P O L I T E C H N I K A P O Z N A Ń S K A

WYDZIAŁ MASZYN ROBOCZYCH I TRANSPORTU

PRACA DOKTORSKA

mgr inż. Paweł Daszkiewicz

BADANIA MOŻLIWOŚCI POPRAWY WSKAŹNIKÓW EKOLOGICZNYCH SILNIKÓW O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM ZASILANYCH PALIWAMI KONWENCJONALNYMI Z DOMIESZKĄ WODORU

Promotor:

prof. dr hab. inż. Marek Idzior

Praca naukowa współfinansowana w ramach projektu pt. "Wsparcie stypendialne dla doktorantów na kierunkach uznanych za strategiczne z punktu widzenia rozwoju Wielkopolski" Poddziałanie 8.2.2 PO KL

Poznań 2014

Spis treści

Streszczenie **4**

Abstract **6**

Wykaz skrótów, symboli i oznaczeń **8**

1. Wstęp **11**

2. Przegląd literatury nt. silników zasilanych dwupaliwowo **17**
2.1. Poprawa wskaźników ekologicznych silników 17
2.2. Sposoby zasilania silników dwupaliwowych 20
2.3. Współspalanie wodoru w silnikach spalinowych 23

3. Przegląd zagadnień związanych ze spalaniem **27**
3.1. Eksploracja procesu spalania paliwa 27
3.2. Formowanie związków toksycznych 36

4. Właściwości wodoru w porównaniu z olejem napędowym **47**
4.1. Technologie wytwarzania wodoru 47
4.2. Właściwości fizyczne i chemiczne wodoru 50
4.3. Właściwości wodoru jako paliwa 53

5. Problem badawczy **59**
5.1. Cel i teza pracy 59
5.2. Sposób rozwiązania zadania badawczego 61
5.3. Właściwości wodoru jako paliwa 53

6. Metodyka badań **63**
6.1. Obiekt badań 63
6.2. Aparatura do pomiarów zużycia paliwa i emisji stężeń substancji szkodliwych w spalinach 71
6.3. Koncepcja realizacji badań 77
6.4. Niepewność pomiarowa 79

7. Badania silnika AVL 5804 zasilanego olejem napędowym z dodatkiem wodoru **79**
7.1. Badania silnika zasilanego olejem napędowym 79
7.2. Metodyka doboru kątów początku wtrysku inicjującej zapłon dawki ON przy zasilaniu dwupaliwowym z dodatkiem wodoru 80
7.3. Charakterystyki obciążeniowe stężeń składników toksycznych spalin (CO, HC, NO_x i CO_2 i PM) = f(M_o) 81
7.4. Analiza przebiegu procesu spalania w silniku o ZS zasilanym olejem napędowym z dodatkiem wodoru 84

8. Badania silnika AVL 5804 zasilanego olejem napędowym z dodatkiem wodoru i LPG 86
8.1. Metodyka doboru kątów początku wtrysku inicjującej zapłon dawki ON przy zasilaniu dwupaliwowym z dodatkiem wodoru i LPG 86
8.2. Charakterystyki obciążeniowe stężeń składników toksycznych spalin (CO, HC, NO_x i CO_2 i PM) = f(M_o) 87
8.3. Analiza przebiegu procesu spalania w silniku o ZS zasilanym olejem napędowym z dodatkiem wodoru i LPG 91

9. Badania silnika AVL 5804 zasilanego olejem napędowym z dodatkiem wodoru i C_2H_2 93
9.1. Metodyka doboru kątów początku wtrysku inicjującej zapłon dawki ON przy zasilaniu dwupaliwowym z dodatkiem wodoru i Etynu 93
9.2. Charakterystyki obciążeniowe stężeń składników toksycznych spalin (CO, HC, NO_x i CO_2 i PM) = f(M_o) 94
9.3. Analiza przebiegu procesu spalania w silniku o ZS zasilanym olejem napędowym z dodatkiem wodoru i LPG 99

10. Zakończenie 100
9.1. Wnioski końcowe 100
9.2. Kierunki dalszych prac 101

Literatura 102

Streszczenie

Przedmiotem niniejszej dysertacji jest analiza możliwości poprawy wskaźników ekologicznych silników zasilanych dwupaliwowo o zapłonie samoczynnym (olejem napędowym z dodatkiem wodoru). Środkiem pozwalającym na zgłębienie zagadnienia była szczegółowa analiza współspalania gazów palnych i oleju napędowego. Zasilanie dwupaliwowe polegało na dostarczeniu paliwa alternatywnego do kanału dolotowego i wykorzystaniu samozapłonu dawki oleju napędowego każdorazowo określonej dla danego obciążenia i prędkości obrotowej jako źródło zapłonu mieszanki paliwo alternatywne-powietrze.

Wprowadzenie w problematykę rozprawy zrealizowano na podstawie studium literaturowego. Przybliżono zagadnienia dotyczące właściwości wodoru, pozwalające na spalanie tego gazu w silnikach o zapłonie samoczynnym scharakteryzowano ich zalety i wady oraz właściwości fizykochemiczne. W kolejnym kroku przedstawiono podstawy teoretyczne procesów i spalania paliw (w tym metody dostarczania do komory spalania paliwa gazowego). Skupiono się przy tym na analizie wpływu różnych sposobów dostarczenia paliwa na parametry paliw oraz scharakteryzowano ich proces spalania. Przedstawiono ponadto mechanizmy powstawania związków toksycznych spalin.

Rozpoznanie literaturowe pozwoliło na sformułowanie celu oraz tez pracy. Uznano, że przyrost energii mający miejsce podczas spalania wodoru w silnikach o zapłonie iskrowym przyczyni się do wzrostu energii spalania oleju napędowego, a odpowiedni dobór kąta początku wtrysku zwiększy wartość ciśnienia w komorze spalania i temperaturę, co w istotny sposób wpłynie na poprawę wskaźników emisyjnych.

Badania przeprowadzono na jednocylindrowym, stacjonarnym silniku o zapłonie samoczynnym wyposażonym w układ zasilania typu Common Rail, którym dostarczano dawkę oleju napędowego inicjującą zapłon przy zasilaniu standardowym. Paliwo alternatywne (wodór, gaz propan-butan i eten) dostarczane było do kolektora dolotowego. Sporządzono charakterystyki obciążeniowe obejmujące te same parametry pracy jednostki przy zasilaniu standardowo olejem napędowym oraz dwupaliwowo, olejem napędowym i paliwami alternatywnymi.

Weryfikację przyjętych tez zrealizowano w czterech etapach badań. Pierwszym z nich były badania wstępne przeprowadzone na stanowisku silnikowym, zasilanym olejem napędowym. Kolejne fazy badawcze rozszerzane były o: współspalanie oleju napędowego z wodorem; współspalanie oleju napędowego z wodorem i gazem propan-butan oraz współspalanie oleju napędowego z wodorem i etenem. Wyniki pomiarów stężeń związków szkodliwych emitowanych przez rozpatrywane paliwa, pozwoliły na szersze zarysowanie problemów emisyjnych dotyczących użycia dodatku wodoru do paliwa konwencjonalnego.

W pracy opisano algorytm doboru parametrów wtrysku inicjujący zapłon dawek oleju napędowego, które umożliwiły osiąganie większych udziałów paliw

alternatywnych w całkowitym paliwie dostarczonym do cylindra przy spełnieniu zdefiniowanych kryteriów.

Przedstawiono również analizę parametrów procesu spalania obliczonych na podstawie zmierzonych ciśnień w komorze spalania, wykazując wpływ zasilania dwupaliwowego.

Przedstawione w pracy rezultaty badań zaprzeczyły możliwość skutecznej poprawy wskaźników emisyjnych powstałych przy zasilaniu wodorem silnika o zapłonie samoczynnym, wskazano jakie są zależności pomiędzy rozpatrywanymi wielkościami.

Podsumowanie pracy stanowią wnioski dotyczące wyników badań. Z uwagi na niewyczerpanie podjętego zagadnienia przedstawiono ponadto kierunki dalszych prac.

Summary

Testing the possibility of improving ecological of indicators CI engines fuel powered conventional with an admixture of hydrogen

The subject of this dissertation is to analyze ways to improve the ecological engines powered dual-fuel compression-ignition (diesel oil with the addition of hydrogen). A means to explore issues was a detailed analysis of co-incineration of combustible gases and diesel. Dual fuel supply was to provide an alternative fuel into the intake manifold and the use of auto-ignition diesel dose of each specified for a given load and speed as a source of alternative fuel mixture ignition-air.

Introduction to the problems of the hearing was conducted on the basis of the study of literature . The chapter issues concerning the properties of hydrogen , allowing the burning of this gas in diesel engines characterized their advantages and disadvantages and physicochemical properties. The next step shows the theoretical and fuel combustion processes (including methods for delivering fuel to the combustion chamber of the gas). Focus here is on the analysis of the impact of different ways to provide fuel for the fuel properties and combustion characterized them. Further illustrates the mechanisms of toxic fumes .

Diagnosis of literature allowed to formulate and also to work. It was considered that the increase in energy that takes place during the combustion of hydrogen in engines spark-ignition will increase the energy consumption of diesel fuel , and the appropriate choice of the angle of injection will increase the pressure in the combustion chamber and the temperature, which significantly affect the improvement of the emission.

Research was conducted on single, stationary diesel engine equipped with a system Common Rail, which delivered a dose of initiating ignition of diesel fuel at power standard. Alternative fuel (hydrogen, propane-butane and ethene) was supplied to the intake manifold. Done load characteristics including the same parameters of the unit when powered by a standard diesel and dual-fuel, diesel and alternative fuels.

The verification shall be adopted also been implemented in four stages of research. The first of these preliminary studies were carried out on an engine, fueled with diesel oil. The next phase of the research were extended: co-combustion of diesel fuel with hydrogen; co hydrogen gas oil and liquefied petroleum gas and diesel co hydrogen and ethene. The results of measurements of concentrations of harmful compounds emitted by the fuel considered, allowed a wider scratch emission problems related to the use of hydrogen addition to conventional fuel.

This paper describes an algorithm for selection of dose injection initiating ignition of diesel fuel, which made it possible to achieve a greater share of alternative fuels in the total fuel supplied to the cylinder at meeting the defined criteria.

An analysis of the combustion process parameters calculated on the basis of the measured pressure in the combustion chamber, showing the impact of the dual fuel value.

The results of the research work effectively denied the opportunity to improve the emission rates resulting from the hydrogen-powered engine ignition indicated what are the relationships between the quantities under consideration.

Summary of work are proposals for research results. Due to the non-exhaustion issues taken further illustrates the directions of further work.

Wykaz skrótów, symboli i oznaczeń

^{o}C	temperatura w stopniach Celsjusza [^{o}C]
ACEA	*European Automobile Manufacturers' Association* – europejskie stowarzyszenie producentów pojazdów
C	węgiel
CARB	*California Air Resources Board* – kalifornijski Urząd Ochrony Środowiska
CH_3OH	metanol
CH_4	metan
C_2H_2	acetylen
CNG	*Compressed Natural Gas* – sprężony gaz ziemny
CO	tlenek węgla
CO_2	dwutlenek węgla
$DeNO_x$	zaawansowany reaktor katalityczny wiążący i redukujący tlenki azotu
DOC	*Diesel Oxidation Catalyst* – utleniający reaktor katalityczny dla silnika ZS
dP/dφ	szybkość narastania ciśnienia [MPa/^{o}OWK]
dQ/dφ	szybkość wywiązywania ciepła [J/^{o}OWK]
DPF	*Diesel Particulate Filter* – filtr cząstek stałych
DR	*Dilution Ratio* – stopień rozcieńczenia spalin
ECU	*Electronic Control Unit* – elektroniczna jednostka sterująca pracą silnika spalinowego
EEV	*Enhanced Environmentally-friendly Vehicle* – pojazd przyjazny środowisku
EGR	*Exhaust Gas Recirculation* – system recyrkulacji gazów spalinowych
EOBD	*European On-Board Diagnostics* – europejski odpowiednik amerykańskiego systemu diagnostyki pokładowej pojazdu OBD
EPA	*Environmental Protection Agency* – urząd ochrony środowiska, działający na terenie Stanów Zjednoczonych
ESC	*European Stationary Cycle* – homologacyjny europejski test statyczny wykonywany na hamowni silnikowej (dla pojazdów ciężkich)
ETC	*European Transient Cycle* – homologacyjny europejski test dynamiczny wykonywany na hamowni silnikowej (dla pojazdów ciężkich)
FAME	*Fatty Acid Methyl Esters* – estry metylowe kwasów tłuszczowych olejów roślinnych
FID	*Flame Ionization Detector* – analizator płomieniowo-jonizacyjny
GHG	*Greenhouse Gases* – gazy cieplarniane
H_2	cząsteczka wodoru
ΔH	ciepło reakcji procesu chemicznego (zmiana entalpii całkowitej paliwa) [J/mol]
HC	węglowodór
HCCI	*Homogeneous Charge Compression Ignition* – silnik z systemem spalania mieszanki jednorodnej
H_2O	woda
HDD	*Heavy Duty Diesel* – silnik ZS o dużej objętości skokowej
HDV	*Heavy Duty Vehicle* – pojazd ciężki

k	liczba stopni swobody, równa liczbie pomiarów *n* pomniejszonej o 1
L	ilość powietrza doprowadzona do spalenia jednostki masy paliwa [kg]
L_{C2H2}	zapotrzebowanie powietrza do spalenia 1 kg H_2 [kg_{pow}/kg_{pal}]
L_{H2}	zapotrzebowanie powietrza do spalenia 1 kg H_2 [kg_{pow}/kg_{pal}]
L_{LPG}	zapotrzebowanie powietrza do spalenia 1 kg LPG [kg_{pow}/kg_{pal}]
L_{ON}	zapotrzebowanie powietrza do spalenia 1 kg ON [kg_{pow}/kg_{pal}]
LDV	*Light Duty Vehicle* – lekki pojazd użytkowy
LOB	liczba oktanowa badawcza
LOM	liczba oktanowa motorowa
LPG	*Liquefied Petroleum Gas* – skroplone paliwo gazowe; propan – *butan*
m	masa [kg]
MPI	*Multi Point Injection* – system wtrysku wielopunktowego
n	liczba wykonanych pomiarów
N	liczba cykli spalania
NaOH	wodorotlenek sodu
NDIR	*Non-Dispersive InfraRed* – analizator niedyspersyjny na podczerwień
NDUV	*Non-Dispersive UltraViolet* – analizator niedyspersyjny na promieniowanie ultrafioletowe
Ne	moc użyteczna [kW]
NEDC	*New European Driving Cycle* – homologacyjny europejski test jezdny wykonywany na hamowni podwoziowej
NO	tlenek azotu
NO_2	dwutlenek azotu
NO_x	tlenki azotu
O_2	cząsteczka tlenu
OBD	*On-Board Diagnostics* – amerykański system diagnostyki pokładowej pojazdu
OWK	obroty wału korbowego, kąt obrotu wału korbowego [^{o}]
PAC	*Polycyclic Aromatic Compounds* – ciężkie węglowodory aromatyczne
PAH	*Polycyclic Aromatic Hydrocarbons* – wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne
PASS	*Photo Acoustic Soot Sensor* – czujnik fotoakustyczny do określania stężenia cząstek stałych w spalinach
PC	*Passenger Car* – samochód osobowy
PDE	*Pumpe Düse Einheit* – pompowtryskiwacz
PEMS	*Portable Emissions Measurement System* – aparatura mobilna do badań toksyczności spalin
PM	*Particulate Matter* – cząstki stałe
PN	*Particulate Numer* – liczba cząstek stałych
ppm	jednostka stężenia danego związku w mieszaninie gazów lub roztworów [–]
Q_{max}	całkowita ilość ciepła wydzielona w procesie spalania w jednym cyklu pracy [J]
R	indywidualna stała gazowa [J/kg/K]
SAE	*Society of Automotive Engineers* – Stowarzyszenie Inżynierów Motoryzacji
SCR	*Selective Catalytic Reduction* – system selektywnej redukcji katalitycznej

SMF	*Sintered Metal Filter* – filtr cząstek stałych, wykonany ze spieków metali
t	czas [sec]
T	temperatura [K/^{o}C]
TWC	*Three Way Catalyst* – trójfunkcyjny reaktor katalityczny dla silnika ZI
V_{ss}	objętość skokowa cylindra [dm^3]
U	energia wewnętrzna [J/kg]
VCR	*Variable Compression Ratio* – zmienny stopień sprężania silnika spalinowego
VGT	*Variable Geometry Turbocharger* – turbosprężarka o zmiennej geometrii łopatek
V/V	procentowe stężenie objętościowe [%]
VVT	*Variable Valve Timing* – system zmiennych faz rozrządu
VVTL	*Variable Valve Timing and Lift* – system zmiennych faz rozrządu
W_{u_C2H2}	wartość opałowa C_2H_2 [kJ/kg]
W_{u_H2}	wartość opałowa H_2 [kJ/kg]
W_{u_LPG}	wartość opałowa LPG [kJ/kg]
W_{u_ON}	wartość opałowa dla oleju napędowego [kJ/kg]
ZI	silnik spalinowy o zapłonie iskrowym
ZS	silnik spalinowy o zapłonie samoczynnym
φ	kąt początku wtrysku dawki ON [^{o}OWK]
θ	stosunek wartości stechiometrycznej powietrze/paliwo do wartości optymalnej [–]
λ	współczynnik nadmiaru powietrza [–]
γ	wykładnik politropy

1. Wstęp

Pojazdy samochodowe napędzane silnikiem spalinowym od ponad stu lat towarzyszą człowiekowi, są jednym z wyróżników rozwoju cywilizacji dającym możliwość przemieszczania się ludzi i towarów. W obecnych czasach stały się one podstawowym środkiem transportu i komunikacji, bez którego w dzisiejszym świecie trudno wyobrazić sobie egzystencję nawet najbardziej prymitywnych społeczeństw.

Przemysł samochodowy podlega obecnie modyfikacjom związanym z zagadnieniami, takimi jak: skażenie środowiska naturalnego, efekt cieplarniany, emisja związków toksycznych i uciążliwość, jakie powodują pojazdy samochodowe. Konstruktorzy, w celu zadowolenia i nakłonienia klienta do kupna samochodu, muszą zaspokajać nie tylko jego podstawowe wymagania, ale także proponować nowoczesne systemy, układy i rozwiązania stosowane aktualnie w samochodach. Nie wystarczy zaoferować klientowi samochód o innowacyjnej sylwetce, wygodnym wnętrzu, niezawodnego i o atrakcyjnych parametrach technicznych [53]. Z punktu widzenia nabywcy coraz bardziej istotne jest by pojazd był przyjazny środowisku, zużywał jak najmniejsze ilości paliwa oraz jego eksploatacja i użytkowanie były na jak najniższym poziomie.

Silnik spalinowy był, jest i będzie według prognoz na lata 2020-2050 podstawowym źródłem napędu pojazdów samochodowych. Badania wskazują, że to właśnie silnik spalinowy jest elementem pojazdu, który podczas ostatnich lat uległ największemu rozwojowi, dokonano w nim najwięcej zmian, zarówno konstrukcyjnych, jak i systemowych, uważany potencjalnie za element pojazdu, który wywołuje najbardziej niekorzystny wpływ na środowisko naturalne [101].

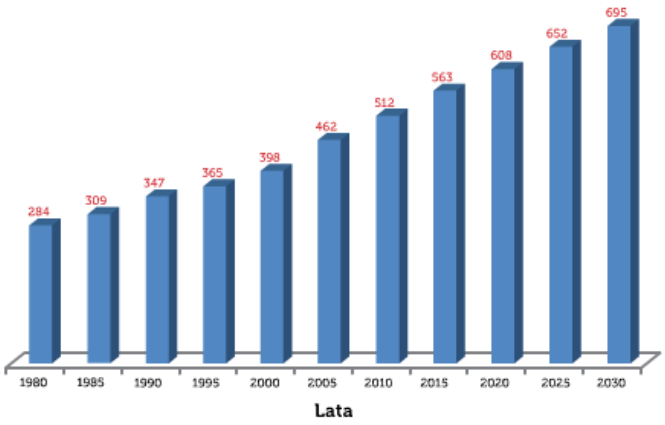
Aktualnie uważa się, że silnik spalinowy jest najważniejszym podzespołem pojazdu, którego rozwój ma minimalizować uciążliwość dla środowiska naturalnego, czyli ma charakteryzować się jak najmniejszą emisją substancji toksycznych i hałasu oraz małym zużyciem paliwa (emisją CO_2). Rosnące wymagania w zakresie właściwości ekologicznych silników są piętnowane zarówno przez urzędy ochrony środowiska w postaci bardziej rygorystycznych norm emisji związków szkodliwych pochodzących ze spalin, jak również przez samych użytkowników, co wskazuje na dobrowolny wzrost świadomości ekologicznej społeczeństw. Najważniejszymi obiektywnymi kryteriami oceny urządzeń technicznych przez społeczeństwo i jego poszczególnych członków są [66, 101]: globalna ocena urządzeń technicznych, właściwości urządzeń technicznych w procesach wytwarzania i eksploatacji oraz skutki zagospodarowania urządzeń technicznych wycofywanych z eksploatacji.

