



Politechnika  
Częstochowska



Wydział Inżynierii  
Mechanicznej i Informatyki

## PRACA DOKTORSKA

### **Badanie przebiegu tworzenia mieszanki palnej za pomocą wtrysku kondensatu pirolitycznego w komorze o stałej objętości**

*Analysis of a combustible mixture formation by the  
injection of pyrolysis oil in a constant volume combustion  
chamber*

Imię Nazwisko: mgr inż. Magdalena Szwaja

Promotor pracy:

dr hab. inż. Arkadiusz Szymanek, prof. uczelni

Praca przyjęta dnia:

Podpis promotora:

*Częstochowa, 2023 r.*



Składam wyrazy podziękowania za opiekę naukową i trud włożony w moją edukację dla profesorów:

Jeffrey D. Naber,  
David Shonnard,  
Ezra Bar-Ziv,  
Arkadiusz Szymanek.

Magdalena Szwaja



## Spis treści

Wykaz występujących oznaczeń .....	7
1. Wstęp .....	9
1.1. Uzasadnienie podjęcia tematu .....	9
1.2. Aspekt ekologiczny i ekonomiczny gospodarki odpadami o potencjale energetycznym .....	9
1.3. Aspekt prawny utylizacji odpadów .....	10
1.4. Aspekt techniczny i technologiczny energetycznej utylizacji odpadów .....	11
2. Stan wiedzy .....	13
3. Cel, zakres i tezy pracy .....	27
3.1. Cel pracy .....	27
3.2. Tezy pracy .....	28
3.3. Zakres pracy .....	28
4. Metodyka badawcza .....	31
4.1. Podstawy pracy badawczej .....	31
4.2. Stanowisko Laser Particle Sizer - Malvern-Spraytec .....	33
4.3. Komora o stałej objętości .....	37
5. Wyniki badań eksperymentalnych i ich analiza .....	59
5.1. Matryca badań .....	59
5.2. Wyniki badań oleju pirolitycznego .....	59
5.3. Analiza wtrysku w warunkach otoczenia .....	62
5.4. Analiza wtrysku i spalania w podwyższonym ciśnieniu i temperaturze .....	72
5.4. Badanie zasięgu i prędkości rozpylania w podwyższonym ciśnieniu i temperaturze .....	87
5.6. Analiza błędów .....	99
6. Wnioski .....	103
Streszczenie pracy doktorskiej .....	106
Summary .....	109
Wykaz literatury .....	112



## Wykaz występujących oznaczeń

Wielkość	Jednostka	Opis
$\delta / \delta x$		pochodna cząstkowa
$\kappa$	-	stosunek ciepł właściwych $c_p$ do $c_v$
$\mu$	Pa·s	lepkość dynamiczna
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	gęstość
$\sigma$	N/m	napięcie powierzchniowe
$\Delta$		błąd bezwzględny, zmiana wielkości w skali makro
$C_p$	J/(mol·K) J/(kg·K)	ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu
$C_v$	J/(mol·K) J/(kg·K)	ciepło właściwe przy stałej objętości
$dQ$	J	elementarna zmiana ciepła, zmiana w bilansie ciepła w okresie 10 $\mu$ s
$dQ/dt$	J/s, MJ/s	szybkość wydzielania ciepła
$dp$	Pa	elementarna zmiana ciśnienia, zmiana ciśnienia w okresie 10 $\mu$ s
$dT$	K, °C	
$m$	mg, g, kg	masa
$n$	-	liczba moli, liczba pomiarów
$p$	Pa, bar	ciśnienie
$t$	s	
$t_0$	s	chwila początku wtrysku paliwa
$t_2$	s	chwila po wydzieleniu 2% ciepła ze spalania paliwa
$t_{10}$	s	chwila po wydzieleniu 10% ciepła ze spalania paliwa
$t_{50}$	s	chwila po wydzieleniu 50% ciepła ze spalania paliwa
$t_{90}$	s	chwila po wydzieleniu 90% ciepła ze spalania paliwa
$t_{0-2}$	s	interwał czasowy wydzielenia 2% ciepła od chwili początku wtrysku do chwili wydzielenia 2% ciepła
$t_{0-10}$	s	interwał czasowy wydzielenia 10% ciepła od chwili początku wtrysku do chwili wydzielenia 10% ciepła
$t_{0-90}$	s	interwał czasowy wydzielenia 90% ciepła od chwili początku wtrysku do chwili wydzielenia 90% ciepła
$t_{10-90}$	s	interwał czasowy wydzielenia 80% ciepła od chwili wydzielenia 10% do chwili wydzielenia 90% ciepła
$v$	m/s	prędkość
$A$	m <sup>2</sup>	pole powierzchni
$D$	m, mm	średnica, wymiar charakterystyczny
$MW$	g/mol, kg/kmol	masa molowa
$Oh$	-	liczba Ohnesorge
$Q$	J, kJ, MJ	ciepło
$R_u$	J/(mol·K)	8,3145 - uniwersalna stała gazowa
$S$		odchylenie standardowe
$SMD$	-	Sauter Mean Diameter
$T$	K, °C	temperatura
$U$	J/mol	energia wewnętrzna

V	J/kg	
We	m <sup>3</sup>	objętość
	-	liczba Webera

### **Indeks dolny**

a		powietrze
c		ciecz
dyf		dyfuzyjny
f		paliwo
g		gaz
i		i-ty element
kin		kinetyczny
max		maksimum
min		minimum
norm	-	znormalizowany do przedziału <0,1>
sr		średni
St		dotyczy rozkładu t-Studenta

W pracy dla pewnych zjawisk i wielkości fizycznych, aby uniknąć niejednoznaczności w tłumaczeniu, przyjęto używać nazewnictwa powszechnie stosowanego w literaturze światowej pisanej w języku angielskim jak następuje:

- bag breakup* – rozpad “worka”,
- common rail* – układ wtrysku wysokociśnieniowego,
- primary breakup* – rozpad pierwotny,
- secondary breakup* – rozpad wtórny.



# **1. Wstęp**

## **1.1. Uzasadnienie podjęcia tematu**

Kondensat pirolityczny jest cieczą powstającą podczas schładzania produktów pirolizy substancji organicznej. Przykładem jest szeroko znany olej pirolityczny z pirolizy opon samochodowych. Olej ten ma cechy paliwa, które można wykorzystać do maszyn cieplnych wytwarzających ciepło i/lub pracę mechaniczną (silnik spalinowy, turbina gazowa, kocioł grzewczy wodny lub wodno-parowy). Od strony technicznej tego typu ciecze można stosować do palników kotłów grzewczych zamiast oleju opałowego. Wstępne badania prowadzone w Katedrze Maszyn Ciepłych na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Informatyki Politechniki Częstochowskiej a także w szeregu innych ośrodków badawczych wskazują na duży potencjał do wykorzystania tego typu cieczy jako substytutu paliwa kopalnego do silnika spalinowego z zapłonem samoczynnym jak i silnika z zapłonem iskrowym.

## **1.2. Aspekt ekologiczny i ekonomiczny gospodarki odpadami o potencjale energetycznym**

Odpady o relatywnie dużej wartości odpadowej to przede wszystkim substancje organiczne, w którym dominuje węgiel i wodór. W technologii termicznego przetwarzania odpadów wskutek podwyższenia temperatury procesu następuje rozpad złożonych związków organicznych do związków prostych o krótkich łańcuchach węgla, tlenu węgla i wodoru. Istniejące technologie termicznego przetwarzania są neutralne dla środowiska naturalnego. Palne produkty wykorzystywane są w urządzeniach energetycznych, natomiast pozostałości jako produkty uboczne występują w marginalnej skali i przy założeniu, że w substratach nie występuje chlor, siarka i metale ciężkie można przyjąć, że produkty uboczne także można zagospodarować z pożytkiem dla środowiska naturalnego.

Obróbkę termiczną można stosować nie tylko do zużytych opon samochodowych, ale także do odpadów z tworzyw sztucznych, które jako substancja organiczna pozbawiona siarki mają znacznie większy potencjał do przetwarzania tą technologią. Szczególnie interesującym wyzwaniem jest utylizacja tych rodzajów tworzyw sztucznych, które nie można poddać recyklingowi. Wstępne szacunkowe dane podają, że w Europie produkuje się około 156 mln ton odpadów z tworzyw sztucznych, z czego około 37% poddawane jest recyklingowi i stanowi surowiec do ponownego wykorzystania [1]. Powszechnie znany jest problem z dryfującymi po Oceanie Spokojnym

wypami odpadów o powierzchni około 5-krotnie większej od Polski znanych pod nazwą *Great Pacific Garbage Patch*. Szacuje się, że środowisko naturalne będzie potrzebować około 600 lat do wchłonięcia tych śmieci.

Zatem badania prowadzone nad utylizacją plastikowych odpadów powinny mieć priorytet i ich efektem powinno być opracowanie tanich i energooszczędnych technologii do przetwarzania nierecyklingowalnych odpadów na pełnowartościowy surowiec do ponownego wykorzystania w tym także surowiec energetyczny.

Wstępnie uzyskane pozytywne wyniki z prac badawczych nad pirolizą tworzyw sztucznych powinny przyczynić się do dalszego zintensyfikowania tych prac i opracowania technologii termicznej utylizacji śmieci typu organicznego.

### **1.3. Aspekt prawny utylizacji odpadów**

Obecnie istotną barierą do wdrożenia i powszechnego stosowania oleju pirolitycznego jako substytutu paliwa silnikowego w wielu krajach europejskim w tym w Polsce jest ustawa o odpadach, która zawiera szereg przeciwwskazań eliminujących jakiegokolwiek możliwości wykorzystania odpadów w celu przetwarzania ich do postaci pełnowartościowego paliwa, mogącego zastąpić benzynę i olej napędowy do środków transportu i urządzeń energetycznych, które nie mają statusu spalarni odpadów. Stąd, nazywanie oleju pirolitycznego paliwem nie jest poprawne od strony prawnej. Jednakże mając na uwadze potoczne znaczenie wyrazu „paliwo” oraz brak przeciwwskazań ze strony semantyki językowej w dalszej części pracy używa się nazwy „paliwo” dla tego rodzaju cieczy.

Klasyfikacja materii zużytej, która nie może powtórnie zostać wykorzystana w tym samym charakterze jak była poprzednio, stanowi podstawowy problem od strony prawnej. Paradoksalnie jest oczywistym, że są przedmioty, które w jednych uwarunkowaniach są uznawane za odpady, natomiast w innych stanowią pełnowartościowy materiał lub surowiec do dalszego przetwarzania, ponieważ od strony właściwości fizykochemicznych nie ma pomiędzy nimi różnicy. Taka niejednoznaczna ocena danego materiału daje przesłanki do stwierdzenia, że akty prawne regulujące gospodarkę odpadami są niedoskonałe i wymagają nowelizacji, głównie w kierunku prawidłowego zdefiniowania odpadu oraz odpadu niebezpiecznego. Istnieje luka w aktach prawnych dopuszczająca usuwanie kodu odpadu z przetwarzanego materiału, ale procedura dla potencjalnego przedsiębiorstwa chcącego się tym zająć jest bardzo uciążliwa. Obecnie, niestety, można posunąć się do stwierdzenia, że

stan prawny obowiązujący w wielu wysoko uprzemysłowionych krajach nie sprzyja rozwojowi efektywnych ekonomicznie i energetycznie technologii utylizacji odpadów, co sprawia, że kraje te eksportują swoje odpady do krajów „biednych” w tym krajów spoza Unii Europejskiej. Można także paradoksalnie stwierdzić, że problematyka śmieci nie istnieje w krajach o niskim standardzie życia, ponieważ tam odpady wyrzuca się do rzek, zatapia w morzu lub pali w przydomowych kotłach grzewczych.

#### **1.4. Aspekt techniczny i technologiczny energetycznej utylizacji odpadów**

Obecnie istniejący stan prawny reguluje energetyczną utylizację odpadów w tym neutralizację odpadów niebezpiecznych stanowiących istotne zagrożenie dla środowiska naturalnego i ludności przez ich spalanie w spalarniach śmieci. Spalarnie śmieci są inwestycjami bardzo kosztownymi głównie ze względu na wysokie koszty urządzeń do neutralizacji produktów spalania w tym neutralizacji dioksyn. Instalacje techniczne, które można wykorzystać do utylizacji energetycznej odpadów innych niż niebezpieczne zostaną obłożone takimi samymi obostrzeniami odnośnie emisji i ochrony środowiska jak spalarnie odpadów z chwilą gdy rozpoczną proces termicznego, energetycznego przetwarzania odpadów, pomimo, że odpad ten może okazać się w swojej morfologii pozbawiony metali ciężkich i szeregu prekursorów do powstawania dioksyn i innych uciążliwych dla środowiska substancji. Obecnie wiele ośrodków naukowych prowadzi badania nad zagospodarowaniem odpadów organicznych przez ich termiczną obróbkę, w tym toryfikację, pirolizę i zgazowanie, których celem jest produkcja karbonizatu oraz paliw ciekłych i gazowych.

Jednym z takich ośrodków badawczych jest uczelnia Michigan Technological University, na której autorka tej pracy pod kierunkiem prof. Ezry Bar-Ziv uczestniczyła w badaniach nad toryfikacją odpadów złożonych z makulatury i tworzyw sztucznych. W następnym etapie autorka brała udział w badaniach nad pozyskaniem oleju pirolitycznego z polietylenu pod kierunkiem prof. Davida Shonnarda, a w ostatnim etapie, który był najbardziej istotny, doktorantka prowadziła badania nad rozpylaniem i spalaniem oleju pirolitycznego pod kierunkiem prof. Jeffreya Nabera.

Istotnym problemem w przypadku stosowania cieczy pirolitycznych jako substytutu paliwa do silnika spalinowego lub turbiny gazowej jest rozpoznanie przebiegu wtrysku, zapłonu i spalania. Występuje tam szereg zjawisk począwszy od wypływu paliwa, jego rozpylania, odparowania, mieszania

i tworzenia mieszaniny palnej z powietrzem, które nie zostały dotychczas wystarczająco dobrze rozpoznane. Szczególnie brak jest prac badawczych dotyczących przebiegu wtrysku oleju pirolitycznego i tworzenia mieszanki palnej przez nowoczesny, wysokociśnieniowy układ wtryskowy do bezpośredniego wtrysku paliwa do cylindra.

Podsumowując, należy dążyć do całkowitego przetwarzania odpadów w tym głównie odpadów gumowych i tworzyw sztucznych na surowce wtórne lub energię oraz wyeliminować ich składowanie co wpłynie pozytywnie na środowisko naturalne i ograniczenie wydobycia paliw kopalnych. Mając to na uwadze, działania badawcze w kierunku produkcji i paliwowego wykorzystania oleju pirolitycznego pochodzącego z odpadów są uzasadnione.

## 2. Stan wiedzy

Tematyka badawcza pracy dotyczy badań wtrysku, zapłonu i spalania oleju pirolitycznego w celu wykonania oceny jego potencjalnego wykorzystania jako paliwa dla silnika wyposażonego w wysokociśnieniową instalację wtrysku bezpośredniego. Badania przeprowadzono zgodnie z zaproponowaną metodyką pomiarową. Aktualny stan wiedzy został przedstawiony za pomocą przeglądu dostępnej literatury dotyczącej zjawisk występujących podczas wtrysku oraz spalania oleju pirolitycznego. Podstawowym celem było uzasadnienie przyjętej metodyki badawczej, stąd część przytoczonych prac pochodzi z przed kilkudziesięciu lat, jednakże wiedza w nich przedstawiona pozostaje do dziś aktualna. Zatem studia literaturowe przeprowadzono dla następujących obszarów tematycznych związanych z problematyką poruszaną w pracy:

- mechanizm rozpadu strugi wtryskiwanego paliwa: primary i secondary breakup,
- analiza wtrysku za pomocą parametru SMD (Sauter Mean Diameter),
- liczby kryterialne: Webera i Ohnesorge do oceny jakości rozpylania oleju pirolitycznego przez wtryskiwacz wysokociśnieniowy,
- analiza porównawcza spalania oleju pirolitycznego z paliwami klasycznymi w silniku tłokowym.

### **Mechanizm rozpadu strugi wtryskiwanego paliwa: primary i secondary breakup**

Rozpylanie cieczy można podzielić na dwa kluczowe etapy: w pierwszym etapie strumień cieczy z wtryskiwacza rozpada się na duże krople, które następnie rozpadają się na mniejsze kropelki. Wtórny rozpad jest istotnym zjawiskiem przy analizie przebiegu spalania rozpylanego paliwa, ponieważ wpływa na zwiększenie całkowitej powierzchni kropeł rozpylanego paliwa co w dalszej konsekwencji wpływa na szybkość odparowania i spalania.

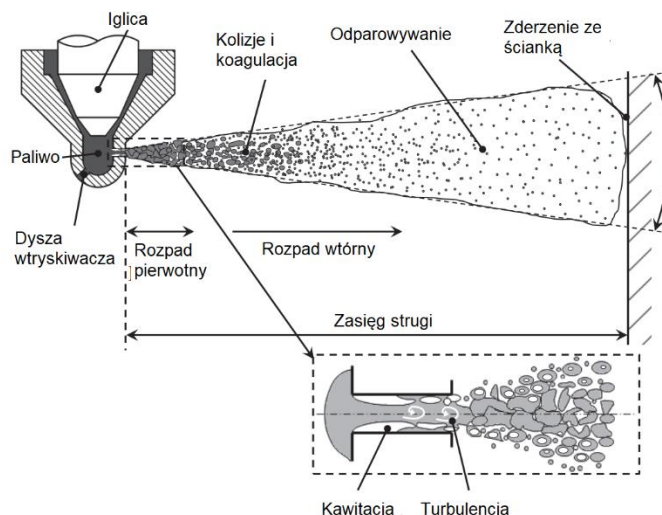
Analiza numeryczna deformacji i rozpadu strugi cieczy na krople jest zjawiskiem złożonym i trudnym do numerycznej analizy. Aktualne metody obliczeniowe, takie jak metoda Lagrange'a i Eulera, które są wykorzystywane do modelowania przepływu ze względu na dwie fazy skupienia w takim przepływie i modelowanie dynamiki ruchu pojedynczej cząsteczki okazują się być mało efektywne. W przypadku metody Lagrange'a kropla jest reprezentowana przez cząstkę punktową, którą można podzielić na dwie części lub więcej cząstek, aby opisać rozpad kropli.

Rzeczywisty rozpad na krople strugi cieczy wypływającej z dyszy pod dużym ciśnieniem jest zbiorem szeregu zjawisk fizycznych czyniąc to zagadnienie problemem bardzo złożonym pod względem opisu matematycznego. Obecnie, pomimo rozwoju technik obliczeniowych, do opisu zjawisk rozpadu strugi nadal stosuje się uproszczenia zakładając, że rozpad strugi na krople można podzielić na dwa zjawiska [2–5]:

- *primary breakup* – pierwotny rozpad, mający miejsce w dyszy i w jej bezpośrednim otoczeniu i dotyczy rozpadu strugi na duże obszary,

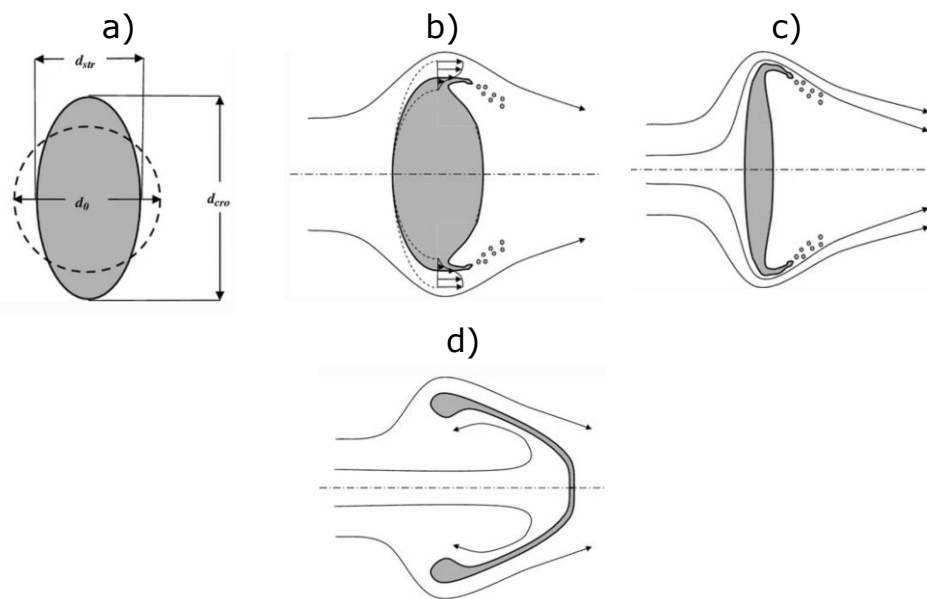
- *secondary breakup* – rozpad wtórny, który ma miejsce w dalszej odległości od dyszy i dotyczy głównie rozpadu dużych kropli na mniejsze.

Pierwotne i wtórne rozpady mogą zachodzić jednocześnie, a granica między tymi dwoma zjawiskami jest często trudno zauważalna. Pierwotny rozpad strumienia cieczy jest problemem o ogromnej złożoności i obejmuje wiele procesów fizycznych zachodzących w szerokim zakresie skal przestrzennych [6–8]. Ta wieloskalowa natura sprawia, że badanie pierwotnego rozpadu jest szczególnie trudne. Ponadto Agarwal zaobserwował, że przepływ cieczy wewnątrz wtryskiwacza ma także wpływ na jej dalsze rozpylanie, co dodatkowo komplikuje problem [9]. Z prac Rimberta i Castaneta [10] oraz zespołu naukowego Boffeta [11] wynika, że w rozpadzie pierwotnym istotną rolę odgrywa niestabilność Rayleigh-Taylor. Badania nad rozpadem cieczy przez rozpylanie są głównie skoncentrowane na badaniach eksperymentalnych. Nawet przy najbardziej zaawansowanej diagnostyce optycznej i rentgenowskiej pozostają cechy przepływu dwufazowego, które są trudne lub wręcz niemożliwe do zmierzenia na drodze eksperymentu, na co zwrócili uwagę w swoich badaniach nad przebiegiem rozpylania i wtrysku benzyny w zakresie zarówno *primary* jak i *secondary breakup* [6,12–14]. Szereg badaczy potwierdza także, że najbardziej wiarygodną metodą badawczą w tej dziedzinie jest rejestracja obrazów za pomocą szybkiej kamery cyfrowej. W oparciu o techniki wizualizacji opracowano schemat rozpadu strugi wtryskiwanego paliwa jak to przedstawiono na rysunku 2.1 [15].



**Rys. 2.1.** Pierwotny i wtórny rozpad paliwa wg [15]

O ile rozpad pierwotny nastęrcza wciąż wiele trudności w zakresie jego prawidłowego opisu analitycznego to rozpad wtórny został już częściowo rozpoznany. Na rysunku 2.2 przedstawiono przykładowe mechanizmy prowadzące do rozpadu wtórnego.



**Rys. 2.2.** Etapy wtórnego rozpadu [16]: (a) wibracje, (b) *shear stripping breakup* [17], (c) *sheet-thinning breakup* [18], (d) *bag breakup* [19]

Chou [20] zaproponował następujący, czteroetapowy rozpad wtórny dla jednego z mechanizmów o nazwie *bag breakup*, przedstawiony schematycznie na rys.2.2d:

- deformacja prowadząca do zmiany kształtu z kuli na elipsoidę,
- powiększanie deformacji elipsoidy prowadzące do powstania worka, tworzy wydrążony worek z obrzeżem w kształcie pierścienia toroidalnego
- właściwy rozpad worka, tworzą się liczne duże mniejsze obszary przekształcające się szybko w kuliste krople,
- rozpad obrzeża – pierścienia, tworzą się nieco większe obszary od tych powstałych w etapie nazwanym „właściwy rozpad worka”.

Wtórny rozpad kropli był szeroko badany w eksperymentach. W zależności od liczby bezwymiarowej, jaką jest liczba Webera  $We$ , ustalono, że istnieją następujące podstawowe mechanizmy rozpadu [21–24]:

- *Oscillation breakup* - rozpad w wyniku oscylacji/wibracji. Kropla oscyluje z pewną częstotliwością, która przy niskiej wartości liczby Webera oscyluje bez zerwania swojej powierzchni. Gdy spełnione są określone warunki, amplituda oscylacji wzrasta do wartości przy której siły rozciągające są większe od sił napięcia powierzchniowego i następuje rozpad na kilka dużych fragmentów/cząstek.
- *Bag breakup* - przerwanie powierzchni. Obszar cieczy o dużej powierzchni ulega przerwaniu i rozpada się tworząc odizolowane od siebie powierzchnie, które rozpadają się na wiele kropelek.
- *Sheet stripping breakup* – zrywanie powierzchni kropli. Spłaszczona w wyniku intensywnego ciśnienia dynamicznego kropla deformuje się od środka w kierunku powierzchni powodując rozrywanie tej powierzchni i podział na mniejsze krople. Idąc od środka w kierunku krawędzi zdeformowana kropla ma coraz mniejszą grubość tworząc cienkie arkusze cieczone, które odrywają się od zdeformowanych obrzeży i zaczynają być unoszone z ośrodkiem gazowym jako odrębne krople [25].
- *Shear breakup* – czyli rozpad wskutek ścinania. W tym mechanizmie istotną rolę odgrywają siły ścinające powstające w cieczy rzeczywistej z powodu jej skończonej lepkości.

Obecnie powszechne w użyciu są modele rozpadu według O'Rourke i Amsdena (model TAB) [26] i model rozpadu wg Reitza [5,27], które są z powodzeniem używane w modelowaniu rozpadu kropli podczas wysokociśnieniowego wtrysku paliwa. W modelach tych zakłada się, że dyskretne, mocno zagęszczone cząstki o tej samej średnicy można uznać za



ośrodek ciągły. Wykorzystana w tych modelach metoda Lagrange'a i metoda Eulera są łatwiejsze do zastosowania, szczególnie do obliczeń spalania, jednakże zawierają kilka współczynników, które można wyznaczyć jedynie na drodze badań eksperymentalnych.

Podstawową wielkością pojawiającą się w modelach analitycznych i numerycznych rozpadu pierwotnego i wtórnego jest wielkość SMD.

### **Analiza wtrysku za pomocą wielkości SMD**

SMD jest skrótem od *Sauter Mean Diameter* i oznacza zastępczą średnicę nieregularnej cząsteczki o objętości  $V$  i powierzchni  $A$ , którą przeformowano do kształtu kuli. Stąd zgodnie z tą definicją można wyznaczyć SMD czyli hipotetyczną średnicę  $D$  z następującej zależności 2.1.

$$SMD = D = \frac{6 \cdot V}{A} \quad (2.1)$$

Wielkość SMD można także stosować do zbioru cząsteczek obliczając dla nich zastępczą średnicę  $D_{32}$  według zależności 2.2.

$$D_{32} = \frac{\sum D_i^3}{\sum D_i^2} = \frac{6 \cdot V}{A} \quad (2.2)$$

gdzie:

$V$  – sumaryczna objętość wszystkich cząstek,

$A$  – pole powierzchni wszystkich cząstek.

Jest wiele prac naukowych opisujących zastosowanie SMD do analizy wtrysku i rozpylania paliwa zarówno przez wtryskiwacz wysokociśnieniowy oleju napędowego, niskociśnieniowy wtryskiwacz benzynowy jak i dyszę w gaźniku. Analizę za pomocą parametru SMD przy wtrysku oleju napędowego w instalacji *common rail* badał Xu He i jego zespół [28]. Badaniom poddano zmienność SMD w czasie dla różnych średnic dysz wtryskiwacza i ciśnienia wtrysku. Doszli do wniosków, że wzrost średnicy dyszy wpływa na wzrost SMD, natomiast wzrost ciśnienia wtrysku powoduje zmniejszenie SMD. Zauważyli, że rozkład statystyczny kropel jest symetryczny. Chen [29] postawił sobie za cel sformułowanie zależności pomiędzy SMD rozpylonego paliwa z takimi wielkościami jak lepkość, ciśnienie wtrysku paliwa, ciśnienie dynamiczne powietrza w okolicy wtrysku. Najbardziej wpływowym czynnikiem na jakość rozpylania paliwa mierzoną za pomocą SMD było ciśnienie wtrysku paliwa

a następnie lepkość paliwa. Jednakże jednymi z pierwszych osób, które wykazały takie zależności ponad 30 lat temu byli Hiroyasu [30], Varde [31], Naber [32], Reitz [33] i Lefebre [34]. Opracowali oni szereg empirycznych zależności wiążących ze sobą SMD, ciśnienie wtrysku, średnicę dyszy wtryskiwacza oraz lepkość paliwa. Zależności te opisują trendy, które następnie zostały potwierdzone przez wielu innych naukowców.

Pierwotny i wtórny rozpad kropeł w skali mikro można uznać za zjawisko o charakterze losowym pod względem ilości i wielkości formowanych kropeł. Stąd zasadne jest przeprowadzenie analizy statystycznej dla takiego zbioru kropeł za pomocą wielkości SMD. Zaobserwowano, że funkcja gęstości prawdopodobieństwa (pdf) dla średniej średnicy kropeł paliwa zarówno w *primary* jak i *secondary breakup* jest przykładem rozkładu logarytmicznie normalnego, co potwierdzono m.in. w pracach [1] i [34]. Ponadto, Movaghar [34] modelował przebieg wtrysku i *primary breakup* w warunkach wtrysku wysokociśnieniowego. Uzyskał on wyniki SMD na poziomie pomiędzy 2 i 3  $\mu\text{m}$ . Niestety, nie mógł tego potwierdzić eksperymentalnie a jedynie dokonał analizy numerycznej wykorzystując metodę DNS (*direct numerical simulation*) i ODT (*one-dimensional turbulence*). W wyniku modelowania Movaghar uznał, że wielkość SMD wiarygodnie odzwierciedla przebieg pierwotnego rozpadu strugi. Interesujące badania nad przebiegiem rozpadu pierwotnego i wtórnego prowadzi Kapusta z Politechniki Warszawskiej. Według niego rozpad strumienia cieczy można znacznie przyspieszyć przez doprowadzenie tej cieczy do punktu wrzenia. Stwierdził on, że nawet niskociśnieniowe wtryskiwacze mogą generować bardzo małe kropelki wskutek wtrysku w warunkach błyskawicznego wrzenia [35]. Szybkie odparowanie wtryskiwanej cieczy wpływa również na ogólną charakterystykę rozpadu strugi i powstającej chmury. Jak wykazano dla przypadku wtrysku ciekłego propanu przez wtryskiwacze wielootworowe, zasięg wtrysku zmniejsza się znacznie gdy wtrysk odbywa się pod ciśnieniem poniżej ciśnienia nasycenia wtryskiwanej cieczy [36]. Badanie przebiegu rozpadu pierwotnego i wtórnego jest zagadnieniem ciągle rozwijanym i rozpoznawanym. W przeglądzie literatury przedstawiono zaledwie niewielką część tej problematyki. Powstaje szereg prac mających na celu analityczne opisanie zjawisk występujących podczas rozpadu strugi cieczy na kropelki. Jednym z najlepiej rozpoznanych narzędzi łączących w sobie średnice kropeł w celu opisu dynamiki rozpadu wtórnego są liczby kryterialne Weber i Ohnesorge.

## Liczby kryterialne: Webera i Ohnesorge do oceny jakości rozpylania oleju pirolitycznego przez wtryskiwacz wysokociśnieniowy

Pierwsze wzmianki o powiązaniu wybranych właściwości fizycznych ze zjawiskami rozpadu strugi cieczy na krople można znaleźć w pracy Nukiyamy i Tanasawy [37]. W pracy pt. *Experiments on the atomization of liquids in an air stream* przedstawili oni eksperyment rozpylania cieczy za pomocą strumienia powietrza i stwierdzili, że na średnią średnicę powstających kropeł mają wpływ takie wielkości fizyczne jak: napięcie powierzchniowe, gęstość, lepkość płynu, objętościowe natężenia przepływu powietrza i rozpylanej cieczy oraz prędkość względna między dwiema fazami: ciekłą i gazową.

W wyniku szeregu przeprowadzonych eksperymentów zrodziła się potrzeba zdefiniowania liczby kryterialnej, którą można byłoby wykorzystać do analizy podobieństwa zjawisk występujących podczas rozpadu strugi cieczy wypływającej z dyszy. Liczbę tę zdefiniował Moritz Weber. Liczba  $We_c$  jest zdefiniowana jako stosunek sił bezwładności do sił napięcia powierzchniowego lub energii kinetycznej cząstki do energii kohezji/deformacji związanej z siłami napięcia powierzchniowego dla danej cząstki (2.3):

$$We_c = \frac{\rho_c \cdot v^2 \cdot D}{\sigma} \quad (2.3)$$

gdzie:

$\rho_c$  - gęstość wtryskiwanej cieczy,

$v$  - prędkość kropeł,

$D$  - wymiar charakterystyczny, którym może być średnica kropli,

$\sigma$  - napięcie powierzchniowe paliwa.

Liczba Webera jest liczbą zależną od wcześniej wprowadzonych liczb Reynoldsa i liczby kapilarnej.

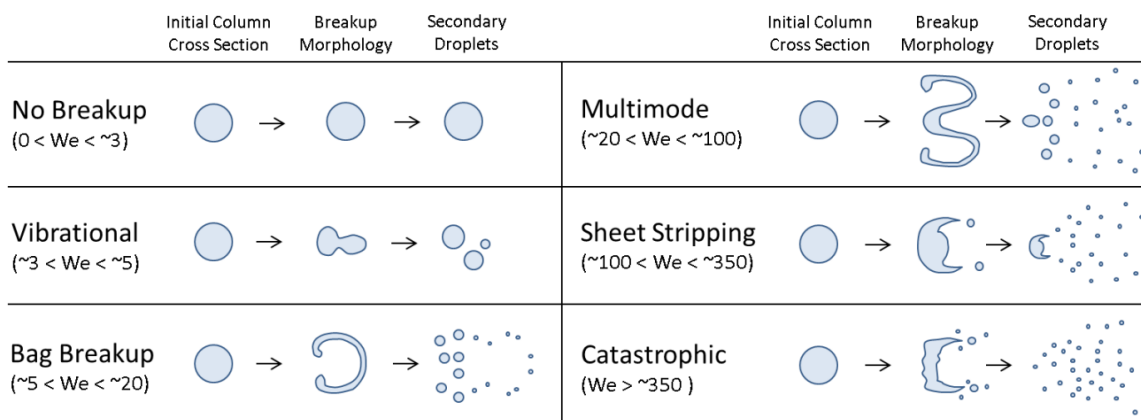
Literatura podaje, że gęstość występująca we wzorze 2.3 to gęstość cieczy, jednakże istnieje szereg opracowań [7,38], w których liczbę Webera definiuje się jako tzw. aerodynamiczną liczbę  $We_a$  według zależności 2.4. Zgodnie z tym wzorem liczba  $We_a$  wyraża stosunek jednostkowej siły od ciśnienia dynamicznego od ośrodka gazowego, w którym przemieszcza się kropla ze względną prędkością  $v$  do jednostkowej siły napięcia powierzchniowego tej kropli.

$$We_a = \frac{\rho_a \cdot v^2 \cdot D}{\sigma} \quad (2.4)$$

gdzie:

$\rho_a$  - gęstość środowiska, do którego następuje wtrysk paliwa (powietrze),  
 $v$  - prędkość kropel paliwa w środowisku gazowym,  
 $D$  - wymiar charakterystyczny, którym może być średnica kropli,  
 $\sigma$  - napięcie powierzchniowe paliwa.

Jedno z pierwszych, szczegółowych opracowań opisujące przebieg rozpadu kropli (*secondary breakup*) scharakteryzowane liczbą Webera przedstawił Chen [39] (rys. 2.3). Jak można zauważyć, im wyższa liczba Webera tym intensywniejszy efekt rozpadu, tj. rozpadu na mniejsze krople. Rozpad, który cechuje się najwyższą wartością liczby Webera powyżej 350 nazwano *catastrophic breakup*. Na tym etapie rozpadu kropla w pierwszej kolejności pod wpływem ciśnienia dynamicznego ośrodka gazowego podlega silnemu spłaszczeniu do postaci bardzo cienkiej elipsoidy, która deformuje się a następnie rozpada się na fragmenty o dużych rozmiarach dzięki niestabilnym falam Rayleigha-Taylora. Następnie fale Kelvina-Helmholtza o znacznie krótszej długości fali powstające na krawędziach fragmentów powodują rozciąganie do formy tzw. *ligaments* (więzadła), a następnie rozpadają się na bardzo małe kropelki, co także potwierdzili Lee i Reitz [25].



**Rys. 2.3.** Schemat wtórnego rozpadu w zależności od liczby Webera [39,40]

Jak wynika z powyższego rozważania, przedstawionego na rysunku 2.3, liczba Webera jest liczbą kryterialną wiążącą etapu rozpadu strugi paliwa z jego właściwościami fizycznymi. Kolejną liczbą kryterialną, która została wykorzystana do analizy rozpadu strugi jest liczba Ohnesorge zdefiniowana przez Wolfganga von Ohnesorge w 1936 zgodnie z zależnością 2.5. Liczba kryterialna Ohnesorge Number wyraża stosunek sił lepkości do sił bezwładności i napięcia powierzchniowego dla danej cząstki.

$$Oh = \frac{\mu}{\sqrt{D \cdot \rho_f \cdot \sigma}} = \frac{\sqrt{We}}{Re} \quad (2.5)$$

gdzie:

$\rho_f$  – gęstość paliwa,

$D$  – wymiar charakterystyczny, którym może być średnica kropli,

$\sigma$  – napięcie powierzchniowe paliwa,

$\mu$  – lepkość dynamiczna paliwa.

W przytoczonych pracach Chen [39], Aleiferisa [6], oraz ponadto Faetha [41], Reitza [42] i Marka [43] (Katedra Maszyn Ciepłych Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Informatyki Politechniki Częstochowskiej) oraz wielu innych te dwie liczby kryterialne są stosowane do oceny charakteru i jakości wtórnego rozpadu.

Przedmiotem badań w tej pracy jest eksperymentalne wyznaczenie jakości rozpylania i tworzenia chmury paliwa którym jest olej pirolityczny wtryskiwany przez wtryskiwacz wysokociśnieniowy. Następnie poddano analizie przebieg zapłonu tej chmury rozpylonego oleju pirolitycznego i rozwoju przebiegu spalania, stawiając sobie jako podstawowy cel zbadanie możliwości wykorzystania tego oleju jako potencjalnego paliwa do silnika spalinowego wyposażonego w wysokociśnieniową instalację wtryskową.

### **Analiza porównawcza spalania oleju pirolitycznego z paliwami klasycznymi w silniku tłokowym**

W poszukiwaniu paliw odnawialnych coraz większą uwagę zwraca się na produkty uboczne powstające podczas przetwarzania termicznego (toryfikacja, piroliza, zgazowanie) substancji organicznych. Do takich produktów ubocznych należy ciecz poprocesowa powszechnie nazywana olejem pirolitycznym. Olej z pirolizy jest kondensatem z oparów cieczy powstających podczas pirolizy. Zazwyczaj biomasa i odpady organiczne (tworzywa sztuczne, opony) są substancjami organicznymi, które są stosowane jako surowiec do reaktora pirolitycznego. Ze względu na stosunkowo dobrze opracowane technologie toryfikacji, pirolizy i zgazowania biomasy roślinnej, podejmowane są próby wykorzystania tych technologii do termicznego przetwarzania substancji organicznej innej niż biomasa, w tym głównie są to opony samochodowe oraz tworzywa sztuczne bez możliwości wykorzystania ich w recyklingu. W oparciu o te technologie skutecznie zaimplementowano rozwiązania do termicznego rozkładu osadu ściekowego, tworzyw sztucznych i gumy z używanych opon. Jak omówiono w dostępnej literaturze [44,45] odpady z tworzyw sztucznych

i używane opony samochodowe ze względu na ich wysoką zawartość węgla i wodoru są uważane za atrakcyjny materiał do wytwarzania substancji ciekłych i gazowych o relatywnie dobrej wartości opałowej. Stąd, produkty te w krótkoterminowej przyszłości mogą mieć znaczący udział w sektorze paliw pod warunkiem wprowadzenia szeregu zmian w ustawach o odpadach w celu doprowadzenia do przewartościowania odpadu do materiału pełnowartościowego.

