, SYMROZ, Szczecin.
- [136] Struś M., Kieźel L., 2007, *Proekologiczne paliwo do silników o zapłonie samoczynnym*, Patent nr 193339.
- [137] Struś M., Kowalski K., 1998, *Ocena przecieków par precyzyjnych pomp wtryskowych silników wielkopojemnościowych zasilanych RME*, SYMROZ, Szczecin.
- [138] Struś M., 2011, *Reduction of toxic emissions by using three-component biofuel*, Polish Journal of Environmental Studies, Vol. 20.
- [139] Su Han Park, Cha J., Hyung Jun Kim, Chang Sik Lee, 2012, *Effect of early injection strategy on spray atomization and emission reduction characteristics in bioethanol blended diesel fueled engine*, Energy 39: 375–387.
- [140] Szlachta Z., 1998, *Cold Startability of the Diesel Engine Fuelled with Rape Fuels*. Polish Academy of Sciences – Cracow Branch, Edit. Commission of Motorization, Cracow, Vol. 13, Monograph 1, 1–67.
- [141] Szlachta Z., 2002, *Zasilanie silników wysokoprężnych paliwami rzepakowymi*, WKŁ., Warszawa.
- [142] Szlachta Z., Dudek S., 2003, *Zasilanie biopaliwami silników pojazdów rolniczych*, Motrol-Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa.
- [143] Thomas T.P., Birney D.M., Auld D.L., 2012, *Viscosity reduction of castor oil esters by the addition of diesel, safflower oil esters and additives*, Industrial Crops and Products 36: 267–270.
- [144] Torres-Jimenez E., Dorado M., Kegl B., 2011, *Experimental investigation on injection characteristics of bioethanol–diesel fuel and bioethanol–biodiesel blends*, Fuel 90: 1968–1979.
- [145] Tys J., 2009, *Wykorzystanie surowców rolniczych w energetyce*, Wieś Jutra, Warszawa.
- [146] Tys J., Piekarski W., Jackowska J., Kaczor A., Starobrat P., 2003, *Technologiczne i ekonomiczne uwarunkowania produkcji paliw z rzepaku*, Acta Agrophysica 99, Lublin.
- [147] Tziourtzioumis D., Stamatelos A., 2012, *Effects of a 70% biodiesel blend on the fuel injection system operation during steady-state and transient performance of a common rail diesel engine*, Energy Conversion and Management.
- [148] Vellguth G., 1983, *Performance of vegetable oils and their monoesters as fuels for diesel engines*, SAE Transactions 83: 1358.
- [149] Vruk M.A., Viksman A.S., Levin G.Ch., 1981, *Rabota dizelja v nestacionarnych uslovijach*, Izd. Mašinostroenie, Leningrad.

- [150] Weber de Menezes E., da Silva R., Catalunã R., Ortega R. J.C., 2006, *Effect of ethers and ether/ethanol additives on the physicochemical properties of diesel fuel and on engine tests*, Fuel 85: 815–822.
- [151] Williamson A.M., Badr O., 1998, *Assessing the Viability of using Rape Methyl Ester (RME) as an Alternative to Mineral Diesel Fuel for Powering Road Vehicles in the UK*, Applied Energy 59 (2–3): 187–214.
- [152] Wituszyński K., 1996, *Prędkość kątowna i moment obrotowy jako nośniki informacji o stanie silnika spalinowego: studium teoretyczno-eksperymentalne*, Lubelskie Towarzystwo Naukowe, Lublin.
- [153] Xiaoming Zhao, Meifeng Ren, Zhigang Liu, 2005, *Critical solubility of dimethyl ether (DME)Cdiesel fuel and dimethyl carbonate (DMC)Cdiesel fuel*, Fuel 84: 2380–2383.
- [154] Yinga W., Longbao Z., Hewu W., 2006, *Diesel emission improvements by the use of oxygenated DME/diesel blend fuels*, Atmospheric Environment 40: 2313–2320.
- [155] Youn I.M., Su Han Park, Hyun Gu Roh, Chang Sik Lee, 2011, *Investigation on the fuel spray and emission reduction characteristics for dimethyl ether (DME) fueled multi-cylinder diesel engine with common-rail injection system*, Fuel Processing Technology 92: 1280–1287.
- [156] Yufu Xu, Qiongjie Wang, Xianguo Hua, Chuan Li, Xifeng Zhu, 2010, *Characterization of the lubricity of bio-oil/diesel fuel blends by high frequency reciprocating test rig*, Energy 35: 283–287.
- [157] Zabłocki M., Sowa K., Sędzik M., 1991, *Analiza wpływu oleju rzepakowego na działanie aparatury wtryskowej silnika wysokoprężnego*, Sprawozdanie Politechniki Krakowskiej nr 469/IPSiSS/91.

Assessment of the impact biofuels on selected exploitation properties of diesel engines

The paper presents the results of research on the impact of a new generation of fuels (mainly 3-componentuels) on some features of the combustion-ignition (CI) engine such as effectiveness, sustainability, emission of outlet gases, motor starting capability at low ambient temperatures.

Original research results explain the important problems of the theory and technology of bio-components and motor biofuels, including a 3-component BIOXDIESEL biofuel developed by the author.

A significant part of the thesis concerns the assessment of the internal combustion engines working at non-stationary states and fed by different fuels, especially the new alcohol-esters-hydrocarbons developed by the author mixtures.

A new method of such assessment has been worked out as an attempt to define and describe the identification of internal combustion engines (CI) by means of a cyclo-dyne, i.e., a graphic characteristic showing the effects of dynamic change in the combustion cycle, a significant feature of which can be the center of gravity (for coordinates M_o, n).

It was shown that the stochastic nature of the dynamic changes of engine parameters results in that the center of gravity is not a point but a flat figure, an ellipse with axes whose lengths correspond to the standard deviation of the statistical density distribution of two-dimensional variable.

The center of gravity may be indicative of a number of features of the motor, determined for example by fuel properties. The results of these studies hare been confirmed and verified in a broad range of variability of the fuel.

It has been shown that despite significant differences in the properties of the components, it is possible to compose them in such a way that the resulting fluid properties should not differ from those of the standard fuel.

The paper presents as the author's own results of testing the engine start-up at low ambient temperatures, the durability of selected elements of the fuel system, change of the properties of lubricating oil and especially toxic exhaust emissions. It has been

shown that the use of a BIOXDIESEL mixture should not lead to a deterioration of engine performance and durability with toxic emissions being significant by reduced (in some cases) at the same time.

The important result of the research is applicability of the new 3-component bio-fuel (patent) and use of the mobile agro-refinery for its production (patent).