Z drugiej strony ważnym aspektem są ograniczone zasoby paliw kopalnianych, które znajdują się tylko w wybranych regionach świata, co dodatkowo prowadzi do konfliktów regionalnych i wojen. Rosnący popyt i ograniczona podaż powodują, że ceny paliw kopalnych rosną i w najbliższej przyszłości będą rosnąć, a wszystko to wskazuje tendencję, że czasy taniej ropy naftowej dawno się zakończyły. W celu utrzymania obecnego poziomu życia i dalszego rozwijania się państw paliwa kopalne są niezbędne. Jednakże powstające przy tym produkty negatywne powodują ogrzewanie

atmosfery ziemskiej, zanieczyszczenia powietrza, wody oraz gruntu, co powoduje w konsekwencji pogarszanie warunków bytowych istnienia na Ziemi, dlatego właśnie istnieją zarówno ekonomiczne, społeczne, jak i środowiskowe przyczyny rozwoju i pozyskiwania alternatywnych technologii i napędów pojazdów samochodowych.

Pierwsze zainteresowanie alternatywnymi źródłami napędu nastąpiło już w roku 1970, kiedy to zabrakło ropy naftowej. Fakt ten, pomimo panującej powszechnie opinii, że jest jeszcze mnóstwo zasobów paliw kopalnych uświadomił wszystkim, że zasoby są ograniczone i przyjdzie taki dzień, kiedy zostaną wyczerpane. W ciągu ostatnich dziesięcioleci nastąpił ogromny wzrost zainteresowania przyjaznymi dla środowiska, alternatywnymi paliwami i napędami oraz metodami pozyskiwania i wytwarzania energii. Ponadto ważne jest dla Ziemi i wszystkich gatunków, które ją zamieszkują, aby energię pozyskiwać i korzystać z niej w sposób świadomy. Energia odnawialna, daje tę możliwość i wskazuje kierunki, w jakich może być ona przekształcana i wykorzystywana [28, 57].

Światowa populacja konsumuje dziś ropopochodne produkty w ilości 100 tys. razy większej, niż w latach, kiedy zaczynała z nich korzystać. Szacuje się, że wzrost zużycia energii na świecie wynosi średnio 2% rocznie w latach 1980-2030 (rys.1.1) [102]. Wykorzystanie energii we wszystkich dziedzinach życia, również w motoryzacji rośnie na całym świecie od 420 biliardów (10^{15}) J w 2003 roku do 560 biliardów w roku 2030.

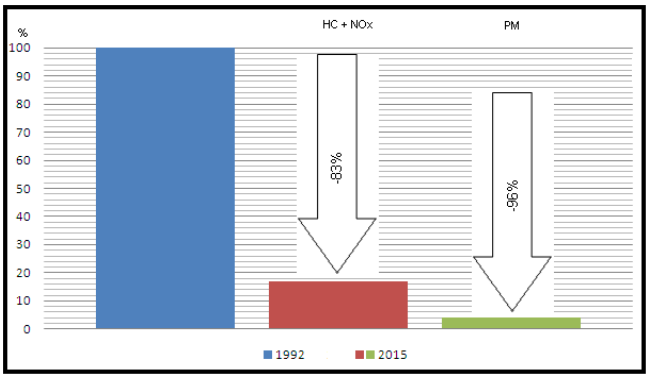


Rys. 1.1. Zużycie energii na świecie w latach 1980-2030 [101]

Rozwój układów odpowiedzialnych za tworzenie i spalanie mieszaniny paliwowo-powietrznej nie był tak gwałtowny i nie mógł w tak szerokim zakresie parametrów pracy silnika spełnić ograniczeń emisyjnych. Wszystko to przyczyniło się to do powstawania układów poza silnikowych (reaktorów katalityczny, filtrów cząstek stałych, techniki SCR itp.) obniżających emisję związków toksycznych do znormalizowanego poziomu. Na rysunku 1.2 przedstawiono zależność charakteryzującą zmniejszenie emisji dla silnika ZS. Na przestrzeni zaledwie 23 lat odnotowano 83 % zmniejszenie emisji węglowodorów z tlenkami azotu i 96 % zmniejszenie emisji cząstek stałych PM [102].

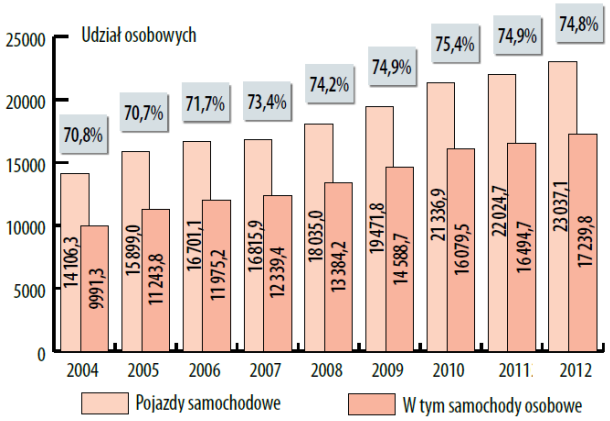
Zmiany ograniczeń emisji związków toksycznych zmusiły konstruktorów silników do poszukiwania nowych rozwiązań konstrukcyjnych silników oraz układów

poza silnikowego oczyszczania spalin, idąc dalej do współspalania paliw konwencjonalnych z alternatywnymi.



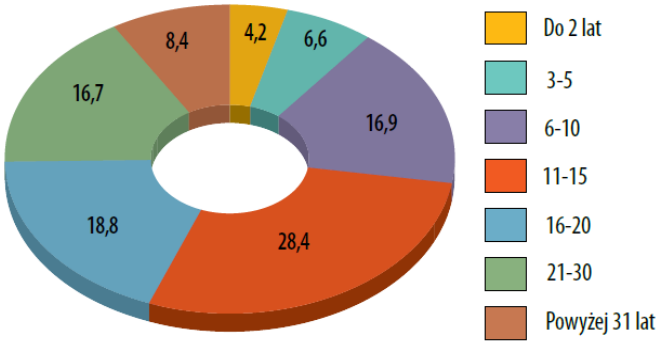
Rys. 1.2. Zmniejszenie emisji zanieczyszczeń dla silnika ZS w Unii Europejskiej na przestrzeni lat 1992 – 2015 [61]

Ze względu na rosnącą liczbę pojazdów przedstawioną na rys. 1.3. mającą tendencję zwyżkową od kilku lat zauważyć można, iż problematyka związana z emisyjnością pojazdów, z zastosowaniem alternatywnych paliw i napędów oraz poprawa uregulowań prawnych jest niezwykle potrzebna, nawet konieczna.



Rys. 1.3. Park samochodowy w Polsce [tys. sztuk] [102]

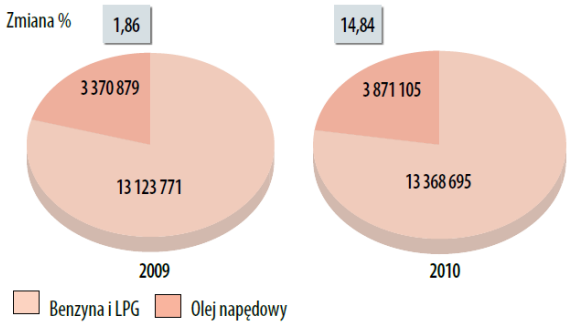
W 2012 roku park pojazdów samochodowych w Polsce wzrósł o 4,6 % w stosunku do 2011 roku, do ponad 23 mln pojazdów. Tempo powiększania się parku było o 1,4 punktu procentowego wyższe niż w 2011 roku, ale i tak 2 razy wolniejsze od zanotowanego w 2011 roku, kiedy wzrost do poprzedniego roku wyniósł 9,6 %.



Rys. 1.4. Procentowy udział parku samochodów osobowych w roku 2012 [102]

Dynamika przyrostu parku pojazdów samochodowych ogółem wynika z tempa przyrostu liczby aut osobowych, których w 2012 roku przybyło o 4,5 % do 17,2 mln. Tempo powiększania się parku było blisko dwa razy większe niż w 2011 roku, kiedy wyniosło 2,58 %.

W 2012 roku na 1000 mieszkańców Polski przypadały 451 samochody osobowe. Rok wcześniej były to 402 samochody. Masowo sprowadzane samochody z drugiej ręki przyniosły także niekorzystne skutki. Ponieważ w prywatnym imporcie przeważają samochody mające ponad 4 lata (88,9 % w 2012 roku), park samochodowy w Polsce starzeje się. Aut osobowych mających do pięciu lat było 10,8 % (o 0,9 punktu procentowego mniej niż rok wcześniej) i był to jeden z większych spadków udziału najmłodszych aut w parku samochodów osobowych (rys. 1.4). Samochodów mających powyżej trzydziestu jeden lat było w 2011 roku w Polsce dwa razy więcej, niż aut liczących do dwóch lat. Konsekwencje utrzymywania starego parku samochodów są ponoszone nie tylko przez właścicieli samochodów (m.in. w postaci wyższych rachunków za naprawy), ale i społeczeństwo. Stare samochody są mniej bezpieczne i nie ekologiczne, ich silniki emitują znacznie więcej trujących spalin, niż nowe modele.

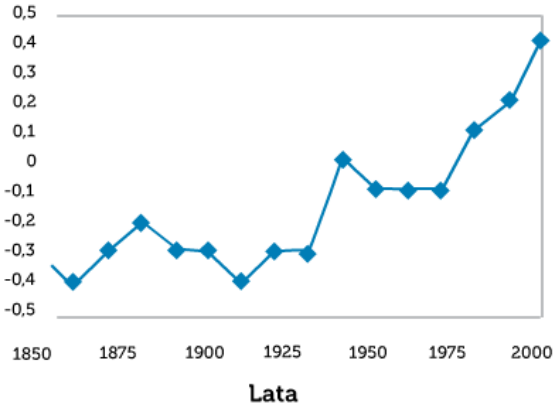


Rys. 1.5. Liczba pojazdów osobowych z podziałem na rodzaj paliwa w 2012 roku [102]

Powyższe zależności dotyczące zarówno liczebności, jak i struktur wiekowych oraz ilości pojazdu z silnikiem o ZS (rys. 1.5) świadczą o konieczności zagłębienia się w tematykę związana z emisyjnością tych pojazdów, rozwiązaniami prawnymi, jakie obecnie obowiązują oraz na podstawie przeprowadzonych badań i doświadczeń o możliwościach poprawy ich emisyjności, możliwości, a wręcz nawet konieczności stosowania alternatywnych paliw, jakim może być wodór wykorzystywany w realizowanych badaniach, a co za tym idzie poprawy otaczającego nas środowiska naturalnego.

Głównym zagadnieniem niebezpiecznym dla ludzkości związanym bezpośrednio z emisyjnością pojazdów jest globalne ocieplenie, czyli znaczny wzrost temperatury ziemi w krótkim okresie czasu, na skutek działalności człowieka. Rzeczywisty wzrost temperatury o 1°C w ciągu wieku (rys. 1.6), uważany jest za ocieplenie. Wzrost o 1 czy 2°C może wydawać się niewielki, to jednak takie zmiany mogą mieć istotny wpływ na klimat. Niepodważalne fakty mówią wyraźnie, że naturalne zmiany klimatu, takie jak ocieplenie z powodu aktywności wulkanicznej, promieniowania słonecznego oraz

zmian właściwości chemicznej atmosfery wymagają tysięcy lat, aby zmienić temperaturę tylko o 1°C.



Rys. 1.6. Globalna średnie ocieplenie klimatu [°C] [102]

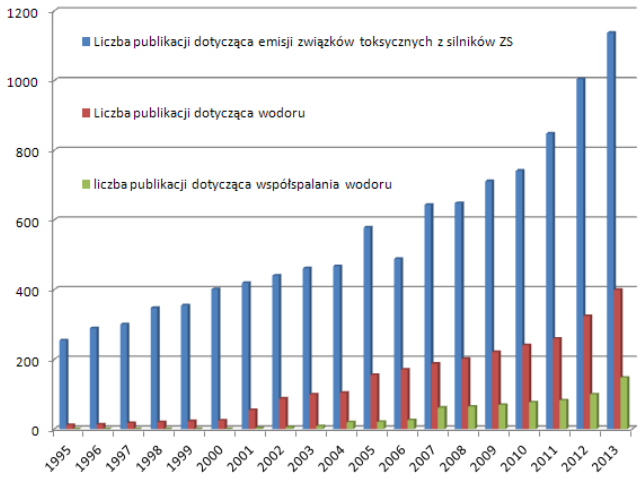
Emisja gazów emitowanych z pojazdów bezpośrednio przyczynia się do problemów zdrowotnych, kwaśnych deszczy i powstawania ozonu. Można wysunąć założenie, że aby poziom emisji związków toksycznych mógł zacząć stabilizować się, musi on najpierw osiągnąć wartość maksymalną, żeby następnie mógł zmniejszać się. Według najnowszych danych stabilizacja ekwiwalentu koncentracji związków toksycznych pochodzących ze wszystkich gałęzi gospodarki przewidywany jest na rok 2015. Z naukowego punktu widzenia dla silników spalinowych o ZS można założyć, iż maksymalny poziom emisji związków toksycznych został już osiągnięty, jednakże rosnąca liczba pojazdów powoduje, że problem ten jest aktualny i będzie monitowany przez najbliższe lata. Najlepszą aktualnie metodą na zmniejszenie jednostkowej emisji związków toksycznych pochodzących z silników spalinowych, o której jest mowa w rozprawie jest rozwój źródeł i korzystanie z energii nie pochodzącej z paliw kopalnianych. W dziedzinie motoryzacji można wskazać główne kierunki rozwoju i badań, jakimi są: stosowanie alternatywnych paliw w połączeniu z konwencjonalnymi, jednym z takich rozwiązań jest spalanie paliwa konwencjonalnego w silniku o ZS z domieszką wodoru; ogniwa paliwowe, energia słoneczna, których rozpowszechnianie i stosowanie na przestrzeni lat będzie coraz bardziej intensywne.

Na uznanie zasługuje również fakt, iż Europejski przemysł samochodowy jest największym inwestorem w badania i rozwój [59]. Nakłady sięgają 26 mld euro, to jest ok.
5 procent przychodów. Koncerny samochodowe wydają na badania i rozwój więcej od przemysłu farmaceutycznego (19,8 mld euro) i telekomunikacyjnego (12 mld). Europejscy producenci otrzymali w 2008 roku blisko 6300 patentów – tj. 55 % uzyskanych przez branżę w Europejskim Urzędzie Patentowym.

O randze i aktualności zagadnienia związanego z poprawą wskaźników ekologicznych silników o ZS zasilanych paliwami konwencjonalnymi z domieszką wodoru świadczy wzrastająca rokrocznie liczba publikacji dotycząca tego zagadnienia.

W literaturze znaleźć można zarówno teoretyczne, empiryczne, jak i praktyczne podejście do emitowanych związków toksycznych z omawianych jednostek napędowych, a ponadto zajmuje się zagadnieniami związanymi z bezpośrednią

eksploatacji silników wyposażonych w nowoczesne układy oczyszczania spalin [7, 8, 23, 63, 79, 92]. W bazie danych o czasopismach technicznych, dostępnej pod adresem www.sceincedirect.com [105], wyszukano hasłowo liczbę publikacji dotyczących tematyki emisji związków toksycznych z lat 1995-2013, co przedstawiono na rys. 1.7.



Rys. 1.7. Globalna średnie ocieplenie klimatu [°C] [12]

Uzyskane dane odnoszą się wyłącznie do tytułów, streszczeń oraz słów kluczowych najważniejszych publikacji prezentowanych na światowych konferencjach. Wynika z nich, że zainteresowanie emisją związków toksycznych emitowaną z pojazdów jest w ostatnich latach bardzo duże: ponad 1150 publikacji dotyczących emisji z pojazdów wyposażonych w silnik o ZS. Dysproporcja dotycząca połączenia i ujednolicenia standardów emisyjnych oznacza, że zagadnienia odnoszące się bezpośrednio do emisji i możliwości redukcji emisji tych związków za pomocą współspalania wodoru i innych gazów palnych w silnikach są wciąż mało rozpoznane i konieczne są szerokie prace w tym temacie, oraz, że niniejsza praca należy do obszaru, który wciąż nie jest wystarczająco rozpoznany. Z tego właśnie powodu uzasadnione jest prowadzenie badań i prac naukowych związanych z tematyką wskaźników ekologicznych silników zasilanych paliwami konwencjonalnymi z domieszką wodoru i innych gazów palnych.

2. Przegląd literatury nt. silników zasilanych dwupaliwowo

2.1. Poprawa wskaźników ekologicznych silników

Jak już napisano, aktualnie działania rozwojowe nad silnikami o zapłonie samoczynnym koncentrują się głównie wokół optymalizacji procesu spalania i udoskonalania pozasilnikowych urządzeń oczyszczających spaliny.

Tłokowy silnik spalinowy o spalaniu wewnętrznym, którego głównym zadaniem jest zamiana energii chemicznej zawartej w paliwie na pracę mechaniczną układu korbowo-tłokowego jest jednym z głównych maszyn cieplnych wykorzystywanych w naszej cywilizacji. Ze względu na wysoki poziom technologii wytwarzania (w pełni zautomatyzowany proces produkcji silników - typu „fire") oraz niezawodną pracę w zakładanym czasie eksploatacji, przez najbliższe dziesięciolecia będzie dominował, jako źródło energii mechanicznej.

Biorąc pod uwagę sprawność tłokowego silnika spalinowego, znaczącą rolę w gospodarce światowej odgrywa silnik o zapłonie samoczynnym. Wyższa sprawność jednostki o ZS wynika z większego stopnia sprężania oraz faktu, że w całym zakresie obciążeń pracuje on na ubogich mieszakach paliwowo-powietrznych, dla których współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda > 1$ [71, 86].

Warto również podkreślić, że silniki o ZS, a w szczególności jednostki napędowe o niskich wskaźnikach mocy z jednostki objętości całkowitej cylindra, a także silniki średniej i dużej mocy mają trwałość pozwalającą na przebiegi osiągające 2 mln kilometrów.

Ze względu na wspomniane powyżej cechy, silniki o ZS są aktualnie najbardziej rozpowszechnionymi jednostkami napędowymi użytkowanymi w pojazdach trakcyjnych średnich i dużych mocy (samochody dostawcze, ciężarowe, lokomotywy itp.) oraz jednostkach stacjonarnych.

Szeroki zakres stosowania silników o ZS ma istotny wpływ na zwiększone zapotrzebowanie na paliwa ropopochodne na poziomie istotnym z punktu widzenia budżetów krajów, niezależnie od poziomu ich rozwoju gospodarczego.

Obawa przed malejącymi zasobami ropy naftowej, przy dużym zapotrzebowaniu na paliwa ropopochodne prowadzi do wzrostu ich cen na światowych oraz nadmiernej emisji składników szkodliwych pochodzących ze spalin takich, jak: CO, CO_2, HC, NOx oraz cząstki stałe PM (zawartość toksycznych składników w spalinach regulują coraz bardziej restrykcyjne normy emisji związków toksycznych – tab. 2.1-2.3).