Obecnie prowadzi się badania w zakresie spalania czystego oleju pirolitycznego oraz mieszanin z innymi paliwami w celu wzbogacenia jego właściwości palnych. Mieszanie surowego oleju pirolitycznego z inną substancją o charakterze paliwa może być także spowodowane obniżeniem zawartości składników niekorzystnych np. siarki występującej w surowym oleju pirolitycznym pochodzącym z pirolizy opon samochodowych.

Na podstawie dotychczas przeprowadzonych badań istnieje szereg przesłanek po temu aby jednoznacznie potwierdzić, że olej pirolityczny powinien być badany pod względem wykorzystania go jako paliwa zarówno do silników trakcyjnych jak i do silników w agregatach kogeneracyjnych. Surowy olej pirolityczny jest czarną, nieprzezroczystą substancją o silnym charakterystycznym zapachu. Olej ten zawiera głównie związki węglowodorowe, alkohole, wodę i kwasy organiczne [46]. Z drugiej strony, ze względu na jego stosunkowo wysoką wartość kaloryczną, olej pirolityczny jest uważany za potencjalne paliwo do silnika tłokowego i turbiny gazowej [47–49]. Umeki [48] stwierdził, że mieszanina oleju pirolitycznego z olejem napędowym posiada właściwości fizyko-chemiczne pretendujące do bezpośredniego wykorzystania w silniku spalinowym z zapłonem samoczynnym. Ponadto, jego badania wykazały, że olej pirolizy charakteryzował się liczbą oktanową badawczą zbliżoną do około 90 tj. takiej jaką charakteryzuje się typowa benzyna do silników spalinowych pojazdów samochodowych. Tudou [49] zbadał i zaproponował mieszaninę składającą się z 50% oleju napędowego, 40% lekkiej frakcji oleju pirolitycznego i 10% węglanu dimetylu. Hurdogan po dodaniu 10% oleju pirolitycznego do oleju napędowego uzyskał paliwo, które nie pogarszało wydajności silnika pod względem momentu obrotowego i mocy wyjściowej [47].

W związku z tym wdrożenie paliwa, które jest mieszaną butanolu (paliwo odnawialne) i oleju z pirolizy (jako produkt wykorzystania odpadów biomasy/tworzyw sztucznych) można uznać za innowacyjne działanie. Badania opisane w tym manuskrypcie koncentrowały się na zastosowaniu tego paliwa

do silnika stacjonarnego, ale wyniki wskazują, że można je również wykorzystać do silników SI motoryzacyjnych.

W dostępnej literaturze istnieje wiele artykułów przedstawiających wyniki prac badawczych koncentrujących się na stosowaniu oleju pirolitycznego do silników z zapłonem samoczynnym. Naukowcy badali stosowanie oleju pirolitycznego w niewielkich ilościach 5-10% [47,50–60], a także w ilościach powyżej 20% [61–63] dodawanych do oleju napędowego. Są także próby spalania wyłącznie oleju pirolitycznego w silniku tłokowym [51,64]. Martinez [58] testował mieszaninę składającą się z 5% oleju pirolizy z opon i oleju napędowego w czterocyndrowym, turbodoładowanym silniku z zapłonem samoczynnym z systemem wtrysku wysokociśnieniowego *common rail*. Stwierdził że silnik napędzany tą mieszaniną charakteryzował się nieco wyższym jednostkowym zużyciem paliwa i niższą sprawnością ogólną przy niskich obciążeniach, ale przy wyższych obciążeniach nie zaobserwował żadnych różnic. Koc i inni [50] przeprowadzili badania nad 4-cylindrowym silnikiem ZS zasilanym mieszaniną oleju z pirolizy opon i biodiesla. Koc zaobserwował obniżkę w emisji NO<sub>x</sub> i CO oraz zwiększoną moc i moment obrotowy. Zvar zastosował w turbodoładowanym silniku ZS strategię wtrysku z dawką pilotową [52] do spalania mieszaniny 10% oleju pirolitycznego z olejem napędowym. Jeśli chodzi o wyższą zawartość oleju pirolizy w mieszankach oleju napędowego, Murugan [61,62] przedstawił wyniki spalania mieszaniny oleju napędowego z olejem pirolitycznym w ilości 70%. Zaobserwował zmniejszenie sprawności ogólnej oraz zwiększoną emisję HC i CO w spalinach. Spalanie oleju pirolitycznego w silniku tłokowym prowadził także Karagoz [65,66]. Testował on olej pirolityczny w ilości 10, 30 i 50% w mieszaninie z oleju napędowym w jednocylindrowym, czterosuwowym silniku ZS. Wyniki wykazały, że mieszanina z 10% zawartością oleju pirolitycznego charakteryzuje się najwyższą sprawnością ogólną w zakresie zmiennego obciążenia silnika.

Vihar [51] zbadał pracę 6-cylindrowego, turbodoładowanego silnika ZS dużej mocy o pojemności 6,9 dm<sup>3</sup> zasilanego wyłącznie olejem pirolitycznym. Vihar wywnioskował, że olej pirolityczny z opon samochodowych można z powodzeniem wykorzystywać jako paliwo do zasilania silnika dużej mocy w agregacie prądotwórczym. Jak można zauważyć, zdecydowana większość badań dotyczy spalania oleju pirolitycznego w zasilniku ZS. Jest to podyktowane tym, że surowy olej pirolityczny ze względu na zawartość cięższych węglowodorów C<sub>15</sub>-C<sub>20</sub> ma skłonności do samozapłonu w znacznie niższej temperaturze niż benzyna. Stąd, baza literaturowa dotycząca wykorzystania

oleju pirolitycznego w silniku ZI nie jest uboga. Jednakże należy wymienić kilka istotnych pod tym względem prac badawczych [64,67–70]. Między innymi Kumar i Puli [64] przedstawili wyniki prac eksperymentalnych w zakresie spalania mieszaniny benzyny i 5%, 10%, 15% i 20% oleju pozyskanego z pirolizy tworzyw sztucznych. Tu należy zaznaczyć, że są także prowadzone badania nad pozyskiwaniem oleju pirolitycznego nie tylko z zużytych opon samochodowych ale także z innych źródeł, w tym przede wszystkim z tworzywa sztucznego. Kumar i Puli badali sprawność silnika Maruti 800 oraz emisję spalin. Zaobserwowali obniżkę emisji UHC i wzrost NOx. Jednocześnie w podsumowaniu potwierdzili, że silnik ZI może być zasilany mieszaniną do 20% oleju pirolitycznego bez żadnych modyfikacji w zakresie samego silnika. Sunaryo [68] przeprowadził eksperymentalne badania w zakresie sprawności i emisji spalin z silnika ZI napędzanego olejem pirolitycznym z tworzyw sztucznych. Określił liczbę oktanową badaczą dla tego oleju na poziomie pomiędzy 88 a 92. Dlatego wnioskował on o celowości stosowania tego oleju jako alternatywnego paliwa do zasilania dla silników ZI. Kareddula i Puli [69] skoncentrowali się nad badaniami spalania mieszaniny benzyny z 15% zawartością oleju pirolitycznego z dodatkiem 5% etanolu. Przeprowadzili analizę porównawczą odnośnie sprawności silnika jak i emisji toksycznych składników spalin. Zaobserwowali spadek sprawności oraz wyższą emisję NOx w porównaniu do spalania benzyny. Dlatego w celu obniżenia emisji NOx zaproponowali dodanie etanolu w ilości 5%. Gschwend [70] w swoich badaniach skoncentrował się na uszlachetnieniu surowego oleju pirolitycznego. Stwierdził, że olej pirolityczny po usunięciu kilku cięższych węglowodorów można wykorzystać jako paliwo do silnika ZI.

W Katedrze Maszyn Ciepłych Politechniki Częstochowskiej także prowadzono badania nad spalaniem oleju z pirolizy opon samochodowych. Badania prowadzone przez Chwistę [67,71–73] dotyczyły spalania oleju pirolitycznego wymieszanego z alkoholami (etanol i butanol). Chwista potwierdził, że pomimo niskiej wartości liczby oktanowej dla oleju pirolitycznego jego mieszanina z etanolem w proporcji 1:3 (25% oleju pirolitycznego) nie prowadzi do żadnych objawów nieprawidłowego przebiegu spalania w tym spalania stukowego w silniku SI o stopniu sprężania 9,5, 10 i 11 : 1. Chwista zaobserwował lepszą stabilność spalania oleju pirolitycznego wymieszanego z wyższymi alkoholem (C4). Chwista prowadził również badania w zakresie spalania oleju z pirolizy biomasy. Olej ten w przeciwieństwie do oleju z opon samochodowych cechował się dużym udziałem wody oraz zawartością fenoli. Chwista zaproponował spalanie tego oleju w silniku ZS



w postaci mieszaniny z olejem napędowym, aczkolwiek jak wynikało z jego badań trwałość tej mieszaniny nie była zadowalająca i mieszanina po kilku godzinach ulegała rozwarstwieniu. Jednakże główną wartością naukową w pracach Chwista było spalanie oleju pirolitycznego w silniku ZI w ilościach 25 i 50% w mieszaninie z n-butanolem. Potwierdził on, że przebieg spalania mieszaniny oleju pirolitycznego z opon samochodowych z butanolem charakteryzuje się lepszą stabilnością w porównaniu do spalania benzyny i czystego butanolu i etanolu. Ponadto, mieszanina surowego oleju pirolitycznego z alkoholem była skutecznym sposobem na obniżenie zawartości siarki z około 1 do poniżej 0,25% zależnie od proporcji poszczególnych składników.

Na podstawie przeglądu literatury można zaobserwować rosnące zainteresowanie olejem pirolitycznym z tworzyw sztucznych i jego wykorzystaniem jako potencjalnego paliwa podstawowego lub dodatkowego do silnika spalinowego [53,56,57,64,69,74].

## **Podsumowanie**

Podsumowując przegląd literatury starano się wykazać, że metodyka zaproponowana w danej pracy jest metodyką badawczą powszechnie stosowaną i uznaną za najbardziej wiarygodną w eksperymentach mających na celu ocenę przebiegu rozpylania paliwa. Stąd, wykorzystanie wielkości SMD oraz liczb kryterialnych Webera i Ohnesorge do badań przebiegu wtrysku oleju pirolitycznego przez wtryskiwacz wysokociśnieniowy jest w pełni uzasadnione. W następnej kolejności wykazano, że prace dotyczące badań nad przebiegiem spalania oleju pirolitycznego w silniku cieplnym a w szczególności oleju pirolitycznego pochodzącego z pirolizy odpadowych tworzyw sztucznych, stanowią niewielką bazę w porównaniu do badań nad innymi paliwami. Stwierdzono także brak w dostępnych bazach literaturowych artykułów omawiających wyniki badań wtrysku i spalania oleju pirolitycznego z jego wizualizacją za pomocą szybkiej kamery cyfrowej.



### **3. Cel, zakres i tezy pracy**

#### **3.1. Cel pracy**

Badania przedstawione w pracy mają na celu oraz zbadanie przydatności oleju pirolitycznego jako potencjalnego paliwa dla silnika tłokowego z zapłonem samoczynnym i zapłonem iskrowym.

Należy zaznaczyć, że olej pirolityczny jest mieszaniną wielu węglowodorów, których rodzaj i ilość zależy od wsadu, temperatury i czasu przebiegu pirolizy. Olej pirolityczny, który był badany został wyprodukowany w laboratoryjnym reaktorze pirolitycznym a następnie poddany destylacji jak to przedstawiono szczegółowo w rozdziale 5.

Wymiernymi wynikami badań są:

- analiza porównawcza wybranych wielkości dla oleju pirolitycznego, benzyny i oleju napędowego,
- opracowanie ewentualnych wytycznych w zakresie modernizacji konstrukcji komory spalania cylindra i układu zasilania paliwem oraz parametrów eksploatacyjnych tłokowego silnika spalinowego niezbędnych do zapewnienia prawidłowego przebiegu spalania oleju pirolitycznego.

Podstawowymi celami pracy są:

- rozpoznanie przebiegu wtrysku i rozpylania oleju pirolitycznego w warunkach temperatury i ciśnienia atmosferycznego,
- rozpoznanie przebiegu wtrysku, zapłonu i przebiegu spalania oleju pirolitycznego w komorze o stałej objętości w warunkach podwyższonego ciśnienia i temperatury typowych dla silnika ZS,
- wykonanie analizy porównawczej z benzyną i olejem napędowym.

Problemem badawczym jest opracowanie metodyki badawczej zapewniającej prawidłowy przebieg badań i uzyskanie wiarygodnych wyników przy akceptowalnym poziomie niepewności pomiarowej. Opracowanie prawidłowej metodyki badawczej powinno prowadzić do uzyskania odpowiedzi w zakresie:

- ocena przydatności oleju pirolitycznego jako potencjalnego paliwa silnikowego;

- ocena jakościowa tworzenia mieszanki palnej w cylindrze silnika przez wtryskiwacz wysokociśnieniowy na podstawie właściwości fizycznych tego oleju,
- powiązanie wielkości opisujących wtrysk z wybranymi wskaźnikami/liczbami kryterialnymi oraz analiza porównawcza wtrysku, rozpylania, samozapłonu i rozwoju płomienia

### **3.2. Tezy pracy**

Sformułowano 3 tezy pracy jak następuje:

Teza 1: zjawiska rozpylania i tworzenia mieszanki palnej oleju pirolitycznego uzyskanego po destylacji surowej cieczy pochodzącej z pirolizy HDPE przebiegają podobnie do zjawisk występujących dla typowej benzyny 95 w instalacji bezpośredniego wtrysku w silniku ZI;

Teza 2: badana ciecz może być zastosowana jako zamiennik dla benzyny 95 do zasilania nowoczesnego silnika samochodowego wyposażonego w instalację wysokociśnieniowego wtrysku bezpośredniego.

Teza 3: Przebieg spalania oleju pirolitycznego zachodzi szybciej, ze względu na większy udział fazy spalania kinetycznego w porównaniu do przebiegu spalania oleju napędowego.

### **3.3. Zakres pracy**

Praca badawcza jest realizowana w całości jako praca eksperymentalna, która obejmuje następujące główne zadania:

- badania wstępne w zakresie analizy wielkości fizykochemicznych dla badanego oleju pirolitycznego;
- badania przebiegu wtrysku i rozpylania dla oleju pirolitycznego, benzyny i oleju napędowego wspomaganie rejestracją szybką kamerą cyfrową;
- badania przebiegu wtrysku, rozpylania, zapłonu i przebiegu spalania dla oleju pirolitycznego i oleju napędowego w warunkach typowych dla silnika ZS wspomaganie rejestracją szybką kamerą cyfrową.

Schemat rozwiązania postawionego problemu naukowego przedstawiono na rysunku 3.1.

Funkcja rozdziału	<b>Schemat blokowy układu pracy</b>	Numer rozdziału
	Tytuł rozdziału i zawartość	
Wstęp i geneza pracy	<p style="text-align: center;"><b>Wstęp i ogólna charakterystyka pracy</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Wstępne rozpoznanie gospodarki odpadami spoza recyklingu</li> <li>- Aspekt ekologiczny oraz ekonomiczny, konieczność energetycznej utylizacji</li> <li>- Brak wystarczających danych do oceny przydatności oleju pirolitycznego z odpadowych tworzyw sztucznych jako potencjalnego paliwa silnikowego</li> <li>- Niedobór prac badawczych dotyczących przebiegu wtrysku oleju pirolitycznego i jego spalania</li> </ul>	1
Analiza stanu wiedzy i postawienie	<p style="text-align: center;"><b>Stan wiedzy</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mechanizm rozpadu strugi wtryskiwanego paliwa: primary i secondary breakup</li> <li>- Analiza wtrysku za pomocą parametru SMD</li> <li>- Liczby kryterialne: Webera i Ohnesorge do oceny jakości rozpylania oleju pirolitycznego przez wtryskiwacz wysokociśnieniowy</li> <li>- Samozapłon i rozwój płomienia w rozpylanej chmurze oleju pirolitycznego</li> <li>- Analiza porównawcza z paliwami klasycznymi</li> </ul>	2
Teza pracy	<p style="text-align: center;"><b>Cel i zakres pracy</b></p> <p><b>Sformułowanie i uzasadnienie problemu badawczego:</b> ocena przydatności oleju pirolitycznego jako potencjalnego paliwa silnikowego; ocena jakościowa tworzenia mieszanki palnej w cylindrze silnika przez wtryskiwacz wysokociśnieniowy na podstawie właściwości fizycznych tego oleju w powiązaniu z wybranymi wskaźnikami/liczbami kryterialnymi oraz analiza porównawcza wtrysku, rozpylania, samozapłonu i rozwoju płomienia</p> <p><b>Cel:</b> Rozpoznanie przebiegu wtrysku cieczy pirolitycznej w warunkach temperatury i ciśnienia atmosferycznego oraz w warunkach podwyższonego ciśnienia i temperatury w komorze o stałej objętości.</p> <p><i>Tezy: 1. Zjawiska rozpylania i tworzenia mieszanki palnej badanego oleju pirolitycznego przebiegają podobnie do zjawisk występujących dla benzyny 91 w instalacji bezpośredniego wtrysku w silniku ZI</i></p> <p><i>2. Badana ciecz może być zastosowana jako zamiennik dla benzyny 91 do zasilania nowoczesnego silnika wyposażonego w instalację wysokociśnieniowego wtrysku bezpośredniego</i></p>	3
Metodyka badawcza	<p style="text-align: center;"><b>Metodyka badań eksperymentalnych</b></p> <p>Opis zastosowanej metodyki badawczej – <b>analiza porównawcza</b> wybranych parametrów oleju pirolitycznego i jego mieszanin z benzyną i olejem napędowym w odniesieniu do paliw referencyjnych , którymi były: benzyna 91 i olej napędowy lekki.</p> <p><b>Parametry wybrane do analizy:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- średnia średnica kropli wg Sautera (SMD)</li> <li>- rozkład statystyczny rozpylanej cieczy</li> <li>- szybkość i zasięg rozprzestrzeniania się strugi wtryskiwanej cieczy</li> <li>- zwłoka zapłonu i szybkość rozchodzenia się płomienia</li> </ul> <p><b>Plan badań eksperymentalnych:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- wyznaczenie wybranych właściwości fizykochemicznych oleju pirolitycznego – analiza GC-MS</li> <li>- badania przebiegu wtrysku i rozpylania paliw</li> <li>- badania przebiegu wtrysku i samozapłonu w warunkach podwyższonego ciśnienia i temperatury</li> </ul> <p><b>Dobór i opis stanowisk do badań:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- komora o stałej objętości do testów spalania z rejestracją obrazów szybką kamerą cyfrową</li> <li>- komora do rejestracji wypływu i rozpylania badanej cieczy za pomocą szybkiej kamery cyfrowej i laserowego układu optycznego</li> </ul>	4
Weryfikacja słuszności tezy pracy	<p style="text-align: center;"><b>Wyniki badań eksperymentalnych i ich analiza</b></p> <p>Przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- właściwości fizykochemiczne badanych cieczy</li> <li>- SMD badanych cieczy</li> <li>- rejestracja obrazów wtrysku, rozpylania, samozapłonu i rozwoju płomienia</li> <li>- powiązanie uzyskanych wartości SMD z liczbami kryterialnymi Webera i Ohnesorge</li> <li>- porównanie zasięgu strugi wypływającego paliwa w warunkach podwyższonego ciśnienia i temperatury</li> <li>- porównanie zarejestrowanych przebiegów ciśnienia w komorze o stałej objętości</li> <li>- analiza wpływu błędów na dokładność uzyskanych wyników</li> </ul>	5
Wnioski	<p style="text-align: center;"><b>Podsumowanie/wnioski</b></p> <p>Wnioski: ogólne - odnośnie celu i tezy pracy; szczegółowe - dotyczące wyników badań; metodyczne dotyczące zastosowanej metody i poprawności badań; użytkowe - dotyczące możliwości wykorzystania wyników; przyszłościowe - przedstawiające możliwe działania w przyszłości.</p>	6

**Rys. 3.1.** Układ pracy wraz ze schematem postępowania



## 4. Metodyka badawcza

### 4.1. Podstawy pracy badawczej

Mając na uwadze cel oraz tezy pracy przedstawione w poprzednim rozdziale przyjęto następujące założenia do realizacji badań mających rozpoznać zjawiska wtrysku i zapłonu oleju pirolitycznego w odniesieniu do paliw referencyjnych, którymi są benzyna i olej napędowy:

- głównym narzędziem badawczym jest analiza porównawcza, mająca na celu dokonanie porównania ze sobą wybranych wielkości fizykochemicznych i termodynamicznych dla ww. paliw. Wybrano następujące wielkości podlegające porównaniu:
  - wielkości fizykochemiczne:
    - skład oleju pirolitycznego,
    - gęstość,
    - lepkość,
    - napięcie powierzchniowe,
    - średnia średnica kropli wg Sautera (SMD),
    - rozpuszczalność w innych substancjach: benzyna, olej napędowy, lekki, izobutanol,
  - wielkości termodynamiczne:
    - zwłoka zapłonu,
    - fazy spalania: faza spalania kinetycznego, faza spalania dyfuzyjnego, główna faza spalania,
    - szybkość spalania jako szybkość wydzielania ciepła lokalnie  $dQ$  i jednostkowo  $dQ/dt$ ,
    - temperatura spalania,
  - pozostałe wielkości fizyczne:
    - prędkość wypływu strugi paliwa z wtryskiwacza,
    - zasięg strugi wtryskiwanej cieczy.
- Badania eksperymentalne są głównym źródłem wyników do analizy porównawczej:
  - badania eksperymentalne opierają się na:
    - pomiar bezpośredni i pośredni wybranych wielkości fizykochemicznych,
    - wizualizacja zjawisk wtrysku i spalania za pomocą szybkich kamer cyfrowych,

- do obliczeń wielkości wyznaczanych w sposób pośredni z pomiarów wykorzystano oprogramowanie Matlab, EES i Chemkin, które zastosowano głównie do:
  - obróbka cyfrowa sygnałów i obrazów,
  - obliczenia termodynamiczne w tym temperatura spalania adiabatycznego.

W celu realizacji zamierzonych badań zgodnie z przedstawioną metodyką badawczą, opracowano plan badań jak następuje:

1. Wyprodukowanie oleju pirolitycznego do celów badawczych.
2. Analiza fizykochemiczna wyprodukowanego oleju pirolitycznego.
3. Badania wtrysku i rozpylania oleju pirolitycznego i paliw referencyjnych w warunkach otoczenia i w warunkach rzeczywistej pracy silnika tłokowego.
4. Badanie wtrysku i zapłonu oraz rozwoju spalania oleju pirolitycznego i paliw referencyjnych w komorze spalania o stałej objętości.

Do realizacji planu badań wykorzystano dwa następujące stanowiska badawcze:

- stanowisko Laser Particle Sizer - Malvern-Spraytec do rejestracji przebiegu wtrysku z wysokociśnieniowego wtryskiwacza benzynowego w warunkach ciśnienia i temperatury otoczenia.
- Stanowisko z komorą spalania z wizualizacją za pomocą szybkiej kamery cyfrowej przebiegu wtrysku i zapłonu w warunkach podwyższonego ciśnienia i temperatury.

Obydwa stanowiska badawcze były zlokalizowane na uczelni Michigan Technological University w laboratoriach centrum badawczego Advanced Power Systems Research Center.

Z powodu lokalizacji badań jako paliwa referencyjne przyjęto paliwa z rynku amerykańskiego:

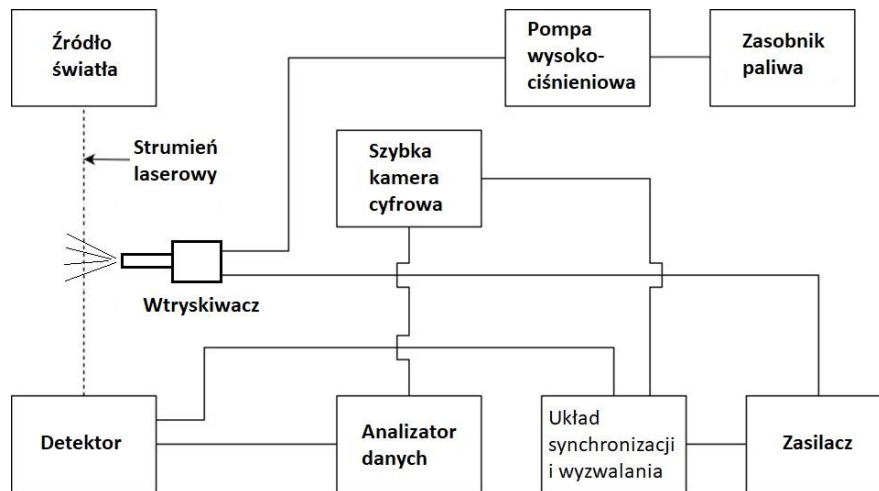
- Benzyna 91 – właściwościami antystukowymi zbliżona do benzyny o liczbie oktanowej badawczej (RON) 94-95.
- Lekki olej napędowy stosowany do napędu pojazdów samochodowych z dodatkami bio nie przekraczającymi 5%.

Paliwem podstawowym poddanym badaniom był przedestylowany olej pirolityczny wyprodukowany z pirolizy wsadu HDPE przy temperaturze 575-600°C w czasie retencji 1s. Szczegóły wytworzenia tego oleju opisano w rozdziale 5.



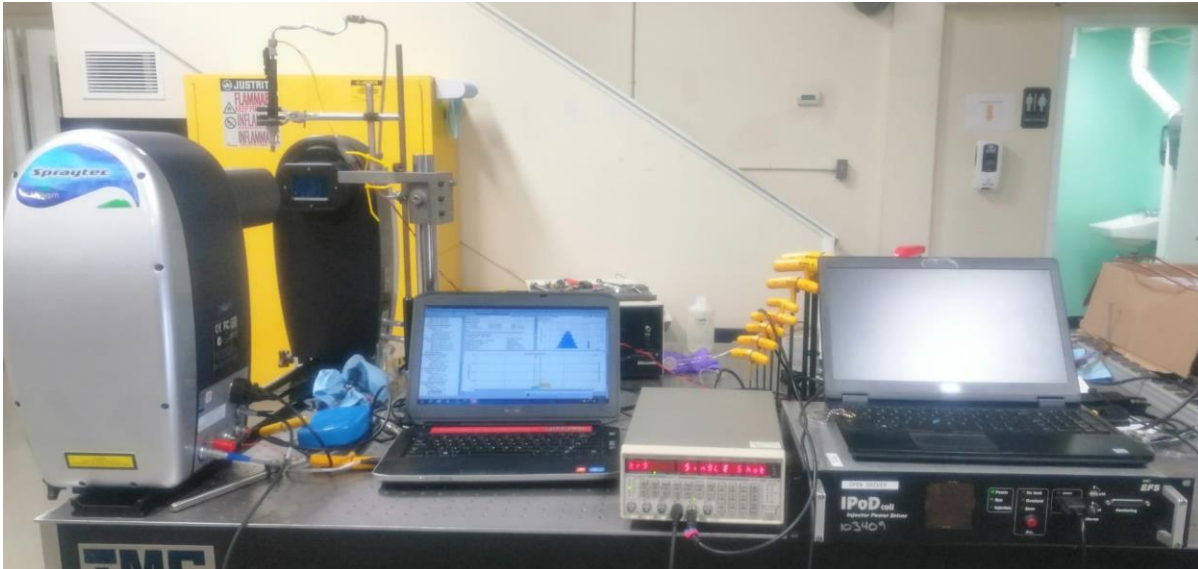
## 4.2. Stanowisko Laser Particle Sizer - Malvern-Spraytec

Jest to stanowisko opracowane przez firmę Malvern Spraytec do wizualizacji i analizy przebiegu wtrysku oraz obliczenia parametru SMD – średnia średnica kropeł wg Sautera (SMD - Sauter Mean Diameter). Na tym stanowisku badano przebieg wtrysku oleju pirolitycznego z wysokociśnieniowego wtryskiwacza benzynowego przy ciśnieniu 400 bar w warunkach otoczenia: ciśnienie 1 bar i temperatura 20-21°C. Uzyskano wyniki SMD dla czystego oleju pirolitycznego i paliw referencyjnych. W oparciu o te wyniki przeprowadzono analizę porównawczą. Na rysunku 4.1 przedstawiono stanowisko badawcze do badania chmury paliwa. Podstawowymi elementami są laserowe źródło światła, szybka kamera cyfrowa i analizator danych wyposażony w komputer obliczeniowy dużej mocy do analizowania danych w trybie czasu rzeczywistego.



**Rys. 4.1.** Schemat stanowiska Laser Particle Sizer - Malvern-Spraytec do badań parametrów rozpylania wtrysku

Na rysunku 4.2 przedstawiono widok na laboratorium badawcze. Z lewej strony widoczny jest zestaw aparatury do analizy wtrysku i rozpylania wykorzystywany do badań.



**Rys. 4.2.** Widok na stanowisko Laser Particle Sizer - Malvern-Spraytec

Głównymi elementami wyposażenia stanowiska są:

- szybka kamera cyfrowa Chronos (model CR14-1.0), 1057 kl/s
- wtryskiwacz wysokociśnieniowy: Bosch, GDI o parametrach:
  - 6-otworkowy,
  - średnice dysz: 0,225 mm,
  - wydatek: 14 g/s,
  - czas wtrysku: 1,5 ms,
  - temperatura wtryskiwacza: 60°C,
- wysokociśnieniowa pompa wtryskowa: HPLC, maks. do 4000 bar.

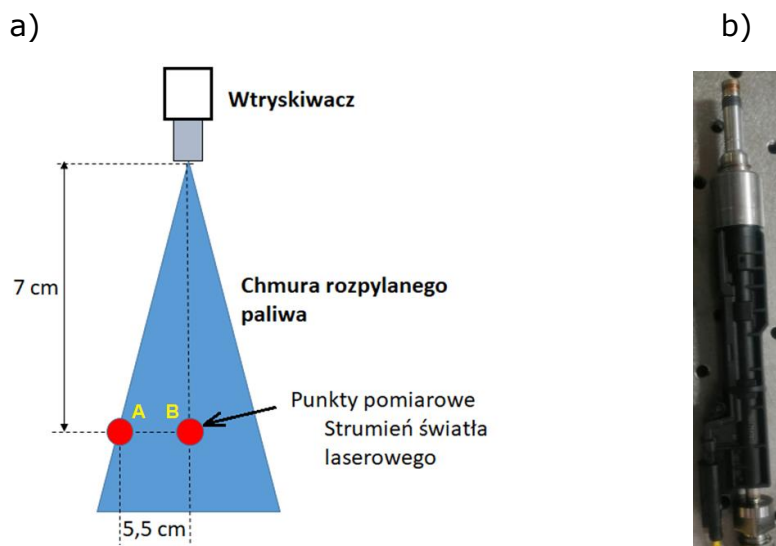
Na stanowisku można zrealizować następujące pomiary w strefie wtrysku:

- pomiar natężenia wyemitowanego i pochłoniętego światła laserowego,
- średnie średnice kropeł wg Sautera (SMD),
- rozkład objętościowy kropeł,
- rozkład liczbowy kropeł,
- centyle: Dx(10), Dx(50), Dx(90) – są to wielkości podające zawartość procentową liczby (lub objętości) kropeł, które sumarycznie występują poniżej zadanej wartości.

Pomiar powyższych wielkości jest realizowany punktowo w dwóch punktach jak pokazano na rysunku 4.3a. Jeden z punktów znajduje się w osi symetrii strugi wypływającego paliwa, natomiast drugi z punktów ułożono w odległości 5,5 cm od osi symetrii. Lokalizacje obydwu punktów wybrano

w oparciu o wiedzę i doświadczenie badawcze pracowników etatowych laboratorium.

Wtryskiwacz użyty do badań, to wtryskiwacz przeznaczony do wtrysku bezpośredniego benzyny przy ciśnieniu 400 bar pokazany na rysunku 4.3b. Aby zapewnić takie same warunki wtrysku i rozpylania strugi paliwa przyjęto, że wszystkie paliwa będą wtryskiwane przez ten sam wtryskiwacz pod takim samym ciśnieniem równym 400 bar. Takie podejście może budzić kontrowersje w przypadku stosowania tego wtryskiwacza do oleju napędowego. Olej napędowy w nowoczesnych układach wtryskowych typu *common rail* jest podawany do cylindra pod ciśnieniem od 1000 do 2500 bar, a zatem przy ciśnieniu kilkakrotnie wyższym od ciśnienia zastosowanego podczas badań. Z drugiej strony, w celu dokonania analizy porównawczej w zakresie wielkości charakterystycznych dla danego paliwa, należy utrzymywać takie same warunki eksperymentu. Ponadto, mechanicznie sterowane wtryskiwacze oleju napędowego I generacji pracowały przy ciśnieniu do 200 bar. Zatem, wybór ciśnienia zasilania 400 bar był właściwy i merytorycznie uzasadniony.



**Rys. 4.3.** Rozmieszczenie punktów pomiarowych na tle chmury paliwa (a), wtryskiwacz użyty do badań (b)

Przykładowe zdjęcie chmury rozpylanego paliwa pokazano na rysunku 4.4.



**Rys. 4.4.** Przykładowy obraz (pojedyncza klatka) wypływu paliwa z wtryskiwacza zarejestrowany za pomocą szybkiej kamery cyfrowej

Wyniki pomiarów wielkości SMD przedstawiono graficznie w postaci wykresów przedstawiających czasowe przebiegi SMD dla trzech paliw: olej pirolityczny, olej napędowy i benzyna 91. Przedstawiono także histogramy rozkładu statystycznego SMD.

W oparciu o uzyskane dane obliczono wartości liczb kryterialnych: Webera i Ohnesorge oraz opracowano wnioski końcowe ukazujące wzajemne zależności pomiędzy wybranymi właściwościami fizycznymi i tymi liczbami kryterialnymi dla badanych paliw.

Parametry eksperymentu przeprowadzonego na stanowisku Malvern-Spraytec przedstawiono w tabelicy 4.2.

**Tablica 4.2.** Macierz eksperymentu na stanowisku Malvern-Spraytec

Badane paliwa	-	Olej pirolityczny Benzyna 91 Olej napędowy
Ciśnienie w komorze (ciśnienie atmosferyczne)	bar	1
Temperatura w komorze (temperatura otoczenia)	°C	20-21
Ciśnienie wtrysku	bar	400
Temperatura wtryskiwacza	°C	60
Czas wtrysku	ms	1,5
Liczba wtrysków w pojedynczej próbie	-	10
Liczby powtórzeń danej próby	-	10
Pomiar w dwóch punktach A i B (jak pokazano na rys. 4.3a)		

### 4.3. Komora o stałej objętości

Komora spalania o stałej objętości jest stanowiskiem, na którym wykonano rejestrację przebiegu ciśnienia w przedziale czasowym obejmującym wtrysk, zapłonu i rozwój płomienia aż do jego wygaśnięcia dla oleju pirolitycznego i paliw referencyjnych w warunkach zbliżonych do warunków występujących w rzeczywistym silniku ZS panujących w chwili wtrysku paliwa do cylindra. Przeprowadzono także badania wtrysku w atmosferze beztlenowej aby wyeliminować zapłon i określić prędkość wypływu paliwa z dyszy wtryskiwacza oraz maksymalny zasięg strugi wtryskiwanych paliw.

Ponadto przedstawione zjawiska rejestrowano za pomocą szybkiej kamery cyfrowej z prędkością do 20 000 kl/s.

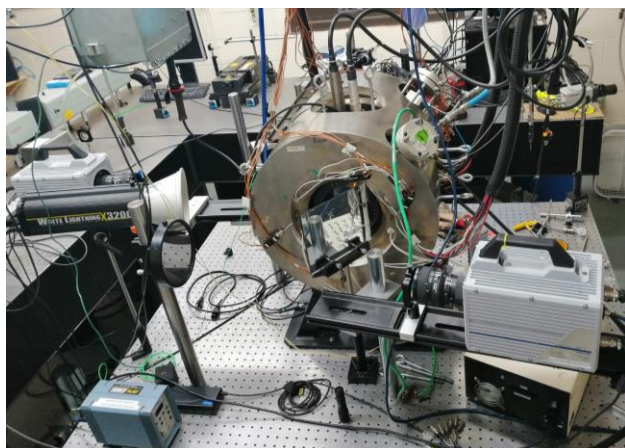
W przeciwieństwie do warunków panujących w silniku spalinowym przebieg wtrysku i zapłonu odbywał się w polu bezwirowym. Było to poniekąd zaletą tego typu badań, ponieważ można było w ten sposób wyeliminować wpływ zawirowania na przebieg badanych zjawisk. Przy zastosowaniu analizy porównawczej brak zawirowania nie miał istotnego wpływu na ocenę jakości przebiegu wtrysku oleju pirolitycznego w odniesieniu do benzyny i oleju napędowego.

Na rysunku 4.5 pokazano komorę spalania, w której przeprowadzano eksperyment wtrysku i spalania. Natomiast na rysunku 4.6 przedstawiono widok na laboratorium z komorą spalania i jej oprzyrządowaniem.

Komora spalania ma objętość roboczą 1,1 dm<sup>3</sup>. Wewnątrz komora jest owalna o średnicy 101,6 mm.