Tabela 2.1. Normy emisji spalin dla silników pojazdów PC o zapłonie samoczynnym [103]

L.p.	Norma Euro	Data	Emisja [g/km]				
			CO	HC	NO_x	$HC+NO_x$	PM
1	I	Lipiec 92	2,72	-	-	0,97	0,14
2	II	Styczeń 96	1,00	-	-	0,7	0,08
3	III	Styczeń 2000	0,64	-	0,50	0,56	0,05
4	IV	Styczeń 2005	0,50	-	0,25	0,30	0,025
5	V	Wrzesień 2009	0,50	-	0,18	0,23	0,005
6	VI	Wrzesień 2014	0,50	-	0,08	0,17	0,005

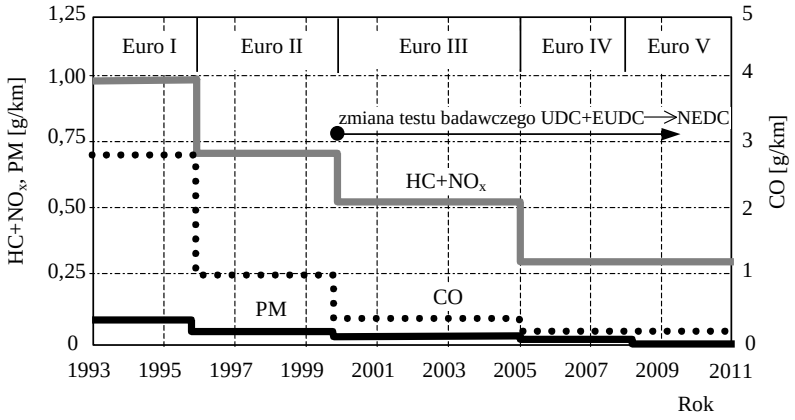
Tabela 2.2. Normy emisji spalin dla silników pojazdów LDV o ZS WE 715/2007 [103]

L.p.	Norma Euro	Data	Emisja [g/km]				
			CO	HC	NOx	HC+NOx	PM
1	I	Październik 94	6,900	-	-	1,700	0,250
2	II	Styczeń 98	1,500	-	-	1,200	0,170
3	III	Styczeń 2001	0,950	-	0,780	0,860	0,100
4	IV	Styczeń 2006	0,740	-	0,390	0,460	0,060
5	V	Wrzesień 2010	0,740	-	0,280	0,350	0,005
6	VI	Wrzesień 2015	0,740	-	0,125	0,215	0,005

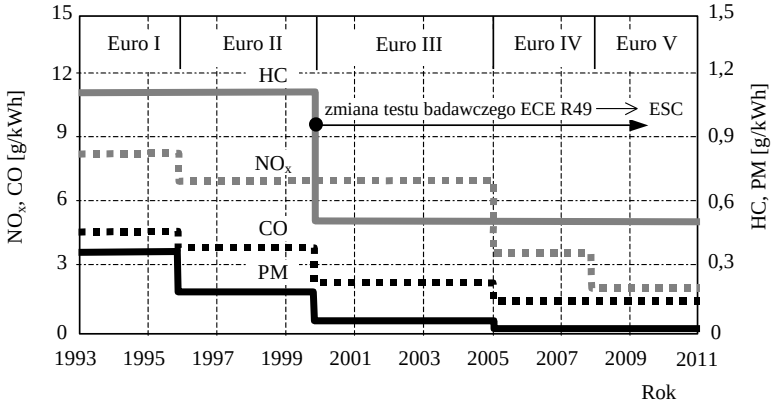
Tabela 2.3. Normy emisji spalin dla silników pojazdów HDV o ZS WE 715/2007 [103]

L.p.	Norma Euro	Data	Emisja [g/kWh]				
			CO	HC	NOx	PM	Zadymienie
1.	I	1992	4,500	1,100	8,000	0,612	-
2.	II	Październik 96	4,000	1,100	7,000	0,250	-
3.	III	Październik 2000	2,100	0,660	5,000	0,100	0,800
4.	IV	Październik 2005	1,500	0,460	3,500	0,020	0,500
5.	V	Październik 2008	1,500	0,460	2,000	0,020	0,500
6.	VI	Styczeń 2013	1,500	0,130	0,500	0,010	0,150

Przemysł motoryzacyjny wprowadza ciągle nowe rozwiązania obniżające poziom emisji związków szkodliwych w celu spełnienia coraz bardziej rygorystycznych norm. Stosowane obecnie rozwiązania pozwalają spełnić obowiązujące przepisy dotyczące emisji (Euro VI, rys. 2.1 i 2.2) [56].



Rys. 2.1. Limity emisji związków toksycznych dla silników ZS LDD [56]



Rys. 2.2. Limity emisji związków szkodliwych dla silników ZS HDD [56]

Wymienione czynniki wskazują, że intensywnie poszukuje się rozwiązań, które umożliwią ograniczenie zużycia paliw ropopochodnych, a głównej mierze oleju napędowego. Za przykład mogą posłużyć zalecenia zawarte w ustawodawstwie stanu Kalifornia z 2013 roku, które nakłada obowiązek redukcji dwutlenku węgla o 30 % do 2015 roku. Również Komisja Europejska podejmuje działania w kierunku ograniczenia gazów cieplarnianych do 2050 roku o co najmniej 60 % w porównaniu z poziomem z 1990 roku [105].

W związku z powyższym prowadzone są w jednostkach naukowo badawczych i koncernach motoryzacyjnych intensywne badania dążące do poprawy procesu spalania oraz zmniejszenia emisji wymienionych składników toksycznych spalin. Działania te skupiają się w głównej mierze na podwyższaniu ciśnienia wtrysku, modyfikacji składu paliwa, zastosowaniu paliw alternatywnych (alkoholowych i gazowych), implementacji sytemu recyrkulacji spalin EGR oraz wykorzystaniu układów wychwytujących cząstki stałe zawarte w spalinach [2, 12, 16,52]. Ponadto należy wspomnieć o działaniach ukierunkowanych na zwiększanie sprawności silników poprzez ograniczanie strat tarcia. Przykładem tego typu działań jest np. ograniczanie liczby pierścieni.

Istotnym sposobem rozwiązania problemu ograniczania CO_2 może być zastosowanie paliw alternatywnych w stosunku do ON [67, 68, 80, 88], które cechuje większy udział w cząsteczce paliwa. Do głównych paliw alternatywnych można zaliczyć:

- gazowe paliwa kopalniane – gaz ziemny (CH_4), w tym gaz otrzymywany z łupków (gaz ukryty głęboko w trudnodostępnych warstwach geologicznych na głębokości od 1000 do 4000 metrów; gazem łupkowym nasycone są warstwy iłów; duże zasoby tego gazu są prognozowane na terenie Polski) [105],
- LPG (liquified petroleum gas), czyli mieszanina propanu (C_3H_8) i butanu (C_4H_{10}),
- biopaliwa (głównie etanol – C_2HSOH, alkohol metylowy – CH_3OH),
- biogaz (mieszanina metanu i dwutlenku węgla).

Zagadnienia związane z cyklem produkcyjnym etanolu przedstawiono w pracy [50, 51]. Wyniki analiz cyklu produkcyjnego etanolu wytwarzanego z substancji organicznych, takich jak: ziemniaków, ziaren zbóż, rzepaku, kukurydzy, buraków cukrowych wykazują, że produkcja tego typu paliwa jest opłacalna. Jednakże wykorzystywanie ww. surowców, z których można wyprodukować pokarm dla ludzi i karmę dla zwierząt, może spowodować drastyczny wzrost cen żywności, wywołując przy tym poważny problem dla niektórych państw. Rozwiązaniem tego zagadnienia może być produkcja paliw z wykorzystaniem odpadów przemysłowych, rolniczych, z produkcji leśnej i gospodarstw domowych. Przykładem może być słoma, drewno odpadowe, osady ściekowe, kompost, śmieci, a także resztki żywności.

Podsumowując wyżej wymienione aspekty związane z zasilaniem silników o ZS można stwierdzić, że zastosowanie paliw zastępczych (alternatywnych) do tłokowych silników spalinowych wynika z różnego rodzaju uwarunkowań:

- ekologicznych,
- ekonomicznych,
- strategicznych.

Analiza wyników prac ośrodków naukowo badawczych wykazuje, że jednym z najczęściej stosowanych paliw zastępczych do tłokowych silników spalinowych jest gaz naturalny [1, 24, 40, 48, 84], ale także alkohole (metylowy i etylowy) [57, 60]. Szczególnie w Polsce bardzo popularne jest zastosowanie LPG jako paliwa alternatywnego. Szczegółowe wyniki badań zasilania dwupaliwowego, w którym paliwem dominującym były LPG przedstawiono w publikacjach [47, 48, 49]. Prowadzone były również prace eksperymentalne nad użyciem alkoholu metylowego do napędu jednostki spalinowej[22, 74].

Zastosowanie gazu naturalnego jest uzasadnione także ze względu na duże zasoby światowe tego surowca i korzystny skład i poziom emisji toksycznych składników spalin. Wykorzystanie etanolu argumentowane jest dużymi możliwościami pozyskania tego paliwa na skalę przemysłową, tym bardziej, iż jest to paliwo uznawane powszechnie za odnawialne. Oba paliwa charakteryzuje niższa cena jednostkowa w odniesieniu do jednostki energii, w związku z czym koszt jednostki energii uzyskany z tych paliw kształtuje się następująco dla:

- oleju napędowego – 0, 12 [PLN/MJ] – wartość dla ceny hurtowej 5,20 zł za litr,
- LPG – 0,08 [PLN/MJ] – wartość dla ceny hurtowej 2,64 zł za litr,
- gazu naturalnego – 0,053 [PLN/MJ] – wartość dla ceny hurtowej 2,12 zł za m^3 CNG,
- etanolu – 0,055 [PLN/MJ] – wartość dla ceny hurtowej 1,25 zł za dm^3 etanolu.

2.2. Sposoby zasilania silników dwupaliwowych

Dotychczasowe wyniki przeprowadzonych badań wykazują, że spalanie wyżej wymienionych paliw jest możliwe w dwupaliwowym silniku o zapłonie samoczynnym, który charakteryzuje poprawa sprawności ogólnej [5, 13, 18], szczególnie w zakresie obciążeń zbliżonych do nominalnych, pozytywnie wpływa na zmniejszenie sumarycznej emisji składników spalin [49].

Wybór dwupaliwowego zasilania tłokowego silnika o zapłonie samoczynnym wynika także z własności gazu naturalnego oraz etanolu, paliwa te charakteryzują się niższą wartością liczby cetanowej, a zatem dużą odpornością na samozapłon [2, 3, 4, 34]. Stąd wzięła się koncepcja zapłonu od inicjującej zapłon dawki oleju napędowego.

Koncepcja zasilania dwupaliwowego jednostki napędowej znana jest od dawna, już w roku 1956 zgłoszono patent nr 2909159 [57], zauważono wtedy, że ten typ zasilania wadzi do podwyższenia sprawności cieplnej i uzyskania większych mocy w porównaniu do zasilania tylko olejem napędowym.

Intensywne badania nad tego rodzaju zasilaniem, szczególnie w zakresie sterowania procesem spalania, rozpoczęto w drugiej połowie XX wieku w USA i we Włoszech [57]. W badaniach tych główny nacisk położono na poprawę sprawności silnika i obniżenie emisji cząstek stałych i tlenków azotu.

W Polsce pionierem badań silników o ZS zasilanych dwupaliwowo był prof. M. Zabłocki. W pracy [95] zaproponował sterowanie zasilaniem dwupaliwowym za

pomocą mechanicznie sprzęgniętej pompy wtryskowej z układem wytryskującym paliwo gazowe, a także analizę zagadnień związanych z procesem spalania mieszanki dwupaliwowej.

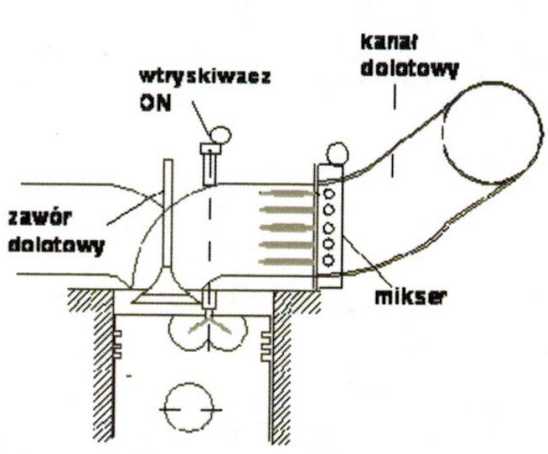
Zasilanie dwupaliwowe przy zastosowaniu CNG jako paliwa głównego szeroko omówiono w pozycji [51, 64, 65]. Zawarte w niej analizy oparte były o badania silnika jednocylindrowego. W pracy skoncentrowano się na badaniach wpływu dawki ON inicjującej zapłon oraz ilości gazu dostarczanego do komory spalania na osiągi, emisję i charakterystyczne parametry procesu spalania.

Również w publikacjach [9, 30, 45, 54, 55, 89] dotyczącej możliwości współzasilania silników spalinowych wodorem rozpatrywano przypadek dwupaliwowego zasilania silnika wodorem i ON. Podobnie, jak w pracach [7, 20, 42, 91], regulacja silnika polegała na zmianie udziału wodoru pod względem energetycznym w całkowitym paliwie. Zauważono, że przy relatywnie ubogim składzie mieszanki wodorowo-powietrznej ($\lambda \approx 1$,6) występują bardzo silnie pulsacje ciśnienia w cylindrze, świadczące o występowaniu spalania stukowego w tłokowym silniku spalinowym zasilanym wodorem. Również w tych analizach nie rozpatrywano wpływu zmian parametrów regulacyjnych silnika dwupaliwowego na osiągi, emisję i parametry pracy silnika.

We wszystkich działaniach współspalania paliwa konwencjonalnego z dodatkiem paliwa alternatywnego analizie poddaje się osiągi, wielkość emisji i parametry procesu spalania od sposobu realizacji zasilania dwupaliwowego z inicjującą dawką ON oraz coraz częściej zwraca się uwagę na sposób dostarczenia paliwa alternatywnego do komory spalania [10, 19, 21, 54, 70].

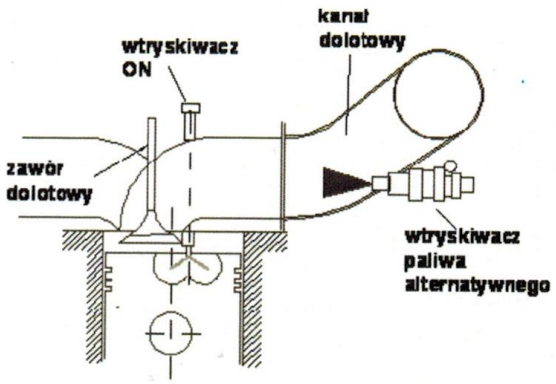
Istnieją różnego rodzaju rozwiązania stosowania paliw zastępczych do silników o ZS. W przypadku zastosowania alternatywnych paliw gazowych wprowadza się metody polegające na:

– ciągłym dostarczaniu paliwa gazowego do kolektora dolotowego przez potocznie zwany mikser (rys. 2.3),



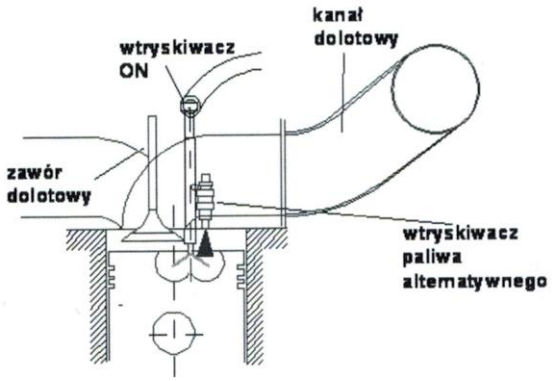
Rys. 2.3. Układ zasilania dwupaliwowego silnika z wykorzystaniem miksera umieszczonego w kanale dolotowym

– sekwencyjnym (pośrednim) wtrysku paliwa gazowego do kolektora dolotowego, który po wymieszaniu się z powietrzem jest zapalany od dawki ON inicjującej zapłon w cylindrze silnika (rys. 2.4),



Rys. 2.4. Układ zasilania dwupaliwowego silnika z wtryskiem bezpośrednim do kanału dolotowego

– bezpośrednim wtrysku paliwa gazowego do komory spalania po samozapłonie zainicjowanym przez dawkę ON (rys. 2.5),



Rys. 2.5. Układ zasilania dwupaliwowego silnika z wtryskiem bezpośrednim do komory spalania

Zasilanie alternatywnymi paliwami ciekłymi może być również realizowane przez jednoczesne dostarczenie do układu wtryskowego mieszaniny paliwa alternatywnego i ON. Ze względu na to, że ciekłe paliwa alternatywne trudno mieszają się z ON, możliwe są do uzyskania roztwory o najwyżej 10 % udziale paliwa alternatywnego. Zastosowanie dodatków [26] (np. 1-octylamino-3-octyloxy-2-propanol oraz 2-nitrato-3-octyloxy propyl) pozwala na zwiększenie udziału etanolu (ciekłego paliwa alternatywnego) powyżej 10 %. Ponadto dodatki te zwiększają liczbę cetanową mieszaniny ON i etanolu, powodując poprawę samozapłonu. Metoda ta nie wymaga jakichkolwiek zmian w konstrukcji układu zasilania silnika o ZS. Jednakże poziom ilości zastosowanego paliwa alternatywnego nie czyni go źródłem strategicznym w rozumieniu dywersyfikacji źródeł energii w gospodarce krajów nie posiadających własnych zasobów ropy naftowej.

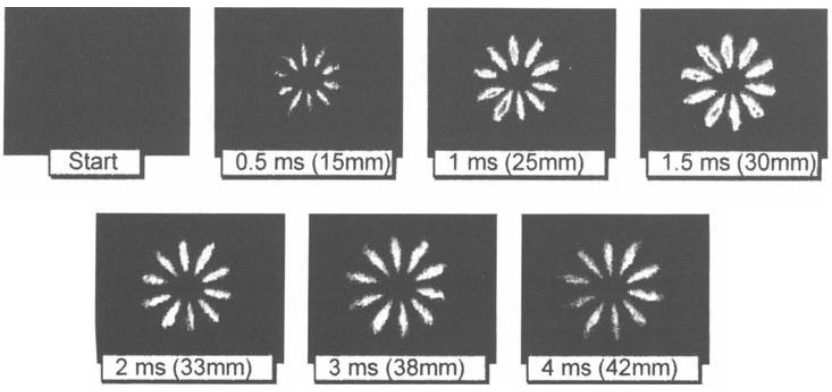
Zwiększenie ilości wykorzystywanych ciekłych paliw alternatywnych zasilających silniki o ZS wymaga wprowadzania bardziej zaawansowanej technologii układu zasilania silnika o ZS. Rozwiązaniem bardzo przydatnym jest, jak wspomniano

wyżej [15, 62, 90], zasilanie dwupaliwowe, w którym do zapłonu wykorzystywana jest dawka inicjująca zapłon ON. Przy tej koncepcji udział energetyczny paliwa alternatywnego może być większy niż 50 %.

2.3. Współspalanie wodoru w silnikach spalinowych

Analiza literatury [6, 14, 75, 85] wykazuje, że charakterystyki współspalania wodoru silniku benzynowym i innymi gazami palnymi mogą być brane pod uwagę w koncepcji współspalania tego paliwa. W koncepcji współspalania oleju napędowego w mieszance powietrze-wodór i inne gazy palne należy uwzględnić podstawową różnicę paliwa konwencjonalnego w porównaniu z wodorem, jaką stanowi szeroka granica palności od 4 do 75 % objętości wodoru w powietrzu. Prędkość spalania wodoru może wzrosnąć w odpowiednich warunkach do kilkuset metrów na sekundę. Te cechy mogą być wykorzystywane do spalania ubogich mieszanek, charakteryzujących się niską emisją NOx, co może prowadzić do poprawy wydajności. Właściwości te mogą jednak prowadzić do niechcianego wzrostu spalania lub nawet do detonacji. W celu rozwiązania tego zagadnienia zagłębić sie należy we wpływ warunków temperatury, ciśnienia, turbulencji, składu gazu i przepływu.

Dorer, Prechtl, Mayinger [17] przeprowadzili badania wizualizacyjne rozpylenia strugi paliwa w mieszance powietrzno-wodorowej silnika o zapłonie iskrowym. Wykorzystane przez nich urządzenie służące do wizualizacji procesu rozpylenia strugi w komorze spalania wykorzystywało zjawisko indukowanej fluorescencji laserowej (LIF). Pulsacyjny laser emitował wiązkę laserową o długości fali 248 nm, skupioną na soczewce ustawionej w małej odległości, a wiązka lasera przemieszczała się przez komorę spalania. Cząsteczki w warstwie były podsycane i emitowały światło we wszystkich kierunkach. Zintensyfikowana wiązka rejestrowała emitowane światła przez okno w dolnej części komory spalania. Ta technika pomiaru pozwala również na wizualizację niespalonej mieszaniny gazu podczas procesu spalania, dając ilościowy obraz mieszaniny i rozkład koncentracji mieszaniny w komorze spalania, co przedstawiono na rys. 2.6.

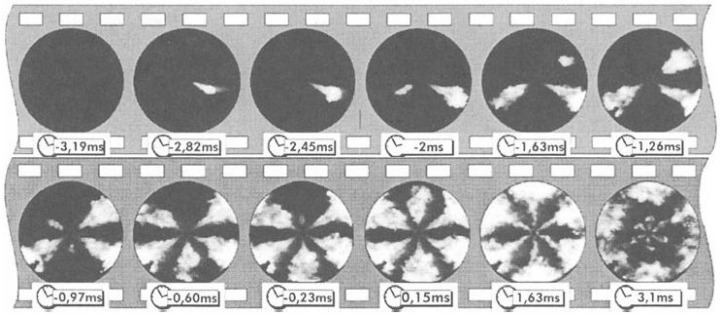


Rys. 2.6. Układ zasilania dwupaliwowego silnika z wtryskiem bezpośrednim do komory spalania

Eksperyment wykazał, że w silniku wysokoprężnym z dodatkiem wodoru może być osiągnięty zapłon mieszanki. Opóźnienie zapłonu w głównej mierze zależy od

stopnia sprężania. Wraz z wyższym współczynnikiem kompresji zapłon może być zrealizowany. Dostarczenie wodoru powinno być realizowane w pobliżu GMP, w celu uniknięcia spalania detonacyjnego.

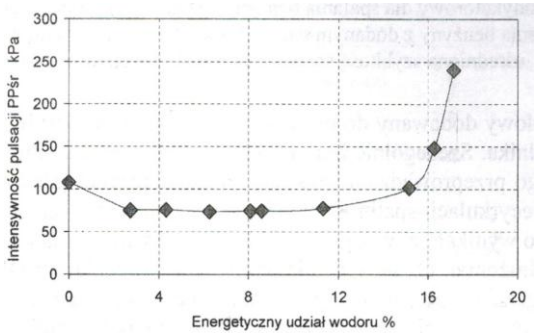
Seria eksperymentów wykonanych przez Dorer, Prechtl, Mayinger [17] pokazała że stopień prażenia ma znaczny wpływ na opóźnienie zapłonu. Wyższe temperatury prowadzą do krótszych opóźnień zapłonu. Analiza filmu potwierdza przypuszczenie, że zapłon jednego strumienia nie prowadzi do zapłonu pozostałych strumieni wodoru jak pokazano na rysunku 2.7. Zaobserwowano także, że kilka strumieni nie uległo zapłonowi. Można wnioskować że różne obszary mieszanki wodoru wtryśniętej w jednym cyklu mogą mieć różne opóźnienie zapłonu. W rezultacie różnice ciśnień w różnych cyklach mogą powodować przerwy zapłonu. Prawdopodobną przyczyną może być temperatura sprężonego wodoru oraz różny charakter mieszanki. Prawdopodobnie na zapłon wpływ ma także czystość sprężonego wodoru oraz nieszczelności w układzie dolotowym.



Rys. 2.7. Przebieg proces wtrysku oleju napędowego do mieszanki paliwowo-wodorowej z wtryskiwacza 6 otworkowego

W innej publikacji zaprezentowanej przez zespół Saravanan i Nagarajan [79], , Tsujimura i inni [93] wykazano, że w przypadku silników z zapłonem samoczynnym zastosowanie wodoru, jako paliwa dodatkowego może wpłynąć ma na zmianę zwłoki samozapłonu oleju napędowego. Dodatkowo wprowadzony do komory spalania wodór przyczynia się do większego stężenia rodników H i OH, a także w decydujący sposób wpływa na przebieg reakcji przedpłomieniowych i zainicjowanie spalania w pierwszej fazie 0-10 %MFB dla silników o zapłonie iskrowym.

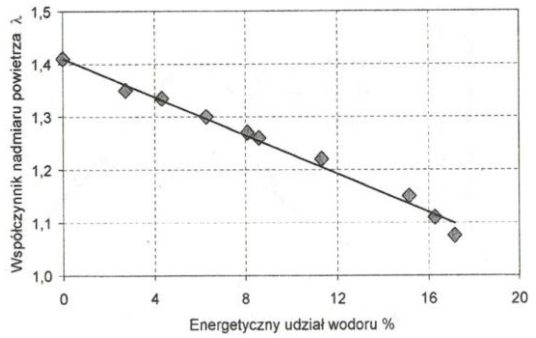
Z badań przeprowadzonych przez Szwaję [88] dla stałej dawki oleju napędowego i dawki wodoru zmieniającej się w zakresie od 0 do 17 % jego udziału energetycznego w całkowitej dawce spalanej w silniku, wynika, że gwałtowny wzrost intensywności pulsacji ciśnienia spalania występował po przekroczeniu wartości 16 % udziału energetycznego dawki wodoru (rys.2.8).



Rys. 2.8. Układ zasilania dwupaliwowego silnika z tryskiem bezpośrednim do komory spalania [88]

We wszystkich przypadkach nie zbadano wpływu wyższej wartości udziału energetycznego na emisję związków toksycznych oraz na liczbę i wielkość cząstek stałych oraz parametry pracy silnika spalinowego.

Silnik zasilany wyłącznie olejem napędowym [89, 90] pracował przy współczynniku nadmiaru powietrza $\lambda = 1.43$. wraz ze wzrostem dawki wodoru zmniejszał się współczynnik nadmiaru powietrza wyznaczony dla całkowitej dawki obydwu paliw, zbliżając się do składu stechiometrycznego (rys. 2.9), dla udziału wodoru na poziomie 18-19 %. Autor zajmował się również intensywnością stuku, której wartość wyraźnie wzrastała z powodu składu mieszanki palnej zbliżającej się do składu stechiometrycznego, co powodowało również wzrost temperatury spalania.



Rys. 2.9. Współczynnik nadmiaru powietrza w funkcji energetycznego udziału wodoru przy stałej dawce oleju napędowego i niezmiennym kącie początku wtrysku

Wszystkie badania, które związane są z możliwością zastosowania jak największego udziału paliwa alternatywnego prowadzą do wniosku, że główną barierą w uzyskaniu dużych udziałów paliwa alternatywnego jest zjawisko stuku. Zjawisko to może wywoływać wiele niekorzystnych efektów wpływających na osiągi, trwałość elementów konstrukcyjnych silnika (tłok, głowica, uszczelka pod głowicą). Paliwa alternatywne mogą być również źródłem nadmiernej emisji tlenków azotu, węglowodorów oraz ze względu na gwałtowne wydzielanie się energii w okresie spalania mogą wpływać na wzrost poziomu hałasu.

Istotnym czynnikiem ograniczającym zastosowanie większego poziomu paliw alternatywnych w mieszance paliwowo-powietrznej dostarczanej do cylindra silnika ZS są zjawiska uwarunkowane przedwczesnym zapłonem i wygaszaniem płomienia. Prowadzi to do wzrostu niepowtarzalności kolejnych cykli pracy, jak również zwiększonej emisji węglowodorów oraz tlenku węgla [62, 65, 72].

Reasumując, do niekorzystnych zjawisk występujących w silniku zasilanym dwupaliwowo, omawianych w pracach [3, 14, 25, 34, 49, 88] można zaliczyć:

- zwiększoną emisję węglowodorów i tlenków węgla w zakresie obciążeń częściowych silnika,
- niepowtarzalność parametrów procesu spalania,
- twardą pracę i stuk (hałas emitowany przez silnik, ale także problemy z trwałością silnika).

Wydawać się może, że wybór dwupaliwowego zasilania tłokowego silnika o zapłonie samoczynnym spełnia wyszczególnione w omawianym rozdziale cele związane z zastosowaniem paliw alternatywnych, głównie dodatku wodoru i innych gazowych paliw, do zasilania silników o ZS, tj.:

- strategiczne – ze względu na fakt, że wodór jest paliwem o nieograniczonej dostępności, jako pierwiastek tworzący wodę,
- ekonomiczne – ze względu na wielkość energii zawartej w tym paliwie oraz ze względu na spodziewaną poprawę parametrów pracy silnika,
- ekologiczne – ze względu na fakt, że paliwo gazowe charakteryzuje się korzystniejszym składem spalin, niż paliwa ciekłe ropopochodne, zaś wodór jest paliwem odnawialnym, a także ze względu na relatywnie wysoką sprawność silnika wodorowego.

Ważnym aspektem jest także niewielki zakres modyfikacji eksploatowanych aktualnie silników o zapłonie samoczynnym do takiego systemu zasilania. Adaptacja ta nie wymaga ingerencji w podstawową konstrukcję silnika i jego podzespołów.

W silniku zasilanym dwupaliwowo, w porównaniu do silnika zasilanego standardowo, jak już zauważono, mogą występować zjawiska niekorzystnie wpływające na pracę silnika, takie jak twarda praca i stuk. Zjawisko stuku w silniku zasilanym dwupaliwowo charakteryzuje się słyszalnymi dźwiękami o wysokiej częstotliwości, emitowanymi przez drgające elementy konstrukcyjne silnika (kadłub, głowica) [73, 78]. Źródłami tych drgań są bardzo szybkie przyrosty ciśnienia wywołane gwałtownym wywiązywaniem energii tuż po samozapłonie (twarda praca), bądź pulsacje ciśnienia wywołane samozapłonem wzbogaconej homogenicznej mieszanki wodór-powietrze w strefie poza obszarem spalania dawki inicjującej zapłon oleju napędowego.

Analiza cytowanej wyżej literatury wykazuje, że przedstawione w niej wyniki dotyczą głównie zagadnień związanych z wpływem wielkości inicjującej zapłon dawki ON oraz udziałów energetycznych paliwa alternatywnego na osiągi, parametry procesu spalania w tym możliwości wystąpienia zjawiska stuku w połączeniu z badaniami wizualizacyjnymi. Prace te w ogóle, bądź w minimalnym stopniu omawiają zagadnienia związane z możliwością ciągłego oddziaływania na pracę silnika zasilanego dwupaliwowo za pomocą odpowiedniego doboru parametrów regulacyjnych silnika. Dobór parametrów regulacyjnych powinien opierać się o zdefiniowane wcześniej kryteria poprawnej pracy silnika, związane m.in. z zadymieniem spalin, emisją tlenków azotu, spalaniem stukowym, niepowtarzalnością kolejnych cykli pracy.

W niniejszej monografii analizę zjawisk związanych z zasilaniem dwupaliwowym oraz zagadnień odnoszących się doboru parametrów regulacyjnych oparto o wyniki badań przeprowadzonych na jednocylindrowym silniku badawczym (AVL 5804), który

był zasilany opcjonalnie paliwem alternatywnym, a mianowicie wodorem (z grupy naturalnych alternatywnych paliw gazowych).

Prawidłowość doboru parametrów regulacyjnych oceniano na podstawie wyników badań i obliczeń:

- osiągów silnika,
- emisji podstawowych składników spalin,
- wybranych parametrów procesu roboczego, ze szczególnym uwzględnieniem przebiegu wywiązywania ciepła na podstawie przebiegu ciśnienia.

3. Analiza powstawania związków toksycznych

3.1. Uwagi ogólne

Produktami idealnego procesu spalania paliw węglowodorowych jest para wodna i dwutlenek węgla (CO_2). Osiągnięcie tylko takich produktów reakcji w rzeczywistym silniku jest w zasadzie niemożliwe ze względu na występujące niecałkowite i niezupełne spalanie. W wyniku procesów cieplnych zachodzących w silnikach tłokowych powstają związki szkodliwe dla organizmu człowieka i środowiska naturalnego. Należą do nich m.in.:

- cząstki stałe, zawierające sadzę oraz wielorakie toksyczne związki węgla, wodoru i tlenu (aldehydy, akroleina, α-benzopiren),
- tlenki azotu,
- węglowodory, zwłaszcza silnie kancerogenne wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (PAH),
- tlenek węgla,
- tlenki siarki, głównie dwutlenek siarki.

Węglowodory i tlenki azotu są rakotwórcze, a tlenek węgla i dwutlenek siarki – trujące. Dwutlenek siarki, tlenki azotu (głównie NO_2) i węglowodory, gromadząc się w atmosferze wchodzą w reakcje pod wpływem promieniowania słonecznego, tzw. reakcje fotochemiczne, w wyniku których powstaje bardzo groźny dla ludzkiego zdrowia smog [56].

Poza wymienionymi związkami w spalinach silników powstaje dwutlenek węgla CO_2. Związek ten nie jest co prawda toksyczny, można go jednak uznać za niepożądany, gdyż zalicza się do tzw. gazów cieplarnianych. Wzrost jego emisji i kumulacja w atmosferze skutkuje podwyższaniem temperatury Ziemi i zmianami klimatycznymi (efekt cieplarniany). Gazem cieplarnianym jest także podtlenek azotu N_2O, który długi czas zalega w atmosferze.

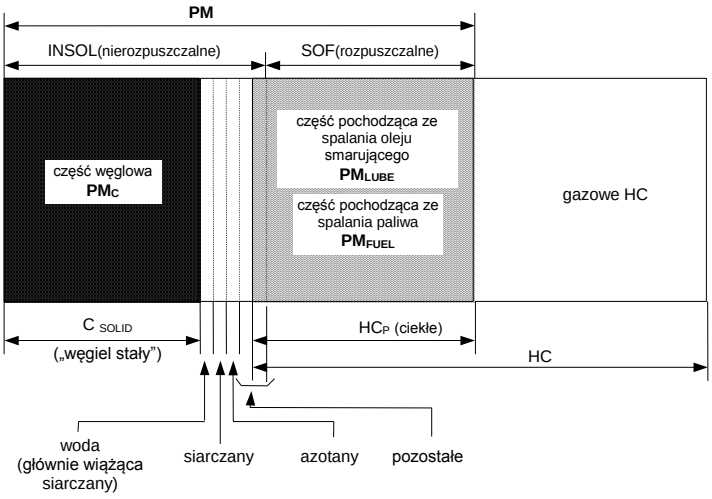
Ogólny pogląd na mechanizmy powstawania związków toksycznych i sadzy w silnikach o zapłonie samoczynnym wiąże ich powstawanie z niejednorodnością składu mieszanki paliwowo-powietrznej. Niejednorodność ta jest spowodowana głównie sposobem dostarczania paliwa, wtryskiem do komory spalania. Poniżej przedstawiono bardziej szczegółowe rozważania dotyczące powstawania najważniejszych związków toksycznych w procesie roboczym silnika.

3.2. Cząstki stałe

Powszechnie za cząstki stałe PM (ang. *particulate matter),* uważa się produkty wydostające się z układu wylotowego silnika w stanie ciekłym lub stałym, w których składzie znajduje się sadza silnikowa, związki siarki i metali, cząstki nieorganiczne oraz cięższe frakcje oleju smarnego i węglowodorów pochodzące z paliwa. Cząstki stałe tym samym nie mają jednoznacznej definicji fizycznej ani chemicznej.

Pod pojęciem cząstek stałych w pomiarach silników spalinowych rozumie się całą materię stałą lub ciekłą, organiczną lub nieorganiczną, która gromadzi się na filtrze absolutnym po przejściu przez niego strumienia rozcieńczonych powietrzem spalin w temperaturze 52±3 °C [59, 81].

W skład cząstek stałych wchodzą dwie podstawowe frakcje (rys. 3.1): nierozpuszczalna INSOL (ang. *Insoluble*) oraz frakcja rozpuszczalna SOF (ang. *Soluble Organic Fraction*). Rozpuszczalną część PM_{SOF} tworzą głównie węglowodory w postaci ciekłej – HC_P, z których część pochodzi z paliwa – PM_{FUEL}, a część z oleju smarującego – PM_{LUBE}. Z kolei głównym składnikiem frakcji nierozpuszczalnej PM_{INSOL} jest węgiel stały w postaci zbliżonej do grafitu C, stanowiący tzw. część węglową cząstki stałej.

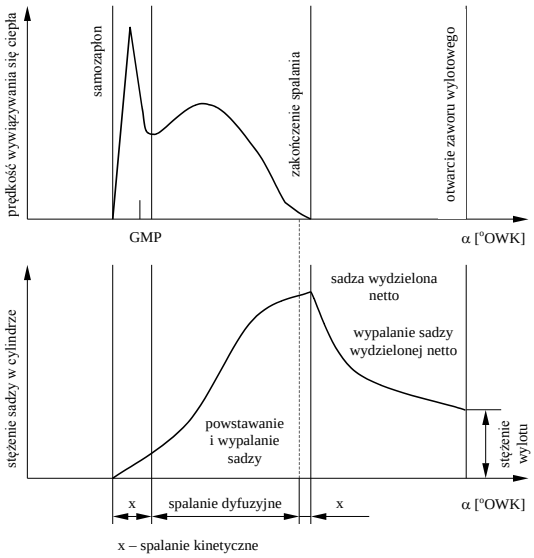


Rys. 3.1. Schemat budowy cząstki stałej [58]

Sadza jest bardzo higroskopijna o czym świadczy jej silnie rozbudowana powierzchnia w stosunku do masy. Struktura powierzchni cząstki sadzy, a także jej rodnikowy charakter, sprzyjają intensywnej absorpcji na niej składników częściowego utleniania paliwa, głównie wielopierścieniowych związków aromatycznych i aldehydów, stanowiących zagrożenie dla organizmu człowieka [56]. Skład tych cząstek jest zależny od paliwa.

Mechanizm powstawania cząstek stałych nie został jeszcze w pełni wyjaśniony. Istnieje jednak kilka wiarygodnych hipotez wyjaśniających sposób jej tworzenia w silnikach spalinowych. Pierwsza faza spalania w silnikach o zapłonie samoczynnym dotyczy mieszaniny o stosunkowo jednorodnym składzie, powstającej w okresie

opóźnienia samozapłonu. W płomieniu kinetycznym wywiązywanie się ciepła przebiega wówczas bardzo szybko i charakteryzuje się niską intensywnością świecenia (spalanie bez wydzielania wolnego węgla). Spalaniu dyfuzyjnemu, czyli kolejnemu etapowi towarzyszy intensywne świecenie, wskazujące na obecność promieniujących cząstek sadzy. Faza ta odgrywa decydującą rolę w procesie tworzenia się sadzy (rys. 3.2) [60]. Występująca w wysokiej temperaturze piroliza cząstek paliwa węglowodorowego powoduje ich termodestrukcję. Rezultatem rozpadu cieplnego jest powstanie węglowodorów nienasyconych, pozbawionych w dużym stopniu wodoru (proces dehydrogenacji – odwodornienia). Oprócz dehydrogenacji zachodzą reakcje pirolityczne, które w procesie spalania paliwa obejmują: kraking (rozpad cząsteczek), polimeryzację (łączenie się wielu prostych cząsteczek w substancje stanowiącą ich wielokrotność, ale mającą odmienne właściwości chemiczne i fizyczne od substancji wyjściowej) i kondensację (łączenie się wielu cząsteczek w jedną większą o odmiennych właściwościach, przy jednoczesnym wydzielaniu się cząsteczek mniejszych). W niższych temperaturach dominują egzotermiczne reakcje polimeryzacji i kondensacji, natomiast w wyższych przeważa rozpad endotermiczny [69, 70]. W procesach tych powstają cząstka sadzy, które tworzą równoległe do powierzchni warstwy. Im cząsteczki sadzy są większe, tym ich wypalanie się w płomieniu jest trudniejsze.