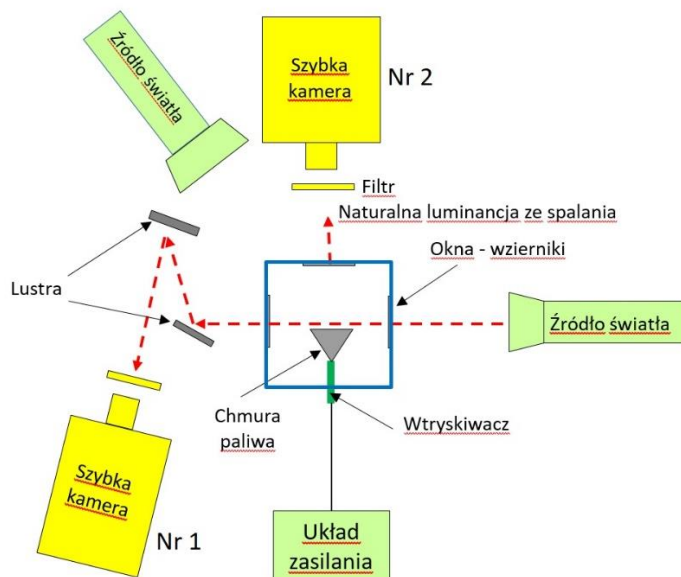


**Rys. 4.5.** Komora spalania

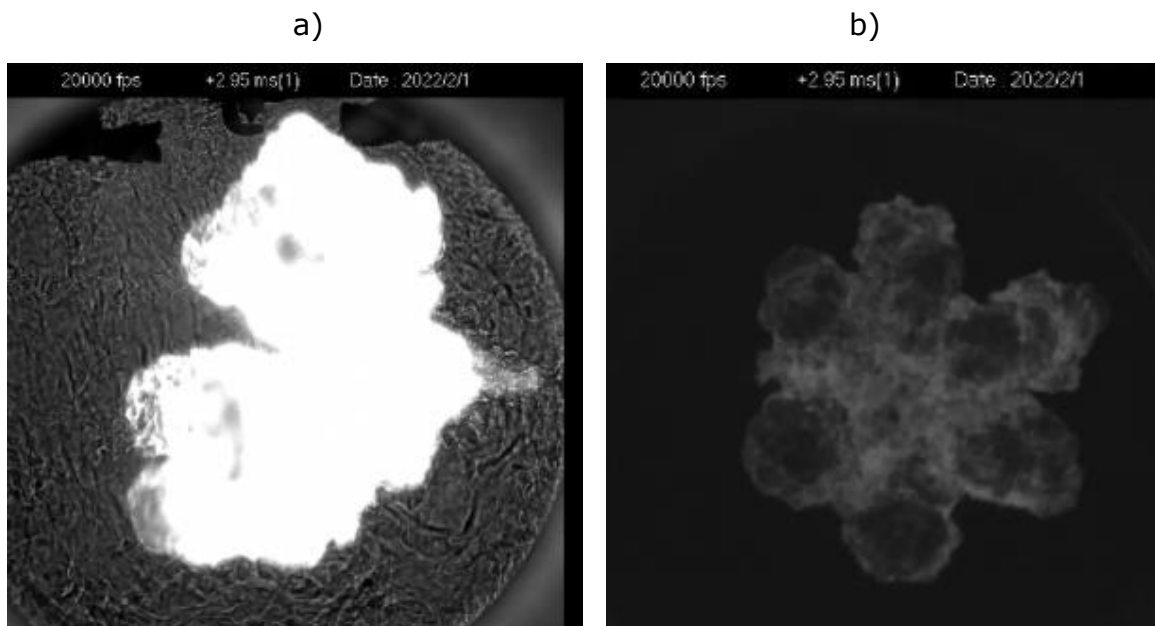


**Rys. 4.6.** Widok na stanowisko z komorą spalania

Stanowisko badawcze z komorą spalania schematycznie zaprezentowano na rysunku 4.7. Widoczne jest rozmieszczenie obydwu kamer oraz źródła światła monochromatycznego. Kamera 1 rejestrowała obraz w świetle przechodzącym podobnie jak w technice fotografii smugowej. Ta kamera była ustawiona poprzecznie do kierunku wypływającej strugi paliwa. Natomiast kamera 2 ustawiona była w podłużnej osi symetrii wtryskiwacza i służyła do rejestracji obrazu promieniowania własnego od powstałego płomienia. Aczkolwiek w tym przypadku, kamera ta mogła także rejestrować światło odbite generowane przez jedno ze źródeł. Było to szczególnie przydatne przy analizie samego wtrysku i rozpylania w atmosferze beztlenowej, gdzie brak luminancji własnej od płomienia sprawiał, że rejestrowany obraz byłby praktycznie nieczytelny.



**Rys. 4.7.** Schemat stanowiska z komorą spalania



**Rys. 4.8.** Przykładowe obrazy z kamer: obraz z kamery Nr 1 (a), obraz z kamery Nr 2 (b)

Podstawowe wyposażenie stanowiska z komorą spalania stanowiły dwie szybkie kamery cyfrowe Photron Fastcam SA1.1 o następujących parametrach eksploatacyjnych:

- obiektywy: długość ogniskowej/przystłona: 85 mm/1,4 i 60 mm/1,7,
- rozdzielczość: 512 x 512 pikseli, obraz monochromatyczny, 8-bitowa skala szarości,
- szybkość rejestrowania obrazów: 20 000 kl/s,
- szybkość migawki: 3,26  $\mu$ s,
- filtr ochronny: 550 nm.

### **Metodyka prowadzenia eksperymentu w komorze spalania**

Metodyka oraz prowadzenie eksperymentu spalania badanej cieczy w komorze spalania były precyzyjnie opisane w procedurze, której najistotniejsze punkty przedstawiono jak następuje:

- komora spalania przeznaczona jest do badań samozapłonu paliwa w podwyższonej temperaturze i ciśnieniu,
- komora spalania wstępnie zostaje wypełniona mieszaniną gazów  $H_2$ - $C_2H_2$ - $O_2$ - $N_2$  w odpowiednich proporcjach,
- zapłon mieszaniny gazów inicjowany jest od świcy zapłonowej,
- w wyniku spalania  $H_2$  i  $C_2H_2$  powstaje mieszanina złożona z:  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $O_2$  i  $N_2$  o wymaganych przez eksperyment proporcjach, szczególnie

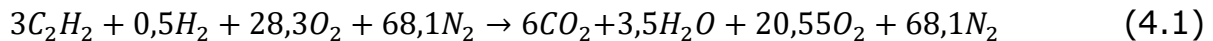
istotny jest udział tlenu, który w tym przypadku był w stężeniu 21% względem całości mieszaniny wypełniającej komorę,

- ciśnienie w komorze zmniejsza się w wyniku stosowania mikroupustu gazów (rys.4.9a),
- wtrysk badanego paliwa odbywa się automatycznie wskutek wyzwolenia wtryskiwacza przy zadanej temperaturze lub zadanym ciśnieniu.

Podczas wtrysku badanego paliwa komora wypełniona jest produktami spalania z poprzedniej reakcji spalania. Skład końcowy gazów wypełniających komorę w chwili wtrysku badanego paliwa jest zależny od ilości i rodzaju substratów do tej pierwszej reakcji spalania. Na potrzeby tych badań substraty dobrano tak aby uzyskać zawartość tlenu na poziomie 21% po pierwszym spalaniu. Stąd mieszanina substratów wypełniająca komorę miała skład:

- $C_2H_2$  w ilości 3%,
- $H_2$  w ilości 0,5%,
- $N_2$  w ilości 25,6%,
- mieszanina 40%  $O_2$ -60%  $N_2$  w wartości 70,8% co odpowiadało zawartości tlenu i azotu w całej mieszaninie odpowiednio 28,3% i 68,1%.

W wyniku spalania tej mieszaniny zgodnie z równaniem reakcji 4.1



uzyskano następujący skład gazów do testu właściwego:

- $CO_2$  w ilości 6,1%,
- $H_2O$  w ilości 3,6%,
- $O_2$  w ilości 20,9%,
- $N_2$  w ilości 69,4%.

Wtrysk badanego paliwa następował po osiągnięciu ciśnienia w komorze spalania na poziomie przykładowo 41 bar lub w temperaturze 1000 K co odpowiadało warunkom zbliżonym do tych panujących w końcu suwu sprężania w silniku o stopniu sprężania 17,5.

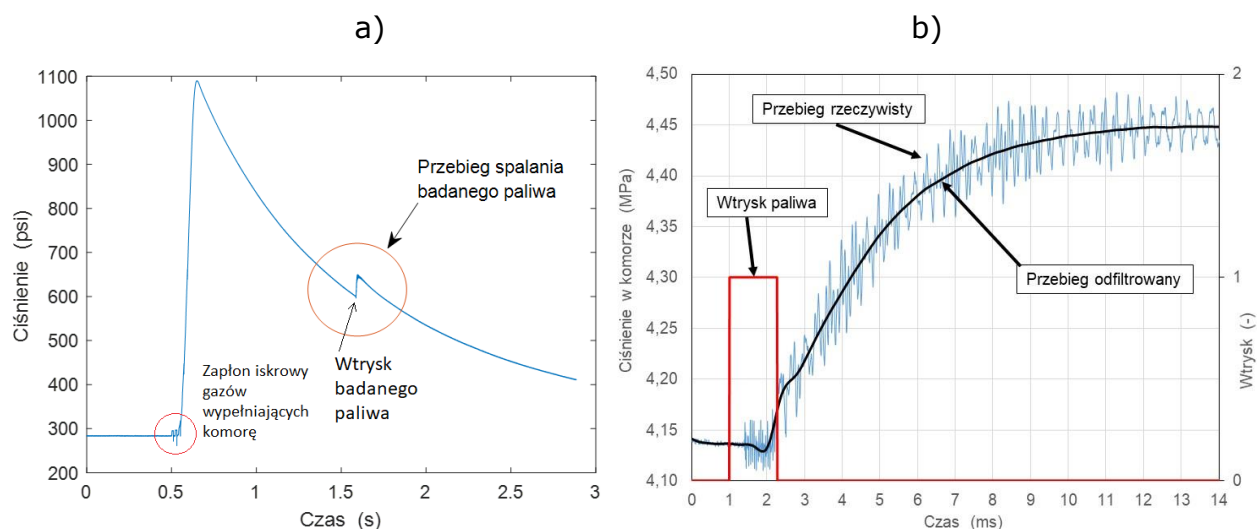
Badania przeprowadzono dla wtrysku oleju pirolitycznego i wtrysku oleju napędowego lekkiego według danych jak pokazano w tablicy 4.2.



**Tablica 4.2.** Macierz eksperymentu w komorze spalania

		Rodzaj paliwa	
		Olej pirolityczny	Olej napędowy, lekki
Próba spalania w atmosferze 21% O <sub>2</sub> / liczba prób		Tak / 2	Tak / 5 (41 bar)
Próba w atmosferze beztlenowej wypełnionej azotem / liczba prób		Tak / 2	Tak / 2
Temperatura początkowa	K	453	453
Temperatura w chwili wtrysku	K	1000	1000
Ciśnienie w komorze w chwili wtrysku	bar	41; 74; 95	41; 74; 95
Ciśnienie wtrysku	bar	400	400

Dla ciśnienia 41 bar przeprowadzono pięć prób, aby sprawdzić powtarzalność wyników i ocenić niedokładność pomiarową. Analizę powtarzalności pomiarów dla eksperymentu przedstawiono w dalszej części pracy w rozdziale 5.



**Rys. 4.9.** Przykładowy przebieg ciśnienia wewnątrz komory (a), powiększenie przedstawiające wzrost ciśnienia ze spalania badanego paliwa (b)

W analizie termodynamicznej wykonano obliczenia szybkości wydzielania ciepła  $dQ/dt$  i  $dQ(t)$ . W celu obliczenia przebiegu szybkości wydzielania ciepła podczas spalania badanego paliwa w komorze o stałej objętości przyjęto szereg uproszczeń jak następuje:

- komora spalania jest komorą izolowaną, co sprawia, że nie ma przepływu ciepła z komory do otoczenia,
- gazy wypełniające komorę traktuje się jako gaz doskonały,
- przyrost masy i liczby moli wynikający z wtrysku badanego paliwa do komory uznaje się za marginalny i niepowodujący istotnej zmiany w obliczeniach,
- zmiana składu chemicznego gazów przed i po spalaniu badanego paliwa jest nieistotna dla dokładności obliczeń, przyjmuje się, że ta mieszanina nie zmienia się,
- ubytek masy gazów wypełniających komorę i spadek ciśnienia wynikający z tego ubytku podczas spalania badanego paliwa przyjmuje się za marginalnie mały i nie wpływający na dokładność obliczeń.

Masa gazów wypełniająca komorę spalania w chwili wtrysku badanego paliwa w temperaturze 1000 K i ciśnieniu 41 bar miała wartość około 15,5 g. Natomiast dawka wtrysniętego paliwa była na poziomie około 26 mg, tj. około 600 razy mniejsza. Zatem, przyjęcie uproszczenia odnośnie marginalności wpływu dawki paliwa na całkowity bilans masowy i molowy w komorze oraz pozostałe wyliczane wielkości podczas spalania jest w pełni uzasadnione, ponieważ upraszcza w dużym stopniu dalsze obliczenia.

Czasowy przebieg szybkości wydzielania ciepła  $dQ(t)$  wyliczano w oparciu o zależność dla gazu doskonałego (4.2).

$$p \cdot V = n \cdot R_u \cdot T \quad (4.2)$$

Po obustronnym zróżniczkowaniu tego równania do postaci różniczki zupełnej i założeniu braku zmiany objętości  $V$  otrzymano postać 4.3

$$V \cdot dp = n \cdot R_u \cdot dT \quad (4.3)$$

Następnie przyjęto zależności wiążące uniwersalną stałą gazową  $R_u$  z ciepłami właściwymi  $c_p$  i  $c_v$  (4.4)

$$\frac{c_v}{R_u} = \frac{c_v}{c_p - c_v} = \frac{1}{\kappa - 1} \quad (4.4)$$

i podstawiono do 4.3 otrzymując 4.5.

$$\frac{1}{\kappa-1} \cdot V \cdot dp = n \cdot c_V \cdot dT \quad (4.5)$$

Zgodnie z definicją energii wewnętrznej przyjęto, że jest ona opisana równaniem 4.6.

$$U_i(T_i) = n_i \cdot c_{V,i} \cdot T_i \quad (4.6)$$

W oparciu o I zasadę termodynamiki przy założeniu braku pracy wykonywanej przez układ ciepło wydzielone w układzie w wyniku przemiany następującej od punktu 1 do punktu 2 można zapisać jako różnicę energii wewnętrznej (4.7).

$$Q = U_2(T_2) - U_1(T_1) \quad (4.7)$$

Elementarna zmiana ciepła  $dQ$  będzie wyrażona zależnością 4.8 i po zredukowaniu wyrazów podobnych uzyska się postać 4.9. Jest oczywistym, że ten elementarny przyrost wydzielania ciepła odbywa się w pewnym skończonym przedziale czasowym, którym jest okres próbkowania przebiegu ciśnienia tj. przedział czasowy równy 10  $\mu$ s. Stąd elementarne  $dQ$  jako zależność czasowa (czyli  $dQ(t)$ ) będzie proporcjonalne do szybkości wydzielania ciepła  $dQ/dt$ , które jest odniesione do czasu 1 sekundy.

$$dQ = U(T_i + dT) - U(T_i) = n_i \cdot c_{V,i} \cdot (T_i + dT) - n_i \cdot c_{V,i} \cdot T_i \quad (4.8)$$

$$dQ = n_i \cdot c_{V,i} \cdot dT \quad (4.9)$$

Przy założeniu upraszczającym zakładającym, że liczba moli  $n_i$  substancji wypełniających komorę oraz  $c_{V,i}$  nie zmieniają się w trakcie spalania oraz uwzględniając zależność 5 otrzyma się końcową postać na szybkość wydzielania ciepła, która po uwzględnieniu zmiennej czasu  $t$  ma postać równania 4.10.

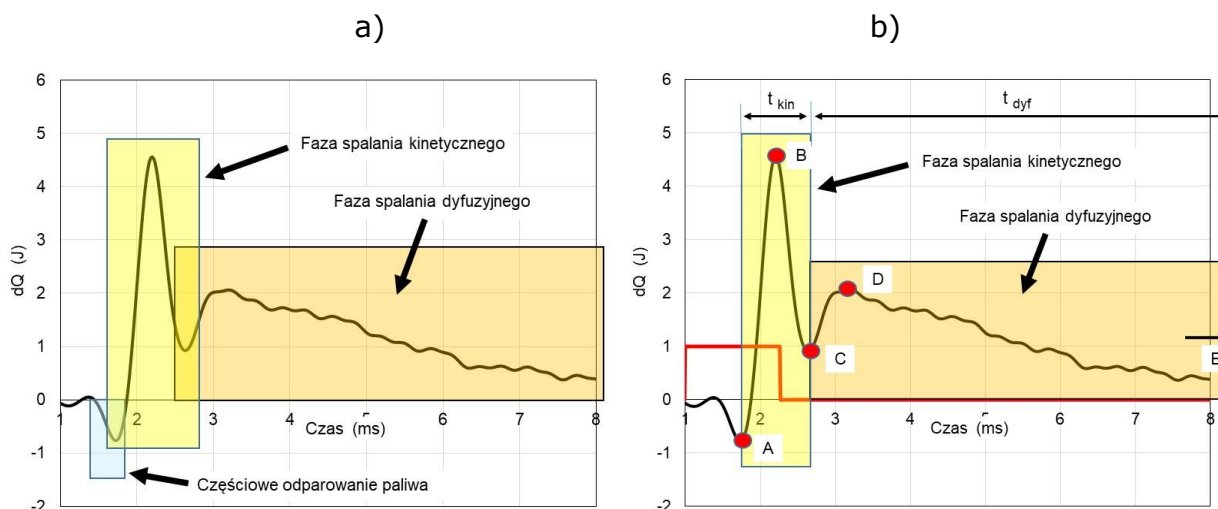
$$dQ = \frac{1}{\kappa-1} \cdot V \cdot dp \quad (4.10)$$

Przykładowy przebieg  $dQ$  przedstawiono na rysunku 4.10. Jak wynika z zależności 4.10, przebieg zmian ciśnienia  $dp$  jest w ścisłej proporcji z przebiegiem wydzielania ciepła  $dQ$ . Iloraz  $\kappa$  ciepł właściwych  $c_p/c_v$  został

obliczony dla danego ciśnienia i temperatury w oparciu o dane tablicowe  $c_p$  i  $c_v$  (tabl. 5.3) dla mieszaniny gazów wypełniających komorę spalania przed rozpoczęciem wtrysku badanego paliwa.

**Tablica 4.3.** Ciepła właściwe  $c_p$  i  $c_v$  i  $\kappa$  dla gazów wypełniających komorę spalania

Gaz		O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O (para)
Skład gazu	%	20,9	69,4	6,1	3,6
Ciśnienie i temperatura: 41 bar, 1000 K					
$c_p$	kJ/(mol·K)	34,78	32,81	54,69	42,33
$c_v$	kJ/(mol·K)	26,37	24,42	46,06	33,36
$\kappa$	-	1,318			
Ciśnienie i temperatura: 74 bar, 1000 K					
$c_p$	kJ/(mol·K)	34,86	32,89	54,99	43,22
$c_v$	kJ/(mol·K)	26,38	24,45	46,11	33,69
$\kappa$	-	1,321			
Ciśnienie i temperatura: 95 bar, 1000 K					
$c_p$	kJ/(mol·K)	34,92	32,94	55,17	43,81
$c_v$	kJ/(mol·K)	26,39	24,47	46,14	33,9
$\kappa$	-	1,323			



**Rys. 4.10.** Przykładowy przebieg szybkości wydzielania ciepła  $dQ$  (a), ten sam przebieg z umownym podziałem na fazy spalania kinetycznego i dyfuzyjnego (b)

W początkowym zakresie na przebiegu  $dQ$  można zaobserwować spadek. Ten spadek jest zlokalizowany w przedziale czasowym gdy następuje otwarcie wtryskiwacza (punkt A na rysunku 4.10b) i wpływ paliwa do komory. Najbardziej prawdopodobnym jest wyjaśnienie tego ubytku ciepła wskutek

odparowania wtryskiwanego paliwa. Potwierdzeniem tej obserwacji i wniosku jest także przebieg ciepła skumulowanego (rys. 4.11a) przedstawiony w dalszej części pracy.

Z przebiegu szybkości wydzielania ciepła  $dQ$  można odczytać przedział spalania typowy dla spalania kinetycznego oraz przedział spalania dyfuzyjnego. Jest oczywistym, że w pewnej chwili czasu występują obydwa rodzaje spalania i jest trudne do oceny kiedy jeden z nich się kończy a drugi rozpoczyna. Stąd wprowadzono uproszczenie polegające na tym, że przebieg spalania kinetycznego rozpoczyna się od chwili wzrostu ciepła  $dQ$  (punkt A) do wystąpienia lokalnego minimum (punkt C na rysunku 4.10b). Natomiast spalanie dyfuzyjne przyjęto, że trwa od punktu C do końca spalania tj. do chwili gdy  $dQ$  osiągnie wartość 0 w punkcie E, którego lokalizacji nie wskazano na rysunku 4.10b. Dla obydwu faz spalania wprowadzono wielkości  $t_{kin}$  i  $t_{dyf}$  oznaczające odpowiednio czas spalania kinetycznego i czas spalania dyfuzyjnego. Ponadto do analizy porównawczej przyjęto kolejne wielkości, którymi są maksymalne wartości szybkości spalania kinetycznego  $dQ_{kin,max}$  i szybkości spalania dyfuzyjnego  $dQ_{dyf,max}$  oznaczone odpowiednio punktami B i D.

Poza znajomością przebiegu szybkości wydzielania ciepła  $dQ$  i  $dQ/dt$  w wielu przypadkach wartościowa informacja jest też zawarta w przebiegu ciepła skumulowanego  $Q$ . Obliczenie ciepła  $Q$  wyznaczono na podstawie równania 11 całkując przebieg  $dQ$ .

$$Q = \frac{1}{\kappa-1} \cdot V \cdot \int_{t_0}^{t_{100}} dp \quad (4.11)$$

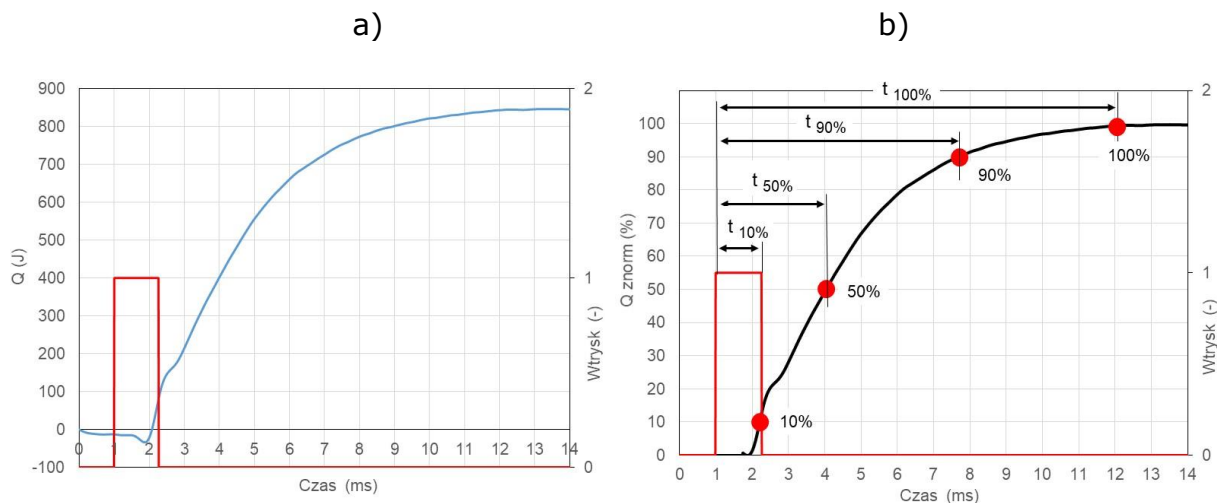
gdzie:

$t_0$  – chwila początku wtrysku,

$t_{100}$  – chwila końca spalania.

Przykładowy przebieg skumulowanego ciepła  $Q$  przedstawiono na rys. 4.11a. W tle rysunku dodatkowo zamieszczono sygnał sterowania wtryskiwaczem. Z przebiegu  $Q$  można odczytać wartość maksymalną  $Q_{max}$ , która została wykorzystana do obliczenia dawki paliwa oraz pewne punkty charakterystyczne:  $t_{2\%}$ ,  $t_{10\%}$ ,  $t_{50\%}$ ,  $t_{90\%}$  i  $t_{100\%}$ . Punkty te można odczytać po przeskalowaniu osi  $Q$  ( $Q(t)$ ) do skali procentowej wg równania 4.12. Zależność ciepła skumulowanego znormalizowanego  $Q_{norm}(t)$  do przedziału 0-100% została przedstawiona na rys. 4.11b.

$$Q_{norm}(t) = \frac{Q(t)}{Q_{max}} \cdot 100\% \quad (4.12)$$



**Rys. 4.11.** Przykładowy przebieg ciepła skumulowanego  $Q$  (a), ten sam przebieg po znormalizowaniu i zaznaczeniu charakterystycznych punktów (b)

Zaznaczone na rysunku 4.11b charakterystyczne punkty:  $t_{2\%}$ ,  $t_{10\%}$ ,  $t_{50\%}$ ,  $t_{90\%}$  i  $t_{100\%}$  posłużą do wyznaczenia faz spalania, którymi ocenia się przebieg spalania w tłokowym silniku spalinowym. Fazy te można podzielić następująco:

- $t_{0-2} = t_{2\%} - t_0$  – faza początku spalania mierzona od początku wtrysku do wydzielenia 2% ciepła ze spalania. Fazę tę zazwyczaj uważa się za wiarygodny parametr reprezentujący zwłokę zapłonu badanego paliwa.
- $t_{0-10} = t_{10\%} - t_0$  – faza początku spalania uważana za kolejny miarodajny parametr do oceny zwłoki zapłonu.
- $t_{10-90} = t_{90\%} - t_{10\%}$  – główna faza spalania. Niektóre prace badawcze podają, że lepiej główną fazę spalania reprezentuje parametr  $t_{10-75}$  w przypadkach gdy ustalenie punktu  $t_{90\%}$  obciążone jest dużą niedokładnością pomiarową. Podobnie trudno jest wiarygodnie ustalić położenie końca spalania tj. punkt  $t_{100\%}$  także z powodu dużej niedokładności pomiarowej.
- $t_{0-90} = t_{90\%} - t_0$  – sumaryczny czas spalania uwzględniający obydwie fazy: początkową i główną.

Dla badanych przebiegów spalania obliczono także temperaturę wewnątrz komory. Temperaturę wyliczono w oparciu o przebieg ciśnienia z równania dla gazu doskonałego wg równania 4.13. Stwierdzono, że tak wyliczona temperatura jest wartością średnią dla gazów wypełniających komorę. Podczas spalania pole temperatury jest mocno zróżnicowane w zależności od chwilowej

obecności płomienia i dlatego przyjęto, że obliczone wg równania 4.13 wartości dotyczą temperatury średniej po zakończeniu spalania.

$$T = \frac{p \cdot V}{n \cdot R_u} \quad (4.13)$$

gdzie:

$n$  – liczba moli gazów wypełniających komorę spalania. Przyjęto, że nie uwzględnia się dawki paliwa i gazów powstałych ze spalania tej dawki.

$R_u$  – uniwersalna stała gazowa,  $R_u = 8,3145 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ ,

$V$  – objętość komory spalania  $1,1 \text{ dm}^3$ ,

$p$  – ciśnienie w komorze spalania.

Liczbę moli wyznaczono według równania 4.14.

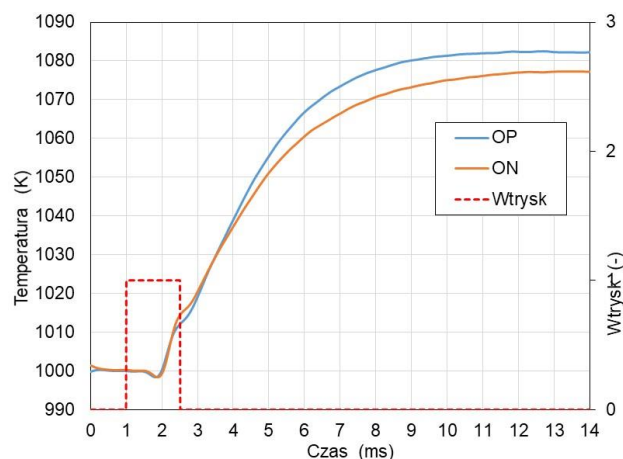
$$n = \frac{m_g}{MW_g} \quad (4.13)$$

gdzie:

$m_g$  – masa gazów wypełniających komorę przed wtryskiem badanego paliwa,

$MW_g$  – wypadkowa masa molowa mieszaniny gazów wypełniających komorę spalania przed wtryskiem badanego paliwa.

Całkowita masa  $m_g$  mieszaniny gazów wypełniających komorę spalania wynosi  $0,0157 \text{ kg}$ . Masa molowa  $MW_g$  wynosi  $29,46 \text{ kg}/\text{kmol}$  a liczba moli  $n$  wynosi  $0,5359$ . Na bazie tych danych obliczono temperaturę w komorze dla próby spalania oleju pirolitycznego i oleju napędowego przy ciśnieniu  $41 \text{ bar}$  (rys. 4.12). Jak można zauważyć, wartość maksymalna temperatury jest różna w obydwu tych przypadkach i wynika z ilości wydzielonego ciepła a w konsekwencji dawki paliwa dostarczanego do komory. Mając na uwadze także poprzednią uwagę uznano, że przebiegi temperatury nie będą wnosić dodatkowych istotnych informacji odnośnie przebiegu spalania badanych paliw i dlatego temperatura w komorze spalania nie będzie podlegać dalszej analizie.



**Rys. 4.12.** Przykładowy przebieg temperatury w komorze podczas spalania oleju pirolitycznego i oleju napędowego przy ciśnieniu początkowym 41 bar

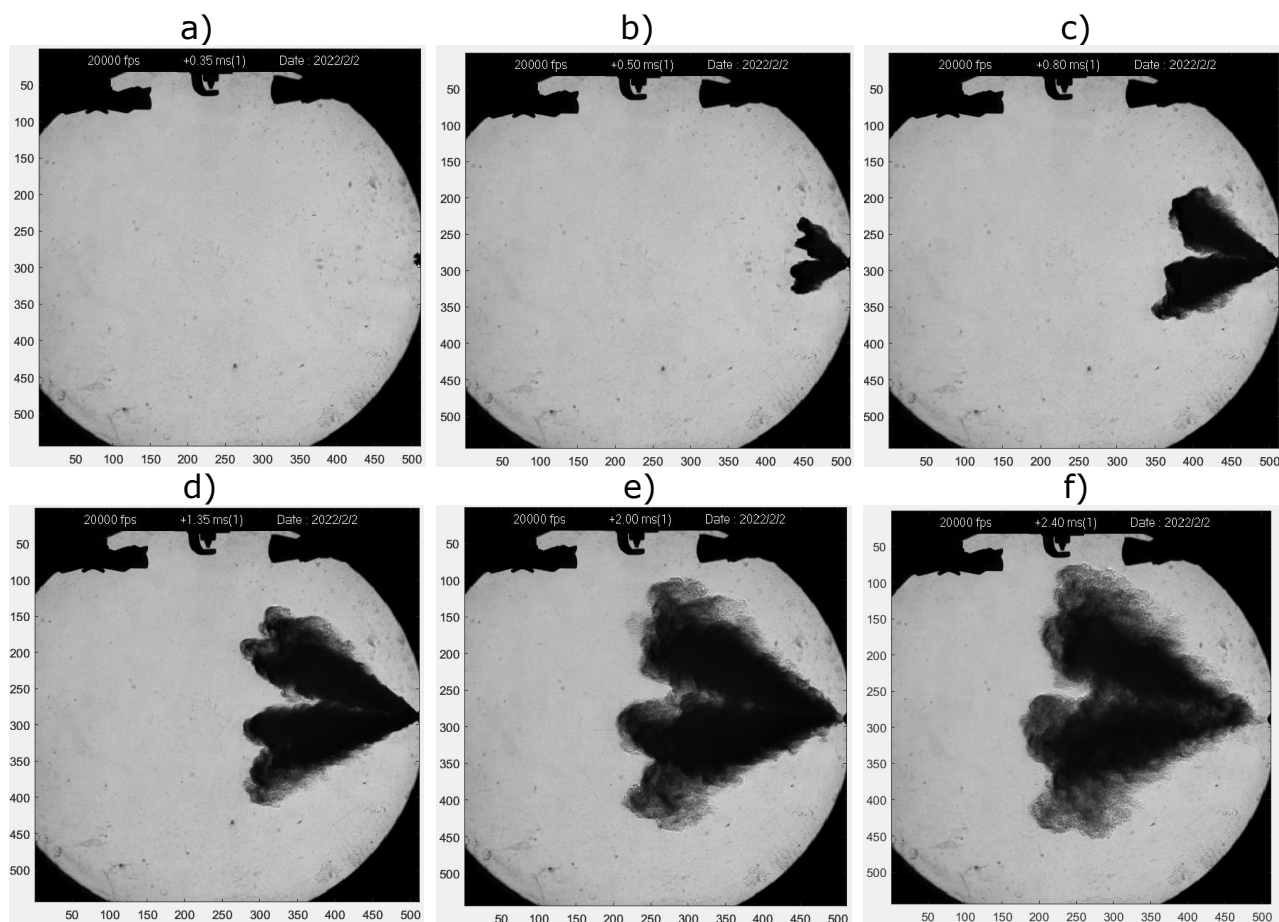
## Metodyka analizy obrazów z kamer

Przebieg wtrysku, zapłonu oraz rozwoju płomienia zarejestrowany za pomocą szybkiej kamery cyfrowej zapisywany był w formacie mp4 lub opcjonalnie w formacie avi. Następnie film był przetwarzany za pomocą własnego kodu w programie Matlab do postaci macierzy trójwymiarowej o indeksowaniu  $x,y,z$  gdzie indeksy  $x,y$  oznaczały adres konkretnego piksela w obrazie o rozdzielczości  $512 \times 512$  a wskaźnik  $z$  był kolejnym obrazem w funkcji czasu. W ten sposób można było dokonywać szeregu operacji matematycznych na obrazie będącym zbiorem liczb 8-bitowych.

Celem obróbki obrazów było usunięcie zakłóceń o charakterze przypadkowym, w tym szumów związanych z poziomem czerni dla tła oraz przypadkowych zakłóceń wynikających z różnej czułości pikseli na matrycy światłoczułej zamontowanej w kamerze.

Rejestracja obrazów wtrysku i propagacji płomienia za pomocą szybkich kamer cyfrowych posłużyła także oceny prędkości wypływu paliwa i zasięgu strugi paliwa. Należy zaznaczyć, że zdefiniowana w tej pracy prędkość wypływu paliwa nie jest prędkością cząstek paliwa w konkretnym przekroju np. u wylotu dyszy, ale jest to prędkość rozprzestrzeniania się chmury paliwa wewnątrz komory spalania. W oparciu o chronologicznie rejestrowane obrazy można było zidentyfikować granicę obszaru tej chmury oraz jej położenie przestrzenne w zależności od czasu. Na rysunku 4.13a-f przedstawiono kilka wybranych, przykładowych obrazów przebiegu wypływu paliwa z wtryskiwacza w kolejnych chwilach czasowych.





**Rys. 4.13.** Przykładowe przebiegi wypływu paliwa z wtryskiwacza w chwili mierzonej od impulsu wyzwalania wtryskiwacza: 0,35 ms (a), 0,50 ms (b), 0,80 ms (c), 1,35 ms (d), 2,00 ms (e), 2,40 ms (f)

W tym eksperymencie paliwo nie podlegało zapłonowi, ponieważ było wtryskiwane do komory wypełnionej azotem. W ten sposób można było ocenić zasięg strugi wypływającego paliwa oraz szybkość jego rozpylania. Zdjęcia chmury paliwa wykonywano w świetle przechodzącym przy wykorzystaniu układu optycznego stosowanego w technice smugowej Schlieren, ponieważ samo paliwo nie generuje z siebie światła, natomiast obraz wykonany techniką światła odbitego okazał się być mało czytelny szczególnie w przypadkach gdy chodziło o wyraźne zarejestrowanie granicy pomiędzy chmurą paliwa i gazem wypełniającym komorę. Na rysunkach 4.13 e,f można zaobserwować na obrzeżu tworzącej się chmury rozbijanie dużych fragmentów strugi paliwa na pojedyncze krople znane jako zjawisko tzw. *secondary break-up*.

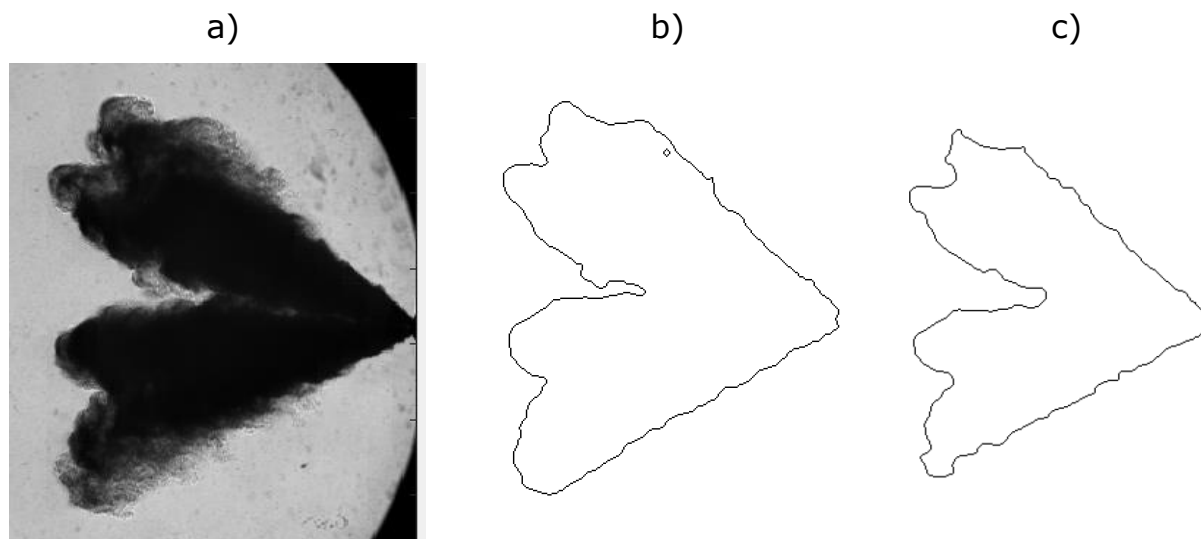
## Etapy przetwarzania obrazu

Zarejestrowane obrazy przetwarzano przy wykorzystaniu szeregu funkcji do obróbki obrazów dostępnych w środowisku oprogramowania Matlab 2021b. Celem przetwarzania tych obrazów było uzyskanie wyraźnie zaznaczonej granicy tj. konturu dla obszaru chmury rozpylanego w komorze paliwa. W tym celu wykonano następujące chronologicznie po sobie operacje graficzne:

1. wyselekcjonowanie obrazu tła rzeczywistego z przypadkowym szumem,
2. wygenerowanie obrazu tła uśrednionego za pomocą obróbki dolnoprzepustowym filtrem Gaussa w celu uśrednienia i tym samym zmniejszenia ziarnistości tła,
3. wykonanie operacji odejmowania tła od obrazu rzeczywistego,
4. wyostrenie wybranych poziomów szarości i podniesienie kontrastu dla wynikowego obrazu za pomocą funkcji *adjustment*,
5. zastosowanie filtra medianowego w celu usunięcia pozostałości szumu,
6. zastosowanie funkcji *cropping* mającej na celu wyciąć charakterystyczny fragment obrazu w celu wykonania na nim operacji tzw. *disk structuring element*,
7. zastosowanie mikrostruktur kolistych do wydzielonych mikroobszarów chmury paliwa w celu uzyskania okrągłego kształtu kropli oraz wygładzanie elementów „kanciastych” i wygładzenie powierzchni strugi. Funkcja *disk structuring element* umożliwia wprowadzenie do obrazu regularnych kształtów, co przetwarzało nieregularne kształty do kształtów regularnych np. nadawało kształt kulisty dla obszaru nieregularnego zbliżonego do kropli. Funkcja ta pomagała także w usuwaniu nieciągłości w obrazie zachowując jednakże ostrość na krawędziach obszarów różniących się poziomem zaciemnienia i usunięciu obszarów a takim samym poziomie zaciemnienia jak obszary w chmurze paliwa ale niepołączonych z tymi obszarami;
8. zastosowanie dolnoprzepustowego filtra Wienera do usunięcia tzw. szumu addytywnego,
9. obliczenie współczynnika progowego do konwersji obrazu ze skali szarości do binarnej skali czarno-białej 0-1 na podstawie średniego poziomu szarości na danym obrazie,
10. konwersja obrazu ze skali szarości do skali 0-1 czarno-białej,

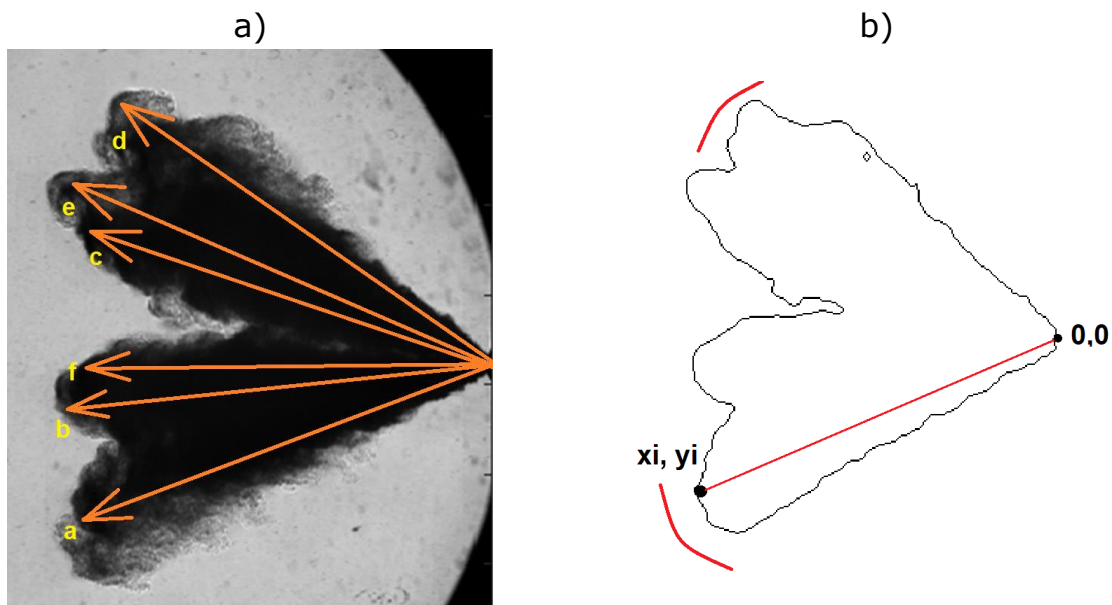
## 11. wygenerowanie obrazu konturu chmury paliwa.

Na rysunku 4.14 przedstawiono wygląd „surowego”, nieobrobionego obrazu (rys. 4.14a) oraz obrazu końcowego (rys. 4.14b i 4.14c) uzyskanego w wyniku obróbki cyfrowej. Obraz ten przedstawia kontur chmury paliwa dla dwóch różnych współczynników progowych zamiany skali szarości na skalę binarną 0-1. Mając wyznaczony kontur chmury rozpylanego paliwa przystąpiono do obliczenia zasięgu dla pojedynczej strugi paliwa. Wtryskiwacz użyty do badań był wtryskiwaczem 6-otworkowym. Na rysunku 4.15a przedstawiającym wpływ paliwa dodatkowo naniesiono hipotetyczne osie symetrii strug paliwa wpływających z sześciu otworków wtryskiwacza.



**Rys. 4.14.** Przykładowy przebieg chmury paliwa (a) oraz konturu tej chmury dla współczynnika progowego 0,8 (b) i 0,2 (c)

Rzeczywisty wpływ ma charakter 3-wymiarowy, natomiast obraz jest 2-wymiarowy. Aby zminimalizować błędy wymiarowe wynikające z konwersji rzeczywistego obrazu 3D do obrazu 2D przyjęto, że strugi oznaczone na rys. 4.15a indeksami „a” i „d” leżą w płaszczyźnie równoległej do płaszczyzny zdjęcia (tj. równoległe do matrycy światłoczułej) i dlatego można przyjąć, że ich równoległe wykonane rzuty na płaszczyznę zdjęcia dają prawidłowe odwzorowanie w wymiarach oczywiście po uwzględnieniu jedynie skali proporcjonalności.

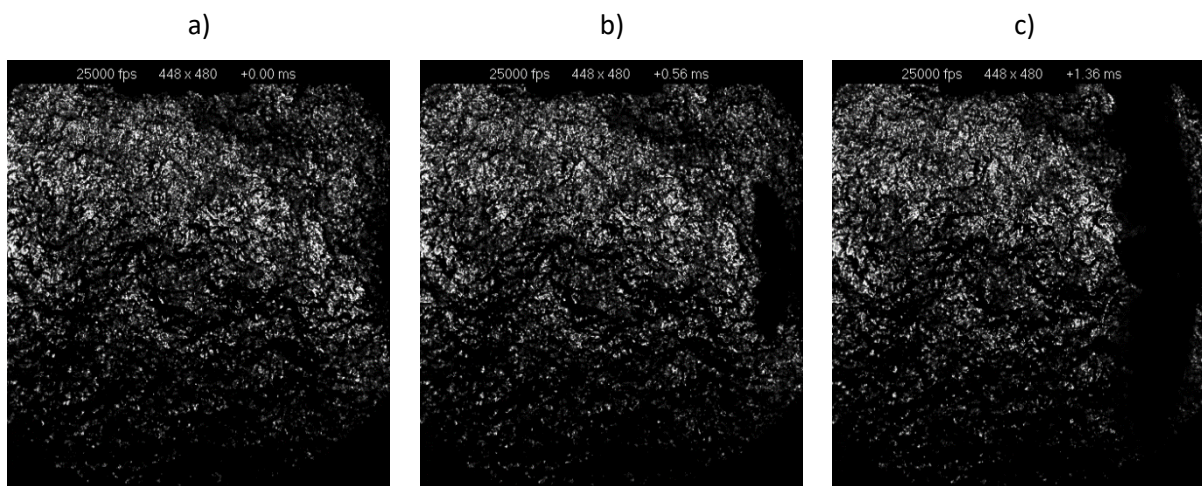


**Rys. 4.15.** Przykładowy przebieg chmury paliwa z zaznaczonymi strugami (a) oraz konturu tej chmury z pokazanym sposobem obliczenia zasięgu (b)

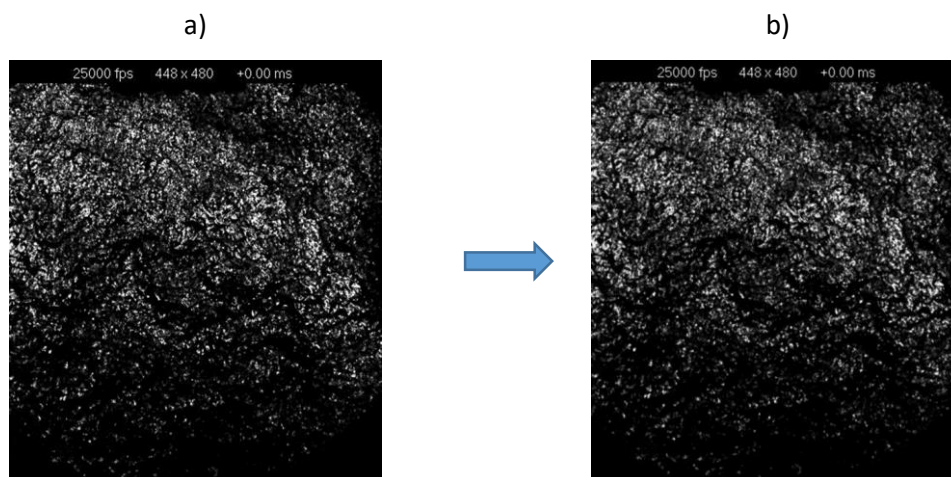
### Przykłady działania poszczególnych operacji na obrazach

Na rysunkach od 4.16 do 4.22 przedstawiono przykładowe działanie wybranych operacji graficznych na obrazach poddawanych cyfrowej obróbce. Na rysunku 4.16 przedstawiono wybrane nieobrobione klatki z przykładowego filmu rejestrującego przebieg wtrysku oleju napędowego. Na rysunku 4.16a przedstawiono pierwszą klatkę, z której wyodrębniono tła, które następnie poddano uśrednieniu po przestrzeni z oknem uśredniania 5x5 pikseli. Szum tła poddano również uśrednieniu po czasie w przedziale czasowym zawierającym 3 kolejno po sobie następujące klatki. W przypadku uśredniania wykorzystano filtr Gaussa występujący pod nazwą *2-D Gaussian smoothing*.

Następnie obliczono poziom szumu dla tego tła charakteryzowany przez wartość średnią jasności i odchylenie standardowe. W następnym etapie można było od kolejnych obrazów odjąć poziom tła. Na klatkach nr 15 i 35 widoczne zaczernienie z prawej strony jest wynikiem osłabienia promieniowania przez tworzącą się chmurę paliwa wpływającego z wtryskiwacza.

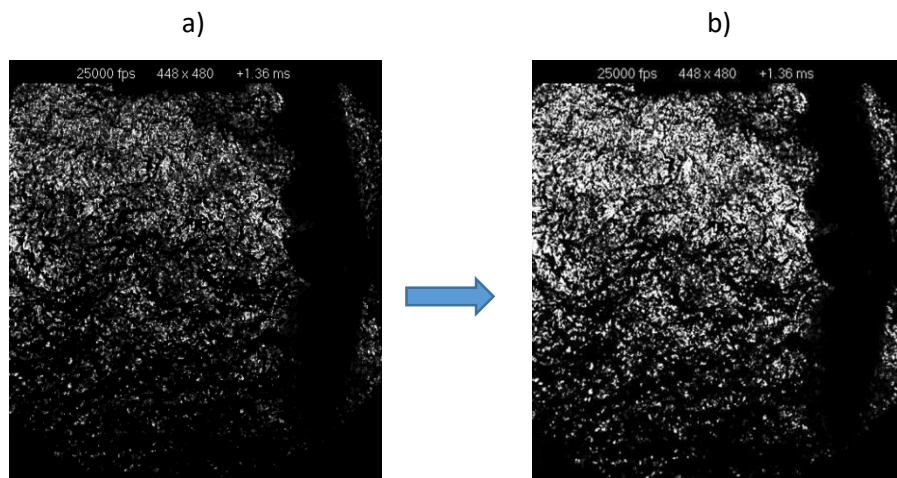


**Rys. 4.16.** Klatka nr 1 -obraz tła (a), klatka nr 15 (b), klatka nr 35 (c) z przykładowego filmu rejestrującego wpływ oleju napędowego

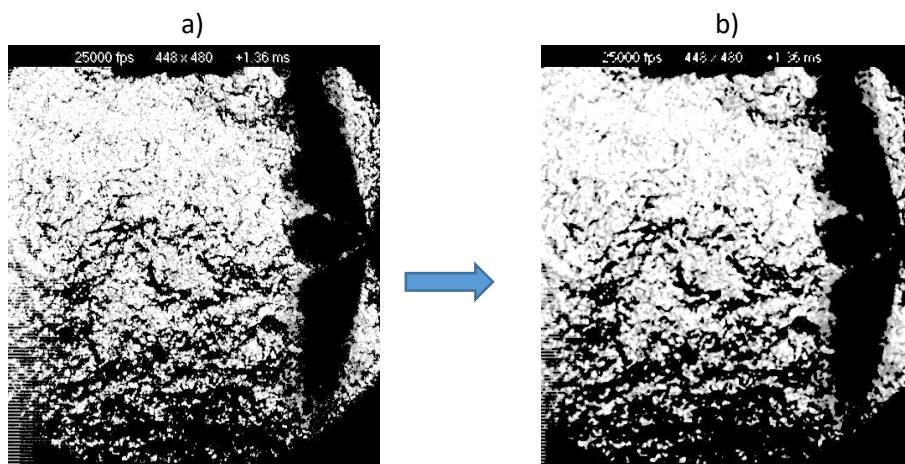


**Rys. 4.17.** Klatka nr 1: obraz bez obróbki (a) i obraz po zastosowaniu filtra Gaussa (b)

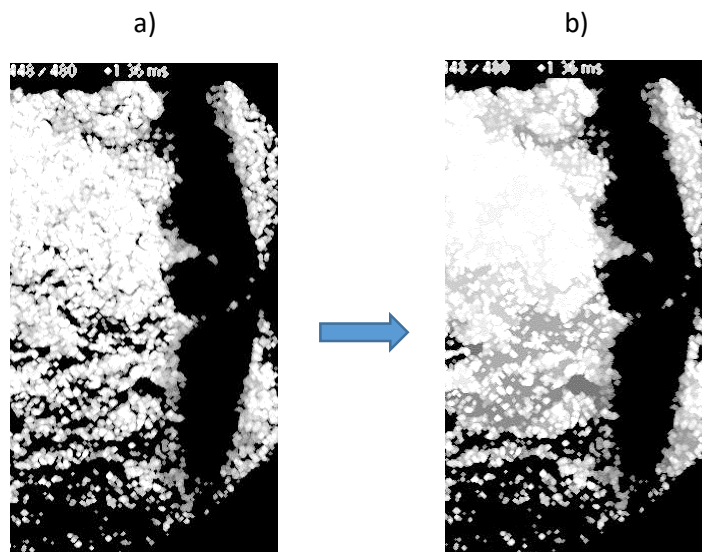




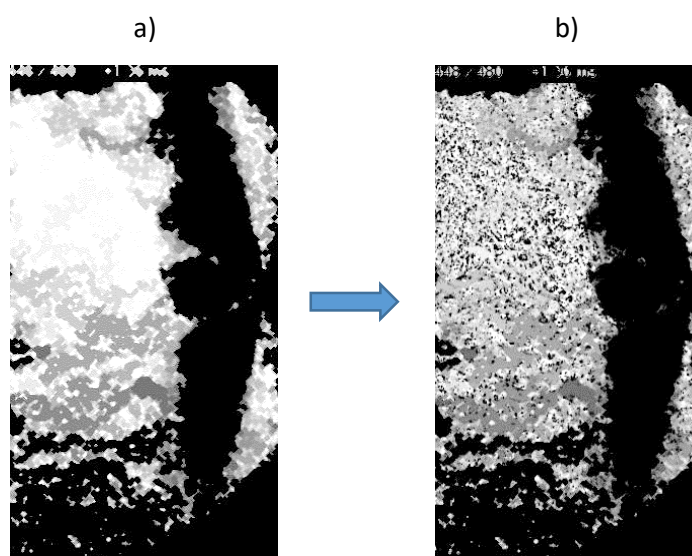
**Rys. 4.18.** Klatka nr 35: obraz bez obróbki (a) i obraz po zastosowaniu filtra Gaussa (b)



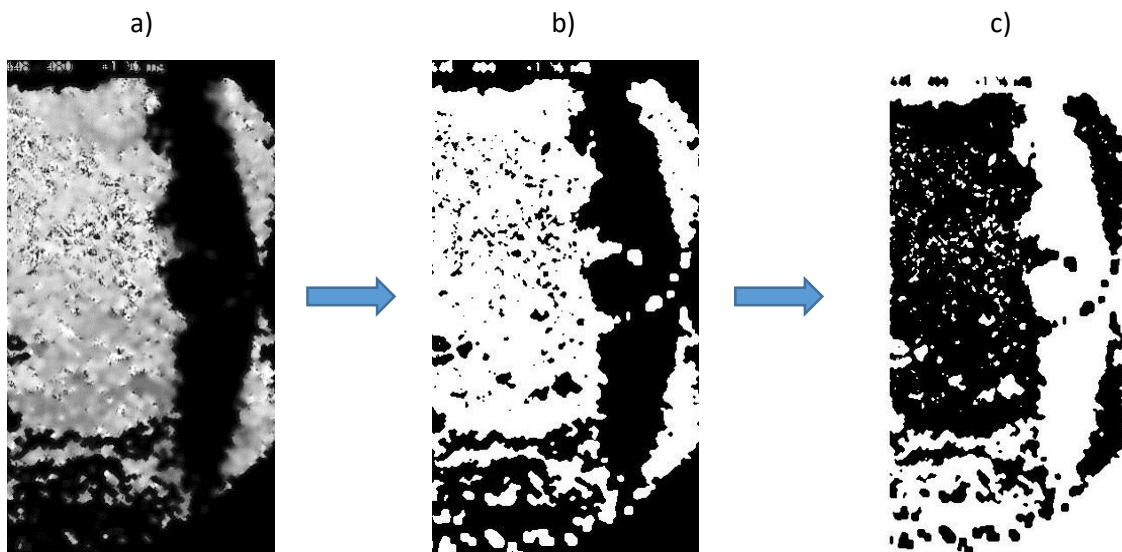
**Rys. 4.19.** Klatka nr 35: obraz po zintensyfikowaniu kontrastu (a) i obraz po zastosowaniu filtra medianowego (b)



**Rys. 4.20.** Klatka nr 35: obraz po wykadrowaniu przycięciu bez obróbki (a) i obraz po zastosowaniu funkcji *disk structuring element* (b)

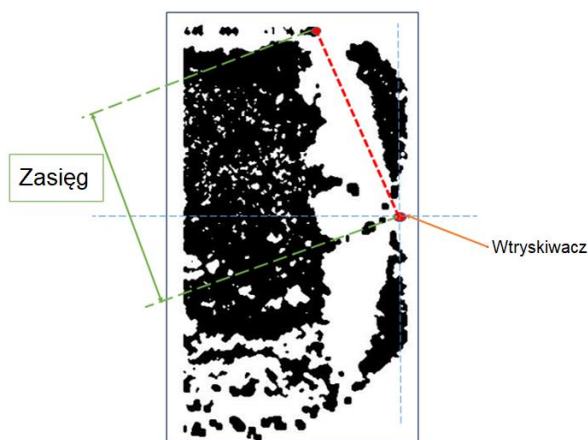


**Rys. 4.21.** Klatka nr 35: obraz po „wygładzeniu” krawędzi (a) i obraz po odjęciu tła (b)



**Rys. 4.22.** Klatka nr 35: obraz po zastosowaniu filtra Wienera (a), obraz po konwersji do dwóch kolorów czerni-biel (b) i oraz po odwróceniu kolorów (c)

Zasięg strugi (Rys. 4.23) wypływającego paliwa liczony był posługując się twierdzeniem Pitagorasa na podstawie znajomości współrzędnych  $x, y$  dla wszystkich punktów leżących na granicy obszaru czarnego i białego a następnie dla tak obliczonego zbioru wyszukiwano jego maksimum.

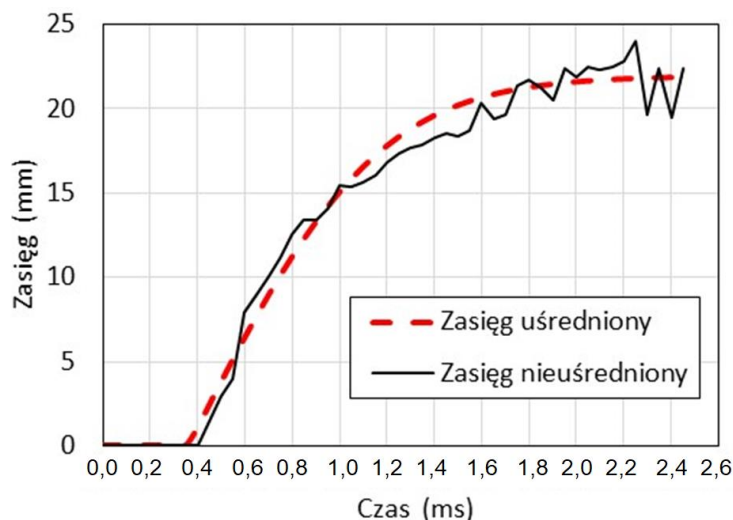


**Rys. 4.23.** Klatka nr 35 – sposób pomiaru zasięgu strugi paliwa

Zasięg został zdefiniowany jako największa odległość (rys.4.15b, 4.23) od punktu o współrzędnych  $0,0$  (końcówka wtryskiwacza) do punktu o współrzędnych  $x_i, y_i$  leżącego na konturze chmury paliwa w obszarze, w którym występuje struga „a” lub „d”.



Przykładowy przebieg zasięgu przedstawiono na rysunku 4.24. Przebieg ten poddano filtracji filtrem dolnoprzepustowym Butterwortha 4-rzędu i uzyskano przebieg uśredniony.



**Rys. 4.24.** Przykładowy czasowy przebieg zasięgu strugi paliwa

Mając dany zasięg w zależności od czasu można obliczyć prędkość rozprzestrzeniania się strugi paliwa licząc jako pochodną zasięgu po czasie. Dla chwili tuż po rozpoczęciu wtrysku można wywnioskować, że prędkość ta będzie zbliżona do prędkości cząstek paliwa będących na czole pojedynczej strugi paliwa. W późniejszym etapie rozpylania prędkość ta jest miernikiem szybkości rozpylania i nie powinna być utożsamiana z prędkością pojedynczych kropli.



## 5. Wyniki badań eksperymentalnych i ich analiza

### 5.1 Matryca badań

Badania eksperymentalne zrealizowano na dwóch stanowiskach badawczych, na których badano rozpylanie strugi wtryskiwanego paliwa w warunkach normalnych ciśnienia i temperatury oraz w warunkach podwyższonego ciśnienia i temperatury typowych dla warunków panujących w silniku o zapłonie samoczynnym w chwili wtrysku paliwa do cylindra. Na drugim stanowisku badano również przebieg zapłonu i rozwoju płomienia w chmurze rozpylanego paliwa. Szczegółowy opis warunków dla obydwu eksperymentów przedstawiono w tablicy 5.1.

**Tablica 5.1.** Warunki i parametry przeprowadzonych eksperymentów

	Stanowisko nr 1 Malvern Spraytec	Stanowisko nr 2 Komora spalania
Rodzaje badanych cieczy	Olej pirolityczny Olej napędowy Benzyna 91 (RON 94)	Olej pirolityczny Olej napędowy
Ciśnienie	1 bar	41, 74, 95 bar ?
Temperatura	20 - 21 °C	
Wielkości mierzone	SMD	Szybkość wypływu paliwa Zasięg strugi paliwa Fazy spalania: 0-2, 0-10, 10-90% wypalenia paliwa Szybkość spalania $dQ/dt$

Badaniom poddano olej pirolityczny wyprodukowany z tworzywa sztucznego HDPE przy wykorzystaniu technologii pirolizy. Olej ten wyprodukowano na stanowisku badawczym na wydziale chemii uczelni Michigan Technological University. Olej ten następnie poddano analizie fizyko-chemicznej.

### 5.2. Wyniki badań oleju pirolitycznego

Na rysunku 5.1. przedstawiono stanowisko badawcze do produkcji oleju pirolitycznego w oparciu o technologię pirolizy. Jest to stanowisko laboratoryjne do pracy cyklicznej zbudowane na wydziale chemii uniwersytetu Michigan Technological University.

Głównym elementem stanowiska jest reaktor pirolityczny. Wsad złożony z wstępnie zmielonego twardego polietylenu (HDPE) o rozmiarze 0,1÷1 mm zostaje stopiony i następnie rozcieńczony rozpuszczalnikiem na bazie wosku w zbiorniku do rozpuszczania w stosunku 1:1.

Następnie usunięto tlen przez wyparcie go wpompowywanym do reaktora azotem. Pirolizę przeprowadzano w temperaturze 575÷600°C przy ciśnieniu atmosferycznym i czasie przebywania w reaktorze około 1 sekundy. Uzyskane opary pirolityczne rozdzielano na trzy grupy za pomocą układu podwójnego skraplacza. Produkt ze skraplacza był głównie woskiem, w którym dominowały alkeny o łańcuchu prostym powyżej C20. W skraplaczu nr 2 odseparowywano alkeny C5-C20. Natomiast produktem końcowym, który z racji swoich właściwości fizycznych nie ulegał kondensacji były substancje gazowe C1-C4 ze śladową ilością wodoru.

W następnym kroku do produktu ze skraplacza nr 2 zastosowano destylację w temperaturze 280°C w celu usunięcia cięższych składników (>C15) i poprawienia jego przydatności jako potencjalnie użytecznego, ciekłego paliwa silnikowego.

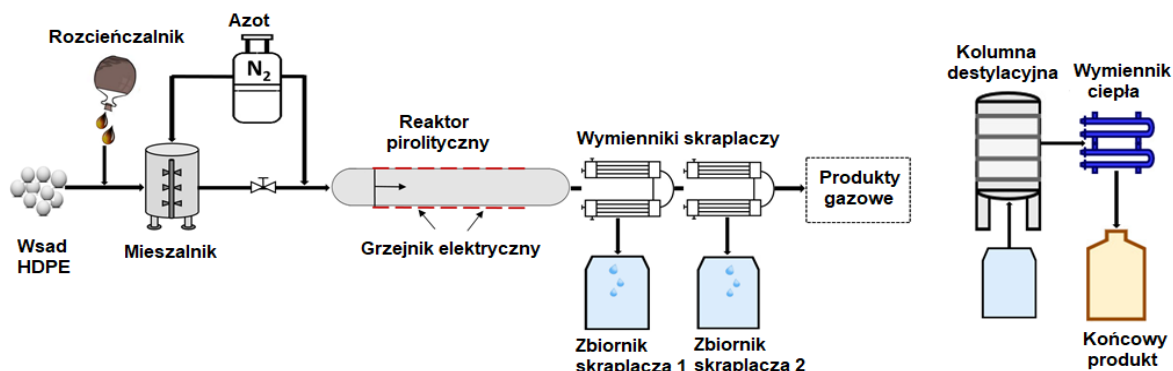
Wydajność stanowiska mierzona uzyskiem substancji ciekłych (produkty ze skraplaczy 1 i 2) była na poziomie około 0,250 dm<sup>3</sup>. Natomiast po obróbce w kolumnie destylacyjnej uzyskiwano końcowy produkt w ilości około 0,15 dm<sup>3</sup>.

Obydwie próbki oleju przed i po destylacji poddano analizie GC/MS przy użyciu chromatografu gazowego Trace 1310 i spektrometru masowego ITQ 1100 Ion Trap.

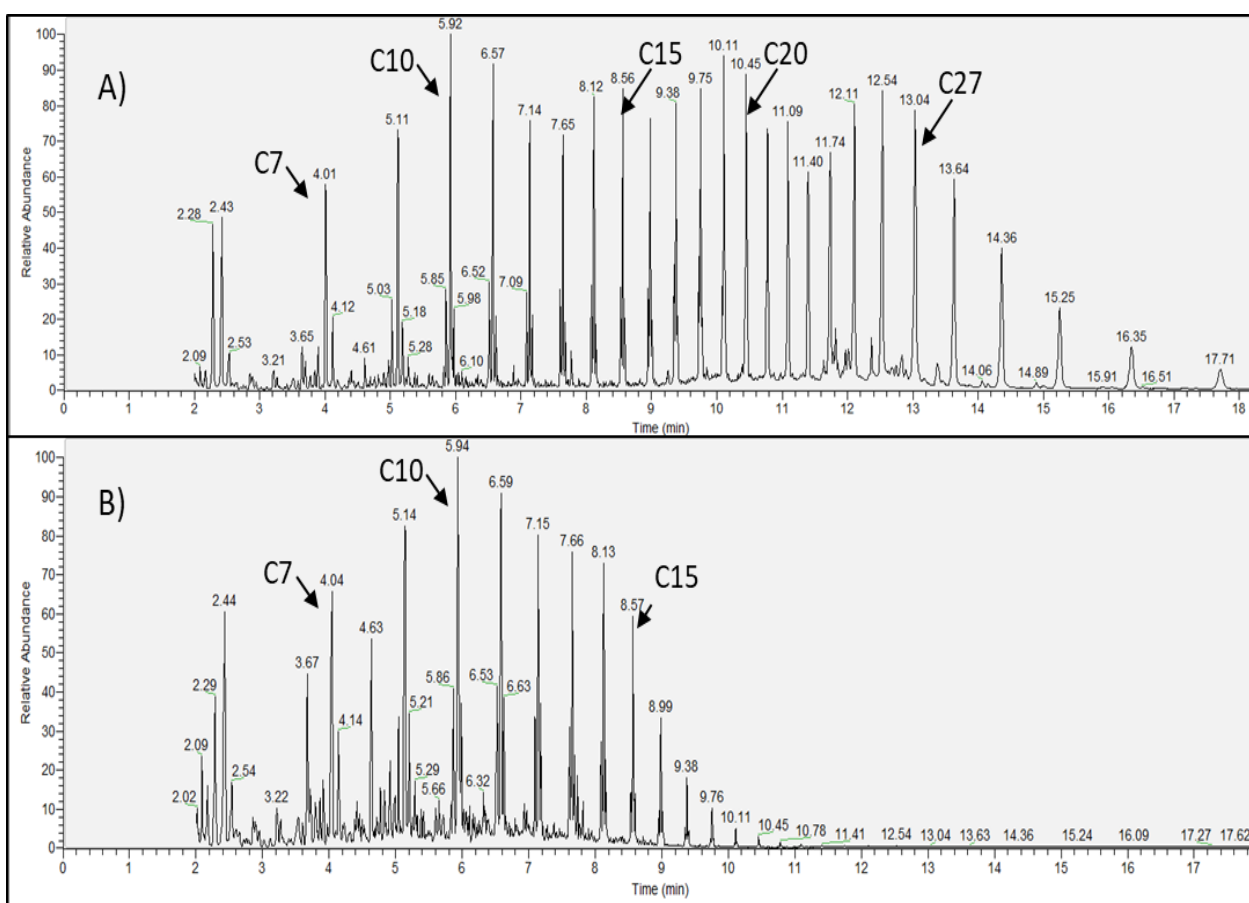
Wyniki z analizy przedstawiono na rys. 5.2.

Po destylacji uzyskano olej pirolityczny o następujących właściwościach fizykochemicznych:

- gęstość: 737,9 kg/m<sup>3</sup>
- lepkość dynamiczna: 0,48 mPa·s
- napięcie powierzchniowe: 22,94 mN/m (pomiar Kruss Tensiometer K100; Plate Method)
- zawartość węgla: 84,8 % mas.
- zawartość wodoru: 14,6% mas.
- wartość opałowa: 40,03 MJ/kg.



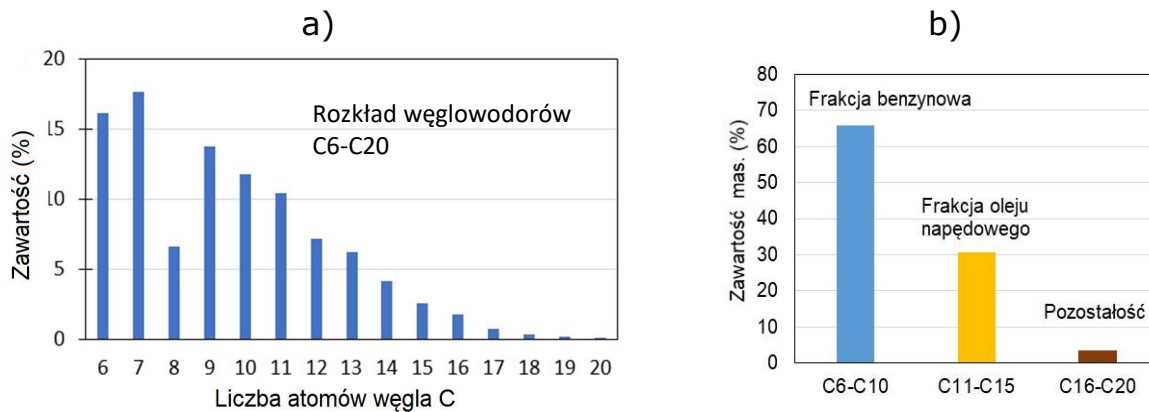
**Rys. 5.1.** Schemat stanowiska do pirolizy



**Rys. 5.2.** Spektrogramy dla oleju przed destylacją (a) i po destylacji (b)

Na podstawie analizy spektrogramów można stwierdzić, że olej pirolityczny po destylacji został praktycznie pozbawiony węglowodorów o liczbie atomów węgla powyżej 15 (rys. 5.3). Jak wynika ze składu masowego (rys. 5.3b) frakcje występujące w benzynie (C6-C10) są dominujące. Natomiast frakcje charakterystyczne dla oleju napędowego (C11-C15) występują w ilości około

30% mogą niekorzystnie wpływać na liczbę oktanową oleju pirolitycznego ze względu na ich niższą temperaturę samozapłonu i tym samym na większą skłonność do generowania spalania stukowego.



**Rys. 5.3.** Procentowy skład masowy węglowodorów w oleju pirolitycznym po destylacji (a), zawartość węglowodorów C6-C10 i C11-C20 w oleju pirolitycznym po destylacji (b)

### 5.3. Analiza wtrysku w warunkach otoczenia

Analiza wtrysku obejmowała badania eksperymentalne wtrysku za pomocą wtryskiwacza 6-otworkowego pod ciśnieniem 400 bar do środowiska atmosferycznego przy ciśnieniu 1 bar i temperaturze 20°C dla następujących paliw:

- olej pirolityczny,
- benzyna,
- olej napędowy.

W ramach badań dokonano pomiarów w celu wyznaczenia następujących wielkości:

- średnia średnica kropeł wg Sautera (SMD),
- rozkład statystyczny liczby i średnicy kropeł tzw. widmo rozpylenia.

Obydwe wielkości mierzone były w funkcji czasu wtrysku w dwóch punktach pomiarowych ulokowanych w obszarze pojedynczej strugi jak następuje:

- punkt centralny ulokowany w osi symetrii wypływającej strugi paliwa,
- punkt skrajny znajdujący się na skrajni tej strugi.

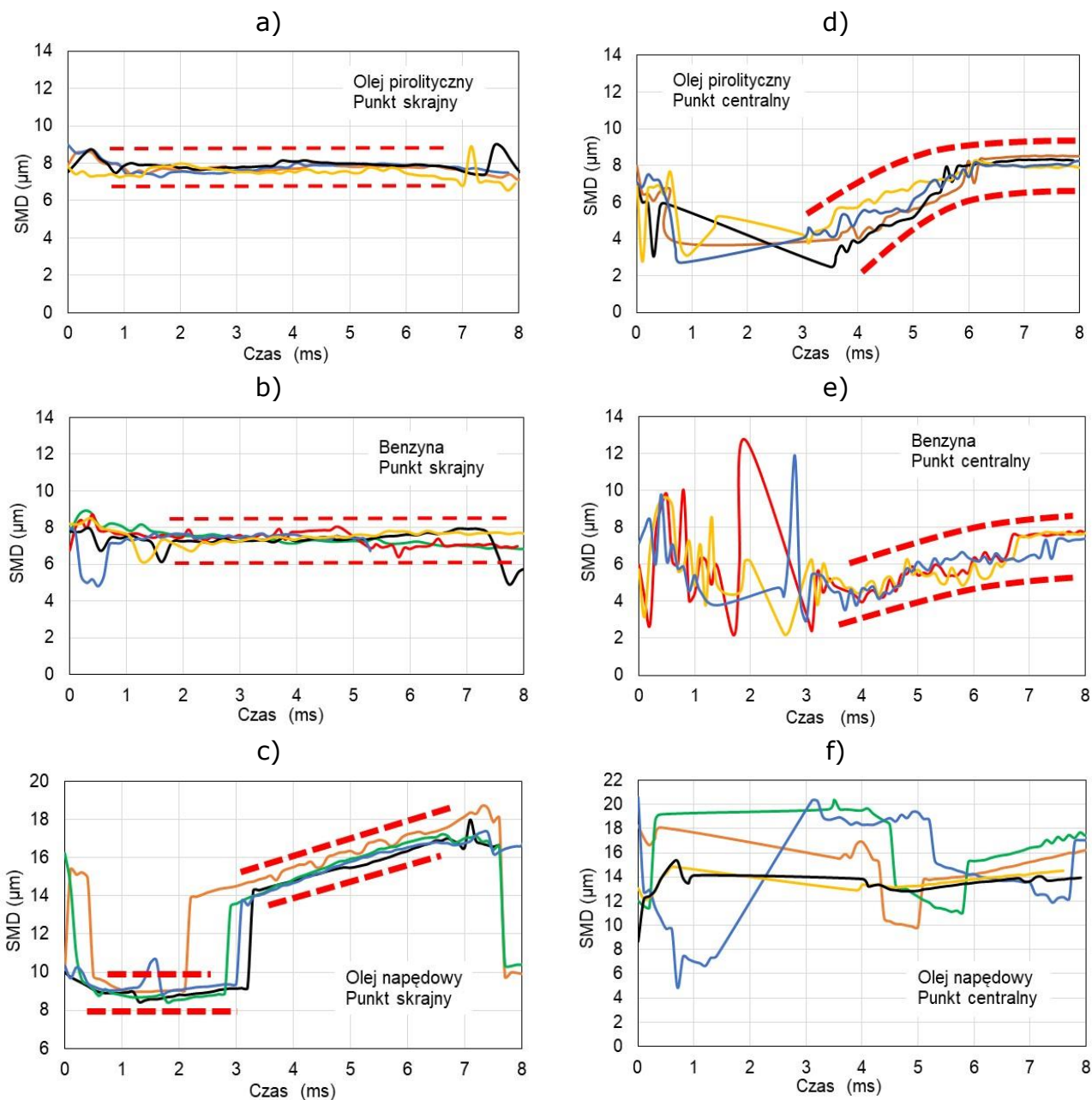
Badania wykonano na stanowisku Malvern Spraytec będącym na wyposażeniu laboratorium badawczym zaawansowanych systemów energetycznych (APSRC – *Advanced Power Systems Research Center*) na uczelni Michigan Technological University. Szczegółowo metodykę badań opisano w rozdziale 4.

Rozkład statystyczny dla kropeł paliwa przedstawiono w postaci histogramów funkcji gęstości prawdopodobieństwa (*pdf – probability density function*) oraz skumulowanej gęstości prawdopodobieństwa (*cdf – cumulative density function*) po czasie 5 ms od początku wtrysku.

Pojedyncza seria pomiarowa składała się z 10 kolejno po sobie następujących wtrysków, które następnie poddano uśrednianiu za pomocą oprogramowania sprzęgniętego ze stanowiskiem badawczym. W celu sprawdzenia powtarzalności wyników wykonano po dziesięć powtórzeń każdej serii pomiarowej. Sumarycznie analizie było poddanych 100 wtrysków każdego z badanych paliw.

Następnie dokonano porównania badanych paliw za pomocą liczb kryterialnych Webera i Ohnesorge oraz przeanalizowano wpływ parametru SMD na ww. liczby oraz dokonano podsumowania tej części badań.

Na rysunku 5.5 przedstawiono czasowy przebieg SMD wyznaczony dla trzech ww. paliw. Są to przebiegi uśrednione z 10 wtrysków. Na wykresach ograniczono się do pokazania czterech serii przebiegów SMD aby uzyskać w miarę przejrzyste wykresy. W tym celu wyselekcjonowano te przebiegi, które najbardziej odbiegały od hipotetycznych średnich. W pierwszej kolejności można zauważyć istotną różnicę pomiędzy przebiegami SMD mierzonymi w punkcie centralnym i punkcie skrajnym. Ze względu na lepszą powtarzalność przebiegów przyjęto, że wyniki dla punktu skrajnego będą bardziej wiarygodne. Poza tym można wnioskować, że zjawisko wtórnego rozpadu kropeł *secondary break-up* w tym punkcie jest bardziej prawdopodobne. Punkt centralny ulokowany w osi wypływu paliwa mógł być podatny na zjawiska związane z rozpadem strugi na pojedyncze krople tzw. *primary break-up* i to mogło być przyczyną większej niepowtarzalności w przebiegach SMD. Ponadto, zaobserwowano relatywnie bardzo dobrą powtarzalność wyników po upływie około 2 ms a w niektórych przypadkach po 4 ms od chwili początku wtrysku. Na tej podstawie przyjęto, że analiza statystyczna rozkładu kropeł będzie dokonana w chwili 5 ms od początku wtrysku.