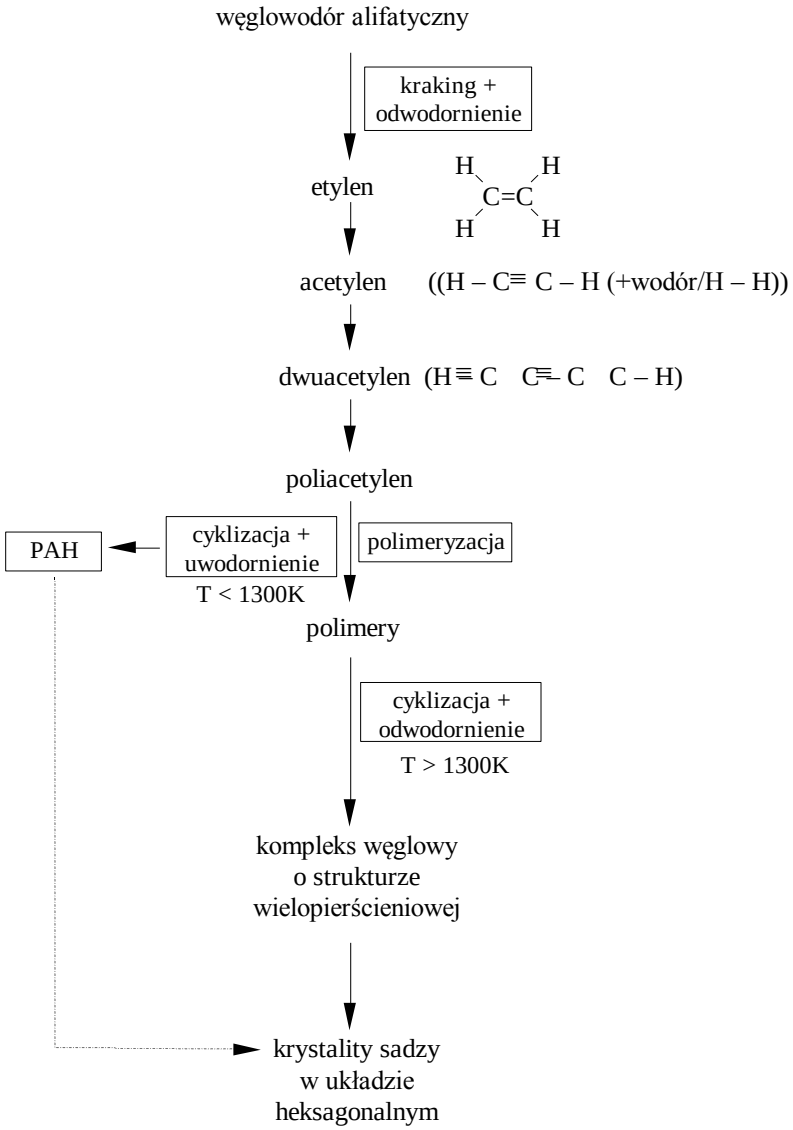


Rys. 3.2. Przebieg wywiązywania się ciepła w cylindrze silnika i zmiana koncentracji sadzy w funkcji kąta obrotu wału korbowego [39]

Większość wyrażanych w literaturze przedmiotu opinii dotyczących formowania sadzy skłania się za przyjęciem mechanizmu jej tworzenia opisanego przez Chakraborty'ego i Longa (rys. 3.3) [35, 58]:

– w wyniku procesów termicznych z cząsteczek paliwa usunięte zostają atomy wodoru (reakcja Portera: $C_nH_m \rightarrow C_nH_{m-1} + 0{,}5\ H_2$). Atomy wodoru powodują dalsze odwodornienie cząsteczki (reakcja Arthura: $C_nH_{m-1} + H \rightarrow C_nH_{m-2} + H_2$). Im łatwiej przebiega usuwanie atomów wodoru w porównaniu ze zrywaniem wiązań węglowych, tym łatwiejsze jest tworzenie się sadzy,

– odwodornione cząsteczki ulegają dalszemu rozpadowi (reakcja $C_nH_m \rightarrow C_2H_6 \rightarrow C_2H_4 \rightarrow C_2H_2$), przy czym acetylen jest ostatnim związkiem przed pojawieniem się sadzy,
– acetylen i inne fragmenty rozłożonych termicznie węglowodorów podlegają polimeryzacji i cyklizacji, a w przypadku wzrostu temperatury dalszemu odwodornieniu, w wyniku których powstają ciężkie kompleksy węglowe o strukturze wielopierścieniowej, będące zarodnikami sadzy.



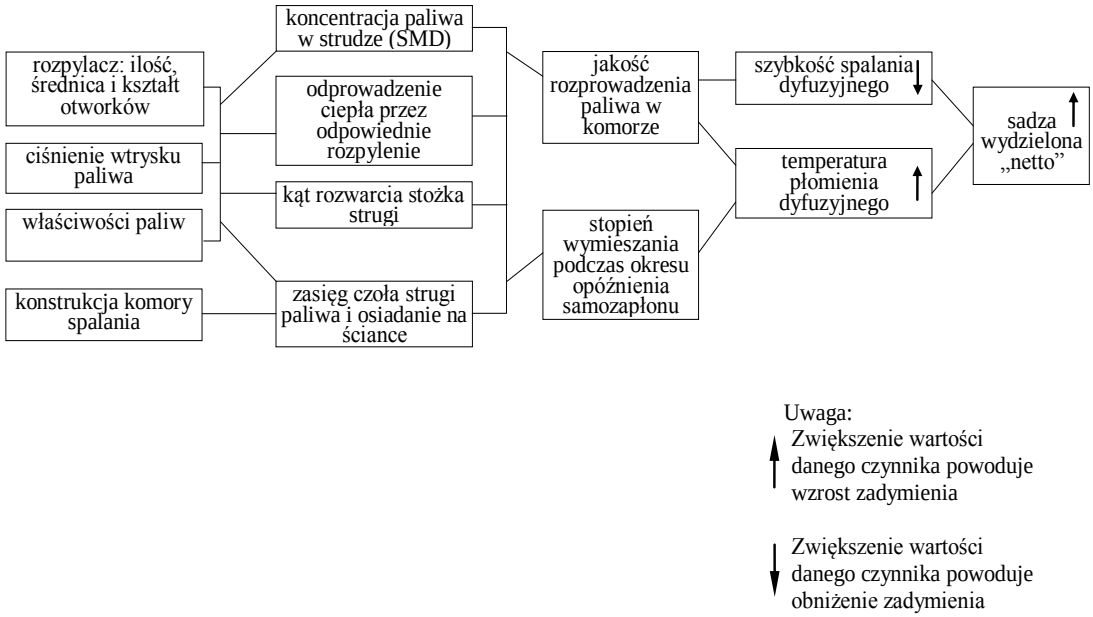
Rys. 3.3. Schemat formowania się sadzy według Chakraborty'ego i Longa [35]

W trakcie trwania procesów silnikowych ilość sadzy ulega zmianie. W etapie spalania dyfuzyjnego następuje jej gwałtowny przyrost do chwili osiągnięcia pewnej wartości maksymalnej (sadza wydzielona netto) występującej w chwili zakończenia spalania. Po osiągnięciu tego poziomu ilość wypalonej sadzy jest większa od liczby powstałych cząstek sadzy. Do chwili otwarcia zaworu wylotowego następuje spadek jej zawartości. Wypalaniu sadzy sprzyja wyższa temperatura, jak również większa koncentracja tlenu. Proces wypalania zostaje przerwany w chwili spadku temperatury.

Według autora pracy [58] istnieje możliwość utlenienia nawet 85 % sadzy wydzielonej netto.

Na ilość wydzielonej w spalinach sadzy wpływ mają czynniki, którymi charakteryzuje się proces wtrysku i spalania paliwa. Najistotniejszą determinantą w tej kwestii jest średnia wartość współczynnika nadmiaru powietrza przy spalaniu skorelowana z ilością paliwa wtryśniętego po samozapłonie. Innym istotnym czynnikiem jest ilość paliwa spalonego w płomieniu dyfuzyjnym.

Na rysunku 3.4 zostały strukturalnie określone zasadnicze czynniki mające wpływ na zadymienie spalin z punktu widzenia aspektów rozpatrywanych w niniejszej pracy. Czytając to zestawienie od strony lewej ku prawej przechodzi się od czynników silnikowych do przeanalizowanych zjawisk fizykochemicznych mających miejsce w komorze spalania.



Rys. 3.4. Najważniejsze czynniki wpływające na zadymienie spalin silnika o zapłonie samoczynnym istotne z punktu widzenia pracy

W pracy [59] sformułowano następujące wnioski, ujmujące reakcje formowania się sadzy na tle procesu spalania w silniku o zapłonie samoczynnym:

– dla danego rodzaju paliwa formowanie się sadzy jest funkcją czasowych zmian stężenia i temperatury nie zmieszanego z powietrzem paliwa; właśnie ta część paliwa podlega reakcjom pirolitycznym i jest źródłem powstającej sadzy,
– uwzględniając warunki fizyczne w różnych fazach procesu spalania w silniku o zapłonie samoczynnym łatwo można stwierdzić, że zarówno okres opóźnienia samozapłonu, jak i okres spalania kinetycznego mieszanki można uznać za nieistotny dla formowania się sadzy. Powstaje ona głównie w okresie spalania dyfuzyjnego; wtedy, gdy spala się paliwo wtryśnięte już do płomienia i trafia na warunki określone przez wysoką temperaturę i brak tlenu.

3.3. Tlenki azotu

Tlenki azotu NO_x powstają w wyniku reakcji tlenu i azotu zawartego w powietrzu pod działaniem wysokiej temperatury występującej w procesie spalania w tłokowym silniku spalinowym [56]. W strefach płomieniach występuje tlenek azotu NO oraz dwutlenek azotu NO_2. Natomiast podtlenek azotu N_2O rozkłada się w temperaturach niższych (850-900 °C), powstaje jedynie w paleniskach fluidalnych.

Dotychczas rozpoznano kilka mechanizmów tworzenia się tlenków azotu w silnikach spalinowych. O przewadze występowania jednego lub też kombinacji wielu z nich decydują warunki pracy w silniku, rodzaj paliwa oraz skład ładunku.

Powstawanie **tlenku azotu NO** opisywane jest za pomocą mechanizmu:

– termicznego, ang. *thermal*,
– szybkiego, ang. *prompt*,
– reakcji azotu zawartego w paliwie.

W mechanizmie termicznym (tzw. rozszerzonym modelu Zeldowicza) źródłem powstawania NO jest reakcja pomiędzy azotem i tlenem z powietrza, zarówno w stanie atomowym, jak i cząsteczkowym. Reakcja odbywa się w wysokiej temperaturze, a jej wydajność jest największa w przypadku zawartości tlenu w mieszaninie gazów palnych zbliżonej do wartości stechiometrycznej. Mechanizm opisują następujące reakcje:

$$O + N_2 <=> NO + N + 314\ kJ \quad (3.1)$$

$$N + O_2 <=> NO + O + 132\ kJ \quad (3.2)$$

$$N + OH <=> NO + H + 127\ kJ \quad (3.3)$$

Dwie pierwsze reakcje zostały sformułowane przez Zeldowicza w 1946 r., trzecią natomiast opisał Lavoie. Tlen atomowy w reakcji pierwszej pochodzi z powietrza, natomiast azot atomowy występujący w reakcji (3.2) i (3.3) jest produktem reakcji (3.8). W związku z powyższym reakcja (3.1) ma dominujący wpływ na szybkość powstawania tlenku węgla. Na rysunku 3.5 przedstawiono przebieg szybkości tworzenia się NO w silniku o zapłonie samoczynnym. Maksymalna emisja tlenku azotu jest zawsze przesunięta w kierunku mieszanek ubogich i silnie zależy od obciążenia silnika, stopnia recyrkulacji spalin, wyprzedzenia zapłonu i wtrysku parametrów, które wpływają na lokalne temperatury. Do obliczeń mieszanin ubogich stechiometrycznych i nieznacznie bogatych w temperaturze poniżej 2 000 K właściwe wyniki daje mechanizm Zeldowicza. Dla mieszanek bogatych decydująca jest reakcja (3.3).

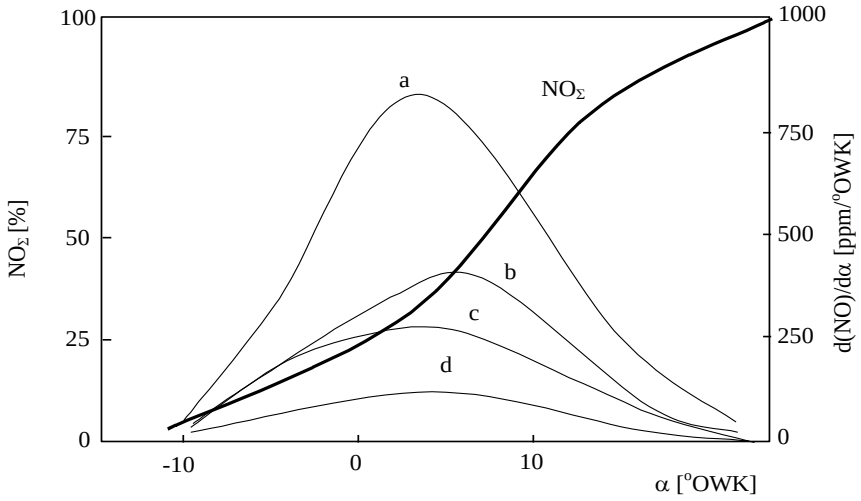
Mechanizm szybki (Fenimorea) ma istotne znaczenie w opisie spalania mieszanek bogatych tworzących dodatkowe ilości NO w obszarach bliskich frontowi płomienia. Tlenek azotu powstaje w wyniku reakcji łańcuchowej zapoczątkowanej szybką reakcją rodników węglowodorowych CH powstałych w reakcjach pośrednich z azotem N_2. Na drodze opisanych reakcji tworzy się cyjanowodór HNC [21, 93]:

$$CH + N_2 \rightarrow HCN + N \quad (3.4)$$

Związki cyjanowe reagują w następnej kolejności z rodnikami O i H, doprowadzając do powstania tlenku węgla w reakcjach:

$$HCN + O <=> NCO + H \quad (3.5)$$

$$NCO + H <=> NH + CO \quad (3.6)$$
$$NH + H <=> N + H_2 \quad (3.7)$$
$$N + OH <=> NO + H \quad (3.8)$$
$$N + NO <=> N_2 + O \quad (3.9)$$



Rys. 3.5. Szybkość tworzenia się NO: a – d(NO)/dα sumaryczna szybkość powstawania NO; b – $d(NO)_1/d\alpha$ według pierwszej reakcji Zeldowicza; c – $d(NO)_2/d\alpha$ według drugiej reakcji Zeldowicza; d – $d(NO)_3/d\alpha$ według reakcji Lavoie; NO_Σ– stężenie sumaryczne [58]

Szybkość powstawania tlenku azotu w opisywanym mechanizmie jest większa niż ta odpowiadająca mechanizmowi Zeldowicza w obszarze gazów popłomiennych. Mechanizm Fenimorea jest o rząd wielkości szybszy i nie zależy tak znacznie od temperatury, jak to ma miejsce w przypadku mechanizmu termicznego (dominuje w temperaturach poniżej 2 000 K). Tym samym znaczenie mechanizmu Zeldowicza rośnie wraz ze wzrostem temperatury reakcji.

Azot występuje również w niektórych paliwach, np. w paliwach pochodzenia roślinnego. Na powstawanie NO z azotu w paliwie duży wpływ mają następujące związki: HCN, CN i NH_i (gdzie i = 1, 2, 3 – amoniak). Udział NO w ogólnej emisji NO_x zwiększa się ze wzrostem udziału paliwa w mieszaninie palnej.

W pracy [59] sformułowano następujące wnioski dotyczące formowania NO:

– NO tzw. „termiczne” powstaje głównie w strefie gazów popłomiennych, a tylko niewielka część całości NO stanowi „szybkie” NO, który powstaje w pierwotnej strefie reakcji,
– w powstawaniu „szybkiego” NO mają udział związki pośrednie HCN, CN i NH; HCN powstaje w pierwotnej strefie reakcji z szybkością osiągającą maksimum dla T_{max} i zanika ze zwiększeniem koncentracji NO,
– rozszerzony model Zeldowicza w wystarczającym stopniu tłumaczy mechanizm tworzenia NO w strefie gazów popłomiennych pod warunkiem uwzględnienia przekroczeń równowagowych rodników i służy on do obliczania stężenia „termicznego” NO przy założeniu równowagi systemu CHO z wyłączeniem NO_2,
– dla mieszanek bardzo bogatych w mechanizmie powstawania NO mają znaczenie głównie związki pośrednie HCN i NH,

– za najbardziej poprawną procedurę określania stężeń rodników O, OH, H i innych przyjmuje się metodę, w której zakłada się cząstkową równowagę systemu H_2-O_2-CO,
– na stężenie NO w spalinach największy wpływ ma temperatura i skład mieszanki.

Dwutlenek azotu NO_2 towarzyszy zwykle tlenkowi azotu NO i przy założeniu, że jest z nim równowadze chemicznej, osiąga znacznie niższe stężenia w stosunku do NO. Tlenek azotu powstający w obszarze gorącego płomienia jest transportowany do stref o niższej temperaturze, gdzie reaguje z występującymi tam rodnikami HO_2:

$$NO + HO_2 <=> NO_2 + OH \quad (3.10)$$

Powstające w wyniku tej reakcji NO_2 jest następnie redukowane z powrotem do tlenku azotu NO w reakcjach z rodnikami H i O:

$$NO_2 + O \rightarrow NO + O_2 \quad (3.11)$$

Reakcje te przebiegają tak długo, aż utworzony NO_2 nie obniży swej temperatury przez zmieszanie z chłodnymi gazami. Schemat ten jest potwierdzany przez stosunek NO_2/NO_x, który w silnikach ZS jest najwyższy przy małych obciążeniach, gdy obszary mogące ułatwić przejście NO_2 w NO są niewielkie, za to istnieje wiele stosunkowo chłodnych stref. W związku z powyższym należy stwierdzić, iż w wysokich temperaturach płomienia NO_2 występuje tylko jako związek przejściowy. Jego pojawienie się w spalinach oznacza, że musiało nastąpić szybkie wygaszanie płomienia np. w wyniku mieszania gorących i zimnych elementów gazu w płomieniu turbulentnym. Dane eksperymentalne wskazują, że udział NO_2 w spalinach silnika ZS może stanowić 10-20 % wszystkich emitowanych związków azotu [49].

3.4. Węglowodory

Węglowodory występujące w spalinach silnikowych oznaczane są w literaturze angielskojęzycznej symbolem HC (ang. *hydrocarbons*), a w literaturze polskiej wskazującym na ich skład symbolem CH. Są to związki węgla i wodoru powstające wskutek niezupełnego (częściowe utlenianie paliwa) i niecałkowitego spalania paliwa. Oprócz składników paliwa niezmienionych przez proces spalania związki te zawierają produkty złożonych reakcji chemicznych pomiędzy węglowodorami. Dotychczas zidentyfikowano ich ponad 250 [61], jednakże szacuje się, że jest ich w spalinach około 1 200 [59]. Po spaleniu ciekłego paliwa w spalinach występują gazowe węglowodory (metan, etan, etylen, acetylen itd.). Inne związki to produkty niezupełnego spalania do których należą aldehydy, ketony, alkohole i kwasy organiczne. Zdecydowaną większość emisji tak pojętych węglowodorów, zwłaszcza w warunkach niedogrzania, stanowią w spalinach silników o ZS aldehydy.

Do głównych przyczyn powodujących niecałkowite spalanie paliw węglowodorowych należy [56]:
– brak tlenu, głównie lokalny ($\lambda < 1$),
– efekt przyścienny i szczelinowy,

– wypadanie zapłonów,
– zużycie oleju smarującego,
– parowanie oleju i paliwa.

W normalnych warunkach pracy silnika o zapłonie samoczynnym globalny niedobór tlenu nie powinien występować. Problemem z niedostatkiem tlenu może być lokalny. W silniku o ZS wynika one głównie z nierównomierności składu mieszanki, co jest efektem sposobu tworzenia mieszaniny palnej przez wtrysk paliwa do cylindra. Zjawiskami sprzyjającymi lokalnym niedoborom tlenu są nieodpowiednie rozpylenie i zawirowanie paliwa. Niedobór globalny zachodzi, gdy w komorze spalania jest zbyt bogata mieszanka, średnia wartość współczynnika nadmiaru powietrza $\lambda < 1$.

Efekt przyścienny występuje, gdy temperatura mieszanki paliwowo-powietrznej w pobliżu ścianek komory spalania jest zbyt mała, aby mogło nastąpić spalanie. Zjawisko to wytłumaczyć można przez dwie teorie dotyczące rozprzestrzeniania się płomienia. Pierwsza z nich mówi, że kolejne warstwy mieszanki są ogrzewane przez ciepło wywiązane w wyniku spalania warstw poprzednich. Jego przekazywanie następuje przez przewodzenie, promieniowanie i dyfuzję gorących spalin do mieszanki i na odwrót. Gaśnięcie następuje wówczas, gdy straty ciepła do ścianek komory są tak duże, że mieszanka w warstwie przyściennej nie osiąga temperatury zapłonu. Druga teoria mówi, że decydujące znaczenie ma stężenie aktywnych cząstek produktów pośrednich spalania. Płomień gaśnie, gdy ich stężenie spada poniżej wartości granicznej, będącej funkcją ciśnienia, temperatury oraz składu mieszanki. Grubość zimnej warstwy przyściennej wynosi 0,05-0,38 mm w zależności od ciśnienia, temperatury i intensywności zawirowań [35].

Ilość węglowodorów występujących w warstwie przyściennej znacznie przewyższa ich poziom zawarty w spalinach. Wynika stąd, że są one utleniane także w czasie suwu rozprężania oraz wylotu. W środkowej części komory spalania stężenie HC jest niewielkie. W trakcie otwierania zaworu wylotowego cylinder opuszcza najpierw niewielka ilość gazów występujących w okolicach zaworu. Przy dalszym otwieraniu wypływają już gazy ze środka cylindra. Przepływ gazów z warstw przyściennych jest hamowany przez tarcie powierzchniowe. W związku z tym pozostająca w cylindrze reszta spalin ma charakter przyścienny, o dużym stężeniu węglowodorów. Spaliny znajdujące się po przeciwnej stronie cylindra (wzdłuż ścianki równoległej do zaworu dolotowego) muszą wypchnąć najpierw gazy z centrum cylindra. Po zamknięciu zaworu wylotowego następuje spadek stężenia za zaworem wylotowym na skutek przepływu zwrotnego gazów w kierunku cylindra w końcu suwu wylotu. Prędkość utleniania w układzie wylotowym zależy w głównej mierze od temperatury [35].