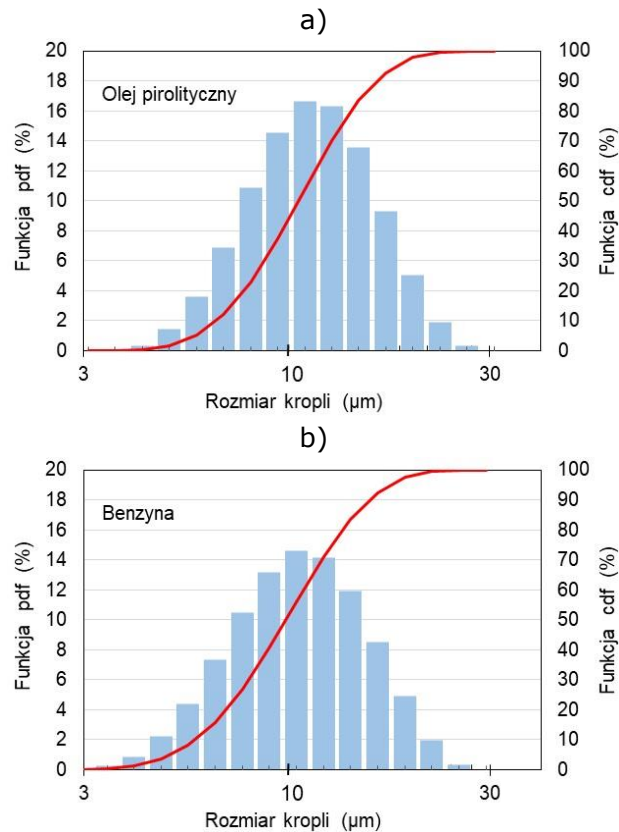


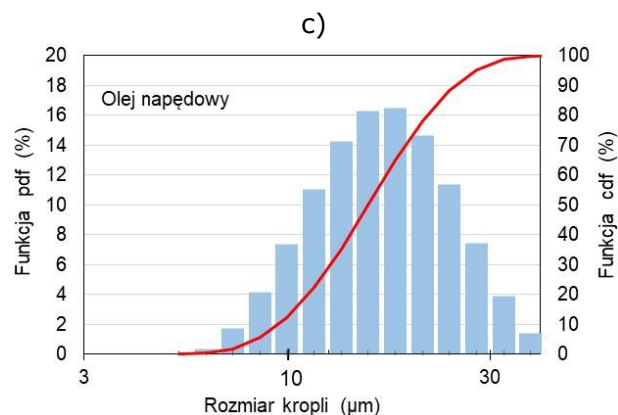
**Rys. 5.5.** Czasowy przebieg średniej średnicy kropli wg Sautera (SMD) dla oleju pirolitycznego (a,d), benzyny (b,e) i oleju napędowego (c,f) dla skrajnego punktu pomiarowego (a,b,c) i centralnego punktu pomiarowego (d,e,f)

Na przebiegach SMD (rys. 5.5) zaznaczono kierunek zmian, w których zawierały się bardzo dobrze powtarzalne wartości SMD. Zarówno olej pirolityczny jak i benzyna rozpylają się bardzo podobnie, jeśli dokona się porównaniu w oparciu o SMD. Wartość ta w obydwu przypadkach zawierała się w przedziale od 7 do 8  $\mu\text{m}$ . Wynikać to może z podobnego składu



chemicznego obydwu paliw. W oleju pirolitycznym znajduje się prawie 70% frakcji typowych dla benzyny. W obydwu przypadkach kierunek zmian był horyzontalny, tj. wielkość SMD nie ulegała zmianie. Można również wnioskować, że efekt zmniejszania kropli paliwa w skutek jej odparowania w tym przedziale czasowym był marginalny, co mogło być m.in. spowodowane występowaniem pary nasyconej po odparowaniu części paliwa. Natomiast, interesującym jest występowanie dwóch stabilnych trendów przy rozpylaniu oleju napędowego przedstawionych na rysunku 5.5c. Obydwa kierunki zmian SMD: poziomy (brak zmian) w przedziale od 0,5 do 3 ms i rosnący pomiędzy 3 i 7 ms były obserwowane we wszystkich seriach pomiarowych dla oleju napędowego, zatem nie były one dziełem przypadku.





**Rys. 5.6.** Histogram rozmiaru kropli po 5 ms w punkcie skrajnym od chwili początku wtrysku dla oleju pirolitycznego (a), benzyny (b) i oleju napędowego (c)

O ile wzrost średnicy kropeł może być wynikiem koagulacji mniejszych kropli o tyle gwałtowna zmiana średnicy z 8...10 μm do 14 μm pozostaje niewyjaśniona i wymaga dalszych badań. Zjawisko to nie było widoczne w osi strugi (punkt centralny), gdzie dominowała duża rozbieżność w SMD zawierających się w przedziale od 10 do 20 μm. Większa wartość SMD wynikała z ciśnienia wtrysku, które było niższe niż w nowoczesnych instalacjach *common rail* ale na podobnym poziomie co w instalacjach wtryskowych opartych o pompowtryskiwacze.

Jak wspomniano, dla punktu skrajnego pomiar dokonywany był po około 5 ms od początku wtrysku. Dla tego pomiaru przeprowadzono analizę statystyczną rozkładu kropeł znaną także pod nazwą widmo rozpylenia. Uzyskano histogramy przedstawione na rysunku 5.6. Analiza tych histogramów potwierdza, że rozkłady kropeł oleju pirolitycznego i benzyny (funkcje pdf – *probability density function*) są zbliżone do siebie, podobnie jak przebiegi skumulowanej gęstości prawdopodobieństwa cdf (*cumulative density function*).

### Liczby kryterialne Weber i Ohnesorge

Do analizy porównawczej wykorzystano liczby Webera i Ohnesorge zdefiniowane zgodnie z zależnościami przedstawionymi poniżej (5.1, 5.2 i 5.3).

Liczbę Webera obliczono na dwa sposoby jak to przedstawiono w przeglądzie literatury.

- Liczba kryterialna **We<sub>a</sub>**:

$$We_a = \frac{\rho_a \cdot v^2 \cdot D}{\sigma} \quad (5.1)$$

- Liczba kryterialna **We<sub>c</sub>**:

$$We_c = \frac{\rho_c \cdot v^2 \cdot D}{\sigma} \quad (5.2)$$

- Liczba kryterialna **Ohnesorge** (5.3):

$$Oh = \frac{\mu}{\sqrt{D \cdot \rho_c \cdot \sigma}} \quad (5.3)$$

gdzie:

$\rho_a$  - gęstość środowiska, do którego następuje wtrysk paliwa (powietrze),

$\rho_c$  - gęstość paliwa,

$v$  - prędkość kropeł w środowisku gazowym,

$D$  - wymiar charakterystyczny, którym może być średnica kropli,

$\sigma$  - napięcie powierzchniowe paliwa,

$\mu$  - lepkość dynamiczna paliwa.

Prędkość  $v$  wypływu paliwa w przekroju dyszy wtryskiwacza obliczono z równania ciągłości znając wydatek wtryskiwacza równy 14 g/s, liczbę otworów oraz średnicę otworu równą 0,225 mm. Lepkość dynamiczną i napięcie powierzchniowe wyznaczono dla temperatury 60°C, czyli temperatury pracującego wtryskiwacza.

Zjawisko rozpadu dużych kropeł na mniejsze tzw. *secondary break-up* pojawia się, gdy duża kropla znajduje się w przestrzeni, w której występuje duża prędkość względna opływającego tę kroplę gazu. Wówczas ciśnienie dynamiczne sprawia, że dana kropla ulega drganiom i deformacji do takiego stopnia, że rozpada się na mniejsze obszary. Rozpad trwa do czasu gdy te małe obszary pod wpływem napięcia powierzchniowego przyjmują kształt kuli i ze względu na swoje niewielkie rozmiary nie ulegają dalszej deformacji ale są unoszone przez gaz. Głównym czynnikiem wtórnego rozpadu jest prędkość gazu omywającego krople. Do rozpadu niezbędna jest energia, która jest pobierana z przepływającego gazu. Energia ta zamienia się na energię napięcia powierzchniowego utrzymującego mniejsze krople w postaci kuli. Stąd także wynika druga definicja liczby Webera mówiąca o stosunku energii kinetycznej do energii potrzebnej do zerwania powierzchni. Na tej podstawie literatura podaje tzw. krytyczną liczbę Webera, powyżej której kropla na pewno ulegnie wtórnemu rozpadowi. Dla oleju napędowego na drodze eksperymentu ustalono, że krytyczna minimalna wartość liczby Webera  $We_{min}$  wynosi 14. We analizowanych przypadkach obliczona liczba Webera była na poziomie

znacznie powyżej jej wartości krytycznej. Po przekształceniu równania 5.1 można wyznaczyć najmniejszą średnicę, powyżej której nastąpi rozpad wtórny dla danej kropli (5.4).

$$D_{min} = \frac{\sigma \cdot We_{min}}{\rho_a \cdot v^2} \quad (5.4)$$

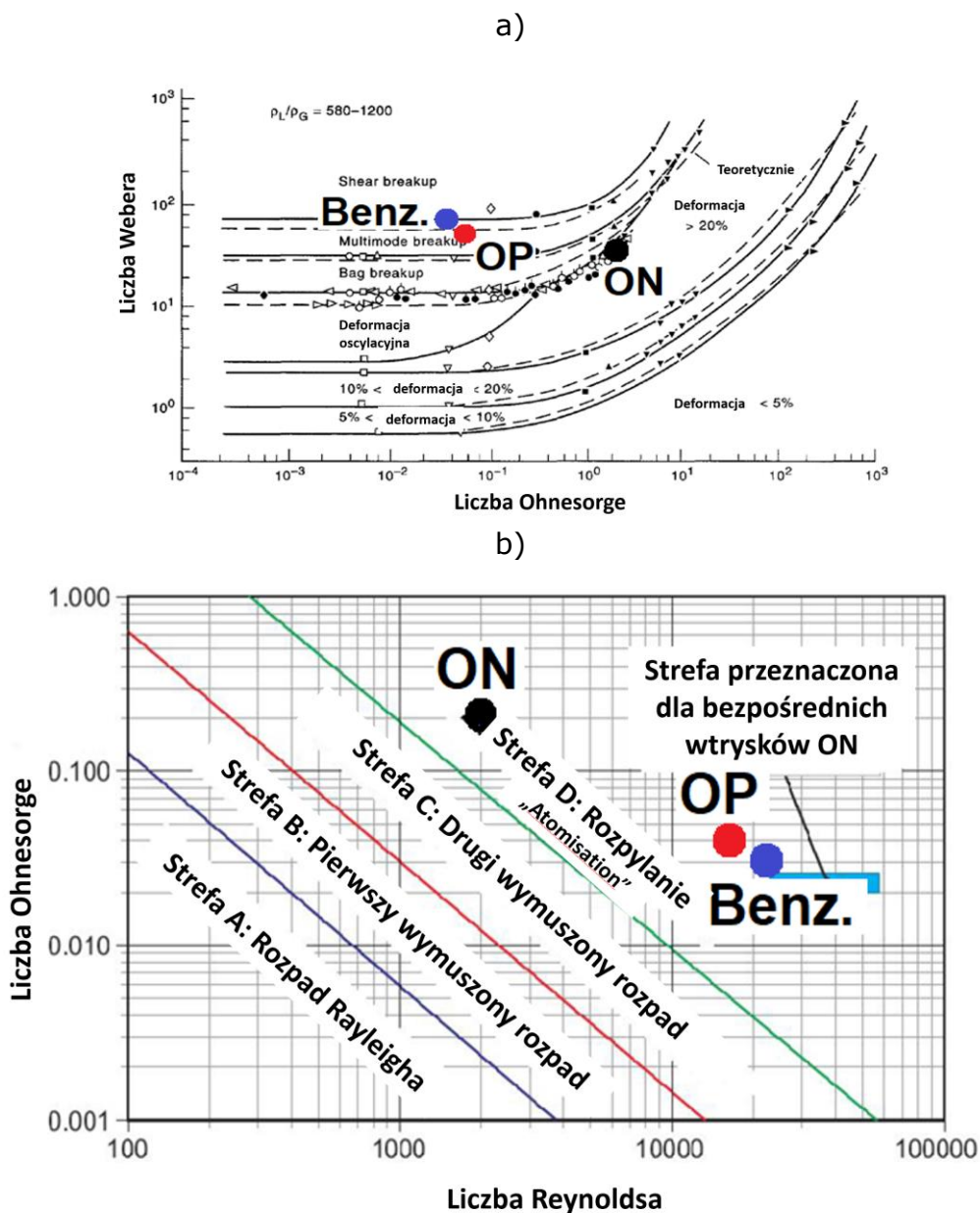
Obliczone liczby kryterialne Weber i Ohnesorge oraz minimalną średnicę kropel  $D_{min}$  a także wielkości niezbędne do obliczenia liczb kryterialnych przedstawiono w tabelicy 5.2. Prędkość wypływu paliwa z dyszy wtryskiwacza obliczono znając wydatek wtryskiwacza  $Q = 14$  g/s, liczbę otworów (6 otworów) oraz średnicę każdej z dysz  $d = 0,225$  mm. Prędkość strugi paliwa tuż za wylotem z dyszy wtryskiwacza obliczono na podstawie obrazów z kamery.

**Tablica 5.2.** Zestawienie wielkości do wyliczenia liczb Webera i Ohnesorge

<b>Wielkość</b>	<b>Jednostka</b>	<b>Olej pirolityczny</b>	<b>Benzyna</b>	<b>Olej napędowy</b>
Gęstość	kg/m <sup>3</sup>	738	730	852
Lepkość dynamiczna (70°C)	mPa·s	0,48	0,30	3,77
Napięcie powierzchniowe (70°C)	mN/m	22,9	20,4	27,6
SMD uśredniona w kanale trendu pomiędzy 3 i 7 ms od początku wtrysku	µm	7,7	7,3	14,5
Prędkość paliwa w przekroju dyszy	m/s	79,5	80,4	68,9
Prędkość strugi paliwa u wylotu dyszy	m/s	42	42	39

<b>Liczba <math>We_a</math></b> dla kropli w środowisku gazowym	-	<b>75</b>	<b>86</b>	<b>46</b>
<b>Liczba <math>We_c</math></b> dla strugi u wylotu dyszy	-	<b>45856</b>	<b>52032</b>	<b>32967</b>
Średnica minimalna $D_{min}$	$\mu m$	151	135	212
<b>Liczba Ohnesorge</b>	-	<b>0.042</b>	<b>0.029</b>	<b>0.204</b>
<b>Liczba Reynoldsa</b>	-	<b>14527</b>	<b>22995</b>	<b>1982</b>

Jak wynika z wyników przedstawionych w tabelicy 5.2, liczba Webera jest znacznie powyżej wartości minimalnej zapewniającej rozpad wtórny kropel dla wszystkich badanych paliw. Mniejsza wartość  $We$  dla oleju napędowego głównie wynika z większego napięcia powierzchniowego dla oleju napędowego w porównaniu do pozostałych badanych paliw. Liczba Ohnesorge dla oleju napędowego jest niemalże 5-krotnie większa od tejże liczby obliczonej dla oleju pirolitycznego, co z kolei wynika przede wszystkim ze znacznie większej lepkości dynamicznej dla oleju napędowego. Liczba Reynoldsa została obliczona dla przepływu strugi podlegającej rozpylaniu tuż za wylotem dyszy wtryskiwacza, dlatego za wymiar charakterystyczny przyjęto średnicę otworu dyszy. Niewielka wartość  $Re$  dla oleju napędowego wynika z jego dużej lepkości dynamicznej. Interpretacja liczby Ohnesorge sprowadza się do jej powiązania z liczbą Reynoldsa. Na rysunku 5.7 przedstawiono położenie mechanizmów rozpadu kropel dla badanych paliw: oleju pirolitycznego, benzyny i oleju napędowego w zależności od liczb  $Re$ ,  $We_a$  i  $Oh$ .



**Rys. 5.7.** Strefy mechanizmów rozpadu kropli z naniesionymi współrzędnymi dla badanych paliw: diagram we współrzędnych  $We_a$  i  $Oh$  [41] (a) oraz we współrzędnych  $Oh$  i  $Re$  [15,42] (b)

Na podstawie danych przedstawionych na rysunku 5.7a można stwierdzić, że rozpad wtórny dla oleju pirolitycznego i benzyny jest spowodowany mechanizmem *shear breakup* i *bag breakup* natomiast mechanizmem wiodącym w rozpadzie kropli oleju napędowego jest mechanizm *bag breakup*. Natomiast wszystkie paliwa charakteryzują się parametrami typowymi dla strefy *Atomisation*, czyli rozpylaniem na poziomie mikrocząsteczek jak

pokazano na rysunku 5.7b. Aczkolwiek, wyniki z powyższych rozważań przedstawiono na diagramach opracowanych około 30 lat temu, tym niemniej wiele publikacji naukowych wciąż się do nich odwołuje.

Średnica minimalna  $D_{\min}$  dla wszystkich paliw zawiera się w przedziale pomiędzy 135 a 212  $\mu\text{m}$ . Jest to rząd wielkości kropeł, które zostaną poddane rozpadowi wtórnemu. Można przyjąć, że pierwsze krople powstające wskutek rozpadu pierwotnego są na tyle duże, że ich rozpad wtórny na pewno nastąpi o czym świadczy wielkość kropeł w chmurze paliwa wyrażona za pomocą wielkości SMD. Ich średnica na poziomie 7-15  $\mu\text{m}$  wskazuje, że powstały w wyniku rozpadu wtórnego.

W oparciu o przeprowadzone badania można wyciągnąć następujące wnioski:

- na podstawie liczb  $We_a$  i  $Oh$  można wnioskować o charakterze przebiegu rozpylania, mechanizmie rozpylania oraz o rozmiarze średnich kropeł za pomocą wielkości SMD. Znając właściwości fizyczne wtryskiwanego paliwa: lepkość dynamiczną, napięcie powierzchniowe i gęstość oraz ciśnienie wtrysku i wymiary dysz wtryskiwacza można za pomocą liczb  $We$  i  $Oh$  wstępnie ocenić średnią średnicę kropeł w strefie atomizacji rozpylanej chmury;
- im niższa liczba  $Oh$ , tym słabsze są siły tarcia między kroplami, zatem przeważają siły napięcia powierzchniowego co powoduje, że po wtórnym rozpadzie będzie formować się mikrokropla o kształcie kulistym na co wskazują wartości SMD i położenie na diagramach z rys. 5.7a i 5.7b;
- liczba Webera dla wtrysków przeprowadzonych podczas badań znajdowała się w przedziale 70-90 zarówno dla benzyny jak i dla oleju pirolitycznego, co wskazuje na wystąpienie wtórnego rozpadu kropli do poziomu kilku mikronów (7-8  $\mu\text{m}$ );
- podobnie można wnioskować odnośnie rozpadu kropli oleju napędowego dla którego  $We_a$  była na poziomie 46, co jest znacznie powyżej liczby krytycznej  $We_{\min} = 14$ . Na podstawie histogramów rozkładu statystycznego wynika, że maksymalne rozmiary kropeł oleju napędowego, po wtórnym rozpadzie, znajdują się poniżej wartości 40-50  $\mu\text{m}$ ;
- przy założeniu takiego samego ciśnienia wtrysku (400 bar w przeprowadzonych badaniach) olej pirolityczny i benzyna charakteryzują się podobnym rozkładem statystycznym kropeł i podobną wartością SMD, co oznacza, że można wykorzystać wtryskiwacze benzynowe do wtrysku oleju pirolitycznego.

#### **5.4. Analiza wtrysku i spalania w podwyższonym ciśnieniu i temperaturze**

Badania przeprowadzono w komorze spalania o stałej objętości. W ramach badań rejestrowano przebieg wypływu paliwa, samozapłon i rozwój płomienia.

W komorze spalania nie przeprowadzano badań nad benzyną, ponieważ stanowisko zostało skonstruowane do badań paliw ciekłych podlegających samozapłonowi wskutek podwyższonej temperatury. Z tego też powodu na stanowisku nie było możliwości realizowania zapłonu wymuszonego przez wyładowanie iskrowe. Aczkolwiek zapłon wymuszony był możliwy do zrealizowania, ale jedynie dla paliw gazowych, które po wymieszaniu z utleniaczem tworzyłyby mieszaninę jednorodną.

Na stanowisku można było zmierzyć zasięg strugi wtryskiwanego paliwa. Jednakże pomiar zasięgu w warunkach rzeczywistych jest niemożliwy do zrealizowania, ponieważ po wystąpieniu samozapłonu struga podlega spalaniu nawet podczas wciąż trwającego wtrysku. Zatem, aby wyznaczyć hipotetyczny zasięg strugi paliwa w warunkach podwyższonego ciśnienia i temperatury, wykonano dodatkowe testy w środowisku atmosfery beztlenowej w tych samych warunkach ciśnienia i temperatury. Wnętrze komory spalania zostało wypełnione azotem. Takie podejście było uzasadnione w przypadku, gdy jest konieczność rozpoznania przebiegu wtrysku, rozpylania i odparowania dawki paliwa w zależności od rodzaju wtryskiwacza i ciśnienia zasilania. W przypadku badania różnych paliw, takie podejście daje możliwość rozpoznania ww. parametrów wtrysku w zależności od lepkości, gęstości, napięcia powierzchniowego i ciepła parowania badanej cieczy.

W ramach badań nad zjawiskiem wtrysku i spalania paliwa w komorze spalania opracowano wykresy przedstawiające jak następuje:

- przebieg ciśnienia w komorze spalania;
- przebieg szybkości zmian ciśnienia  $dp/dt$ ;
- przebieg szybkości wydzielania ciepła  $dQ$  oraz  $dQ/dt$  – uznano, że w celu bardziej przejrzystego przedstawienia przebiegu wydzielania ciepła lepiej będzie pokazać także rzeczywisty przebieg  $dQ$  próbkowany co 10  $\mu s$ ;
- przebieg skumulowanego ciepła  $Q(t)$ ;
- przebieg ciepła znormalizowanego  $Q_{norm}(t)$  do przedziału 0-100%.

Jak nadmieniono wcześniej, badania przeprowadzono dla trzech różnych wartości ciśnienia początkowego (41, 74 i 95 bar) w komorze w chwili wtrysku paliwa.

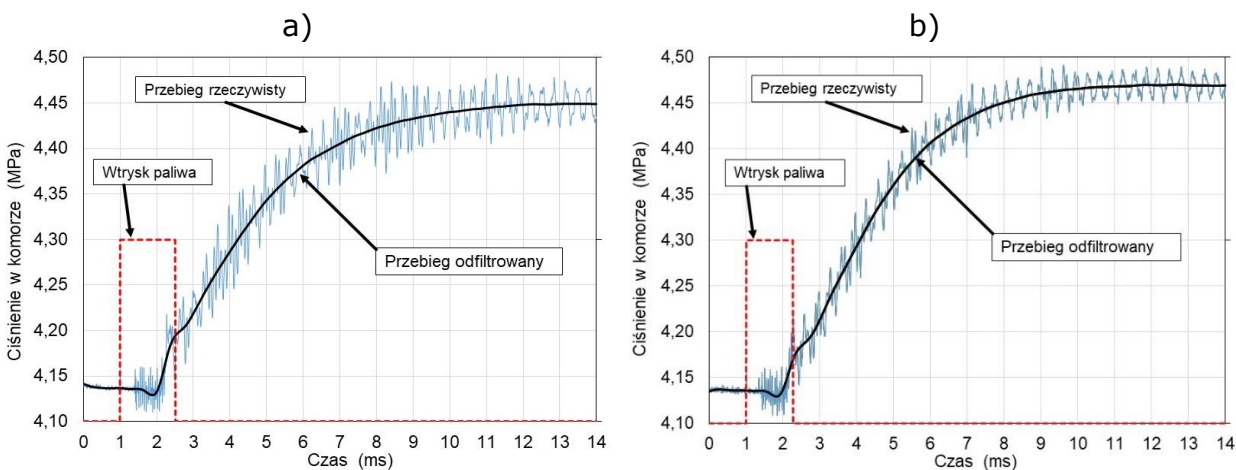


## **Badania przy ciśnieniu 41 bar**

Na rys. 5.8 przedstawiono przebiegi ciśnienia w komorze spalania zarejestrowane z częstotliwością próbkowania 100 kHz. Na rysunku zamieszczono również wykres przedstawiający pracę wtryskiwacza w postaci prostokątnego impulsu o czasie trwania 1,5 ms. Z charakterystyki wtryskiwacza można było wyliczyć, że dawka wtryskiwanego paliwa była na poziomie około 21 mg. Dawka ta była następnie dodatkowo weryfikowana przez jej wyliczenie w oparciu o wartość opałową paliwa i maksymalną wartość ciepła wydzielonego podczas spalania. W tym przypadku, podobnie jak i dla całego eksperymentu spalania przyjęto, że komora spalania jest odizolowana termicznie od otoczenia, zatem przebieg spalania mający miejsce w jej wnętrzu jest zjawiskiem zachodzącym bez wymiany ciepła z otoczeniem. Na rysunku pokazano także przebieg uśredniony z przebiegu rzeczywistego, który powstał po odfiltrowaniu filtrem dolnoprzepustowym Butterwortha 4 rzędu o częstotliwości granicznej 1500 Hz. Widoczne na przebiegu ciśnienia rzeczywistego pulsacje ciśnienia mają charakter przebiegu sinusoidalnego o dwóch dominujących częstotliwościach: 3,4 i 28 kHz. Stąd wywnioskowano, że przyczyny tych pulsacji mogą być następujące:

- są to pulsacje ciśnienia będące wynikiem powstania fali stojącej w komorze spalania wynikłej z gwałtownego wzrostu ciśnienia podczas spalania. Takie założenie może być słuszne, jeśli przyjmie się, że średnica wewnętrzna komory spalania ma 101,6 mm (4 cale).
- mogą to być pulsacje od fali stojącej powstałej w kanaliku łączącym przetwornik ciśnienia z wnętrzem komory spalania. Kanalik ten miał długość około 7 mm.

Należy wykluczyć, że te pulsacje są efektem zakłóceń od sieci elektrycznej lub przypadkowym szumem elektronicznym. Słuszność tego wniosku potwierdza fakt występowania tych pulsacji dopiero po rozpoczęciu wtrysku paliwa i zainicjowania spalania. Tym niemniej można stwierdzić, że pulsacje te nie zakłócają przebiegu ciśnienia i po ich usunięciu otrzymuje się przebieg ciśnienia, który można użyć do dalszej analizy, co było kluczowym założeniem przy analizie wydzielania ciepła.



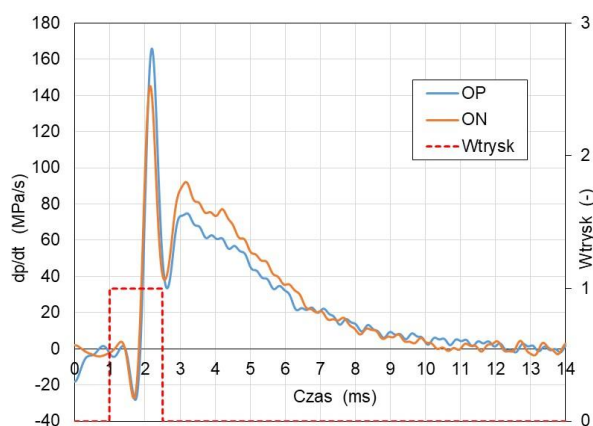
**Rys. 5.8.** Rzeczywisty i odfiltrowany przebieg ciśnienia w komorze przy początkowym ciśnieniu 41 bar oraz otwarcia i zamknięcia wtryskiwacza dla oleju pirolitycznego (a) i oleju napędowego (b)

Przebiegi ciśnienia absolutnego dla obydwu spalanych paliw są swoim kształtem zbliżone do siebie. Jedyną zauważalną różnicą pomiędzy wykresami na rysunku 5.8a i 5.8b są wartości maksymalne ciśnienia, które wynikają z różnej ilości wydzielonego ciepła.

Jedną z istotnych wielkości jakie oblicza się przy analizie ciśnienia spalania w silniku tłokowym jest szybkość zmian ciśnienia spalania  $dp/dt$ . Przy analizie termodynamicznej silnika wielkość ta zazwyczaj odniesiona jest do 1 stopnia kąta obrotu wału korbowego (zazwyczaj w jednostkach bar/deg OWK). Najbardziej istotna jest wartość tej wielkości podczas narastania ciśnienia spalania. Wartość ta charakteryzuje, tzw. twardy bieg silnika lub skłonności do spalania stukowego. Typowe wartości szybkości narastania ciśnienia spalania dla silników z zapłonem samoczynnym zasilanych olejem napędowym są w zakresie od 2 do 6 bar/deg OWK, co w przeliczeniu na skalę czasu przy znanej prędkości obrotowej silnika (np. 1500 obr/min) sprowadza się do przedziału od 1800 do 5400 MPa/s. Wartości  $dp/dt$  przedstawione na rysunku 5.9 wydają się być nieduże, jednakże należy mieć na uwadze, że spalanie w komorze odbywało się w warunkach bez zawirowania jakie występuje w rzeczywistym silniku. Silne zawirowanie powietrza dostarczanego do cylindra silnika jest niezbędne aby zapewnić szybkie odparowanie i wymieszanie par paliwa z powietrzem, co wpływa także na zwiększenie szybkości spalania. Dlatego przedstawiona w tej pracy analiza porównawcza dokonana dla oleju napędowego i oleju pirolitycznego jest w pełni uzasadniona.

Przebiegi  $dp/dt$  przedstawione na rys. 5.9 kształtem są zbliżone do siebie, jednakże wartości charakterystyczne, takie jak maksymalna wartość  $dp/dt$  już są znacząco od siebie różne. Różnice te są także zauważalne na przebiegu szybkości wydzielania ciepła  $dQ$  oraz  $dQ/dt$  (rys. 5.10). Jak nadmieniono wcześniej, przebieg  $dQ$  jest także przebiegiem  $dQ/dt$ , jednakże dotyczy wydzielania ciepła w przedziale pomiędzy dwoma sąsiednimi próbkami pomiarowymi, tj. w przedziale równym okresowi próbkowania czyli  $10\mu s$ .

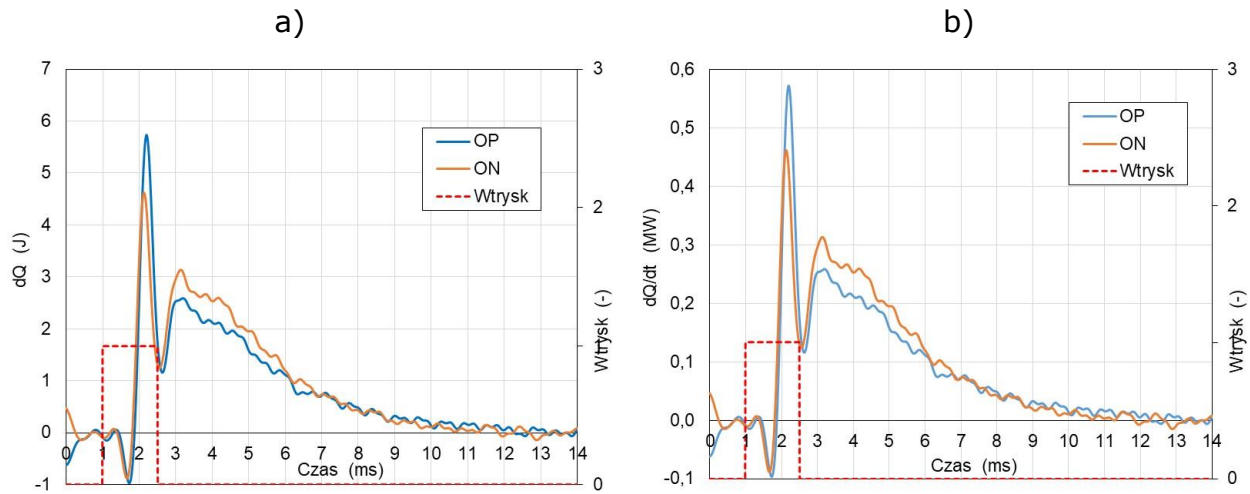
Zauważano, że olej pirolityczny ma wyższą wartość pochodnej  $dp/dt$  w każdym z przebadanych przypadków dla różnych wartości ciśnienia początkowego jak pokazano na rysunkach 5.13, 5.14 oraz 5.17 i 5.18. Wyższa szybkość narastania ciśnienia wynika bezpośrednio z wyższej szybkości wydzielania ciepła  $dQ/dt$  (rys. 5.10). Szybkość wydzielania ciepła jest bezpośrednio związana z szybkością reakcji chemicznej spalania. Stąd można wnioskować, że szybkość spalania oleju pirolitycznego jest wyższa niż oleju napędowego, co da się potwierdzić na podstawie analizy chemicznej składu oleju pirolitycznego, w którym występują lekkie węglowodory, charakteryzujące się większą szybkością odparowania i tworzenia mieszanki jednorodnej z powietrzem a także większą szybkością reakcji chemicznej.



**Rys. 5.9.** Przebieg zmiany ciśnienia  $dp/dt$  dla: oleju pirolitycznego (a); oleju napędowego (b) przy ciśnieniu 41 bar w komorze w chwili zapłonu

Na rysunku 5.10a przedstawiono przebieg szybkości wydzielania ciepła  $dQ(t)$  dla obydwu badanych cieczy. Zauważono podobieństwo przebiegu  $dp/dt$  do przebiegów  $dQ$  oraz  $dQ/dt$ . Jest to spowodowane tym, że przebieg spalania odbywał się w stałej objętości, co jak zaznaczono w rozdziale 4 sprawia, że przebiegi te różnią się od siebie jedynie współczynnikiem proporcjonalności. Można też zidentyfikować fazy spalania kinetycznego i spalania dyfuzyjnego. Przebieg spalania kinetycznego dla obydwu paliw jest szybszy od spalania

dyfuzyjnego, co potwierdza wcześniej sformułowany wniosek o większej szybkości reakcji chemicznych spalania substancji tworzących olej pirolityczny.



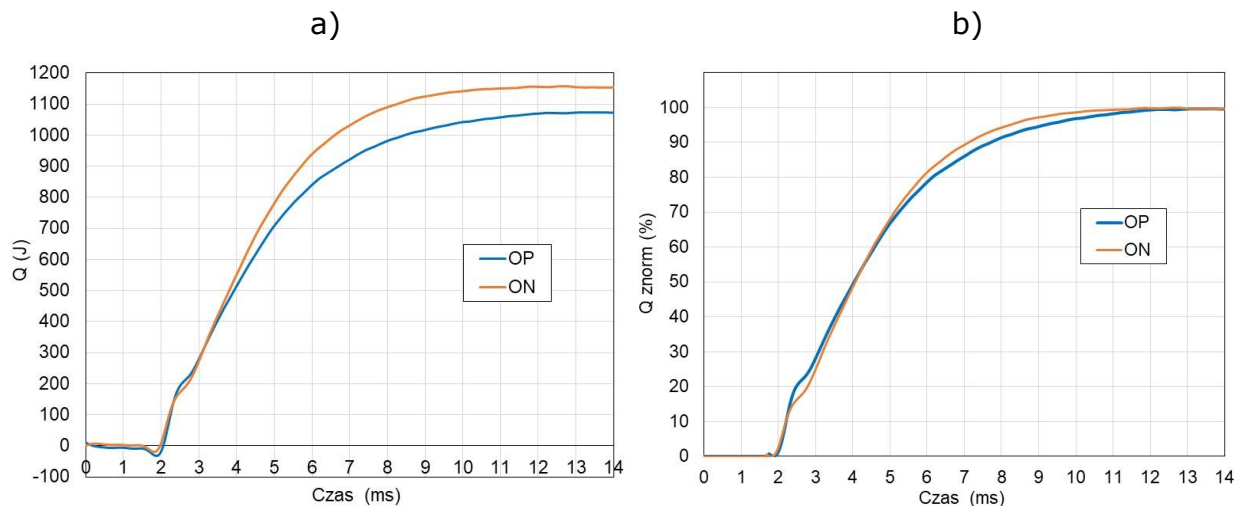
**Rys. 5.10.** Przebieg szybkości wydzielania ciepła  $dQ$  (a) oraz jednostkowy przebieg szybkości wydzielania ciepła  $dQ/dt$  (b) dla oleju pirolitycznego i oleju napędowego przy ciśnieniu 41 bar w komorze w chwili zapłonu

Na przebiegu szybkości wydzielania ciepła (rys. 5.10a i 5.10b) można zauważyć niewielkie obniżenie  $dQ$  aż do wartości ujemnych. Zjawisko to występuje podczas wtrysku paliwa do komory spalania. Zatem można wnioskować, że ujemna wartość  $dQ$  jest spowodowana zjawiskami odbierającymi ciepło i tym samym chwilowo obniżającymi temperaturę i w konsekwencji ciśnienie w komorze. W pierwszej kolejności zjawiskiem odbierającym ciepło jest zjawisko odparowania rozpylanych kropeł paliwa. Ponadto, można przyjąć, że na ujemną wartość  $dQ$  mają także wpływ reakcje chemiczne inicjujące zapłon, które zazwyczaj są reakcjami endotermicznymi. Na przebiegach  $dQ$  (rys. 5.10) to zjawisko nie występuje wyraźnie, ale przebiegi skumulowanego ciepła przedstawione na rysunkach 5.11, 5.15 i 5.19 także potwierdzają to zjawisko.

Przebiegi skumulowanego ciepła wydzielonego podczas spalania (rys. 5.11a i 5.11b) przedstawiają postęp w spalaniu paliwa. Takie przebiegi są także powszechnie wykorzystywane w analizie spalania w silnikach tłokowych. Na podstawie tych przebiegów można ocenić czas zwłoki zapłonu oraz całkowity czas spalania. Czasy te można wyznaczyć ze znormalizowanego przebiegu ciepła (rys. 5.11b). Interwał czasowy  $t_{0-2}$  liczony od początku wtrysku do wydzielenia 2% ciepła uznaje się jako miarodajny czas określający zwłokę zapłonu. Kolejnym istotnym parametrem jest początkowa faza spalania, zdefiniowana jako czas  $t_{0-10}$  mierzony od 0 do chwili osiągnięcia 10% ciepła

wydzielonego podczas spalania, którą także można uznać za proporcjonalną do zwłoki zapłonu. Ponadto z przebiegu skumulowanego ciepła przedstawionego na rysunku 5.11b oraz wcześniej na rys. 4.11b można odczytać tzw. środek spalania, tj. czas  $t_{50}$  wydzielania 50% ciepła oraz czas głównej fazy spalania. Główna faza spalania obejmuje przedział czasowy po fazie  $t_{0-10}$  do końca spalania tj. osiągnięcia całkowitego wypalenia dawki paliwa wtryskniętego do cylindra. W analizie termodynamicznej rzeczywistego silnika punkt 100% wydzielania ciepła, tj. chwila zakończenia spalania jest trudna do precyzyjnego wyznaczenia i obarczona dużą niedokładnością pomiarową, dlatego przyjęto wyznaczać punkt 90% wydzielania ciepła. Stąd, interwał czasowy  $t_{10-90}$  uznaje się, za przedział przedstawiający główną fazę spalania.