Efekt szczelinowy występuje podczas wygaszania płomienia w wąskich szczelinach, o szerokości mniejszej od wartości krytycznej. Przyczyną zjawiska jest intensywne odprowadzanie ciepła do ścianek. Minimalna szerokość kanału lub średnica przewodu, w którym może przemieszczać się czoło płomienia, nosi nazwę odległości wygaszania. Stężenie węglowodorów pochodzących z tzw. przestrzeni szkodliwej jest wprost proporcjonalne do objętości tych przestrzeni odniesionych do objętości komory spalania [56].

Do przyczyn powodujących powstawanie węglowodorów należy również wypadanie zapłonów. Zjawisko to spowodowane jest czynnikami eksploatacyjnymi i konstrukcyjnymi silnika. Zachodzi głównie podczas zimnego rozruchu i nagrzewania się silnika, gdy zbyt niska temperatura utrudnia samozapłon mieszanki.

Absorpcja par paliwa w warstwie oleju przyczynia się do obniżenia lepkości warstwy powierzchniowej. W wyniku tego, podczas suwu wylotu, następuje porywanie drobin przez gazy spalinowe. Nad powierzchnią warstwy oleju pojawi się, w wyniku desorpcji, mgła olejowo-paliwowa, która jest źródłem niespalonych węglowodorów [35]. Emisja węglowodorów wynikająca z opisanego mechanizmu zależy od grubości i temperatury warstwy oleju na gładzi cylindra. Tym samym zużycie oleju smarującego jest silnie skorelowane ze stężeniem związków toksycznych występujących w spalinach, głównie węglowodorów, co wiąże się ze wzrostem emisji.

Pod wpływem wysokich temperatur gazów następuje rozpad (piroliza) lub przebudowa (pirosynteza) struktur węglowodorowych par oleju. Proces ten niekorzystnie wpływa na stopień szkodliwości emitowanych związków. W wyniku zjawisk pirolizy i pirosyntezy powstają ciężkie węglowodory aromatyczne PAC (Polycyclic Aromatic Compounds), do których zalicza się wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne PAH (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons) i węglowodory heterocykliczne. Dalsze formowanie emitowanych węglowodorów może nastąpić w układzie wylotowym. Część desorbowanych par oleju trafia w zimne strefy przestrzeni nad tłokiem. Niska temperatura gazów spalinowych i nieznaczna zawartość w nich tlenu powodują wylot nieprzebudowanych łańcuchów węglowodorowych.

Procesom pirolizy podlegają w silniku związki węglowodorowe pochodzące z paliwa i oleju smarującego. Udział PAH powstałych przy niecałkowitym spalaniu paliwa, w całkowitej masie emitowanych PAH, jest znacznie mniejszy niż udział PAH pochodzący od spalania oleju smarującego, mogą one także występować już pierwotnie w paliwie lub oleju [35].

Emisja PAH jest niewielka – około kilku mikrogramów na kilometr [59]. Ich tworzenie następuje równolegle z powstawaniem sadzy. Wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne biorą następnie udział w tworzeniu cząstek stałych.

3.5. Tlenek węgla

Tlenek węgla tworzy się głównie na skutek niedoboru tlenu, globalnego lub lokalnego. Ze względu na specyfikę pracy silnika o zapłonie samoczynnym niedobór globalny nie powinien występować w normalnych warunkach pracy. Powstawanie tlenku węgla przebiega według reakcji:

$$C_nH_m + \frac{n}{2}O_2 \rightarrow nCO + \frac{m}{2}H_2 \tag{3.12}$$

Poza brakiem tlenu z chemicznego punktu widzenia CO powstaje w wyniku:

- niskotemperaturowego utleniania węglowodorów w zimnym i niebieskim płomieniu,
- rozpadu aldehydów,

– dysocjacji CO_2 w wysokich temperaturach.

Powstanie tego związku wywołane może być niedostatecznym rozpyleniem i odparowaniem paliwa ciekłego, na co decydujący wpływ ma działanie aparatury wtryskowej. Istotne jest tu ciśnienie wtrysku i odpowiednie zawirowanie w komorze spalania. Na wzrost ilości CO w spalinach wpływa również zbyt niska temperatura procesu spalania.

W pierwszym etapie spalania poziom CO w strefie płomienia gwałtownie wzrasta i jest dużo wyższy niż dla adiabatycznego spalania mieszanki paliwowo-powietrznej. Jednak CO powstaje głównie w strefie gazów popłomiennych, gdzie osiąga stężenie równowagowe, a szybkość jego tworzenia jest największa.

Powstawanie CO jest jedną z podstawowych reakcji spalania paliwa węglowodorowego. Mechanizm ten opisują reakcje [36]:

$$RH \rightarrow R \rightarrow RO_2 \rightarrow RCHO \rightarrow RCO \rightarrow CO \tag{3.13}$$

Powstały w wyniku reakcji (3.20) CO jest następnie utleniane do CO_2 w znacznie wolniejszym tempie. Zasadnicza reakcja utleniania CO jest następująca:

$$CO + OH \rightarrow CO_2 + H \tag{3.14}$$

i jest ściśle związana z mechanizmem utleniania wodoru:

$$H + O_2 \rightarrow OH + O \tag{3.15}$$

Utlenianie CO w obecności pary wodnej odbywa się przy współudziale NO:

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 \tag{3.16}$$
$$2NO + 2H_2 \rightarrow N_2 + 2H_2O \tag{3.17}$$

W redukcyjnych procesach często obserwuje się reakcje rozpadu tlenku węgla:

$$2CO \rightarrow CO_2 + C \tag{3.18}$$

W badaniach opisanych w [60] stwierdzono, że w okresie spalania reakcje utleniania CO są wystarczająco szybkie, aby być stale w równowadze. Jedynie podczas późniejszych etapów suwu rozprężania teoria przewiduje, że tworzenie CO odchodzi od stanu równowagi i w rezultacie utlenienia do CO_2. Dowiedziono ponadto, iż spalone gazy nie są jednolite pod względem temperatury. Proces wylotu spalin, któremu towarzyszy spadek temperatury, zajmuje znaczną część cyklu. Dlatego prędkości zmiany temperatury i ciśnienia części ładunku o różnej lokalizacji w cylindrze różnią się w zależności od tego, kiedy wydostają się z cylindra i wchodzą do kolektora wylotowego.

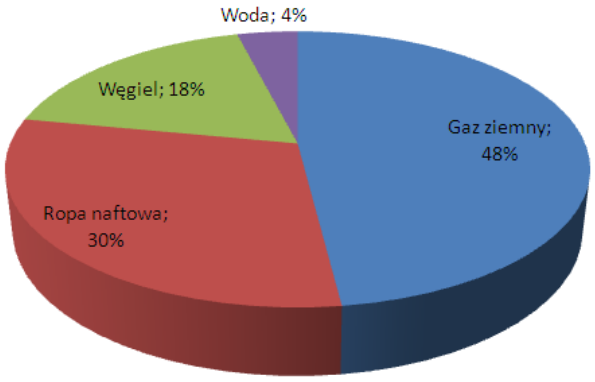
Dla bogatych mieszanek przeciętne stężenia CO w spalinach są podczas procesu rozprężania bliskie stanowi równowagi. W przypadku mieszanek o składzie zbliżonym do stechiometrycznego, przewidywania co do częściowego stanu równowagi reakcji tworzenia CO są zgodne z danymi uzyskiwanymi z pomiarów i są o rząd wielkości wyższe niż przewidywane, według modeli opartych na kinetycznych mechanizmach procesu. Różnica ta wynika z częściowego utleniania ładunku do CO podczas

rozprężania i wylotu, przy obecności niespalonych węglowodorów osiadających na ściankach komory spalania i cylindra [35].

4. Właściwości wodoru w porównaniu z olejem napędowym

4.1. Technologie wytwarzania wodoru

Wodór w wolnej postaci zarówno w skorupie ziemskiej, jak i w atmosferze występuje w śladowych ilościach i nie można go wydobywać, jak ma to miejsce w przypadku paliw konwencjonalnych. Otrzymuje się go w wyniku rozpadu związków, których jest składnikiem i obecnie do celów przemysłowych jest on pozyskiwany z naturalnych surowców energetycznych (rys. 4.1).



Rys. 4.1. Udział surowców naturalnych w przemysłowym wytwarzaniu wodoru [44]

Reforming (w przypadku paliw stałych zwany też gazyfikacją) jest chemicznym procesem oddziaływania na paliwa węglowodorowe w obecności pary wodnej, tlenu lub obu tych związków jednocześnie wraz z dostarczeniem ciepła, celem uzyskania strumienia gazów (reformantów) bogatych w wodór [17, 94]. Urządzenia służące do tego procesu zwane są reformerami. Skład strumienia reformantów zależny jest od rodzaju użytego paliwa oraz zastosowanej metody, ale zawsze oprócz wodoru są tam azot, dwutlenek i tlenek węgla oraz resztki paliwa, które nie wzięły udziału w reakcji.

Metodami przemysłowymi pozyskiwania tego związku są [87]:

– ***reforming parowy metanu lub innych węglowodorów małocząsteczkowych***.

Podstawowymi surowcami do tego procesu są: metan, gaz ziemny, LPG lub benzyna. Wodór powstaje w wyniku działania na związki węglowodorowe parą wodną o podwyższonej temperaturze i w obecności katalizatorów niklowych. W wyniku szeregu reakcji uzyskuje się gaz syntezowy będący mieszaniną: H_2, CO, CO_2 i śladowych ilości CH_4 i H_2O. Następnym krokiem jest przetworzenie gazu syntezowego w wyniku reformingu uzyskując półprodukt o zawartości do 76 % wodoru cząsteczkowego. Ostatnim krokiem jest usunięcie ditlenku węgla. Ostatecznie uzyskuje się wodór o czystości 95-98 % V/V.

Ocenia się, że obecnie na świecie pracuje ok. 150 większych i mniejszych instalacji wytwarzających wodór tą metodą, którego czystość jest wyjątkowo wysoka i wynosi 95-98 %.

– ***Odzysk wodoru z gazowych produktów przetwarzania ropy naftowej i węgla.***

W zależności od pochodzenia półproduktu który może różnić składem oraz zanieczyszczeniem w przemyśle stosowane są trzy metody do pozyskania wodoru z takiego surowca. Pierwszym sposobem jest proces adsorpcyjny PSA (*Preasure Swing Adsorption*). Metoda ta wykorzystuje małą reaktywność wodoru. Polega ona na przepuszczeniu strumienia gazu zawierającego w przedziale 70-90 % V/V wodoru pod ciśnieniem 10–40 bar w temperaturze 20-40^{o}C przez warstwę absorbentu, który stanowi granulki wykonane z wąsko porowatego zeolitu. Na skutek przetłaczania gazu przez złoże zeolitu następuję adsorpcja węglowodorów w tym złożu. Otrzymany gaz zawiera około 9-99,9 % czystego wodoru [87]. Innym sposobem odzysku wodoru jest metoda niskotemperaturowa wykorzystująca niską temperaturę wrzenia wodoru. Poprzez ochładzanie gazu następuje przemiana fazowa i wykroplenie węglowodorów stanowiących zanieczyszczenie gazu. Proces jest prowadzony w temperaturze od –153^{o}C do –173^{o}C. Czystość wodoru uzyskana w tej metodzie przekracza 95 % V/V H_2. Ostatnim znaczącym sposobem przemysłowego oczyszczania wodoru jest metoda dyfuzyjna wykorzystująca zjawisko „przenikania" wodoru przez membrany palladowe. W wyniku dysocjacji cząsteczki wodoru na powierzchni membrany następuje jej rozpad. Tak rozłożona cząsteczka podlega jonizacji, która w postaci protonu przenika przez membranę. Po przejściu przez membranę proton przyłącza elektron i tworzy atom wodoru. Tak powstałe atomy tworzą cząsteczki. Proces przebiega w temperaturze 300-700^{o}C przy ciśnieniu 10-15 bar.

– ***Częściowe utlenianie pozostałości rafineryjnych.***

W obecności pary wodnej w temperaturze oscylującej 1250-1600^{o}C i pod ciśnieniem 150 bar jest wykonywany niecałkowite utlenianie węglowodorów zachodzące według reakcji:

$$2CH_n + O_2 \rightarrow 2CO + nH_2 \qquad (4.1)$$

W wyniku przebiegu reakcji otrzymuje się gaz syntezowy, który po oczyszczeniu metodą PSA pozwala na uzyskanie wodoru o czystości 99,9 %.

– ***Zgazowywanie węgla.***

Proces ten polega na działaniu parą wodną na rozżarzony koks o temperaturze 1000-1200^{o}C prowadząc do powstania gazu wodnego (CO + H_2) [5]. Następnie powstały gaz jest poddany konwersji przy użyciu pary wodnej w obecności katalizatora. Proces przebiega w temperaturze 300-450^{o}C.

– ***Elektrolityczny rozkład wody.***

Pod wpływem energii elektrycznej następuje rozpad cząsteczki wody na wodór cząsteczkowy H_2 (elektroda katodowa) i tlen cząsteczkowy O_2 (elektroda anodowa). Proces ten przebiega według poniższych reakcji:

reakcja na katodzie: $2H_2O + 2e \rightarrow H_2 + 2\ OH,$ (4.2)

reakcja na anodzie: $4\ OH^- \rightarrow O_2 + 2H_2O + 4e.$ (4.3)

Proces ten jest realizowany w urządzeniu nazywanym elektrolizerem. Składa się on z dwóch elektrod anody i katody, na których następuje wydzielanie poszczególnych produktów reakcji. Czynnikiem podlegającym rozpadowi jest oczywiście woda, jednak ze względu na jej małą przewodność właściwą (wynoszącą $3{,}8 \cdot 10^{-6}$ [1/Ω·m])

wystąpiłyby duże straty energii w elektrolizerze spowodowane wysokim udziałem składowej omowej IR w ogólnym spadku napięcia na zaciskach elektrolizera. Z tego powodu stosuje się roztwór wodny powstały na bazie kwasów lub soli. Najczęściej stosowane są roztwory 16-18 % NaOH i 25-29 % KOH. Elektrody w elektrolizerach przemysłowych są wykonywane z niklu lub niklowego żelaza (elektroda katodowa), oraz z niklu lub spineli (elektroda anodowa). Wydajność katodowa wydzielania wodoru jest wysoka i może osiągać 98 %. Dlatego uzyskiwany wodór gazowy charakteryzuje się wysokim stopniem czystości [17]. Niestety sprawność cieplna obecnie stosownych elektrolizerów nie jest jeszcze zadawalająca, ponieważ wynosi ona zaledwie 27 %.

Przemysłowe sposoby produkcji wodoru mają różną sprawność energetyczną procesu, która wpływa na cenę jego produkcji. Również ważnym aspektem jest ekologiczność danej metody, a w szczególności emisja CO_2 do atmosfery. W tym aspekcie bezkonkurencyjna jest metoda elektrolizy wody, jednak energia elektryczna do napędu tego procesu musi pochodzić ze źródeł odnawialnych. Wybrane parametry produkcji wodoru określonymi metodami przedstawiono w tabeli 4.1.

Tabela 4.1. Parametry wytwarzania wodoru różnymi metodami [87]

Lp.	Parametr	Reforming parowy metanu	Gazyfikacja gudronu	Gazyfikacja węgla	Elektroliza wody
1	Surowiec	Gaz ziemny	Gudron	Węgiel	Woda
2	Sprawność cieplna [%]	78,5	76,8	63,2	27,2
3	Produkty uboczne	para	siarka	siarka	tlen
4	Względny koszt inwestycyjne	1,00	2,22	3,43	1,43
5	Względne koszty produkcji	1,00	1,52	2,11	3,19

Najnowsze badania przeprowadzone w Zakładzie Paliw, Biopaliw i Środków Smarnych Przemysłowego Instytutu Motoryzacji w Warszawie ukierunkowane zostały na wytwarzanie biowodoru w procesie reformingu bioetanolu pod ciśnieniem atmosferycznym w przedziale temperatur 400-600°C [94]. W analizowanym artykule energia pozyskiwana jest przez wykorzystanie entalpii spalin wylotowych z konwertera katalitycznego na pokładzie samochodu. Ocenie poddano 3 katalizatory z grupy metali przejściowych na nośnikach tlenkowych. W przypadku TMC 3/1 i Ni/kordierycie (Corning Celcor®) zastosowano nośniki złożone z dwóch i trzech tlenków. Katalizator $Cu/ZnO/Al_2O_3$ nie wykazał wystarczającej selektywności w kierunku wodoru w zaproponowanych warunkach. Uzyskane wyniki stanowią natomiast potwierdzenie dobrych własności niklu jako katalizatora w badanym procesie. Zastosowanie Ni/Al_2O_3 w temperaturze 460^{o}C pozwoliło uzyskać 100 % konwersję etanolu i selektywność na poziomie 75 % w kierunku wodoru. Konwersję 100% oraz selektywność wynoszącą 44 % w 460^{o}C osiągnięto stosując katalizator niklowy naniesiony na kordieryt.

Z powyższego wynika, że głównym źródłem surowca oraz energii dla przemysłowych metod produkcji wodoru są nadal konwencjonalne paliwa węglowodorowe. Dlatego przyczyniają się one do zanieczyszczenia atmosfery poprzez

emisję związków szkodliwych. Metody te pozwalają na sterowanie procesem produkcji wodoru, jednak ciągle dąży się do tego, aby paliwo wodorowe było w pełni ekologiczne i nie przyczyniało się do degradacji środowiska również podczas jego wytwarzania. Takie dążenia przyczyniają się do powstawania nowych alternatywnych metod wytwarzania wodoru, które będą wykorzystywały energię pochodzącą ze źródeł odnawialnych w postaci energii słonecznej, siły wiatru i wody. Natomiast surowcami podlegającymi rozpadowi powinny być woda i biomasa, aby zapewnić zerową emisję CO_2 lub chociażby zamknięty obieg tego szkodliwego związku.

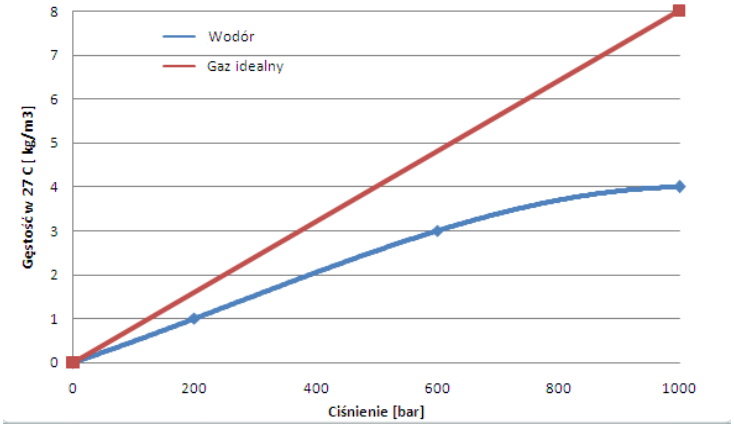
Do alternatywnych sposobów można zaliczyć metody oparte na termochemicznym rozpadzie metanu lub siarkowodoru przy wykorzystaniu skupionej energii słonecznej. Innymi metodami są metody biologiczne do których zalicza się metody fermentacyjne. Zaletą fermentacji jest prostota procesu oraz duża różnorodność surowców które można wykorzystać do tego procesu. Wadami natomiast są uzyskiwanie gazu o zawartości około 50 % H_2 V/V, co wymaga dalszej obróbki gazu. Instalacja bioreaktora do ciemnej fermentacji musi mieć pojemność od 300 do 560 l co dyskwalifikuje tę metodę do zastosowań trakcyjnych. Inną metodą biologiczną jest fotoliza bezpośrednia, która pozwala otrzymywanie wodoru prosto z wody za sprawą bakterii z wykorzystaniem energii światła słonecznego. Jednak reaktory do produkcji dostatecznej ilości wodoru były by o dwa rzędy większe od reaktorów do ciemnej fermentacji [17], jednak badania wskazują, że metoda ta wymaga jeszcze rozwoju. Metody biologiczne stanowią rozwiązania stacjonarne, jednak z racji wysokiego poziomu ekologiczności są atrakcyjne. Wymagają one jednak magazynowania produktu ich reakcji i odpowiedniej jego obróbki w celu zastosowania do napędu pojazdów.