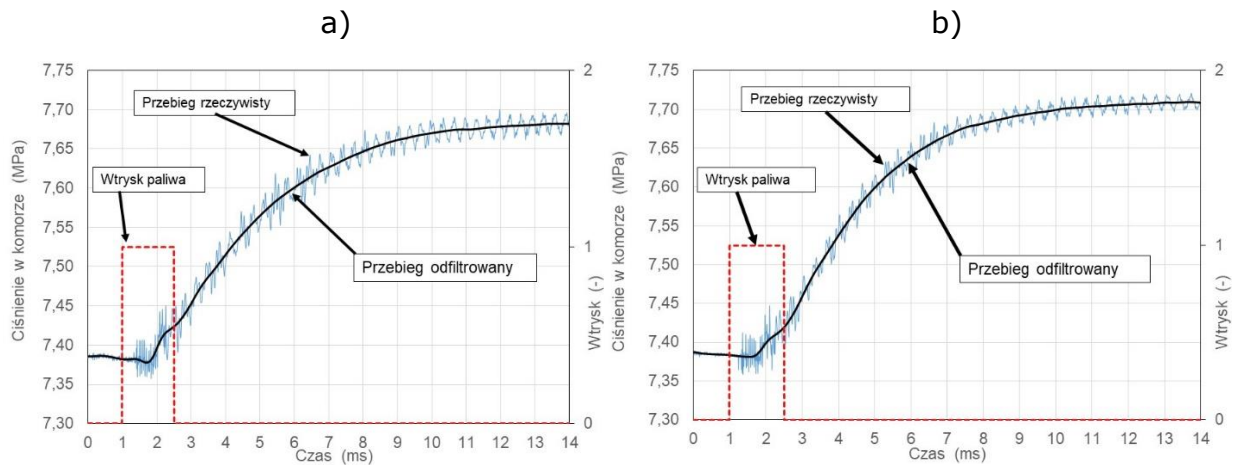
Wielkości  $t_{0-2}$ ,  $t_{0-10}$ ,  $t_{10-90}$  oraz  $t_{0-90}$  obliczono z przebiegów przedstawionych na rys. 5.11, 5.15 i 5.19 i zamieszczono w tabelicy 5.3. W niej zawarto także czasy charakterystyczne dla kinetycznego  $t_{kin}$  i dyfuzyjnego  $t_{dyf}$  przebiegu spalania oraz maksymalne szybkości spalania kinetycznego  $Q_{kin,max}$  i spalania dyfuzyjnego  $Q_{dyf,max}$ .



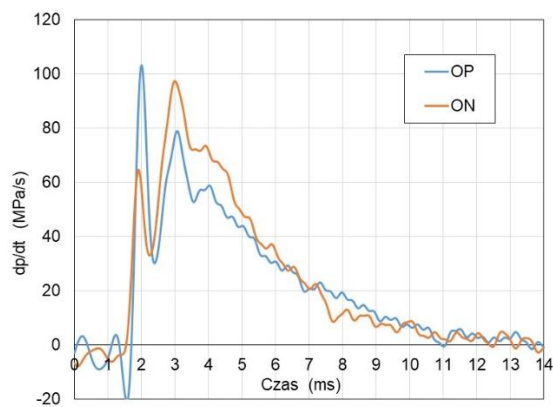
**Rys. 5.11.** Przebieg skumulowanego wydzielania ciepła  $Q(t)$  (a) oraz znormalizowany przebieg wydzielania ciepła  $Q\%(t)$  (b) dla oleju pirolitycznego i oleju napędowego przy ciśnieniu 41 bar w komorze w chwili zapłonu

### Badania przy ciśnieniu 74 bar

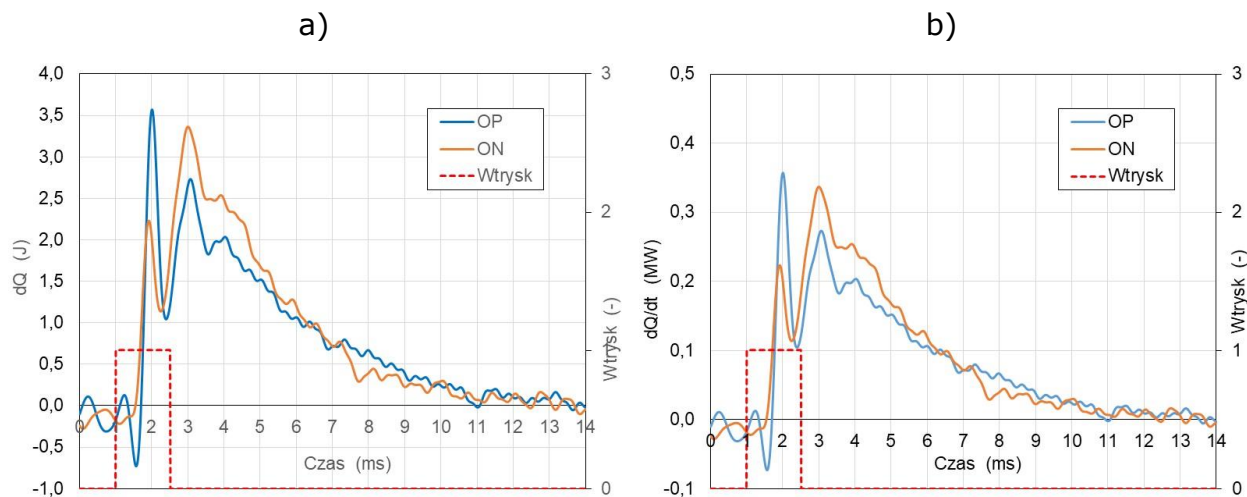
Przedstawiono wyniki ze spalania przy ciśnieniu początkowym w komorze równym 74 bar. Wyniki przedstawiono graficznie w postaci tych samych wykresów jak dla badań przy ciśnieniu 41 bar.



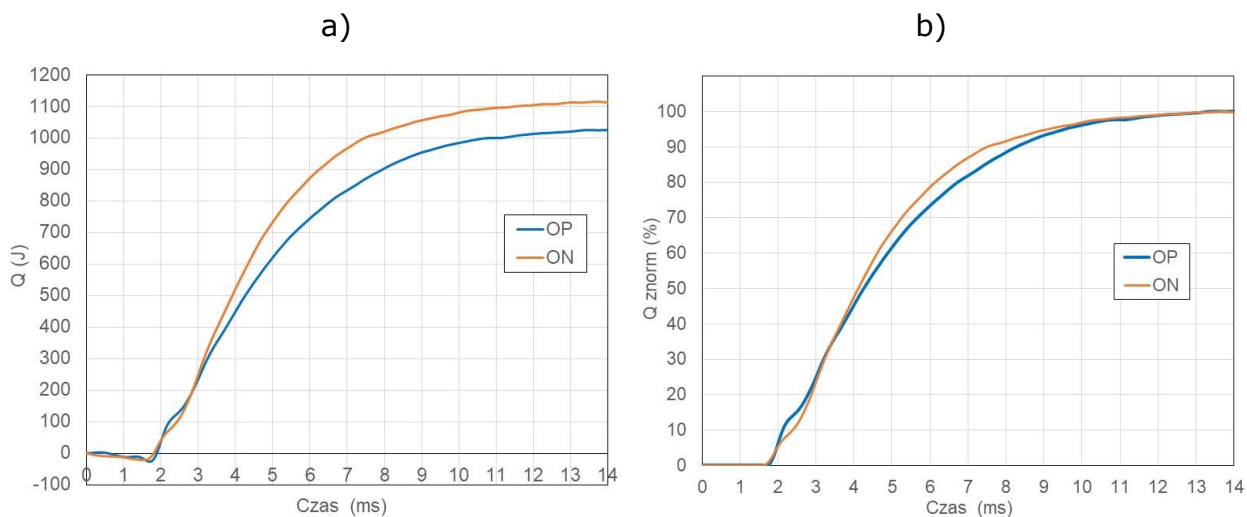
**Rys. 5.12.** Rzeczywisty i odfiltrowany przebieg ciśnienia w komorze przy ciśnieniu 74 bar w chwili zapłonu oraz otwarcia i zamknięcia wtryskiwacza dla oleju pirolitycznego (a) i oleju napędowego (b)



**Rys. 5.13.** Przebieg zmiany ciśnienia  $dp/dt$  dla: oleju pirolitycznego (a); oleju napędowego (b) przy ciśnieniu 74 bar w komorze w chwili zapłonu



**Rys. 5.14.** Przebieg szybkości wydzielania ciepła  $dQ$  (a) oraz jednostkowy przebieg szybkości wydzielania ciepła  $dQ/dt$  (b) dla oleju pirolitycznego i oleju napędowego przy ciśnieniu 74 bar w komorze w chwili zapłonu

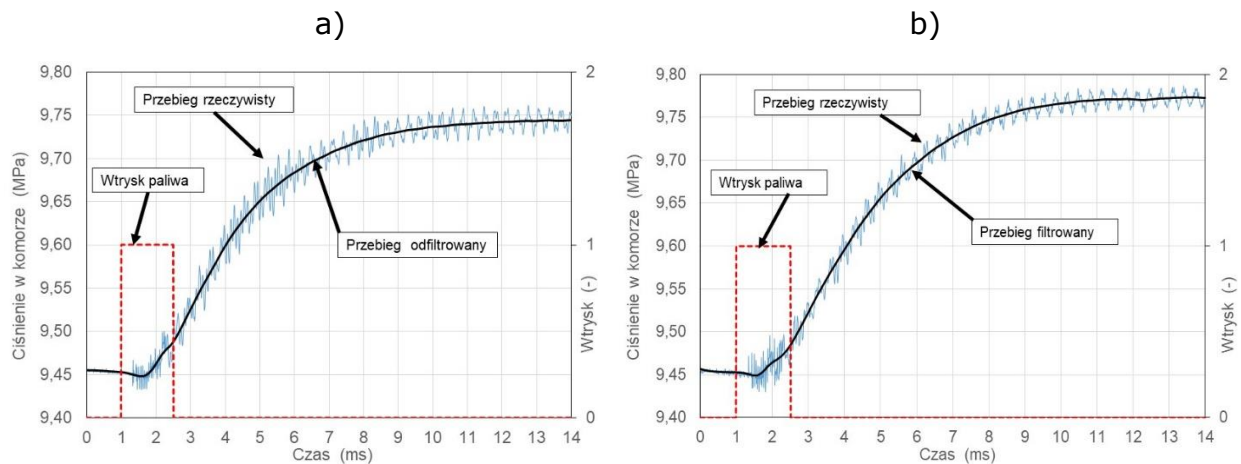


**Rys. 5.15.** Przebieg skumulowanego wydzielania ciepła  $Q(t)$  (a) oraz znormalizowany przebieg wydzielania ciepła  $Q\%(t)$  (b) dla oleju pirolitycznego i oleju napędowego przy ciśnieniu 74 bar w komorze w chwili zapłonu

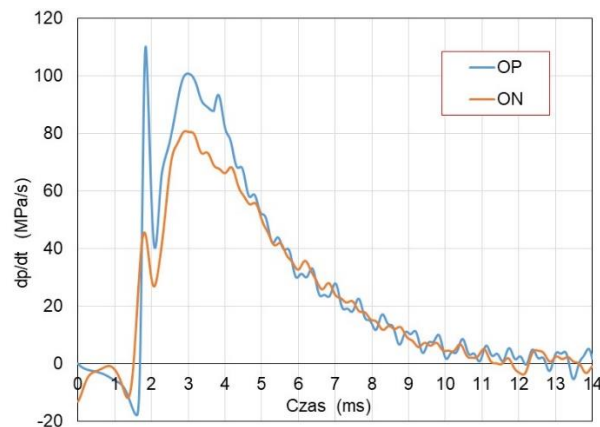


## Badania przy ciśnieniu 95 bar

Przedstawiono wyniki ze spalania przy ciśnieniu początkowym 95 bar. Wyniki przedstawiono graficznie w postaci tych samych wykresów jak dla badań przy ciśnieniu 41 i 74 bar.

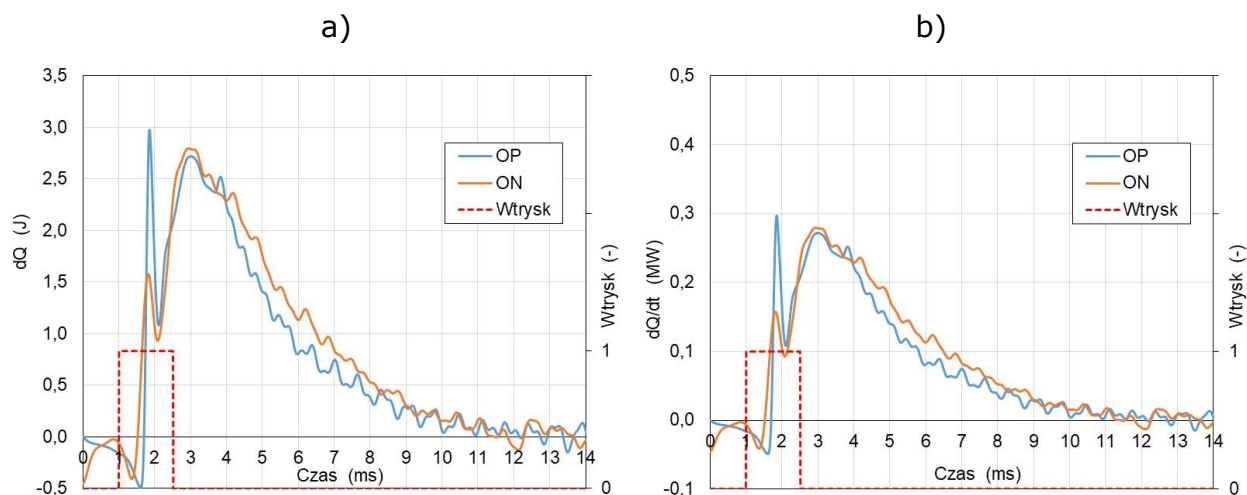


**Rys. 5.16.** Rzeczywisty i odfiltrowany przebieg ciśnienia w komorze przy ciśnieniu 95 bar w chwili zapłonu oraz otwarcia i zamknięcia wtryskiwacza dla oleju pirolitycznego (a) i oleju napędowego (b)

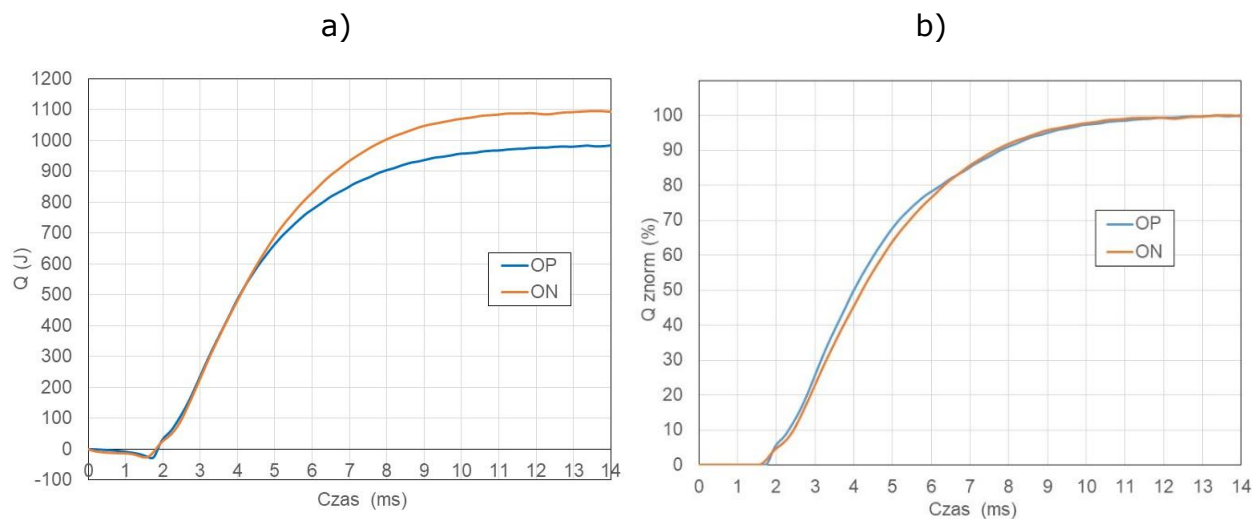


**Rys. 5.17.** Przebieg zmiany ciśnienia  $dp/dt$  dla: oleju pirolitycznego (a); oleju napędowego (b) przy ciśnieniu 95 bar w komorze w chwili zapłonu





**Rys. 5.18.** Przebieg szybkości wydzielania ciepła  $dQ$  (a) oraz jednostkowy przebieg szybkości wydzielania ciepła  $dQ/dt$  (b) dla oleju pirolitycznego i oleju napędowego przy ciśnieniu 95 bar w komorze w chwili zapłonu



**Rys. 5.19.** Przebieg skumulowanego wydzielania ciepła  $Q(t)$  (a) oraz znormalizowany przebieg wydzielania ciepła  $Q\%(t)$  (b) dla oleju pirolitycznego i oleju napędowego przy ciśnieniu 95 bar w komorze w chwili zapłonu

Wszystkie charakterystyczne wielkości zmierzone lub obliczone na podstawie przebiegu ciśnienia spalania zarejestrowanego podczas eksperymentu spalania zamieszczono w tabelicy 5.3.

**Tablica 5.3.** Wyniki wybranych wielkości podczas spalania oleju pirolitycznego i oleju napędowego przy różnych ciśnieniach początkowych w komorze o stałej objętości

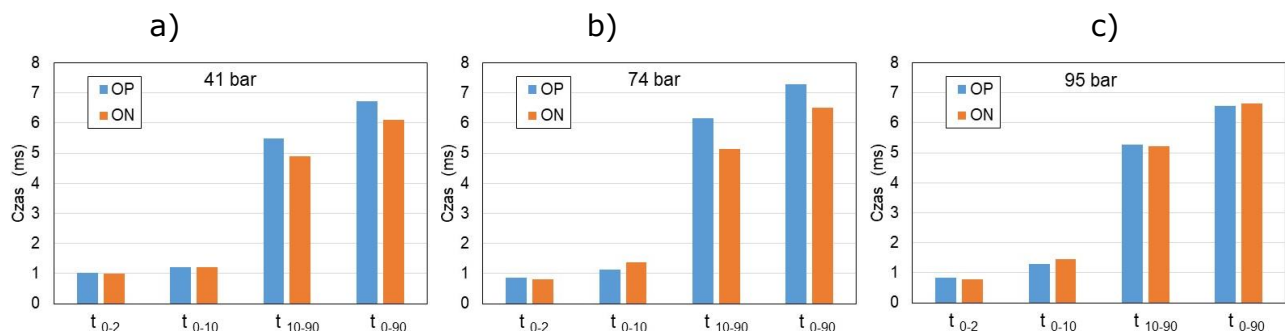
		Olej pirolityczny			Olej napędowy		
Ciśnienie w komorze	bar	41	74	95	41	74	95
$t_0$	ms	1	1	1	1	1	1
$t_2$	ms	2,03	1,87	1,83	1,99	1,82	1,78
$t_{10}$	ms	2,22	2,14	2,29	2,21	2,39	2,45
$t_{50}$	ms	4,05	4,27	3,97	4,08	4,12	4,23
$t_{90}$	ms	7,72	8,29	7,57	7,12	7,52	7,66
$t_{0-2}$	ms	1,03	0,87	0,83	0,99	0,82	0,78
$t_{0-10}$	ms	1,22	1,14	1,29	1,21	1,39	1,45
$t_{10-90}$	ms	5,50	6,15	5,28	4,91	5,14	5,21
$t_{0-90}$	ms	6,72	7,29	6,57	6,12	6,52	6,66
$t_{kin}$	ms	0,91	0,83	0,49	0,89	0,8	0,72
$t_{dyf}$	ms	5,06	5,89	5,76	4,55	5,27	5,57
$t_{kin} / t_{dyf}$	%	18	14	9	20	15	13
$Q_{kin}$	J	202	121	47	181	76	35
$Q_{dyf}$	J	907	941	981	997	1071	1104
$Q_{kin}$	%	18,2	11,4	4,6	15,3	6,6	3,1
$Q_{dyf}$	%	81,8	88,6	95,4	84,7	93,4	96,9
$Q_{kin} / Q_{dyf}$	%	22,2	13,2	4,8	18,1	7,1	3,2
$Q$	J	1109	1062	1028	1178	1148	1139
$dQ_{kin, max}$	J	5,74	3,60	3,00	4,60	2,25	1,60
$dQ_{kin, max}$	MJ/s	0,57	0,36	0,30	0,46	0,23	0,16
$dQ_{dyf, max}$	J	2,59	2,75	2,76	3,13	3,40	2,84
$dQ_{dyf, max}$	MJ/s	0,26	0,28	0,28	0,31	0,34	0,28
$m_{paliwo}$	mg	27,7	26,5	25,7	27,0	26,3	26,1

Dyskusję nad przedstawionymi w tablicy 5.3 wynikami przeprowadzono za pomocą graficznego przedstawienia wybranych wielkości (rys. 5.20-5.24).

Na rysunku 5.20 pokazano fazy spalania dla oleju pirolitycznego i oleju napędowego odpowiednio  $t_{0-2}$ ,  $t_{0-10}$ ,  $t_{10-90}$  i  $t_{0-90}$  dla różnych wartości ciśnienia

w chwili początku wtrysku. Jak można zauważyć, interwały czasowe  $t_{0-2}$  lub  $t_{0-10}$ , które przedstawiają zwłokę zapłonu nie różnią się znacząco od siebie, pomimo, że czas  $t_{0-10}$  jest czasem w którym wydzielilo się 5-krotnie więcej ciepła w porównaniu do czasu  $t_{0-2}$ . Wytlumaczyć to można gwałtownym przyspieszeniem spalania w przedziale od 2 do 10% wydzielanego ciepła tj. od chwili rozbudowania się ognisk samozapłonu i powstania płomienia. Spalanie to obejmuje mieszaninę oparów paliwa wstępnie wymieszanych z utleniaczem. W tym spalaniu dominuje spalanie kinetyczne zachodzące niemalże w całej objętości mieszaniny palnej w postaci gazowej i decydujący na szybkość spalania jest wpływ współczynników szybkości reakcji chemicznych. Największą różnicę pomiędzy tymi czasami zaobserwowano przy spalaniu oleju napędowego przy ciśnieniu 95 bar, gdzie  $t_{0-2} = 0,78 \pm 0,07$  ms a  $t_{0-10} = 1,45 \pm 0,04$  ms. Dokładność wyznaczenia tych wielkości podobnie jak i pozostałych zamieszczonych w tablicy 5.4 omówiono w rozdziale 5.5 (Analiza błędów).

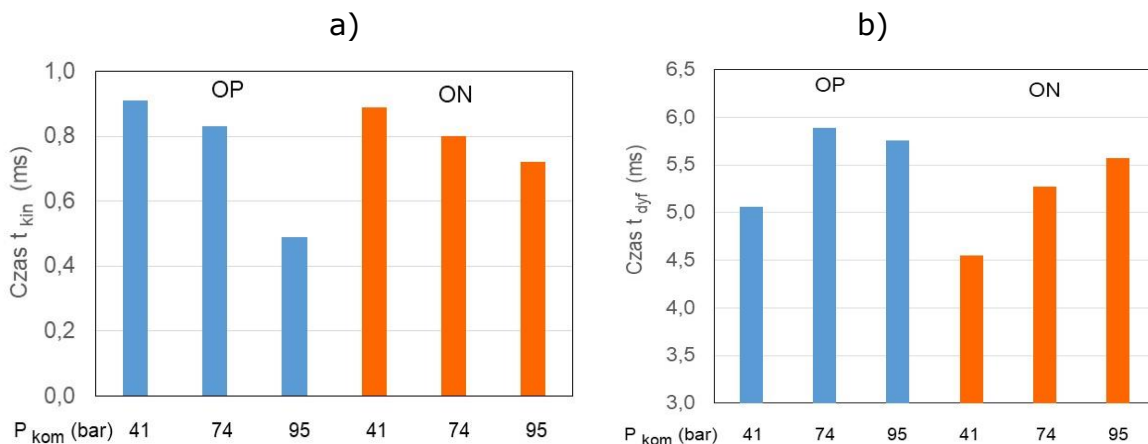
Główna faza spalania zdefiniowana jako przedział czasowy  $t_{10-90}$  od 10 do 90% wydzielonego ciepła jest nieco dłuższa dla oleju pirolitycznego w porównaniu do oleju napędowego. Ta różnica jednak nie przekracza 20% licząc w odniesieniu do oleju pirolitycznego. Tym niemniej można wnioskować, że główna faza spalania, w której dominuje spalanie dyfuzyjne zachodzące na powierzchniach kropeł paliwa jest dłuższa dla oleju pirolitycznego, co może wynikać z zwiększonej zawartości cięższych węglowodorów w porównaniu do oleju napędowego. Podobny kierunek zmian zauważalny jest dla sumarycznej fazy spalania  $t_{0-90}$ , która jest dłuższa dla oleju pirolitycznego w porównaniu do oleju napędowego. Jednakże przy ciśnieniu 95 bar faza ta dla obydwu przebiegów spalania porównywalnie jest taka sama.



**Rys. 5.20.** Czasy poszczególnych faz spalania  $t_{0-2}$ ,  $t_{0-10}$ ,  $t_{10-90}$  i  $t_{0-90}$  dla oleju pirolitycznego i oleju napędowego dla różnych wartości ciśnienia początkowego w komorze spalania: 41 bar (a), 74 bar (b), 95 bar (c)

Na rysunku 5.21 przedstawiono czasy spalania kinetycznego  $t_{kin}$  i spalania dyfuzyjnego  $t_{dyf}$  dla obydwu paliw, przy różnych ciśnieniach początkowych. Jest oczywistym, że czas  $t_{kin}$  jest zdecydowanie krótszy od czasu  $t_{dyf}$ . Można zaobserwować tendencję skracania czasu  $t_{kin}$  w zależności od ciśnienia w komorze, co prawdopodobnie jest spowodowane mniejszą ilością masy paliwa poddanego spalaniu kinetycznemu. Ta mniejsza masa wynika głównie ze zmniejszenia szybkości odparowywania kropeł paliwa pod zwiększonym ciśnieniem. Natomiast czas spalania dyfuzyjnego  $t_{dyf}$  rośnie ze wzrostem ciśnienia, co można tłumaczyć wzrostem masy paliwa spalane w tej fazie kosztem paliwa niespalonego w poprzedniej fazie. Ponadto można stwierdzić, że ze wzrostem ciśnienia obniża się współczynnik dyfuzji w zakresie dostarczania tlenu i odprowadzania produktów spalania z powierzchni kropeł spalanych paliw.

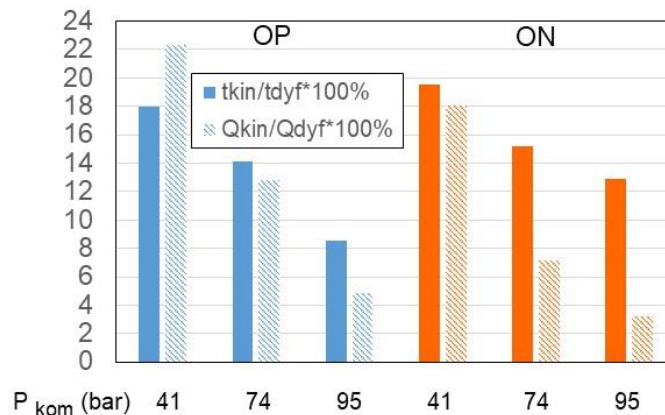
Istotny wydaje się być udział fazy spalania kinetycznego w odniesieniu do fazy spalania dyfuzyjnego. Iloraz  $t_{kin}/t_{dyf}$  w skali procentowej został przedstawiony na rysunku 5.22. Wraz ze wzrostem ciśnienia początkowego udział fazy spalania kinetycznego szybko maleje z 18 do niemalże 8% dla oleju pirolitycznego. Ten sam kierunek zmian zaobserwowano dla oleju napędowego, gdzie wartości  $t_{kin}/t_{dyf}$  maleją od około 20 do około 13%.



**Rys. 5.21.** Czas spalania kinetycznego  $t_{kin}$  (a) oraz spalania dyfuzyjnego  $t_{dyf}$  (b) dla oleju pirolitycznego i oleju napędowego dla różnych wartości ciśnienia początkowego w komorze spalania: 41 bar, 74 bar i 95 bar

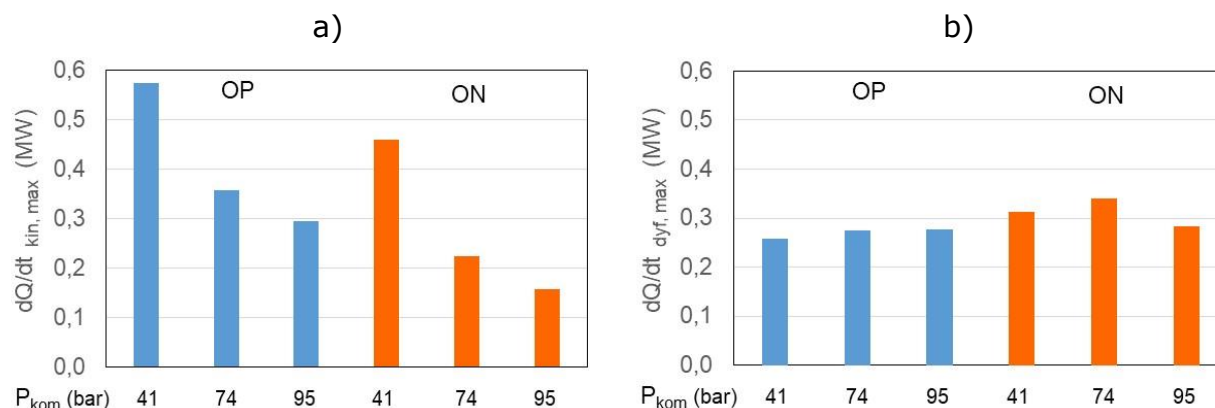
Poza porównaniem czasu  $t_{kin}$  względem  $t_{dyf}$  na rysunku 5.22 przedstawiono także ilości ciepła wydzielonego w fazie spalania kinetycznego  $Q_{kin}$  względem fazy spalania dyfuzyjnego  $Q_{dyf}$ . Przy ciśnieniu początkowym 41 bar udział ciepła  $Q_{kin}$  jest znacznie wyższy aniżeli udział czasowy  $t_{kin}$  względem fazy

spalania dyfuzyjnego  $Q_{dyf}$  i  $t_{dyf}$  odpowiednio. Jednakże, wraz ze wzrostem ciśnienia udział ciepła  $Q_{kin}$  znacznie szybciej obniża się aniżeli udział czasowy fazy spalania kinetycznego  $t_{kin}$  względem fazy spalania dyfuzyjnego. Przyczyny tego zjawiska należy upatrywać w zmianach szybkości reakcji chemicznych w spalaniu kinetycznym i spalaniu dyfuzyjnym w zależności od ciśnienia.



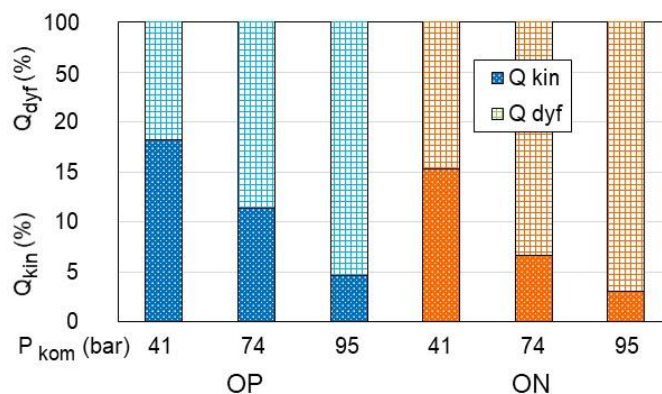
**Rys. 5.22.** Udział procentowy  $t_{kin}/t_{dyf}$  oraz  $Q_{kin}/Q_{dyf}$  dla oleju pirolitycznego i oleju napędowego dla różnych wartości ciśnienia początkowego w komorze spalania: 41 bar, 74 bar i 95 bar

Na rysunku 5.23 przedstawiono maksymalne szybkości wydzielania ciepła  $dQ/dt$  dla fazy spalania kinetycznego i fazy spalania dyfuzyjnego. Maksymalna szybkość wydzielania ciepła  $dQ/dt_{kin,max}$  podczas spalania kinetycznego bardzo szybko obniża się ze wzrostem ciśnienia co ma wpływ na ilość wydzielonego ciepła w tej fazie spalania. Można przyjąć, że szybkość wydzielania ciepła jest w liniowej zależności z szybkością wypalania paliwa a tym samym ze średnią szybkością wszystkich reakcji chemicznych występujących podczas spalania. Maksymalna szybkość wydzielania ciepła  $dQ/dt_{dyf,max}$  podczas fazy spalania dyfuzyjnego nie podlega tak istotnemu obniżeniu a nawet można stwierdzić, że pozostaje na niezmiennym poziomie.



**Rys. 5.23.** Maksymalne szybkości spalania kinetycznego  $dQ/dt_{kin,max}$  (a) oraz spalania dyfuzyjnego  $dQ/dt_{dyf,max}$  (b) dla oleju pirolitycznego i oleju napędowego dla różnych wartości ciśnienia początkowego w komorze spalania: 41 bar, 74 bar i 95 bar

Podsumowaniem analizy dotyczącej faz spalania kinetycznego i dyfuzyjnego jest udział tych faz w całości przebiegu spalania pod względem ilości wydzielonego ciepła (rys. 5.24). Ciepło wydzielone podczas spalania kinetycznego stanowi mniej niż 20% całości wydzielonego ciepła i bardzo szybko maleje do wartości poniżej 5% ze wzrostem ciśnienia początkowego w komorze spalania dla obydwu paliw.



**Rys. 5.24.** Iloraz ciepła w spalaniu kinetycznym do ciepła w spalaniu dyfuzyjnym  $Q_{kin} / Q_{dyf}$  dla oleju pirolitycznego i oleju napędowego dla różnych wartości ciśnienia początkowego w komorze spalania: 41 bar, 74 bar i 95 bar

## 5.4. Badanie zasięgu i prędkości rozpylania w podwyższonym ciśnieniu i temperaturze

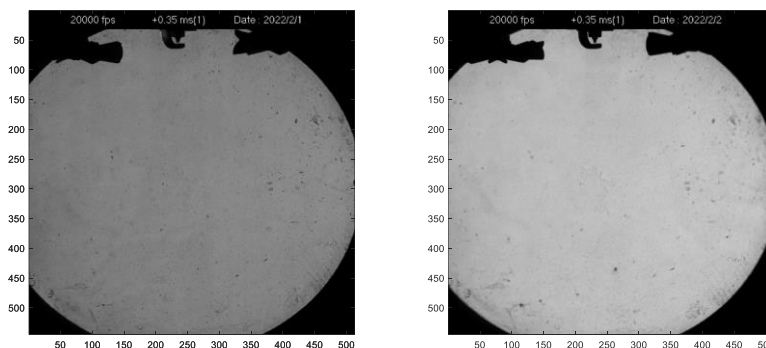
Istotne z punktu widzenia przebiegu formowania się mieszanki palnej jest analiza przebiegu wtrysku i szybkości rozpylania oleju pirolitycznego i oleju napędowego. Wielkości, które następnie użyto do analizy porównawczej, są następujące:

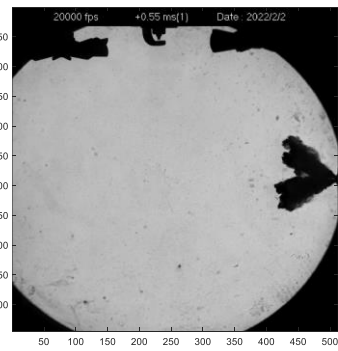
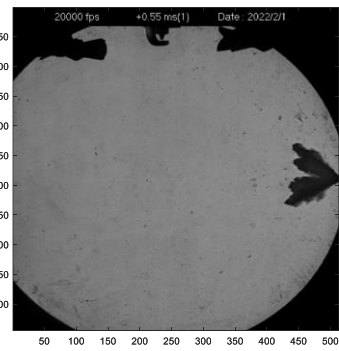
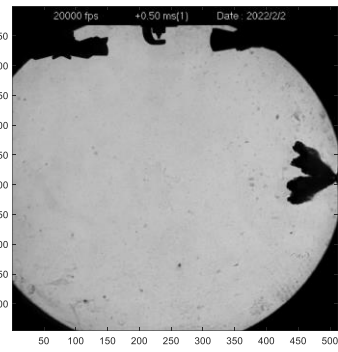
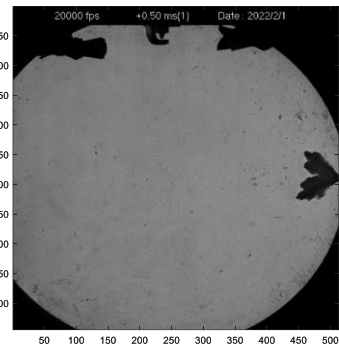
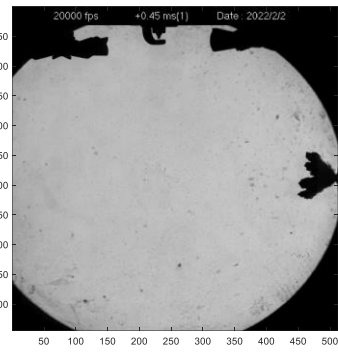
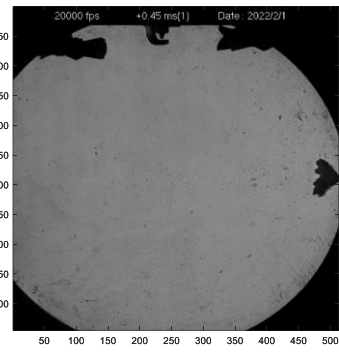
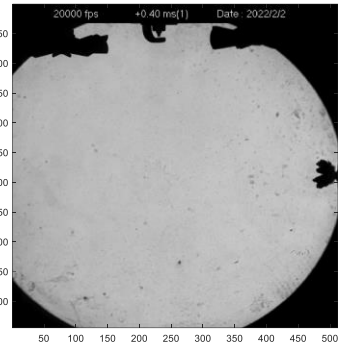
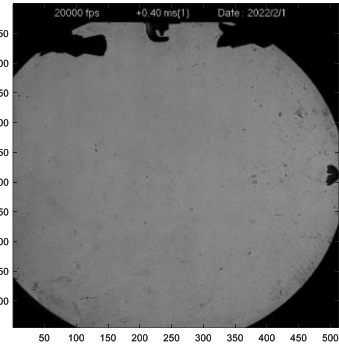
- zasięg strugi rozpylanego paliwa,
- szybkość rozprzestrzeniania się chmury paliwa.

Analizę przeprowadzono w oparciu o rejestrację przebiegu wtrysku za pomocą szybkiej kamery cyfrowej środowisku o podwyższonym ciśnieniu i temperaturze podobnie jak w przypadku analizy przebiegu spalania. Aby wyeliminować zapłon, komorę wypełniono azotem. Szczegóły dotyczące metod pomiarowych i analizy obrazów przedstawiono w rozdziale 4. Badania przeprowadzono dla ciśnienia początkowego 19, 33 i 43 bar w temperaturze 453 K.

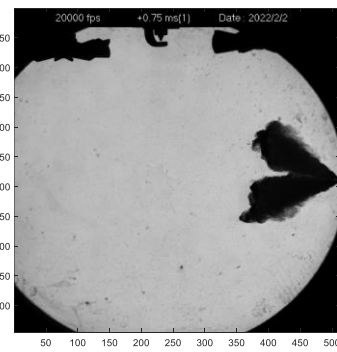
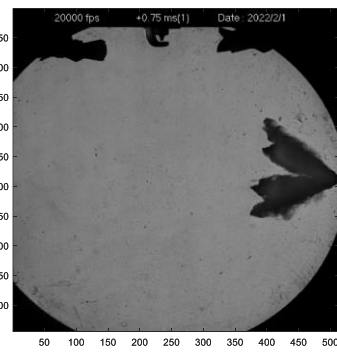
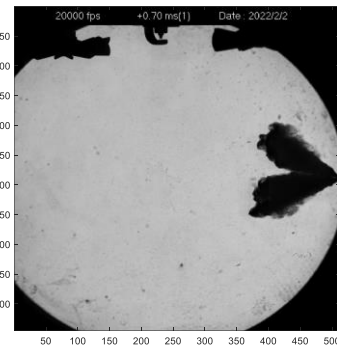
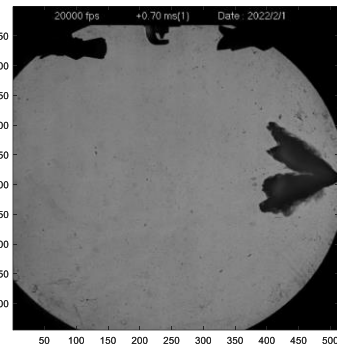
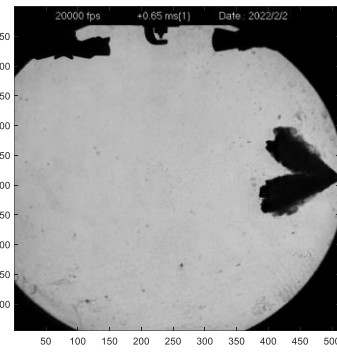
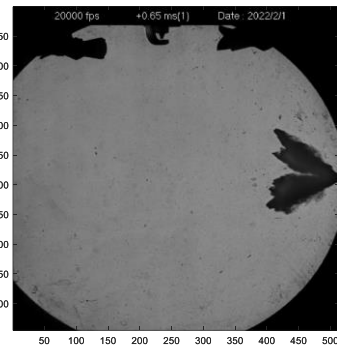
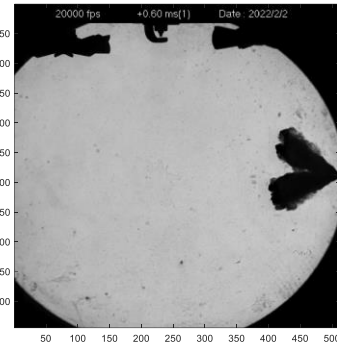
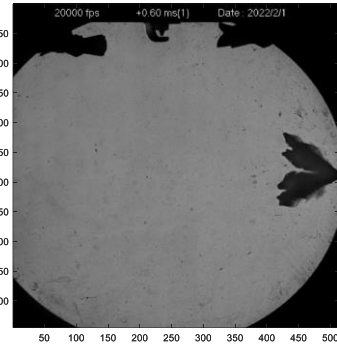
Zasięg strugi po uśrednieniu przedstawiono na rys. 5.25. Zasięg strugi ulega stabilizacji po około 2,5 ms od chwili uruchomienia wtryskiwacza impulsem wyzwalającym. W początkowej fazie wyraźnie widoczny jest brak wypływu paliwa, co wynika z bezwładności masowej dla iglicy wtryskiwacza oraz masy paliwa wypełniającej wtryskiwacz i przewód zasilający. Zwłoka występująca podczas otwierania wtryskiwacza była mierzona od chwili pojawienia się impulsu sterującego wtryskiwaczem do chwili pojawienia się strugi paliwa u wylotu dysz wtryskiwacza. Ta zwłoka czasowa wyznaczona na podstawie zarejestrowanych obrazów była na poziomie około 0,35 ms. Po tym czasie od chwili otwarcia wtryskiwacza kamera rejestrowała początek wypływu paliwa.

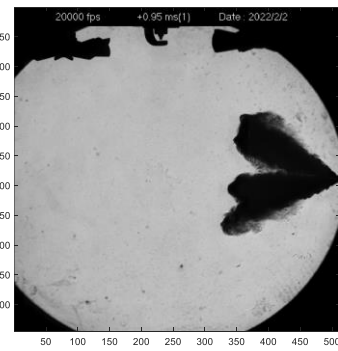
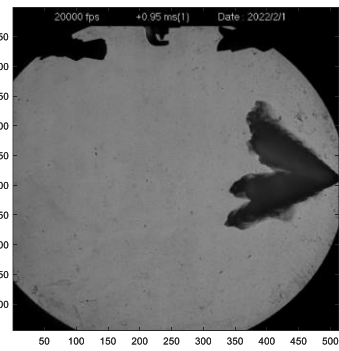
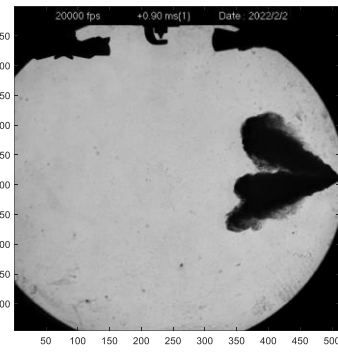
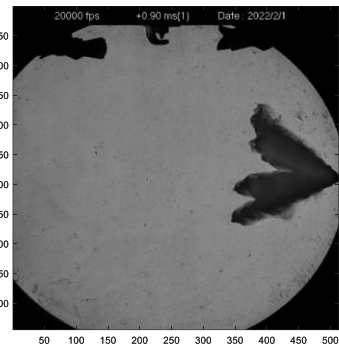
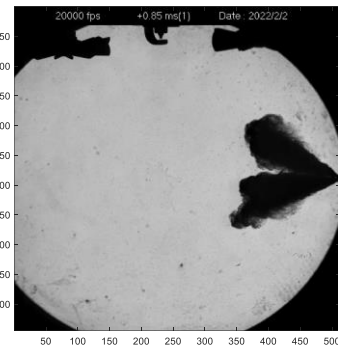
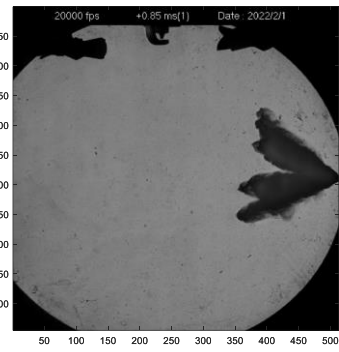
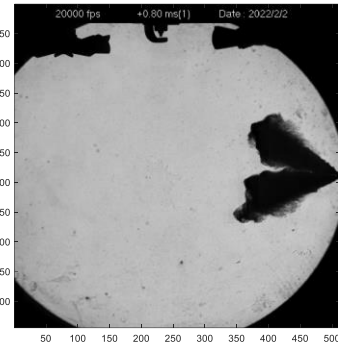
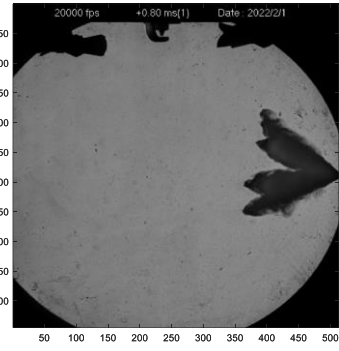
Na rysunku 5.25 przedstawiono przykładowe klatki ze skokiem czasowym 50 $\mu$ s z przebiegu wypływu oleju pirolitycznego (z prawej strony) i oleju napędowego (z lewej strony) przy ciśnieniu początkowym 41 bar.

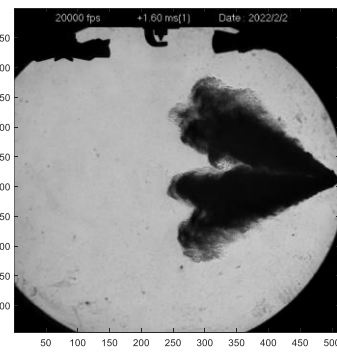
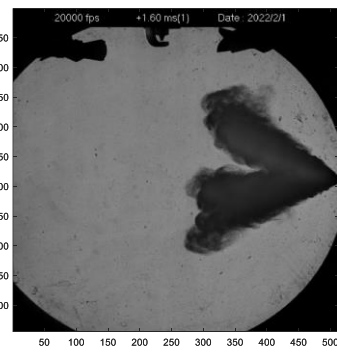
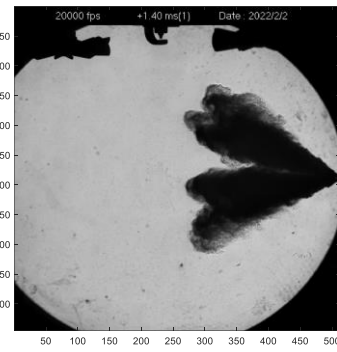
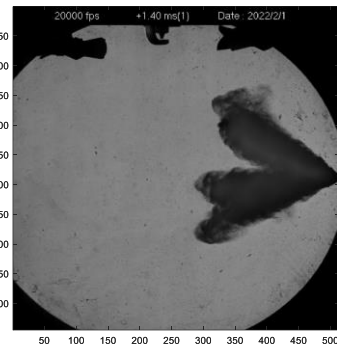
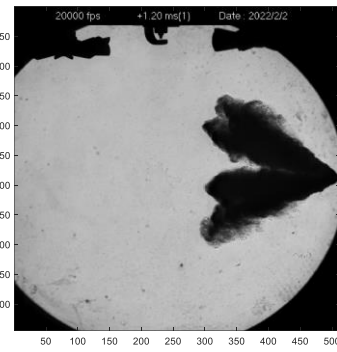
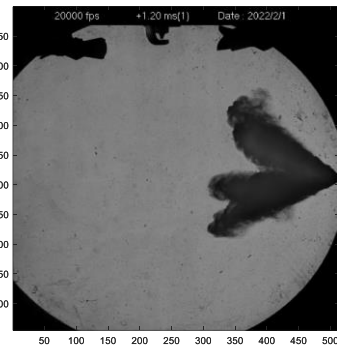
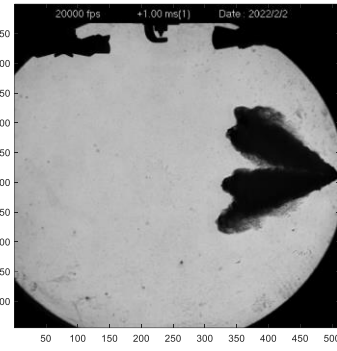
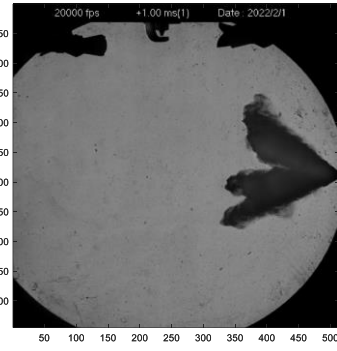


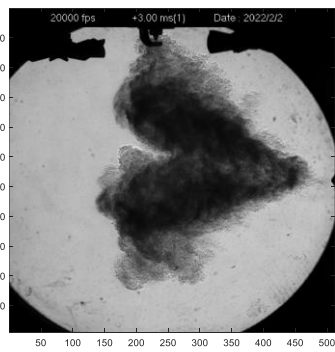
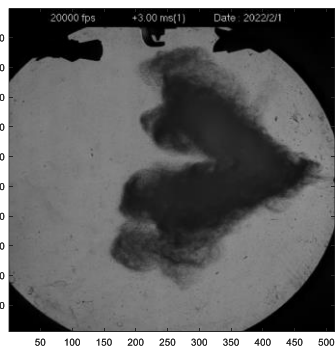
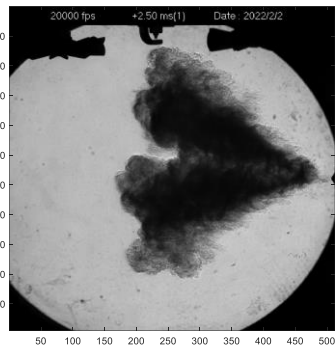
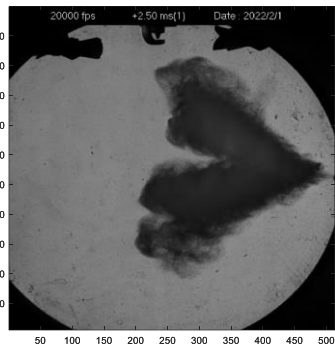
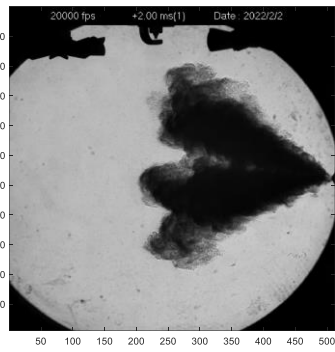
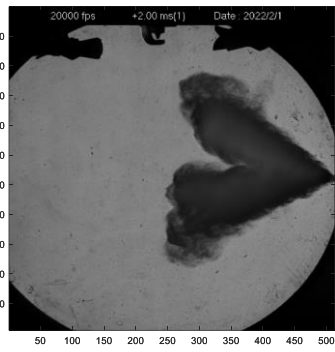
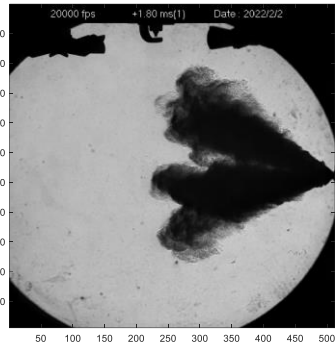
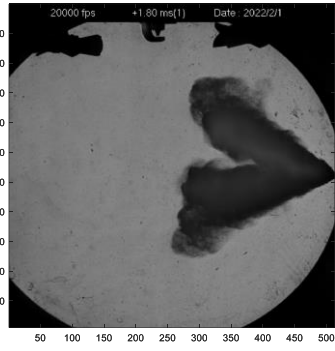


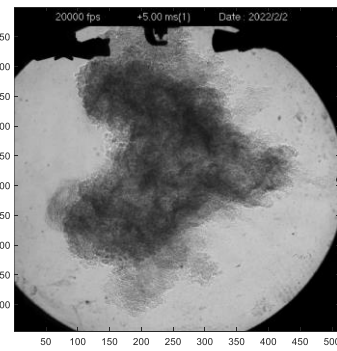
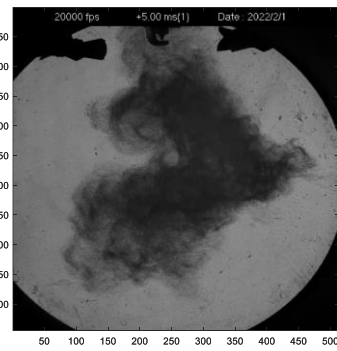
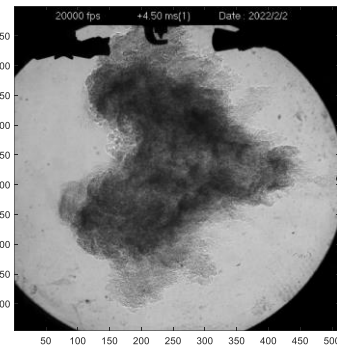
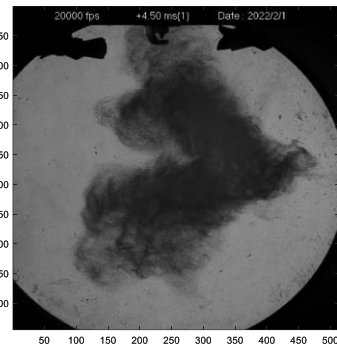
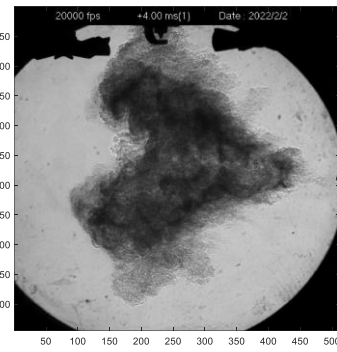
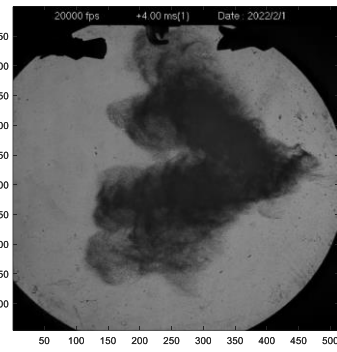
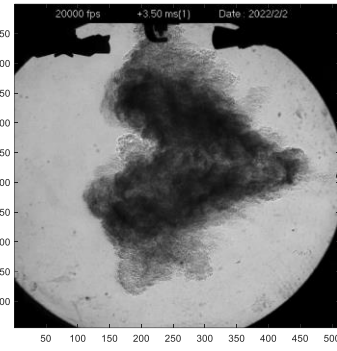
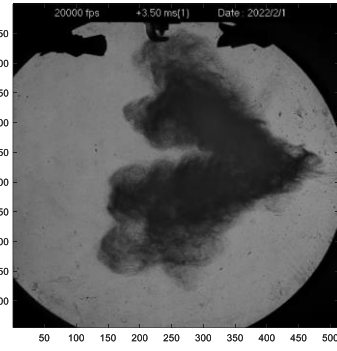


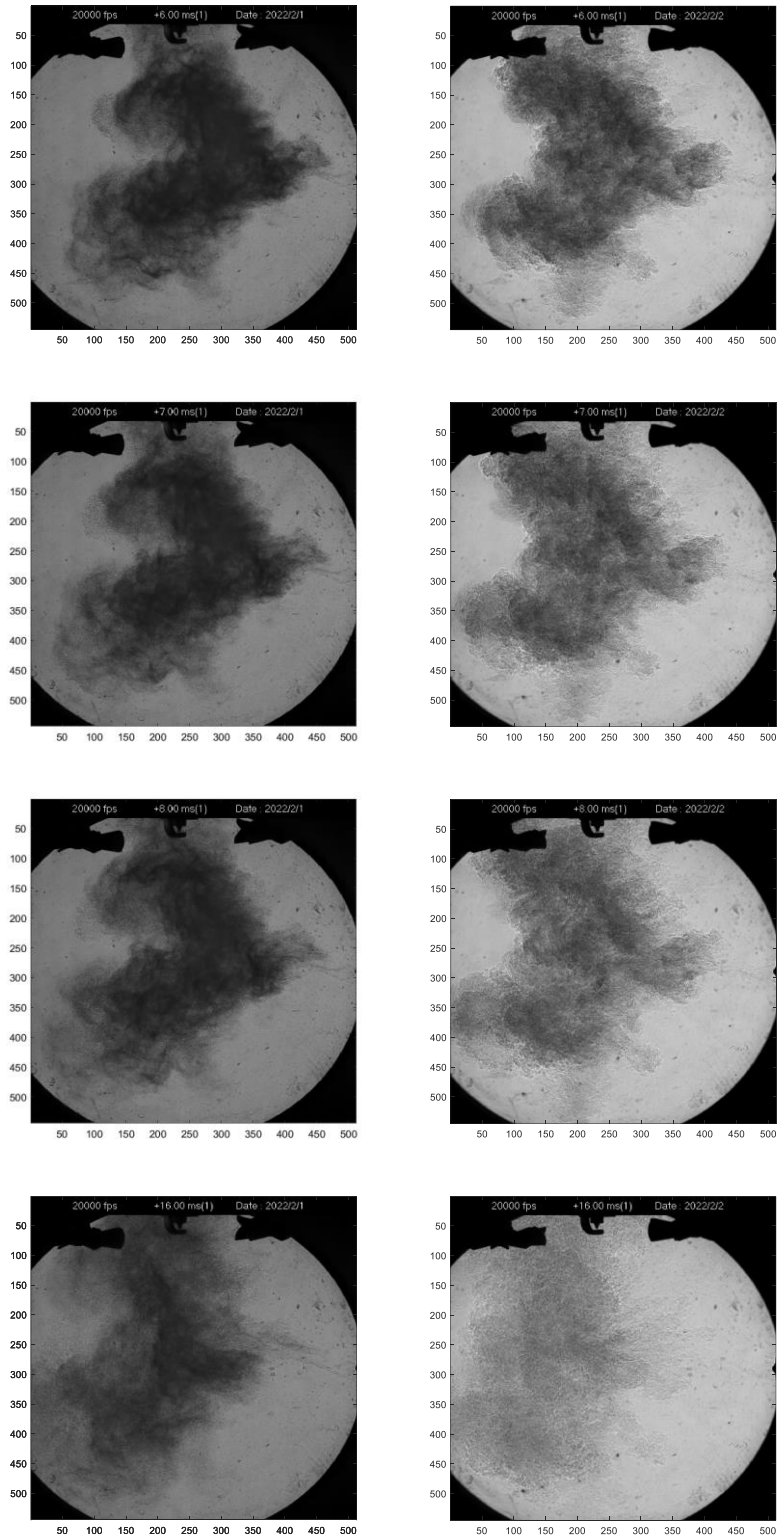








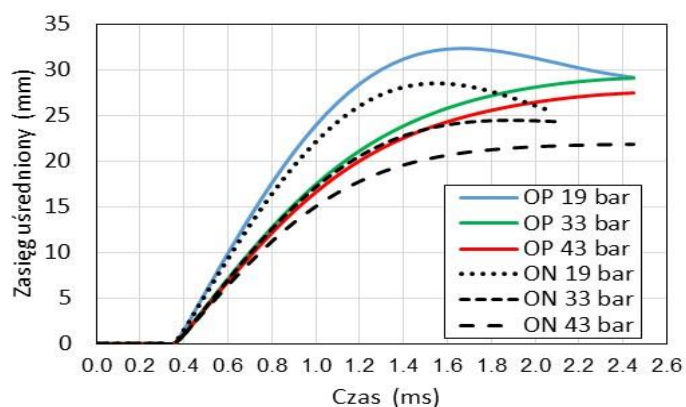




**Rys. 5.25.** Historia wypływu oleju napędowego (z lewej) i oleju pirolitycznego (z prawej strony)

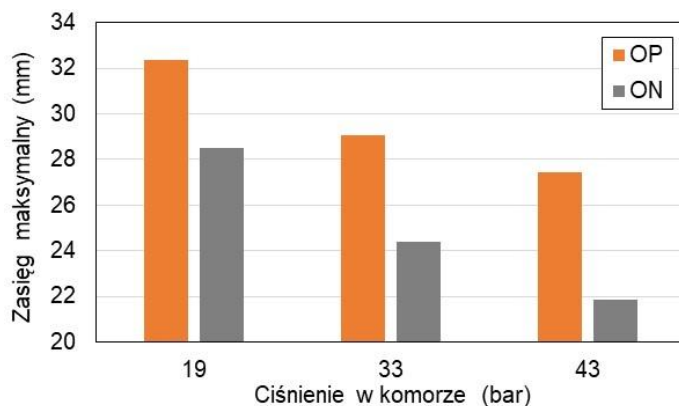
Nie było możliwości precyzyjniejszego ustalenia tego czasu ze względu na szybkość kamery cyfrowej, która rejestrowała kolejne obrazy z prędkością biegu klatkowego równego 20 000 klatek/s co odpowiadało interwałowi czasowemu pomiędzy poszczególnymi klatkami 0,05 ms. Zwłoka ta była uwzględniana w zwłoce zapłonu paliwa i fazach spalania analizowanych w rozdziałach 5.2 i 5.3.

Porównując ze sobą zasięg strugi dla obydwu badanych paliw można stwierdzić, że zasięg oleju pirolitycznego jest większy od zasięgu oleju napędowego. Na podstawie właściwości fizycznych obydwu cieczy można wnioskować, że większy zasięg może być wynikiem mniejszej lepkości oleju pirolitycznego, który jest mieszaniną wielu węglowodorów, w tym także węglowodorów lekkich.



**Rys. 5.26.** Uśredniony zasięg strugi badanych paliw dla różnych ciśnień w komorze

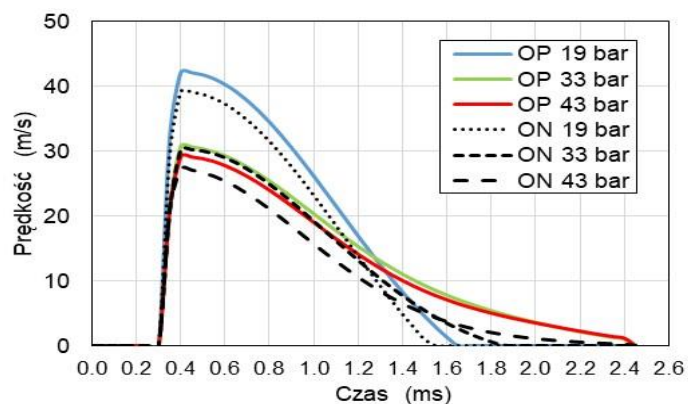
Z przebiegów z rysunku 5.26 wyznaczono zasięg maksymalny, który przedstawiono na rysunku 5.27.



**Rys. 5.27.** Maksymalny zasięg strugi badanych paliw dla różnych ciśnień w komorze

Potwierdza się, że zasięg maksymalny dla oleju pirolitycznego jest większy od zasięgu oleju napędowego. Jest to właściwość z jednej strony korzystna dla szybkości formowania się mieszanki palnej szczególnie do spalania dyfuzyjnego, ponieważ maksymalny zasięg osiągany jest po około 2 ms od chwili podania napięcia do otwarcia wtryskiwacza. Jak wynika z poprzednio przeprowadzonej analizy jest to czas występujący w pobliżu czasu  $t_{10}$  tj. czasu wydzielenia 10% ciepła i od tego punktu  $t_{10}$  rozpoczyna się główna faza spalania w której dominuje spalanie dyfuzyjne. A zatem z punktu widzenia szybkości spalania jest to parametr korzystnie wpływający na przebieg spalania w rzeczywistym silniku, gdzie czas przewidziany do zupełnego spalania dawki paliwa jest odgórnie ograniczony prędkością obrotową silnika. Bardziej rozpylona chmura paliwa ma warunki do lepszego wymieszania z powietrzem i tym samym do szybszego przebiegu spalania. Z drugiej strony, zbyt duży zasięg może sprawiać, że krople paliwa będą docierać do ścianki cylindra w rzeczywistym silniku, co spowoduje, że te krople nie zostaną całkowicie spalane i w konsekwencji będzie to skutkowało podwyższoną zawartością niespalonych węglowodorów (HC) w spalinach i obniżeniem sprawności indykowanej silnika.

Jak wspomniano w rozdziale 4, znając czasowy przebieg zasięgu można obliczyć prędkość rozprzestrzeniania się chmury paliwa, co przedstawiono na rysunku 5.28.



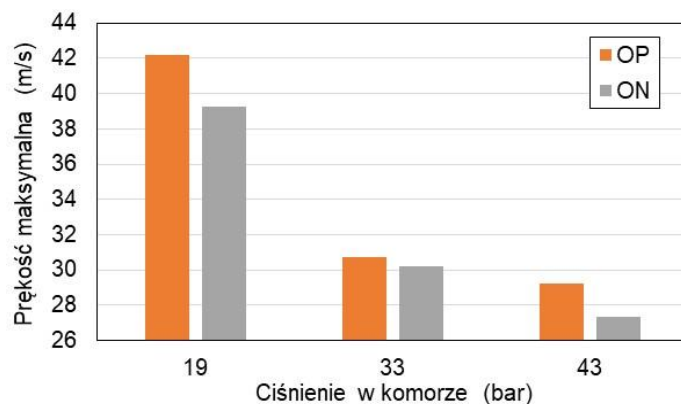
**Rys. 5.28.** Prędkość rozpylania strugi badanych paliw dla różnych ciśnień w komorze

Największą prędkość mają cząstki paliwa tuż po wyjściu z dyszy wtryskiwacza (rys. 5.28). Dla obydwu paliw prędkości te mają wartości zbliżone, aczkolwiek, prędkości wypływu oleju pirolitycznego przy tym samym ciśnieniu są wyższe od prędkości oleju napędowego. Prędkość ta jest trudna do przypisania dla konkretnych cząstek paliwa. W oparciu o analizę obrazów



można było zarejestrować kształt chmury wypływającego paliwa oraz rejestrować zmianę tego kształtu w funkcji upływającego czasu. Stąd, prędkość zdefiniowaną na potrzeby tej analizy przyjęto nazywać prędkością rozprzestrzeniania się chmury paliwa, a w pobliżu dysz wtryskiwacza można było przyjąć, że jest to prędkość w dobrej proporcji, po uwzględnieniu równania ciągłości, do prędkości wypływu paliwa z dyszy wtryskiwacza po jej uśrednieniu w przedziale czasowym 50  $\mu$ s wynikającym z szybkości wykonywania zdjęć kamerą cyfrową.

U wylotu wtryskiwacza obserwowano najwyższą wartość tej prędkości. Na rys. 5.29 przedstawiono tę maksymalną wartość prędkości rozprzestrzeniania się chmury paliwa w zależności od ciśnienia w komorze i rodzaju paliwa. Ze wzrostem ciśnienia następuje zagęszczenie molekułami ośrodka, do którego wtryskiwane jest paliwo i tym samym występują wyższe opory aerodynamiczne co obniża prędkość. Natomiast istotnym spostrzeżeniem jest wyższa wartość prędkości wypływu paliwa dla oleju pirolitycznego, co sprawia, że prawdopodobnie łatwiejsze będzie jego rozpylanie (*secondary break-up*), szybsze odparowanie i w konsekwencji szybszy przebieg spalania.



**Rys. 5.29.** Maksymalna prędkość rozpylania strugi badanych paliw dla różnych ciśnień w komorze

## Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań przebiegu wtrysku i spalania oleju pirolitycznego i oleju napędowego w komorze o stałej objętości sformułowano następujące wnioski:

- przebieg wtrysku i tworzenia chmury oleju pirolitycznego z większą prędkością (średnio o około 8%) w porównaniu do oleju napędowego.

- Zasięg strugi oleju pirolitycznego był większy o około 13-15% w porównaniu do zasięgu oleju napędowego. Jest to istotne w przypadku bezpośredniego wtrysku paliwa do silnika, ponieważ może prowadzić do osadzania się nieodparowanego paliwa na ściankach cylindra i w ten sposób zmniejszać sprawność indykowaną oraz powiększać emisję niespalonych węglowodorów.
- Czas trwania fazy spalania kinetycznego dla oleju pirolitycznego jest około 5% krótszy od fazy spalania kinetycznego dla oleju napędowego.
- Czas spalania kinetycznego skracał się ze wzrostem ciśnienia początkowego w komorze spalania, co jest prawdopodobnie wynikiem przyspieszenia reakcji chemicznych wskutek zmniejszenia się średniej drogi swobodnej dla aktywnych molekuł.
- Czas spalania dyfuzyjnego ulegał wydłużeniu ze wzrostem ciśnienia początkowego w komorze co można tłumaczyć zmniejszeniem współczynnika dyfuzji na powierzchni kropli paliwa.
- Maksymalna szybkość spalania wyrażona za pomocą szybkości wydzielania ciepła  $dQ/dt$  dla fazy spalania kinetycznego jest około 20% większa od szybkości spalania kinetycznego dla oleju napędowego. Natomiast maksymalna szybkość spalania dyfuzyjnego była porównywalna dla obydwu testowanych paliw.
- Udział ciepła wydzielonego z fazy spalania kinetycznego wynosił około 18% dla oleju pirolitycznego a dla oleju napędowego było to odpowiednio 15% co stanowi względny przyrost około 20%. Jest to istotne, ponieważ większa ilość paliwa spalana kinetycznie prowadzi do szybszego przyrostu ciśnienia w cylindrze silnika co ma wpływ na:
  - wyższą sprawność indykowaną obiegu termodynamicznego,
  - lepsze wypalenie paliwa i jednocześnie mniejszą zawartość niespalonych węglowodorów, sadzy i tlenku węgla w spalinach.
- zwłoka samozapłonu mierzona jako czas  $t_{0-2}$  dla oleju pirolitycznego była nieznacznie dłuższa w porównaniu do zwłoki dla oleju napędowego. Ta różnica była jednakże niewielka, ale była wyraźnie widoczna ponad dokładność pomiarową wyznaczenia czasu  $t_{0-2}$ . Zwłoka zapłonu ma wpływ na dalszy przebieg spalania w tym na przyrost ciśnienia. W tym przypadku można uznać, że zwłoka zapłonu dla obydwu paliw ma podobną wartość pod tym względem nie ma istotnej różnicy pomiędzy badanymi paliwami.

## 5.6. Analiza błędów

W ramach przeprowadzonych badań eksperymentalnych dane liczbowe wyznaczano przez pomiar bezpośredni oraz pomiar pośredni.

Pomiar bezpośredni dotyczył następujących wielkości:

- ciśnienie w komorze spalania, ciśnienie otoczenia,
- temperatura,
- wielkości czasowe.

W tych przypadkach niepewność pomiarowa była podawana przez producenta urządzenia pomiarowego jako błąd bezwzględny lub względny dla mierzonej wielkości. Wyniki zamieszczono w tabelicy 5.4.

Pozostałe wielkości wyliczane były za pomocą zależności matematycznych lub generowane przez oprogramowanie zintegrowane z urządzeniem pomiarowym. Dotyczy to przede wszystkim pomiaru średnic średnic kropeł SMD.

**Tablica 5.4.** Dokładność wielkości mierzonych bezpośrednio

<b>Wielkość</b>	<b>Zakres</b>	<b>Dokładność</b>
Czas wtrysku paliwa	0÷10 ms	±10 μs
Czas t	0÷10 ms	±10 μs
Przetwornik ciśnienia Kistler	0÷200 bar	rozdzielczość: 10 pC/bar niepewność: < ±10 kPa
System akwizycji danych	±10 V	dokładność: 16 bit ±1 LSB ±0,3 mV/LSB częstotliwość próbkowania 100 kHz

Niepewność pomiarową dla wielkości wyznaczanych za pomocą pomiaru pośredniego wyznaczano w następujący sposób:

- dla znanych zależności analitycznych niepewność wyznaczano jako niepewność maksymalną obliczaną z różniczki zupełnej według zależności 5.5.

$$\Delta y = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot \Delta x_i \right| \quad (5.5)$$

- dla wielkości wyznaczanych przez kilkakrotne powtarzanie pomiarów w tych samych warunkach niepewność pomiarową wyznaczano przez obliczenie

odchylenia standardowego dla wartości średniej z uwzględnieniem zmiennej standaryzowanej z rozkładu t-Studenta (5.6).

$$S_y = t_{St} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{Sr})^2}{n \cdot (n-1)}} \quad (5.6)$$

gdzie:

$S_y$  – niepewność pomiarowa,

$t_{St}$  – zmienna standaryzowana z rozkładu t-Studenta,

$x_i$  – wynik pojedynczego pomiaru,

$x_{Sr}$  – wartość średnia z n pomiarów,

n – liczba pomiarów.

Rozkład t-Studenta stosowano do pomiarów wielkości z eksperymentu z komorą spalania. W celu oceny powtarzalności przebiegu spalania w komorze wykonano pięć powtórzeń wtrysku takiej samej dawki oleju napędowego w tych samych warunkach ciśnienia i temperatury. Do obliczeń niepewności pomiarowej przyjęto poziom ufności  $1-\alpha = 0,95$ . Stąd zmienna standaryzowana  $t_{St} = 2,776$ . Wyniki niepewności pomiarowej dla wszystkich wielkości mierzonych w sposób pośredni (m.in. wielkości przedstawione w tabelicy 5.3) zamieszczono w tabelicy 5.5. Analizę błędów przeprowadzono jak podano dla pięciu powtarzalnych prób spalania oleju napędowego, ale uzyskane w ten sposób wyniki niepewności pomiarowej przyjęto także za miarodajne dla tych samych wielkości obliczanych dla oleju pirolitycznego.

Niepewność pomiarową dla obliczeń temperatury w komorze spalania wyznaczono z zależności 5.7.

$$\Delta T = \frac{V_k}{R_u} \cdot \left( \left| \frac{p}{n^2} \cdot \Delta n \right| + \left| \frac{1}{n} \cdot \Delta p \right| \right) \quad (5.7)$$

gdzie:

n- liczba moli gazów wypełniających komorę spalania. Przyjęto, że nie uwzględnia się dawki paliwa i gazów powstałych ze spalania tej dawki.

$\Delta n$  – niepewność pomiarowa dla liczby moli n,

$R_u$  – uniwersalna stała gazowa,

$V_k$  – objętość komory spalania  $1,1 \text{ dm}^3$ ,

p – ciśnienie w komorze spalania,

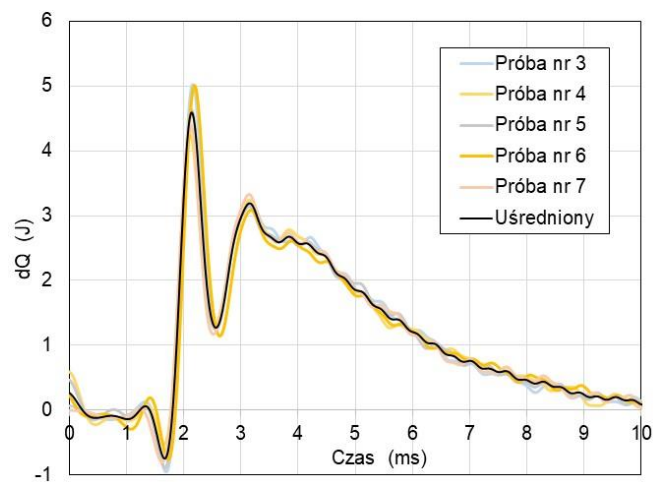
$\Delta p$  – niepewność pomiarowa dla ciśnienia  $p = 10 \text{ kPa}$ .

**Tablica 5.5.** Dokładność wybranych wielkości wyznaczanych pośrednio

Nr próby	-	3	4	5	6	7	Średnia	Odch.std.	Niep.pom. t-Student t=2,776 n=4 1- $\alpha$ =0,95	Odch. proc.
p	bar	41	41	41	41	41				%
t <sub>0</sub>	ms	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00				
t <sub>2</sub>	ms	1,99	2,00	1,96	2,03	1,96	1,99	0,024	0,067	3,4
t <sub>10</sub>	ms	2,21	2,21	2,21	2,24	2,20	2,21	0,013	0,035	1,6
t <sub>50</sub>	ms	4,08	4,03	4,06	4,10	4,06	4,06	0,024	0,066	1,6
t <sub>90</sub>	ms	7,12	6,93	7,17	7,36	7,11	7,14	0,137	0,381	5,3
t <sub>0-2</sub>	ms	0,99	1,00	0,96	1,03	0,96	0,99	0,024	0,067	6,8
t <sub>0-10</sub>	ms	1,21	1,21	1,21	1,24	1,20	1,21	0,013	0,035	2,9
t <sub>10-90</sub>	ms	4,91	4,72	4,96	5,13	4,91	4,93	0,129	0,359	7,3
t <sub>0-90</sub>	ms	6,12	5,93	6,17	6,36	6,11	6,14	0,137	0,381	6,2
t <sub>kin</sub>	ms	0,89	0,87	0,88	0,91	0,89	0,89	0,01	0,04	4,1
t <sub>dyf</sub>	ms	4,55	4,36	4,625	4,72	4,47	4,55	0,12	0,34	7,6
<b>Q<sub>kin</sub></b>	J	181	186	174	195	157	178,52	12,7	35,2	<b>19,7</b>
Q <sub>dyf</sub>	J	997	1004	999	975	1017	998	13,4	37,3	3,7
<b>Q</b>	J	1178	1190	1173	1170	1174	1177	6,90	19,2	<b>1,6</b>
<b>dQ<sub>kin,max</sub></b>	J	4,60	5,02	4,23	5,01	4,40	4,65	0,32	0,89	<b>19,1</b>
dQ <sub>dyf,max</sub>	J	3,13	3,19	3,24	3,09	3,32	3,19	0,08	0,23	7,1
m <sub>paliwo</sub>	mg	27,0	27,2	26,8	26,8	26,9	26,9	0,16	0,44	1,6

Największą niepewnością pomiarową charakteryzowały się wielkości  $Q_{kin}$  oraz  $dQ_{kin,max}$  dochodząc do wartości około 20% (tabl. 5.5), co wynikało z obliczeń zawierających różniczkowanie, gdzie propagacja błędu jest szczególnie wysoka.