4.2. Właściwości fizyczne i chemiczne wodoru

Wodór jest najlżejszym i najbardziej rozpowszechnionym pierwiastkiem we wszechświecie. Przewiduje się, że stanowi on 92,7 % atomów we wszechświecie, następny jest hel stanowiący 7,2 %, a pozostałe pierwiastki stanowią zaledwie 0,1 %. W postaci wolnej w skorupie ziemskiej wodór występuję w śladowej ilości stanowiącej 0,15 %. W atmosferze ziemskiej jest go jeszcze mniej bo 0,1 ppm. Niemal nieograniczone złoża wodoru znajdą się w formie związanej z innymi pierwiastkami. Stanowią je woda, węglowodory, substancje organiczne, organizmy żywe i związki nieorganiczne. Istnieje wiele możliwości pozyskania wodoru z tego typu związków, lecz są one obłożone bardziej lub mniej korzystnym bilansem energetycznym. W rozumieniu energetycznym wodór jest postrzegany jako sposobów transportowania energii jednak przetwarzanie go w maszynach cieplnych spowodowało przyłączenie go do rodziny paliw na równi z gazem ziemnym, benzyna czy też olejem napędowym.

Oprócz zastosowania wodoru jako nośnika energii jest on używany w przemyśle rafineryjnym i petrochemicznym oraz służy do syntezy wielu związków m.in. amoniaku, metanolu, wyższych alkoholi, kwasu solnego, eterów i wielu innych materiałów. Ponadto izotop wodory – deuter w (postaci związanej z tlenem) jest wykorzystywany jako moderator i chłodziwo w energetyce jądrowej.

Wodór posiada najwyższą ze wszystkich pierwiastków przewodność cieplną wynoszącą 0,1745 W/(m·K), oraz ciepło właściwe o wartości 14,195 kJ/(kg·K) (w 273 K). W porównaniu do konwencjonalnych paliw dysponuje najwyższą wartość energii w odniesieniu do jednostki masy równą 121 MJ/kg (dla przykładu – węgiel 25 MJ/kg, benzyna 47 MJ/kg). W stosunku do jednostki objętości, z powodu małej gęstości w stanie gazowym (273 K, 1013 hPa) wynoszącej 0,089 kg/m^3, jego wartość energetyczna nie jest już imponująca i wynosi 10,7 MJ/m^3 [87]. Gęstość wodoru można zwiększyć podnosząc jego ciśnienie. Jednak przyrost ten nie jest tak znaczny jak mogło by to miejsce w przypadku gazu doskonałego i przedstawiono tę różnicę na wykresie (rys 4.2).



Rys. 4.2. Zależność gęstości wodoru gazowego od ciśnienia (w temperaturze 27^{o}C) [43]

Z tego powodu pożądane jest zastosowanie wodoru w postaci płynnej o gęstość 70,8 kg/m^3. Jednak niska temperatura skraplania wynosząca -253^{o}C stwarza znaczne problemy techniczne w zastosowaniu i magazynowaniu wodoru w postaci ciekłej. Innymi przeszkodami stosowania wodoru jest jego zdolność dyfundowania przez gumę, materiały porowate i w podwyższonej temperaturze przez stal co znacznie utrudnia jego magazynowanie oraz przyczynia się do niszczenia korozyjnego materiałów.

Cząsteczki wodoru mają dwie postacie, orto-wodór i para-wodór. O różnicy pomiędzy tymi formami decyduje spin atomów. Orto-wodór posiada spiny atomów zorientowane równolegle, w przeciwieństwie do para-wodoru gdzie spiny te są zorientowane nierównolegle. Różnica w położeniu spinów wpływa na zróżnicowanie właściwości fizycznych i termodynamicznych wodoru, które przedstawiono w tabeli 4.2, przy zachowaniu identycznych własności chemicznych. W warunkach otoczenia wodór gazowy składa się z 75 % orto-wodoru. Wraz z obniżaniem temperatury gazu ilość para-wodoru rośnie i przy temperaturze –200^{o}C zawartość obydwóch form się wyrównuje, natomiast w temperaturze zera bezwzględnego niemal w całości występuje para-wodór [87].

W zależności od temperatury w warunkach ciśnienia otoczenia wodór występuje w trzech różnych stanach skupienia:

– gaz – powyżej temperatury wrzenia 20 K,
– ciecz – w temperaturze 14-20 K,
– ciało stałe – w temperaturze poniżej 14 K.

Tabela 4.2. Porównanie własności para-wodoru i wodoru gazowego w warunkach otoczenia [87]

Lp.	Właściwości	Wodór	
		Para-wodór	75%orto - wodoru + 25% para-wodoru
1	Gęstość w 273 K [10^3mol/cm^3]	0,05459	0,04460
2	Współczynnik ściśliwości w 273 K, Z =pV/RT	1,0005	1,00042
3	Ściśliwość adiabatyczna w 300 K [MPa^{-1}]	7,12	7,03
4	Współczynnik ekspansji objętościowej w 300 K [K^{-1}]	0,00333	0,00333
5	C_p w 273K [J/mol·K]	30,35	28,59
6	C_v w 273K [J/mol·K]	21,87	20,30
7	Entalpia w 273 K [J/mol]	7656,6	7749,2
8	Energia wewnętrzna w 273 K [J/mol]	5384,5	5477,1
9	Entropia w 273 K, [J/mol·K]	127,77	139,59
10	Szybkość rozchodzenia się dźwięku w 273 K [m/s]	1246	1246
11	Lepkość w 273 K [mPa·S]	0,00839	0,00839
12	Przewodnictwo cieplne w 273 K [MW/cm·K]	1,841	1,740
13	Stała dielektryczna w 273 K	1,00027	1,000271
14	Ściśliwość izotermiczna w 300 K [MPa]	-9,86	-9,86
15	Ciepło dysocjacji w 298,16 K [kJ/mol]	435,935	435,881

Posiada on bardzo wąski zakres stanu ciekłego. Aby poszerzyć ten zakres należy podnieść ciśnienie w zbiorniku, w którym wodór ma być przechowywany. Działanie tego typu nie przynosi jednak oczekiwanego rezultatu, jak ma to miejsce w przypadku innych gazów. Zwiększenie ciśnienia o 130 bar powoduje podniesienie temperatury wrzenia zaledwie o 13 K i wynosi ona 33 K. Dalszy wzrost ciśnienia nie powoduje już wzrostu temperatury wrzenia. Porównanie parametrów wodoru w różnych stanach skupienie przedstawiono w tabeli 4.3.

Tabela 4.3. Parametry stanu skupienia wodoru [87]

Lp.	Parametry	Wartość
1	Temperatura wrzenia (1 atm) [K (^{o}C)	20 (–253)
2	Temperatura krystalizacji (1 atm) [K (^{o}C)]	14 (–259)
3	Gęstość gazu w temperaturze 20 ^{o}C (1 atm) [kg/m^3]	0,08376
4	Gęstość cieczy w temperaturze wrzenia (1 atm) [kg/m^3]	70,8
5	Gęstość kryształów w temp. kryst. (1 atm) [kg/m^3]	88,0
6	Objętość właściwa gazu w 20 ^{o}C (1 atm) [m^3/kg]	11,9
7	Objętość właściwa cieczy w -253 ^{o}C (1 atm) [m^3/kg]	0,014
8	Gęstość względna gazu (względem powietrza)	0,0696
9	Gęstość względna cieczy (względem wody)	0,0708
10	Współczynniki ekspansji ciecz-gaz w 20 ^{o}C (1atm) [l/l]	1:848
11	Współczynnik rozprężania (od 250 do 1atm) [l/l]	1:240

12	Współczynnik zawartości H_2 w cieczy [kg/m^3]	
	• wodór ciekły	71
	• woda	111
	• metanol	100

Wodór gazowy występuje w cząsteczkach dwuatomowych jako H_2. Posiada on trzy stabilne izotopy: wodór H o liczbie masowej równej 1, deuter D o liczbie masowej 2 oraz niestabilny izotop tryt T o liczbie masowej 3 i czasie połowicznego rozpadu równym 12 lat. Jądro wodoru składa się z pojedynczego protonu, jądro deuteru z protonu i neutronu, natomiast w skład jądra trytu wchodzą proton i dwa neutrony. Każdy z trzech izotopów ma po jednym elektronie. Produktem rozpadu trytu T jest $3H_e$.

W rozumieniu chemicznym cząsteczka wodoru jest bardzo stabilna, ponieważ energia jej wiązania wynosi 436 kJ/mol. Przyczynia się to do małej reaktywności tej cząsteczki w warunkach normalnych. W warunkach podwyższonej temperatury lub obecności katalizatora reaguje on z wieloma pierwiastkami tworząc kwasy, zasady, sole, różnorodne połączenia organiczne, związki metaloorganiczne, wodorki itp. Wodór reaguje z wieloma związkami o pośredniej elektroujemności, takimi jak: halogenki, metale alkaiczne, metalami przejściowymi i innymi. Z gazami reaguje bardzo gwałtownie z wydzieleniem dużej ilości energii. Z fluorem reaguje wybuchowo w temperaturze pokojowe, z chlorem w wyniku działania światła o długości fali 480 nm, z tlenem łączy się w sposób wybuchowy przy zawartości H_2 od 4 % do 74 % V/V.

4.3. Właściwości wodoru jako paliwa

W silnikach o zapłonie samoczynnym uzyskujemy znacznie wyższe wartości sprawności cieplnej, niż w silnikach o zapłonie iskrowym. Kiedy sprawność cieplna silników o ZI osiąga wartości rzędu 23-25 %, to dla silników o ZS wynosi ona 43-46 % [38, 43, 46, 86]. W stosowanych aktualnie w silnikach o zapłonie samoczynnym sterowanych elektronicznie zasobnikowych układach zasilania typu Common Rail, uzyskujemy znaczne mniejsze zużycia paliwa w stosunku do silników o zapłonie iskrowym. Odpowiednio dla silników o ZS kształtuje się to na poziomie 170-180 [g/kW·h], natomiast w silnikach o Zl wynosi to ok. 200-210 [g/kW·h]. Sprawność i funkcjonalność silników o zapłonie samoczynnym zależy w zasadniczym stopniu od rodzaju i właściwości zastosowanego paliwa. Determinuje ono bowiem jakość tworzonej mieszanki, opóźnienie samozapłonu, przebieg procesu spalania, a co za tym idzie generowane są parametry operacyjne i ekologiczne silnika [43].

Podstawowym paliwem do silników o zapłonie samoczynnym jest olej napędowy, będący mieszaniną węglowodorów, które mają temperaturę wrzenia w granicach 150-380°C. Skład węglowodorowy olejów napędowych zależy od parametrów ropy naftowej, z której je wytworzono, a także, od zastosowanego procesu technologicznego. Właściwości oleju napędowego różnią się zasadniczo od paliw benzynowych. Przydatność oleju napędowego do spalania w silnikach o zapłonie samoczynnym określa: liczba cetanowa, gęstość, lepkość, właściwości niskotemperaturowe, ciepło spalania, temperatura wrzenia i inne [27, 28, 96].

Ostatnie lata, dotyczące badań nad alternatywnymi źródłami energii do środków transportu, charakteryzuj się znacznymi osiągnięciami w tym zakresie. Potwierdzono przydatność do zasilania silników o ZS olejów roślinnych (głównie oleju rzepakowego), szczególnie w formie dodatków do oleju napędowego w dość szerokich udziałach objętościowych. Prowadzone są również prace nad stosowaniem węglowodorowych paliw gazowych jako dodatków oraz odnośnie biogazu pozyskiwanego z odpadów organicznych [94]. W tabeli 4.4 podano podstawowe właściwości oleju napędowego, oleju roślinnego oraz wodoru (brakujące wartości są trudne do ustalenia z dostępnej literatury).

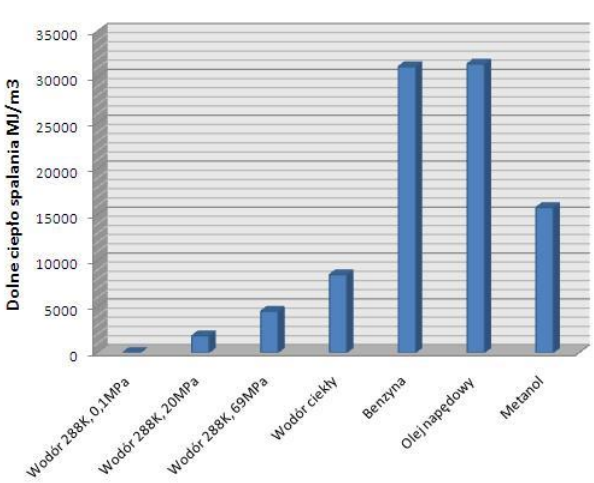
Tabela 4.4. Charakterystyka oleju napędowego, oleju roślinnego i wodoru [43]

Lp.	Właściwości	Olej napędowy	Olej roślinny	Wodór
1	Gęstość [kg/m^3]	840	917	82
2	Dolna wartość opałowa [MJ/kg]	42,3	39,8	119,8
3	Szybkość płomienia [m/s]	0,3	-	2,7
4	Liczba cetanowa	45-55	40-45	-
5	Temperatura samozapłonu [^{o}C]	280	-	585
6	Pozostałość po koksowaniu	0,1	0,6	0,0

W wyniku spalania wodoru z tlenem otrzymuje się wodę i energię. Zaletą tego procesu jest powstawanie związków nieszkodliwych dla środowiska naturalnego, czego nie spotyka się w przypadku paliw węglowodorowych. Energia uzyskana w procesie utleniania po zmierzeniu pozwala na wyznaczenie górnego i dolnego źródła ciepła spalania. Różnica między tymi wartościami stanowi ciepło odparowania, które stanowi część energii potrzebnej do zamiany paliwa ze stanu ciekłego w stan gazowy i zamianę ciała stałego w ciecz. Wartości dolnego i górnego ciepła spalania zestawiono w tabeli 4.5

Tabela 4.5. Ciepło spalania wodoru i paliw silnikowych [87]

Lp.	Paliwo	Górne ciepło spalania (25 ^{o}C, 0,1MPa) [kJ/g]	Dolne ciepło spalania (25 ^{o}C, 0,1MPa) [kJ/g]
1	Wodór	141,86	119,93
2	Metan	55,53	50,02
3	Propan	50,36	45,60
4	Benzyna	47,50	44,50
5	Olej napędowy	44,80	42,50
6	Metanol	19,96	18,05



Rys. 4.3. Zestawienie ilości energii w zależność od stanu skupienia dla różnych paliw

Z powyższego wynika, że wodór ma największy stosunek energii do masy, co sprawia, że jest on bardzo atrakcyjnym paliwem. Ponadto duże ciepło spalania powoduje, że siła eksplozji wodoru jest 2,5 razy większa, niż popularnych paliw węglowodorowych. Niska gęstość wodoru przyczynia się do niskiej gęstości energetycznej tego paliwa, co sprawia duże problemy z magazynowaniem dostatecznej ilości energii w pojeździe. Zestawienie ilości energii w zależność od stanu skupienia paliw gazowych i płynnych przedstawiono na rysunku 4.3.

Wodór posiada szeroki **zakres palności** od 4 do 75 % objętości wodoru w powietrzu, który poszerza się wraz ze wzrostem temperatury. Pozytywną cechą wodoru jest fakt, że dolna granica palności wodoru wynosi ok. 4 %, natomiast dla odparowanego oleju napędowego tylko 0,6 %. Oznacza to większą odporność wodoru przed wybuchem przy małych stężeniach w mieszance z powietrzem [43]. Szeroki zakres palności jest zaletą tego paliwa, jednak posiada on jeszcze szerszy **zakres wybuchowości** zawierający się w granicach od 15 do 95 % V/V, co przysparza trudności w bezpiecznym eksploatowaniu tego paliwa.

Temperatura zapłonu paliw jest zawsze niższa od temperatury wrzenia i dla wodoru wynosi -253^{o}C. Wielkość energii potrzebnej do zainicjowania procesu spalania wyrażona jest **energią zapłonu**. Dla wodoru energia ta jest o rząd wielkości mniejsza w stosunku do konwencjonalnych paliw i wynosi 0,02 mJ. Oznacza to, że inicjatorem zapłonu może być niewidzialna iskra, a nawet elektryczność statyczna ciała ludzkiego w warunkach suchych [29, 32]. Kolejnym parametrem jest **szybkość spalania**, która stanowi prędkość z jaką płomień przesuwa się przez palną mieszaninę gazów. W przypadku wodoru mieści się ona w przedziale od 2,65-3,25 m/s. Wodór jak wszystkie paliwa konwencjonalne posiada temperaturę w której nastąpi jego spalanie bez udziału obcego źródła ciepła. Temperatura ta, określana nazwą **temperatury samozapłonu**, która dla wodoru wynosi 585^{o}C. Warunki, w jakich może istnieć i propagować otwarty płomień w mieszance paliwowo-powietrznej jest ograniczony przez **odległość krytyczną propagacji płomienia**. Wartością opisującą tę wielkość jest szerokość szczeliny, która dla mieszaniny wodoru z powietrzem w warunkach normalnych wynosi 0,6 mm (dla konwencjonalnych paliw szerokość szczeliny równa

się 2 mm). Przyczyną tego zjawiska jest ochłodzenie płomienia poprzez ścianki szczeliny [1].

Parametrem charakteryzującym jest również teoretyczne zapotrzebowanie powietrza przy stechiometrycznym spalaniu wodoru. Wartość tę można wyznaczyć na podstawie równania (4.4) spalania wodoru z tlenem:

$$2\ H_2 + O_2 = 2\ H_2O \qquad 4.4$$

Liczba moli H_2 przy spalaniu całkowitym	2 mole
Liczba moli O_2 przy spalaniu całkowitym	1 mol
Liczba moli N_2 w powietrzu	1 mol O_2 · (79% N_2 w pow./ 21% O_2 w pow.) = 3,762 mole N_2
Liczba moli powietrza na 1 mol tlenu	mol O_2 + mol N_2 = 1 + 3,762 = 4,762
Masa O_2	1 mol O_2 · 32 g/mol = 32 g
Masa N_2	3,762 mole N_2 · 28 g/mol = 105,33 g
Masa molowa powietrza	32 g + 105,33 g = 137,33 g
Masa H_2	2 mole H_2 · 2g/mol = 4 g

Stechiometryczny stosunek powietrze/paliwo wynosi:

– masowo 137,33 g / 4 g = 34,33:1
– objętościowo 4,762 / 2 = 2,4:1

Wartość zapotrzebowania powietrza dla wodoru jest dwukrotnie większa, a niżeli dla paliw konwencjonalnych, która dla oleju napędowego wynosi w zależności od składu 14,4-14,7:1. Oznacza to, że układ dolotowy silnika zasilanego wodorem powinien być przystosowany do możliwości dostarczenia większej ilości powietrza, aby zapewnić stechiometryczny proces spalania.

Istotnym parametrem charakteryzującym odporność wodoru na spalanie stukowe jest **liczba oktanowa**. Wyróżnia się dwa typy tej liczby, które wynikają z różnych warunków jej wyznaczania. Pierwsza to liczba oktanowa badawcza LOB, której wyznaczenie odbywa się na przystosowanym silniku badawczym przy stałej prędkości obrotowej wynoszącej 600 obr/min. Wartość ta odzwierciedla odporność paliwa na spalanie stukowe podczas pracy silnika na obciążeniach częściowych. Dla wodoru wartość LOB wynosi 130 jednostek [78]. Wielkością opisującą odporność paliwa na spalanie stukowe w warunkach dużych obciążeń silnika jest liczba oktanowa motorowa LOM. Liczba ta jest wyznaczana na tym samym stanowisku co LOB jednak przy prędkości obrotowej silnika równej 900 obr/min. Zmierzona wielkość tej liczby wynosi 70-88 jednostek [33]. Przyczyną rozbieżności między tymi liczbami jest charakterystyka spalania wodoru, który ma tendencje do generowania fali ciśnienia o dużej amplitudzie, oraz może ulegać niekontrolowanemu zapłonowi powierzchniowemu [37, 41].

Ważnym parametrem charakteryzującym procesu spalania zachodzącego w silniku spalinowym jest prędkość spalania. W przypadku mieszanki wodorowo-powietrznej prędkości spalania są dużo wyższe niż np. mieszanki benzynowo-powietrznej lub metanowo-powietrznej. Przedstawione w tabeli 4.6 wartości prędkości spalania dla tych mieszanek jednoznacznie wskazują na przewagę mieszanki

z zawartością wodoru [11, 15, 31]. Przedziały wartości podane w tabeli wynikają z cech geometrycznych komory spalania, temperatur mieszanin doprowadzonych do cylindra, prędkości obrotowej silnika itp.