W celu przedstawienia powtarzalności eksperymentu spalania (rys. 5.30) wykorzystano przebieg szybkości wydzielania ciepła  $dQ$  dla pięciu prób spalania oleju napędowego w tych samych warunkach składu gazów w komorze, ciśnienia początkowego, temperatury początkowej, temperatury wtryskiwacza oraz dawki oleju napędowego.



**Rys. 5.30.** Przebieg szybkości wydzielania ciepła dla 5 prób spalania oleju napędowego przy ciśnieniu 41 bar

## 6. Wnioski

Badaniom wtrysku, zapłonu i spalania poddano olej pirolityczny wyprodukowany z twardego polietylenu (HDPE) w wyniku pirolizy w temperaturze 575-600°C, który następnie poddano destylacji w celu usunięcia węglowodorów o liczbie C powyżej 15. Podstawowym narzędziem badawczym była analiza porównawcza, do której wykorzystano dwa paliwa referencyjne: benzyna i lekki olej napędowy. Na podstawie przeprowadzonych badań można było wyciągnąć wnioski, które podzielono jak następuje:

### wnioski ogólne

- osiągnięto zamierzone cele pracy. Uzyskano wyniki, które posłużyły do oceny przydatności oleju pirolitycznego jako paliwa silnikowego;
- potwierdzono tezy pracy. Badania wykazały, że olej pirolityczny pod względem przebiegu wtrysku i jego parametrów nie odbiega znacząco od wtrysku benzyny. Stwierdzono także, że przebieg kinetycznego spalania oleju pirolitycznego przebiega szybciej w porównaniu do spalania kinetycznego oleju napędowego;

### wnioski szczegółowe

- do oceny jakości wtrysku i obliczenia średnich kropeł (SMD) rozpylanego oleju pirolitycznego można wykorzystać liczby Webera i Ohnesorge znając właściwości fizyczne wtryskiwanego paliwa takie jak: lepkość dynamiczną, napięcie powierzchniowe i gęstość oraz ciśnienie wtrysku i wymiary dysz wtryskiwacza;
- na podstawie pomiaru SMD można stwierdzić, że olej pirolityczny rozpyla się podobnie jak benzyna tworząc chmurę o średniej średnicy kropeł na poziomie 7-8  $\mu\text{m}$ . Aerodynamiczna liczba Webera  $We_a$  dla przeprowadzonych eksperymentów dla benzyny i oleju pirolitycznego znajdowała się w przedziale pomiędzy 70 a 90;
- ze względu na wyższą lepkość oleju napędowego rozpad strugi tego paliwa prowadził do utworzenia większych kropli o SMD z przedziału 12-20  $\mu\text{m}$ ;
- z histogramów rozkładu statystycznego wynika, że maksymalne rozmiary kropeł oleju pirolitycznego i benzyny są poniżej 30  $\mu\text{m}$ , natomiast dla oleju napędowego krople po wtórnym rozpadzie mają średnice poniżej wartości 40-50  $\mu\text{m}$ ;
- przebieg spalania obydwu badanych paliw składa się z fazy spalania kinetycznego i spalania dyfuzyjnego. Czas trwania fazy spalania

kinetycznego dla oleju pirolitycznego jest około 5% krótszy od fazy spalania kinetycznego dla oleju napędowego;

- przy wzroście ciśnienia początkowego w komorze czas spalania kinetycznego ulegał skróceniu, natomiast czas spalania dyfuzyjnego nieznacznie się wydłużał, praktycznie bez znaczącej zmiany;
- maksymalna szybkość spalania dla fazy spalania kinetycznego dla oleju pirolitycznego była około 20% większa od szybkości spalania kinetycznego dla oleju napędowego. Natomiast maksymalna szybkość spalania dyfuzyjnego była porównywalna dla obydwu testowanych paliw;

### **wnioski utylitarne**

- przy założeniu takiego samego ciśnienia wtrysku olej pirolityczny i benzyna charakteryzują się podobnym rozkładem statystycznym kropeł i podobną wartością SMD, co oznacza, że można wykorzystać wtryskiwacze benzynowe do wtrysku oleju pirolitycznego;
- zasięg strugi oleju pirolitycznego był większy o około 13-15% w porównaniu do zasięgu oleju napędowego. Jest to istotne w przypadku bezpośredniego wtrysku paliwa do silnika, ponieważ może prowadzić do osadzania się nieodparowanego paliwa na ściankach cylindra i w ten sposób zmniejszać sprawność indykowaną oraz powiększać emisję niespalonych węglowodorów;
- udział ciepła wydzielonego z fazy spalania kinetycznego dla oleju pirolitycznego był około 20% większy w porównaniu do oleju napędowego. Jest to istotne, ponieważ większa ilość paliwa spalana kinetycznie prowadzi do szybszego przyrostu ciśnienia w cylindrze silnika i wpływa na poprawę sprawności indykowanej obiegu termodynamicznego co jednocześnie poprawi zupełność spalania paliwa i obniży jednostkowe zużycie paliwa oraz zawartość niespalonych węglowodorów, sadzy i tlenku węgla w spalinach;
- zwłoka samozapłonu dla oleju pirolitycznego była nieznacznie dłuższa w porównaniu do zwłoki dla oleju napędowego. Wpływa to na dalszy przebieg spalania w tym na przyrost ciśnienia, jednakże w tym przypadku można uznać, że zwłoka zapłonu dla obydwu paliw ma podobną wartość i pod tym względem nie ma istotnej różnicy pomiędzy badanymi paliwami;

### **wnioski przyszłościowe**

- do zasilania silników samochodowych proponuje się stosować olej pirolityczny po destylacji z usunięciem węglowodorów powyżej C15,



natomiast do dużych silników agregatowych można podejmować próby spalania surowego oleju pirolitycznego po zbadaniu szczególnie jego lepkości i zawartości siarki;

- zaleca się badanie toksyczności spalin ze spalania oleju pirolitycznego w warunkach stacjonarnych i dynamicznych;
- zaleca się badanie trwałości oleju pirolitycznego. Olej pirolityczny jest mieszaniną wielu węglowodorów, które mogą ze sobą wchodzić w reakcje chemiczne. Na tej podstawie można przyjąć, że właściwości fizyczne i chemiczne oleju pirolitycznego mogą się zmieniać podczas jego długoterminowego magazynowania. Zmianie mogą podlegać: lepkość, napięcie powierzchniowe, temperatura zapłonu i samozapłonu a także liczba oktanowa itp.

## Streszczenie pracy doktorskiej

Rozprawa doktorska dotyczy badań nad olejem pirolitycznym wyprodukowanym z HDPE (wysokiej gęstości polietylen) pod kątem jego potencjalnego zastosowania jako paliwa silnikowego, zarówno do silnika z zapłonem iskrowym (ZI) jak również silnika z zapłonem samoczynnym (ZS).

Celem rozprawy doktorskiej jest przedstawienie metodyki badawczej oraz wyników przeprowadzonych badań w zakresie wtrysku i tworzenia mieszanki palnej oraz przebiegu spalania oleju pirolitycznego w warunkach ciśnienia i temperatury zbliżonych do tych panujących w silniku spalinowym. Podstawowym narzędziem do interpretacji wyników była analiza porównawcza na podstawie której dokonano porównania z paliwami klasycznymi: benzyną i olejem napędowym lekkim.

Praca ma charakter eksperymentalny. Rozdział I i II mają na celu przybliżenie aktualnego stanu wiedzy oraz uzasadnienie podejmowanych w pracy badań. W rozdziale I omówiono uzasadnienie podjęcia tematu oraz poruszono aspekt prawny, ekologiczny oraz ekonomiczny gospodarki odpadami o potencjale energetycznym. Kondensat pirolityczny jest cieczą powstającą podczas schładzania produktów pirolizy substancji organicznej. Wspomniana ciecz ma cechy paliwa, które można wykorzystać do maszyn cieplnych wytwarzających ciepło i/lub pracę mechaniczną (silnik spalinowy, turbina gazowa, kocioł grzewczy wodny lub wodno-parowy). Poruszono kwestię ogólnoświatowego problemu z utylizacją odpadowych tworzyw sztucznych, których nie można poddać recyklingowi. Dlatego, uzyskane pozytywne wyniki z prac badawczych nad pirolizą tworzyw sztucznych powinny przyczynić się do dalszego zintensyfikowania tych prac i opracowania technologii termicznej utylizacji śmieci typu organicznego. W rozdziale II przedstawiono stan wiedzy w obszarach objętych rozważaniami poruszonymi w pracy i dotyczącymi następujących zagadnień: mechanizm rozpadu strugi wtryskiwanego paliwa znany jako primary i secondary breakup, analiza wtrysku za pomocą parametru SMD (Sauter Mean Diameter), wykorzystanie liczników kryterialnych Weber i Ohnesorge do oceny jakości rozpylania oleju pirolitycznego przez wtryskiwacz wysokociśnieniowy oraz analiza porównawcza spalania oleju pirolitycznego z paliwami klasycznymi w silniku

tłokowym. Stwierdzono, że istnieje niedobór prac badawczych dotyczących przebiegu wtrysku oleju pirolitycznego i jego spalania. Na podstawie przedstawionych prac, wykazano, że metodyka badawcza zaproponowana w pracy jest prawidłowa i uznana za najbardziej wiarygodną w eksperymentach mających na celu ocenę przebiegu rozpylania paliwa.

Rozdział III zawiera cel i zakres pracy oraz sformułowane tezy. Podstawowym celem jest rozpoznanie przebiegu wtrysku cieczy pirolitycznej w warunkach temperatury i ciśnienia atmosferycznego oraz w warunkach podwyższonego ciśnienia i temperatury w komorze o stałej objętości. Badania te mają na celu opracowanie wytycznych w zakresie skutecznego zapłonu i rozwoju płomienia dla oleju pirolitycznego i mieszaniny z paliwami podstawowymi tj. benzyną i olejem napędowym. Sformułowano następujące tezy: Teza 1 - zjawiska rozpylania i tworzenia mieszanki palnej oleju pirolitycznego uzyskanego po destylacji surowej cieczy pochodzącej z pirolizy HDPE przebiegają podobnie do zjawisk występujących dla typowej benzyny 95 w instalacji bezpośredniego wtrysku w silniku ZI; Teza 2 - badana ciecz może być zastosowana jako zamiennik dla benzyny 95 do zasilania nowoczesnego silnika samochodowego wyposażonego w instalację wysokociśnieniowego wtrysku bezpośredniego; Teza 3 - przebieg spalania oleju pirolitycznego zachodzi szybciej, ze względu na większy udział fazy spalania kinetycznego w porównaniu do przebiegu spalania oleju napędowego.

W rozdziale IV opisano zastosowaną w pracy metodykę badawczą. Za podstawowe narzędzie do badań eksperymentalnych i interpretacji wyników przyjęto analizę porównawczą wybranych parametrów dla oleju pirolitycznego w odniesieniu do paliw referencyjnych, którymi były: benzyna 91 i olej napędowy lekki. Wielkości podlegające pomiarom a następnie poddawane porównaniu były następujące: średnia średnica kropli według Sautera (SMD), rozkład statystyczny rozpylanej cieczy, szybkość i zasięg rozprzestrzeniania się strugi wtryskiwanej cieczy, zwłoka zapłonu i główna faza spalania oraz faza spalania kinetycznego i spalania dyfuzyjnego. Następnie zaprezentowano plan badań eksperymentalnych. Na jego podstawie dokonano wyboru dwóch stanowisk badawczych, którymi były:

- komora o stałej objętości przeznaczona do eksperymentu samozapłonu i spalania wyposażona w szybką kamerę cyfrową do rejestracji obrazów chmury paliwa i płomienia,
- komora do rejestracji wypływu i rozpylania badanej cieczy za pomocą szybkiej kamery cyfrowej i laserowego układu optycznego.

Rozdział V stanowi główną część pracy. Zostały w nim przedstawione wyniki badań eksperymentalnych oraz ich analiza. Na wstępie zaprezentowano wyniki z analizy fizykochemicznej oleju pirolitycznego wytworzonego na stanowisku laboratoryjnym. Następnie omówiono wyniki rozpylania badanych cieczy z uwzględnieniem wielkości SMD oraz liczb kryterialnych Weber i Ohnesorge. Kolejne wyniki uzyskano na drodze przetwarzania obrazów z kamer oraz przebiegu ciśnienia w komorze spalania. Na podstawie analizy obrazów uzyskano szereg informacji odnośnie szybkości wypływu paliwa z dysz wtryskiwacza, zasięgu strugi rozpylanego paliwa oraz chwili samozapłonu. W oparciu o przebieg ciśnienia w komorze uzyskano wyniki przebiegu szybkości wydzielania ciepła, faz spalania oraz zwłoki zapłonu. W końcowej części tego rozdziału omówiono analizę błędów w uzyskanych wynikach.

Pracę podsumowano w rozdziale VI, który zawiera wnioski z podzieleniem ich na wnioski ogólne, szczegółowe, metodyczne, utylitarne oraz przyszłościowe. Uzyskano wyniki, które posłużyły do oceny przydatności oleju pirolitycznego jako paliwa silnikowego. Potwierdzono przydatność metodyki badawczej do tego rodzaju pracy oraz potwierdzono tezy pracy. Badania wykazały, że olej pirolityczny pod względem przebiegu wtrysku i jego parametrów nie różni się w dużym stopniu od wtrysku benzyny. Istotną i zauważalną różnicą była faza spalania kinetycznego, która dla oleju pirolitycznego przebiega szybciej w porównaniu do spalania kinetycznego oleju napędowego.

Pracę kończy wykaz literatury.

## Summary

The doctoral dissertation concerns research on pyrolysis oil made of HDPE (high density polyethylene) in terms of its potential use as engine fuel, both for spark ignition (SI) and compression ignition (CI) engines.

The aim of the doctoral dissertation is to present the research methodology and the results of the conducted research in the field of injection and formation of a combustible mixture as well as the combustion progress of pyrolysis oil under pressure and temperature conditions similar to those prevailing in an internal combustion engine. The basic tool for interpreting the results was a comparative analysis on the basis of which a comparison with classic fuels: gasoline and light diesel fuel was performed.

The research work is experimental. Chapters I and II are intended to present the current state of knowledge and justify the research undertaken in the work. Chapter I discusses the justification for taking up the topic and raises the legal, ecological, and economic aspects of waste management with energy potential. Pyrolysis oil is a liquid formed during the condensation of the pyrolysis vapor products of the organic substance. Pyrolysis oil is a liquid that has the characteristics of a fuel that can be used for thermal machines that generate heat and/or mechanical work (combustion engine, gas turbine, and water-steam boiler). Furthermore, the issue of the global problem with the disposal of waste plastics that cannot be recycled was raised. Thus, the positive results obtained from research on the pyrolysis of plastics should contribute to the further intensification of these works and the development of a technology for the thermal utilization of organic waste. Chapter II presents the state of the art in the field covered by the considerations raised in this thesis and concerning the following issues: the mechanism of the injected fuel stream breakdown known as a primary and secondary breakup, injection analysis using the SMD (Sauter Mean Diameter) parameter, the use of Weber and Ohnesorge criterion numbers to evaluate the quality of pyrolysis oil atomization by a high-pressure injector and a comparative analysis of pyrolysis oil combustion with classic fuels in a piston engine. It was found that there is a shortage of research works dealing with pyrolysis oil injection and its combustion. Based on the presented works, it was shown that the research

methodology proposed in the work is appropriate and considered the most reliable in experiments aimed at the investigation of fuel atomization.

Chapter III contains the aim and scope of the work as well as formulated theses. The main goal is to recognize the course of injection of pyrolysis liquid in conditions of temperature and atmospheric pressure and in conditions of increased pressure and temperature in a chamber of constant volume. These tests are aimed at developing guidelines for effective ignition and flame development for pyrolysis oil and mixtures with basic fuels, i.e. gasoline and diesel oil. The following theses were formulated: Thesis 1 - the phenomena of spraying and creating a combustible mixture of pyrolysis oil obtained after distillation of the raw HDPE pyrolysis liquid run similarly to the phenomena occurring for typical 95 gasoline in a direct injection in a SI engine; Thesis 2 - the tested pyrolysis oil can be used as a substitute for 95 gasoline to power a modern automotive engine equipped with a high-pressure direct injection system; Thesis 3 - the combustion progress of pyrolysis oil proceeds faster due to the higher share of the premixed combustion phase compared to this one of diesel fuel combustion.

Chapter IV describes the research methodology used in the work. The basic tool for experimental research and interpretation of results was a comparative analysis of selected parameters for pyrolysis oil in relation to reference fuels, which were: 91 gasoline and light diesel fuel. The values to be measured and then compared were as follows: Sauter's mean droplet diameter (SMD), statistical distribution of the sprayed liquid, speed and penetration of the injected liquid stream, ignition delay, and the main combustion phase, as well as the premixed and diffusion combustion phases. Then the plan of experimental research was presented. On this basis, the following two research test benches were proposed:

- constant-volume chamber for the self-ignition and combustion experiment, equipped with a high-speed video camera for recording images of the fuel cloud and flame propagation,
- a chamber for recording the flow and spraying of the tested liquid by means of a high-speed video camera and a laser optical system.

Chapter V is the main part of the work. It presents the results of experimental research and their analysis. In the beginning, the results of the

physicochemical analysis of the pyrolysis oil produced on the laboratory stand were presented. Then, the results of the atomization of the tested liquids were discussed, taking into account the SMD size and Weber and Ohnesorge criteria numbers. Next, results were obtained by processing images from cameras and the course of pressure in the combustion chamber. Based on the analysis of the images, the following information was obtained: the maximum penetration of the combustion chamber by the sprayed fuel stream and the self-ignition kernel development. Based on the combustion pressure in the chamber, the results of the heat release rate, combustion phases, and ignition delay were determined. The final part of this chapter discusses the analysis of errors in the obtained results.

The work is summarized in Chapter VI, which contains findings divided into as follows: general, detailed, methodological, utilitarian, and future conclusions. The obtained results were used to assess the suitability of pyrolysis oil as engine fuel. The usefulness of the research methodology for this type of work was confirmed and the theses of the work were confirmed too. The experiments showed that pyrolysis oil in terms of the injection process and its parameters do not differ significantly from gasoline injection. An important and noticeable difference was the phase of premixed combustion, which is faster for pyrolysis oil in comparison with the same phase of diesel fuel.

The work ends with a bibliography.

## Wykaz literatury

1. Odpady z Tworzyw Sztucznych i Recykling w UE: Fakty i Liczby | Aktualności | Parlament Europejski Available online: <https://www.europarl.europa.eu/news/pl/headlines/society/20181212S TO21610/odpady-z-tworzyw-sztucznych-i-recykling-w-ue-fakty-i-liczby> (accessed on 26 February 2023).
2. Zhang, B.; Popinet, S.; Ling, Y. Modeling and Detailed Numerical Simulation of the Primary Breakup of a Gasoline Surrogate Jet under Non-Evaporative Operating Conditions. *Int. J. Multiph. Flow* **2020**, *130*, 103362, doi:10.1016/J.IJMULTIPHASEFLOW.2020.103362.
3. Gorokhovski, M.; Herrmann, M. Modeling Primary Atomization. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.40.111406.102200> **2008**, *40*, 343–366, doi:10.1146/ANNUREV.FLUID.40.111406.102200.
4. Ganesan, S.; Matthies, G.; Tobiska, L. On Spurious Velocities in Incompressible Flow Problems with Interfaces. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* **2007**, *196*, 1193–1202, doi:10.1016/J.CMA.2006.08.018.
5. Reitz, R.D.; Bracco, F. V. Mechanism of Atomization of a Liquid Jet. *Phys. Fluids* **1998**, *25*, 1730, doi:10.1063/1.863650.
6. Aleiferis, P.G.; Serras-Pereira, J.; van Romunde, Z.; Caine, J.; Wirth, M. Mechanisms of Spray Formation and Combustion from a Multi-Hole Injector with E85 and Gasoline. *Combust. Flame* **2010**, *157*, 735–756, doi:10.1016/J.COMBUSTFLAME.2009.12.019.
7. Lin, S.P.; Reitz, R.D. Drop and Spray Formation from a Liquid Jet. *Annu. Rev. Fluid Mech.* **1998**, *30*, 85–105, doi:10.1146/ANNUREV.FLUID.30.1.85.
8. Reitz, R.D.; Bracco, F. V. Mechanism of Atomization of a Liquid Jet. *Phys. Fluids* **1998**, *25*, 1730, doi:10.1063/1.863650.
9. Agarwal, A.; Trujillo, M.F. The Effect of Nozzle Internal Flow on Spray Atomization. <https://doi.org/10.1177/1468087419875843> **2019**, *21*, 55–72, doi:10.1177/1468087419875843.
10. Rimbart, N.; Castanet, G. Crossover between Rayleigh-Taylor Instability and Turbulent Cascading Atomization Mechanism in the Bag-Breakup Regime.



11. Boffetta, G.; Mazzino, A.; Musacchio, S.; Vozella, L. Kolmogorov Scaling and Intermittency in Rayleigh-Taylor Turbulence. *Phys. Rev. E - Stat. Nonlinear, Soft Matter Phys.* **2009**, *79*, 065301, doi:10.1103/PHYSREVE.79.065301/FIGURES/5/MEDIUM.
12. Heindel, T.J. X-Ray Imaging Techniques to Quantify Spray Characteristics in the near Field. *At. Sprays* **2018**, *28*, 1029–1059, doi:10.1615/ATOMIZSPR.2019028797.
13. Duke, D.J.; Kastengren, A.L.; Matusik, K.E.; Swantek, A.B.; Powell, C.F.; Payri, R.; Vaquerizo, D.; Itani, L.; Bruneaux, G.; Grover, R.O.; et al. Internal and near Nozzle Measurements of Engine Combustion Network "Spray G" Gasoline Direct Injectors. *Exp. Therm. Fluid Sci.* **2017**, *88*, 608–621, doi:10.1016/j.expthermflusci.2017.07.015.
14. Mitroglou, N.; Nouri, J.M.; Gavaises, M.; Arcoumanis, C. Spray Characteristics of a Multi-Hole Injector for Direct-Injection Gasoline Engines. *Int. J. Engine Res.* **2006**, *7*, 255–270, doi:10.1243/146808705X62922.
15. Baumgarten, C. *Mixture Formation in Internal Combustion Engine*; Springer Berlin Heidelberg, 2006;
16. Guildenbecher, D.R.; López-Rivera, C.; Sojka, P.E. Secondary Atomization. *Exp. Fluids* **2009**, *46*, 371–402, doi:10.1007/S00348-008-0593-2/TABLES/4.
17. Ranger, A.A.; Nicnolls, J.A. Aerodynamic Shattering of Liquid Drops. *AIAAJ* **1969**, *7*, 285–290, doi:10.2514/3.5087.
18. Liu, Z.; Reitz, R.D. An Analysis of the Distortion and Breakup Mechanisms of High Speed Liquid Drops. *Int. J. Multiph. Flow* **1997**, *23*, 631–650, doi:10.1016/S0301-9322(96)00086-9.
19. Han, J.; Tryggvason, G. Secondary Breakup of Axisymmetric Liquid Drops. II. Impulsive Acceleration. *Phys. Fluids* **2001**, *13*, 1554, doi:10.1063/1.1370389.
20. Chou, W.H.; Hsiang, L.P.; Faeth, G.M. Temporal Properties of Drop Breakup in the Shear Breakup Regime. *Int. J. Multiph. Flow* **1997**, *23*, 651–669, doi:10.1016/S0301-9322(97)00006-2.
21. Joseph, D.D.; Belanger, J.; Beavers, G.S. Breakup of a Liquid Drop Suddenly Exposed to a High-Speed Airstream. *Int. J. Multiph. Flow*

- 1999**, 25, 1263–1303, doi:10.1016/S0301-9322(99)00043-9.
22. Pilch, M.; Erdman, C.A. Use of Breakup Time Data and Velocity History Data to Predict the Maximum Size of Stable Fragments for Acceleration-Induced Breakup of a Liquid Drop. *Int. J. Multiph. Flow* **1987**, 13, 741–757, doi:10.1016/0301-9322(87)90063-2.
  23. Han, J.; Tryggvason, G. Secondary Breakup of Axisymmetric Liquid Drops. II. Impulsive Acceleration. *Phys. Fluids* **2001**, 13, 1554, doi:10.1063/1.1370389.
  24. Gelfand, B.E. Droplet Breakup Phenomena in Flows with Velocity Lag. *Prog. Energy Combust. Sci.* **1996**, 22, 201–265, doi:10.1016/S0360-1285(96)00005-6.
  25. Lee, C.H.; Reitz, R.D. An Experimental Study of the Effect of Gas Density on the Distortion and Breakup Mechanism of Drops in High Speed Gas Stream. *Int. J. Multiph. Flow* **2000**, 26, 229–244, doi:10.1016/S0301-9322(99)00020-8.
  26. O'Rourke, P.J.; Amsden, A.A. The Tab Method for Numerical Calculation of Spray Droplet Breakup. *SAE Tech. Pap.* **1987**, doi:10.4271/872089.
  27. Reitz, R.D.; Diwakar, R. Structure of High-Pressure Fuel Sprays. *SAE Tech. Pap.* **1987**, doi:10.4271/870598.
  28. He, X.; Shi, Y.H.; Liu, H.; Li, X.R.; Tian, G.H.; Liu, F.S. Spray Characteristics SMD of High-Pressure Common Rail Diesel Engine Based on LSD Technique. *Beijing Ligong Daxue Xuebao/Transaction Beijing Inst. Technol.* **2016**, 36, 1243–1247, doi:10.15918/J.TBIT1001-0645.2016.12.007.
  29. Chen, L.; Liu, Z.; Sun, P.; Huo, W. Formulation of a Fuel Spray SMD Model at Atmospheric Pressure Using Design of Experiments (DoE). *Fuel* **2015**, 153, 355–360, doi:10.1016/J.FUEL.2015.03.013.
  30. Hiroyasu Hiroyuki; Matasaka, A.; Tabata, M. Empirical Equations for the Sauter Mean Diameter of a Diesel Spray. *SAE Trans.* **1989**, 98, 868–877.
  31. K. S. Varde; Popa, D.M.; Varde, L.K. Spray Angle and Atomization in Diesel Sprays. *SAE Trans.* **1989**, 93, 779–787.
  32. Naber, J.D.; Siebers, D. Effects of Gas Density and Vaporization on

- Penetration and Dispersion of Diesel Sprays. *SAE Trans.* **1996**, *105*, 82–111.
33. Reitz, R.D.; Bracco, F.B. On the Dependence of Spray Angle and Other Spray Parameters on Nozzle Design and Operating Conditions. *SAE Tech. Pap.* **1979**, doi:10.4271/790494.
  34. Lefebvre, A.H.; McDonell, V.G. Atomization and Sprays. *At. Sprays* **2017**, 1–284, doi:10.1201/9781315120911/ATOMIZATION-SPRAYS-ARTHUR-LEFEBVRE-VINCENT-MCDONELL.
  35. Kapusta, Ł.J. Understanding the Collapse of Flash-Boiling Sprays Formed by Multi-Hole Injectors Operating at Low Injection Pressures. *Energy* **2022**, *247*, 123388, doi:10.1016/J.ENERGY.2022.123388.
  36. Kapusta, Ł.J.; Bachanek, J.; Jiang, C.; Piaszyk, J.; Xu, H.; Wszyński, M.L. Liquid Propane Injection in Flash-Boiling Conditions. *Energies* **2021**, *Vol. 14*, Page 6257 **2021**, *14*, 6257, doi:10.3390/EN14196257.
  37. Nukiyama, S.; Tanasawa, Y. Experiments on the Atomization of Liquids in an Air Stream : Reports 1 to 6 | WorldCat.Org. *Trans. Japan Soc. Mech. Eng.* **1939**, *5*, 68–75.
  38. King, M.C.; Bachalo, W.D.; Bell, D.; King-Steen, L.E. Weber Number Tests in the NASA Icing Research Tunnel.
  39. Chen, Y.; DeMauro, E.P.; Wagner, J.L.; Arienti, M.; Guildenbecher, D.R.; Farias, P.A.; Grasser, T.W.; Sanderson, P.D.; Albert, S.W.; Turpin, A.M.; et al. Aerodynamic Breakup and Secondary Drop Formation for a Liquid Metal Column in a Shock-Induced Cross-Flow. *AIAA SciTech Forum - 55th AIAA Aerosp. Sci. Meet.* **2017**, doi:10.2514/6.2017-1892.
  40. Wierzba, A. Deformation and Breakup of Liquid Drops in a Gas Stream at Nearly Critical Weber Numbers. *Exp. Fluids* **1990**, *9*, 59–64, doi:10.1007/BF00575336/METRICS.
  41. Faeth, G.M.; Hsiang, L.P.; Wu, P.K. Structure and Breakup Properties of Sprays. *Int. J. Multiph. Flow* **1995**, *21*, 99–127, doi:10.1016/0301-9322(95)00059-7.
  42. Reitz, R.D. *Atomization and Other Breakup Regimes of a Liquid Jet*; PhD Thesis.; Princeton University, 1978;

43. Marek, M. The Double-Mass Model of Drop Deformation and Secondary Breakup. *Appl. Math. Model.* **2013**, *37*, 7919–7939, doi:10.1016/J.APM.2013.03.025.
44. Costa, G.A.; Santos, R.G. dos Fractionation of Tire Pyrolysis Oil into a Light Fuel Fraction by Steam Distillation. *Fuel* **2019**, *241*, 558–563, doi:10.1016/j.fuel.2018.12.075.
45. Kumar Mishra, R.; Mohanty, K. Co-Pyrolysis of Waste Biomass and Waste Plastics (Polystyrene and Waste Nitrile Gloves) into Renewable Fuel and Value-Added Chemicals. *Carbon Resour. Convers.* **2020**, *3*, 145–155, doi:10.1016/j.crcon.2020.11.001.
46. Banar, M.; Akyildiz, V.; Özkan, A.; Çokaygil, Z.; Onay, Ö. Characterization of Pyrolytic Oil Obtained from Pyrolysis of TDF (Tire Derived Fuel). *Energy Convers. Manag.* **2012**, *62*, 22–30, doi:10.1016/J.ENCONMAN.2012.03.019.
47. Hürdoğan, E.; Ozalp, C.; Kara, O.; Ozcanli, M. Experimental Investigation on Performance and Emission Characteristics of Waste Tire Pyrolysis Oil–Diesel Blends in a Diesel Engine. *Int. J. Hydrogen Energy* **2017**, *42*, 23373–23378, doi:10.1016/j.ijhydene.2016.12.126.
48. Umeki, E.R.; de Oliveira, C.F.; Torres, R.B.; Santos, R.G. dos Physico-Chemistry Properties of Fuel Blends Composed of Diesel and Tire Pyrolysis Oil. *Fuel* **2016**, *185*, 236–242, doi:10.1016/j.fuel.2016.07.092.
49. Tudu, K.; Murugan, S.; Patel, S.K. Effect of Tyre Derived Oil-Diesel Blend on the Combustion and Emissions Characteristics in a Compression Ignition Engine with Internal Jet Piston Geometry. *Fuel* **2016**, *184*, 89–99, doi:10.1016/j.fuel.2016.06.065.
50. Koc, A.B.; Abdullah, M. Performance of a 4-Cylinder Diesel Engine Running on Tire Oil–Biodiesel–Diesel Blend. *Fuel Process. Technol.* **2014**, *118*, 264–269, doi:10.1016/j.fuproc.2013.09.013.
51. Vihar, R.; Seljak, T.; Rodman Oprešnik, S.; Katrašnik, T. Combustion Characteristics of Tire Pyrolysis Oil in Turbo Charged Compression Ignition Engine. *Fuel* **2015**, *150*, 226–235, doi:10.1016/J.FUEL.2015.01.087.
52. Žvar Baškovič, U.; Vihar, R.; Seljak, T.; Katrašnik, T. Feasibility

- Analysis of 100% Tire Pyrolysis Oil in a Common Rail Diesel Engine. *Energy* **2017**, *137*, 980–990, doi:10.1016/j.energy.2017.01.156.
53. Kalargaris, I.; Tian, G.; Gu, S. Experimental Evaluation of a Diesel Engine Fuelled by Pyrolysis Oils Produced from Low-Density Polyethylene and Ethylene–Vinyl Acetate Plastics. *Fuel Process. Technol.* **2017**, *161*, 125–131, doi:10.1016/J.FUPROC.2017.03.014.
54. Van De Beld, B.; Holle, E.; Florijn, J. The Use of Pyrolysis Oil and Pyrolysis Oil Derived Fuels in Diesel Engines for CHP Applications. *Appl. Energy* **2013**, *102*, 190–197, doi:10.1016/j.apenergy.2012.05.047.
55. Simsek, S.; Uslu, S.; Coştu, R. A Novel Approach to Study the Effect of Motor Silk-Added Pyrolysis Tire Oil on Performance and Emission Characteristics of a Diesel Engine. *Fuel* **2021**, *288*, 119668, doi:10.1016/J.FUEL.2020.119668.
56. Devaraj, J.; Robinson, Y.; Ganapathi, P. Experimental Investigation of Performance, Emission and Combustion Characteristics of Waste Plastic Pyrolysis Oil Blended with Diethyl Ether Used as Fuel for Diesel Engine. *Energy* **2015**, *85*, 304–309, doi:10.1016/J.ENERGY.2015.03.075.
57. Damodharan, D.; Sathiyagnanam, A.P.; Rana, D.; Kumar, B.R.; Saravanan, S. Combined Influence of Injection Timing and EGR on Combustion, Performance and Emissions of DI Diesel Engine Fueled with Neat Waste Plastic Oil. *Energy Convers. Manag.* **2018**, *161*, 294–305, doi:10.1016/j.enconman.2018.01.045.
58. Martínez, J.D.; Rodríguez-Fernández, J.; Sánchez-Valdepeñas, J.; Murillo, R.; García, T. Performance and Emissions of an Automotive Diesel Engine Using a Tire Pyrolysis Liquid Blend. *Fuel* **2014**, *115*, 490–499, doi:10.1016/J.FUEL.2013.07.051.
59. Sharma, A.; Murugan, S. Potential for Using a Tyre Pyrolysis Oil-Biodiesel Blend in a Diesel Engine at Different Compression Ratios. *Energy Convers. Manag.* **2015**, *93*, 289–297, doi:10.1016/J.ENCONMAN.2015.01.023.
60. Vihar, R.; Žvar Baškovič, U.; Seljak, T.; Katrašnik, T. Combustion and Emission Formation Phenomena of Tire Pyrolysis Oil in a Common Rail Diesel Engine. *Energy Convers. Manag.* **2017**, *149*, 706–721, doi:10.1016/J.ENCONMAN.2017.02.005.

61. Murugan, S.; Ramaswamy, M.C.; Nagarajan, G. Assessment of Pyrolysis Oil as an Energy Source for Diesel Engines. *Fuel Process. Technol.* **2009**, *90*, 67–74, doi:10.1016/J.FUPROC.2008.07.017.
62. Murugan, S.; Ramaswamy, M.C.; Nagarajan, G. Performance, Emission and Combustion Studies of a DI Diesel Engine Using Distilled Tyre Pyrolysis Oil-Diesel Blends. *Fuel Process. Technol.* **2008**, *89*, 152–159, doi:10.1016/J.FUPROC.2007.08.005.
63. Karagoz, M.; Uysal, C.; Agbulut, U.; Saridemir, S. Energy, Exergy, Economic and Sustainability Assessments of a Compression Ignition Diesel Engine Fueled with Tire Pyrolytic Oil–diesel Blends. *J. Clean. Prod.* **2020**, *264*, 121724, doi:10.1016/j.jclepro.2020.121724.
64. Vijaya Kumar, K.; Puli, R.K. Effects of Waste Plastic Oil Blends on a Multi Cylinder Spark Ignition Engine. *MATEC Web Conf.* **2017**, *108*, 08005, doi:10.1051/matecconf/201710808005.
65. Karagöz, M. Investigation of Performance and Emission Characteristics of an CI Engine Fuelled with Diesel – Waste Tire Oil – Butanol Blends. *Fuel* **2020**, *282*, 118872, doi:10.1016/J.FUEL.2020.118872.
66. Karagöz, M.; Ağbulut, Ü.; Saridemir, S. Waste to Energy: Production of Waste Tire Pyrolysis Oil and Comprehensive Analysis of Its Usability in Diesel Engines. *Fuel* **2020**, *275*, 117844, doi:10.1016/J.FUEL.2020.117844.
67. Szwaja, M.; Chwist, M.; Szwaja, S.; Juknelevičius, R. Impact of Pyrolysis Oil Addition to Ethanol on Combustion in the Internal Combustion Spark Ignition Engine. *Clean Technol.* **2021**, *3*, 450–461, doi:10.3390/cleantechnol3020026.
68. Sunaryo; Efendy, M.; Sarjito; Kamarrudin, N.S. Pyrolysis of Plastic Waste as an Alternative Fuels in Spark Ignition Engine. *Int. J. Emerg. Trends Eng. Res.* **2019**, *7*, doi:10.30534/ijeter/2019/097112019.
69. Kareddula, V.K.; Puli, R.K. Influence of Plastic Oil with Ethanol Gasoline Blending on Multi Cylinder Spark Ignition Engine. *Alexandria Eng. J.* **2018**, *57*, 2585–2589, doi:10.1016/j.aej.2017.07.015.
70. Gschwend, D.; Müller, S.; Wokaun, A.; Vogel, F. Optimum Fuel for Spark Ignition Engines from Lignin Pyrolysis Oil. *Energy & Fuels* **2018**, *32*, 9388–9398, doi:10.1021/acs.energyfuels.7b03472.

71. Chwist, M.; Pyrc, M.; Gruca, M.; Szwaja, M. By-Products from Thermal Processing of Rubber Waste as Fuel for the Internal Combustion Piston Engine. *Combust. Engines* **2020**, *181*, 11–18, doi:<https://doi.org/10.19206/CE-2020-202>.
72. Chwist, M.; Szwaja, S.; Grab-Rogalinski, K.; Pyrc, M. Bio-Oil Blended Butanol as a Fuel to the Spark Ignition Internal Combustion Reciprocating Engine. *Combust. Engines* **2017**, *169*, 93–96, doi:[10.19206/CE-2017-216](https://doi.org/10.19206/CE-2017-216).
73. Szwaja, S.; Grab-Rogalinski, K.; Chwist, M. Pyrolysis Oil Combustion in the CI Engine. *Combust. Engines* **2019**, *179*, 126–131, doi:<https://doi.org/10.19206/CE-2019-420>.
74. Sunaryo; Efendy, M.; Sarjito; Kamarrudin Pyrolysis of Plastic Waste as an Alternative Fuels in Spark Ignition Engine. *Int. J. Emerg. Trends Eng. Res.* **2019**, *7*, doi:[10.30534/ijeter/2019/097112019](https://doi.org/10.30534/ijeter/2019/097112019).