Tabela 4.6. Prędkość spalania dla różnych paliw w mieszance z powietrzem [43]

Paliwo	Wodór	Benzyna	Metan
Prędkość spalania [m/s]	2,65-3,25	0,37-0,43	0,37-0,45

Prędkość spalania, w ujęciu zjawiska fizycznego, jest prędkością przesuwania się frontu płomienia w przestrzeni komory spalania. Konsekwencje tak znacznej prędkości spalania dla mieszanki wodoru z powietrzem skutkują dużą skłonnością do spalania stukowego, co niekorzystnie wpływa na trwałość elementów silnika, głównie układu tłokowo-korbowego [43].

Ponadto w procesie spalania wodoru należy wyróżnić kilka bardzo istotnych właściwości, a mianowicie:

- wysoką sprawność spalania przy małej energii inicjacji zapłonu,
- dużą wartość energii spalania,
- wysoką wartość opałową,
- sprawniejsze spalanie od innych paliw,
- ekologiczność dla środowiska (produktem spalania jest woda),
- odwracalność w procesie spalania (pozyskiwany z wody po spaleniu wraca ponownie do tej postaci).

W rzeczywistości spalanie wodoru ma charakter reakcji łańcuchowej, złożonej z wielu reakcji elementarnych, które zachodzą współbieżnie [39]:

$$\left.\begin{array}{l} O_2 \rightarrow 2O \\ O + H_2 \rightarrow OH + H \\ OH + H_2 \rightarrow H_2O + H \\ H + O_2 \rightarrow OH + O \\ H + O_2 \rightarrow H\,O_2 \\ H\,O_2 + H_2 \rightarrow H_2O + OH \end{array}\right\} \quad (4.5)$$

Mieszanina gazowa wodoru z tlenem (zwana też piorunującą) jest substancją wybuchową (2:1 objętościowo, 1:8 wagowo). Po jej zapaleniu następuje gwałtowne spalanie wodoru, a produktem reakcji jest woda. Reakcje spalania wodoru w tym przypadku, w zależności od stanu skupienia otrzymanego produktu, można opisać następującymi równaniami sumarycznymi [43]:

$$2H_{2(g)} + O_{2(g)} \text{ -> } 2H_2O_{(C)}; \qquad \Delta H = -286{,}02 \text{ kJ/mol } H_2O \quad (4.6)$$

$$2H_{2(g)} + O_{2(g)} \text{ -> } 2H_2O_{(g)}; \qquad \Delta H = -286{,}02 \text{ kJ/mol } H_2O \quad (4.7)$$

Mieszaninę piorunują wodór-tlen można otrzymać przez połączenie gazów uzyskanych w wyniku elektrolizy wody. Mieszanina wodór-tlen o tym samym składzie, co mieszanina piorunująca powstaje również podczas rozkładu wody w wysokiej

temperaturze. W takim wypadku nie jest to jednak mieszanina wybuchowa, gdyż podczas schładzania wodór i tlen przereagowują ze sobą, tworząc ponownie wodę.

Uwzględniając powyższe oraz masy molowe wodoru, tlenu i azotu można wyznaczyć masową ilość powietrza niezbędną do spalenia l g wodoru. Okazuje się, że do spalenia l g wodoru należy dostarczyć 34 g powietrza. Dokonując podobnego przeliczenia dla l g oleju napędowego uzyskamy wartość znacznie mniejszą która wynosi tylko 14,6 g powietrza. Wynika stąd istotne spostrzeżenie, że w przypadku silników spalinowych zasilanych wodorem układy doprowadzające powietrze do cylindra muszą być bardziej wydajne niż zasilane olejem napędowym [43].

Podsumowując wodór ma wiele zalet jako paliwa do których należą:

- duża zdolność do zapłonu ze względu na małą energię potrzebną do zapłonu,
- duża szybkość spalania mieszanki wodorowej,
- duży współczynnik dyfuzji H_2 w powietrzu, dzięki czemu łatwo tworzy jednorodną mieszankę,
- szerokie granice palności mieszanki dzięki czemu można stosować jakościową regulację mocy.

Niestety posiada on również zasadnicze wady, mogące sprawiać trudności w jego eksploatowaniu:

- dużą skłonność do spalania stukowego wywołana niska liczba oktanowa,
- małą odległość krytyczna propagacji płomienia, która przy dużych nieszczelnościach zaworów w silniku tłokowym (w sprawnym silniku nieszczelność zaworów może wynosić 0,4 mm) może przyczynić się do cofania się płomienia do kanału dolotowego,
- dużą reaktywność z metalami powodując korozyjne niszczenie materiałów,
- zdolność do chemicznego rozkładu oleju smarnego,
- małą gęstość energetyczna,
- generowanie pulsacji ciśnienia, obniżające liczbę oktanową,
- trudności z panowaniem nad procesem spalania wywołane zapłonem powierzchniowym i tendencją do spalania stukowego,
- trudności z przechowywaniem.

5. Problem badawczy

5.1. Cel i teza pracy

W celu sprostania pojawiającym się z coraz większą częstotliwością nowym normom toksyczności spalin, stale poszukuje się rozwiązań, komponentów i paliw alternatywnych wpływających na zmniejszenie zużycia paliwa i emisję spalin oraz poprawę osiągów jednostek napędowych o zapłonie samoczynnym.

Zakładane w pracy badania miały na celu analizę możliwości obniżenia emisji związków szkodliwych w silnikach o zapłonie samoczynnym zasilanych mieszaniną paliwa konwencjonalnego z wodorem. W koncepcji badań przyjęto minimalizację zmian konstrukcyjnych klasycznego silnika spalinowego, umożliwiając realizację założonego zadania –współspalanie z wodorem i wodoru z innymi gazami palnymi dostarczanymi do kanału dolotowego, nie rezygnując z takich cech silnika. jak wysoki stopień sprężania i zapłon samoczynny, które to cechy są niezbędne dla uzyskania wysokiej sprawności i małego zużycia paliwa.

Przyjęto następujące tezy pomocnicze:

- silniki wewnętrznego spalania zasilane paliwem konwencjonalnym i wodorem cechuje znacząco niższa emisja związków szkodliwych w stosunku do silników zasilanych wyłącznie paliwem konwencjonalnym,
- zastosowanie wtrysku paliwa konwencjonalnego do mieszanki powietrzno-wodorowej poprawia podstawowe wskaźniki pracy silnika spalinowego, parametry procesu spalania i prowadzi do zmniejszenia zużycia oleju napędowego,
- dostarczenie wodoru z powietrzem do komory spalania i spalanie w nim oleju napędowego związane jest ze wzrostem energii wewnętrznej roztworu, której uwalnianie podczas wtrysku paliwa do komory spalania powoduje poprawę procesu rozpylania paliwa oraz jego szybsze odparowanie,
- dobór możliwie maksymalnego udziału energetycznego paliwa alternatywnego – wodoru,
- efektem wtrysku oleju napędowego do mieszanki powietrzno–wodorowej jest skrócenie czasu opóźnienia samozapłonu oraz zmniejszenie prędkości wydzielania się ciepła na początku spalania,
- wykorzystanie wodoru, jako źródła współzasilania silnika spalinowego prowadzi do zwiększenia emisji NOx.

Powyższe spostrzeżenia stały się podstawą do sformułowania głównego celu pracy, którym jest:

Określenie wpływu dodatku wodoru do paliwa konwencjonalnego na poprawę wskaźników ekologicznych i parametrów pracy silnika o zapłonie samoczynnym

Podjęcie tego zagadnienia w niniejszej pracy było spowodowane niewystarczającą wiedzą o wpływie samego dodatku wodoru i przebiegu procesu spalania oleju napędowego w mieszance powietrzno-wodorowej w komorze spalania silnika o zapłonie samoczynnym. Ponadto związki przyczynowo-skutkowe wynikające

z przeprowadzonej i opisanej w powyższych rozdziałach analizy procesu roboczego silnika oraz ogólnej koncepcji wspomagania mechanizmu współspalania wodoru i gazów palnych z olejem napędowym upoważniają do sformułowania tezy głównej niniejszej dysertacji:

Możliwa jest poprawa wskaźników ekologicznych silników o zapłonie samoczynnym zasilanych paliwami konwencjonalnymi z domieszką wodoru przy zachowaniu osiągów porównywalnych z osiągami silnika o zapłonie samoczynnym

Skrócenie okresu opóźnienia samozapłonu wywołane lepszym rozpyleniem uzyskanym przez uwalnianie się energii wodoru i oleju napędowego spowoduje zwiększenie szybkości parowania i mieszania par paliwa z powietrzem, a zatem i szybkości spalania w płomieniu dyfuzyjnym. Efekt ten sprzyja ograniczeniu emitowanej sadzy, głównie przez intensyfikację jej wypalania. Jednocześnie jednak, na skutek skrócenia okresu opóźnienia samozapłonu nastąpić może wzrost maksymalnego ciśnienia w cylindrze wywołanym wzrostem temperatury czynnika w cylindrze i w konsekwencji wzrostem emisji tlenków azotu. Jednak na podstawie analiz teoretycznych trudno jest przewidzieć superpozycję wszystkich efektów wtrysku oleju napędowego z dodatkiem wodoru do komory spalania silnika o zapłonie samoczynnym.

Niniejsza praca rozszerzy zagadnienia wcześniejszych opracowań o następujące zagadnienia:

- wyznaczenie i analizę zmian energetycznych procesu sprężania czystego paliwa i paliwa z dodatkiem wodoru i innych gazów palnych,
- analizę zmian fizykochemicznych paliwa z dodatkiem wodoru i innych gazów palnych,
- analizę szybkości wywiązywania się ciepła,
- analizę ilości ciepła przejętego przez czynnik roboczy,
- wyznaczenie stężeń poszczególnych składników toksycznych emitowanych przez jednostkę napędową w wyniku spalania czystego oleju napędowego i paliwa z dodatkiem wodoru i innych gazów palnych.

Celami badań prowadzonych w ramach tej pracy były:

1) weryfikacja tezy głównej;
2) potwierdzenie słuszności sformułowanych tez pomocniczych przez dokonanie oceny oraz interpretacji zjawisk towarzyszących procesowi współspalania wodoru z olejem napędowym;
3) ustalenie ilościowych zależności potrzebnych do analizy wielkości termodynamicznych procesu spalania na podstawie przebiegu wywiązywania się ciepła.

Jako podstawowe kryterium oceny weryfikowanej koncepcji przyjęto wartości parametrów opisujących procesy zachodzące podczas wtrysku i spalania. Wartości tych parametrów uzyskiwane dla oleju napędowego spalanego w mieszaninie wodorowo-powietrznej w porównaniu do wartości tych samych parametrów uzyskanych dla wtrysku i spalania konwencjonalnego oleju napędowego pozwalają ocenić skutki zastosowania badanej, nowej koncepcji sposobu zasilania. Analiza porównawcza

wyników pomiarów wybranych wskaźników pozwoliła na oceną poprawności doboru wartości nastawczych układu i wrażliwości tych wskaźników na zmiany ich wartości.

Analizą objęto wybrane wielkości termodynamiczne procesu spalania w silniku o zapłonie samoczynnym. Podstawowymi wwielkościami opisującymi wielkości termodynamiczne procesu spalania w silniku są m.in.: zmiany ciśnienia w cylindrze podczas obiegu pracy, przebieg wywiązywania się ciepła oraz emisja stężeń szkodliwych składników spalin.

5.2. Sposób rozwiązania zadania badawczego

Weryfikacja sformułowanych wyżej tez pracy wymagała rozpoznania zjawisk fizycznych ściśle związanych z zagadnieniem współspalania paliw gazowych z paliwami ciekłymi, wtrysku paliw gazowych i oleju napędowego oraz procesów termodynamicznych związanych z procesem spalania w silniku o zapłonie samoczynnym.

W celu uzasadnienia sformułowanych tez badawczych zbudowano laboratoryjną wersję układu zasilania, który pozwolił na realizowanie procesu współspalania oleju napędowego w mieszance powietrznej wzbogaconej o dodatek wodoru i innych gazów palnych.

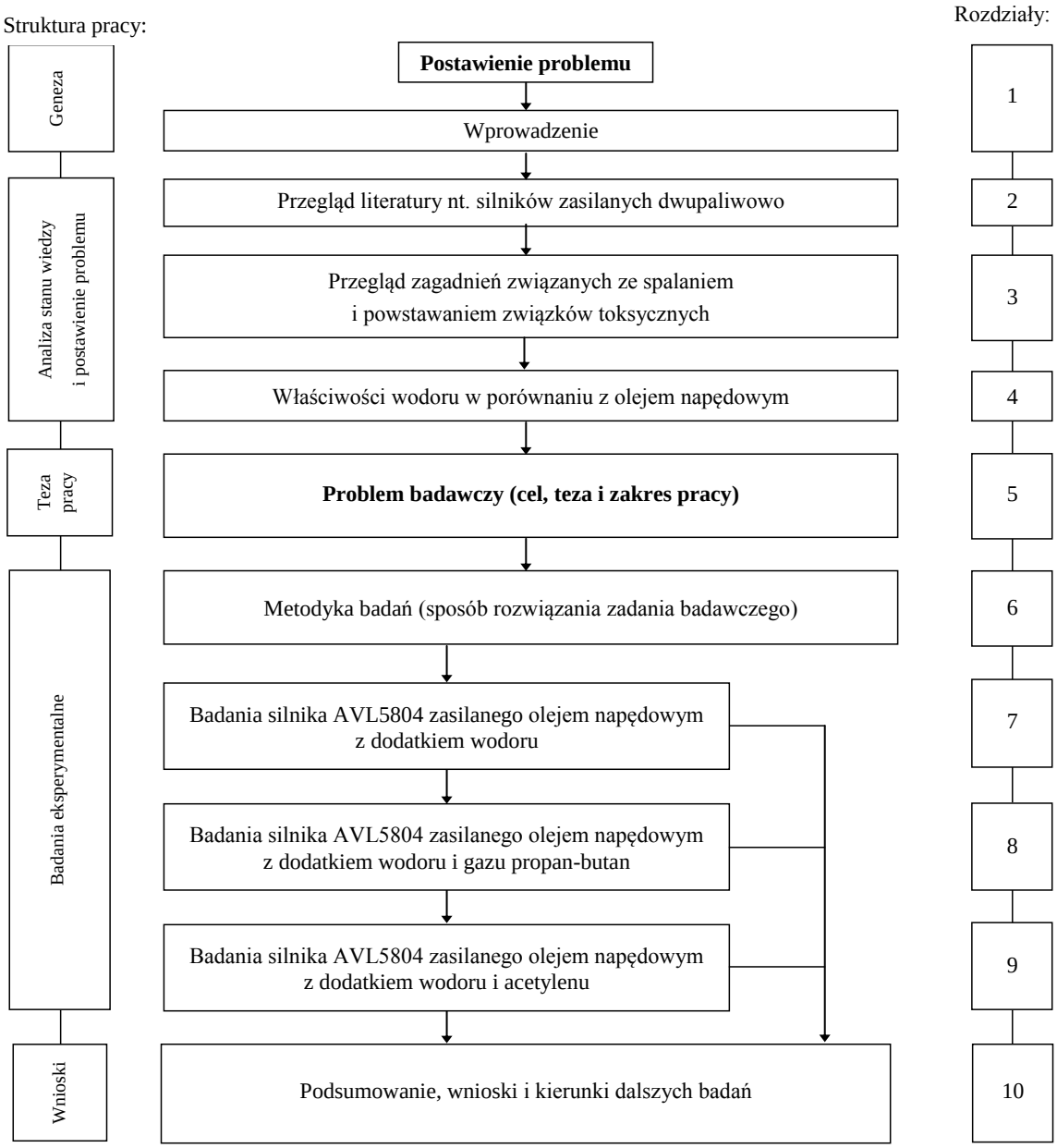
Przy ocenie wpływu wtrysku paliwa właściwego do mieszaniny powietrzno-wodorowej na wskaźniki pracy silnika wykorzystano silnikowe stanowisko hamowniane wyposażone w rozbudowane układy kontrolno-pomiarowe. Badania silnikowe służyły do analizy wybranych wielkości termodynamicznych procesu spalania silnika o zapłonie samoczynnym zasilanego olejem napędowym i olejem napędowym spalanym w mieszaninie powietrza wzbogaconej dodatkiem wodoru i innych gazów palnych. Badania wykonano dla silnika spalinowego AVL 5804 zasilanego konwencjonalnym układem wtryskowym typu *common rail* oraz układem, którym umożliwiał dostarczenie wodoru i innych gazów do kanału dolotowego. Analizę wykonano na podstawie wyników pomiarów zmian wielkości szybkozmiennych oraz pomiarów stężeń składników szkodliwych zawartych w gazach wylotowych.

Po zrealizowaniu w całości założonego planu eksperymentu przeprowadzono analizę uzyskanych wyników, która umożliwiła sformułowanie odpowiedzi na postawione pytania badawcze oraz ustosunkowanie się do postawionych tez pracy.

Realizacja postawionego celu pracy wymagała również:

- analizy uzyskanych przebiegów silnikowych wielkości szybkozmiennych,
- wyznaczenia i analizy wskaźników pracy silnika spalinowego,
- analizy uzyskanych wyników wartości stężeń związków szkodliwych spalin.

Schemat postępowania przyjęty w pracy przedstawiono na rysunku 5.1.



Rys. 5.1. Schemat rozwiązania postawionego celu naukowego pracy

6. Metodyka badań

6.1. Obiekt badań

Badania wykonano na silnikowym stanowisku hamulcowym. Dzięki wykorzystaniu silnika badawczego AVL 5804 możliwe było określenie wpływu dodatku do kanału dolotowego wodoru i innych gazów palnych na procesy cieplne silnika spalinowego. Wykonano także pomiar stężenia związków toksycznych spalin emitowanych przez jednostkę napędową w wyniku współspalania wodoru z olejem napędowym przy użyciu konwencjonalnego wtryskiwacza z rozpylaczem 6-otworkowym. Wykorzystane na tym etapie badań stanowisko składało się z kilku głównych części:

- silnika badawczy AVL 5804 z hamulcem prądnicowym asynchronicznym AMK ASYN typ DW13-170-4-AOW,
- układu zasilania paliwem Common Rail IV generacji,
- układu zasilania paliwa gazowego – wodór oraz acetylen i LPG,
- systemu elektronicznego sterowania układem badawczym,
- systemu AVL INDISET 620 do rejestracji przebiegów szybkozmiennych.

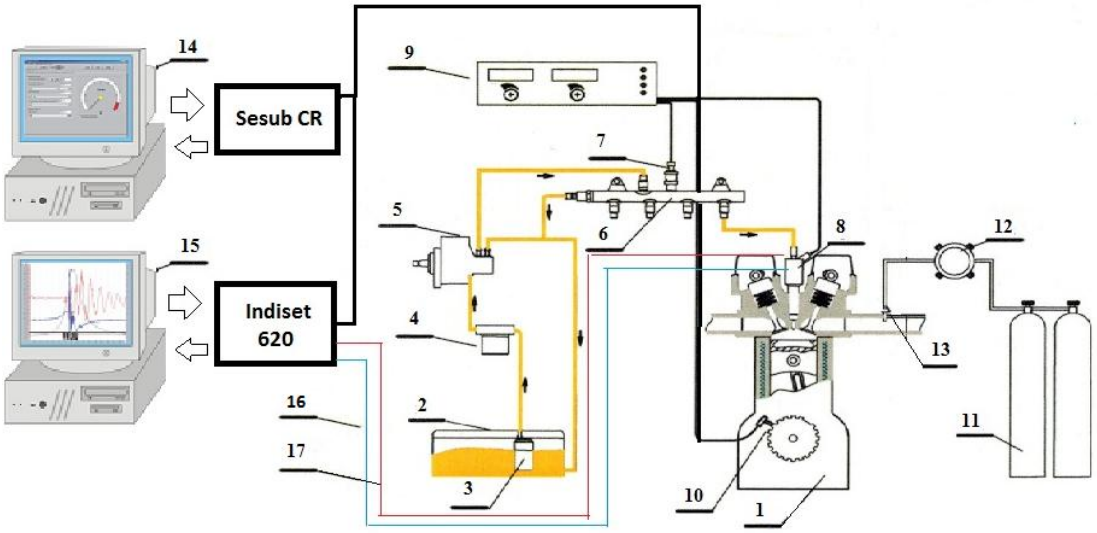
Pierwsza zasadnicza część wchodząca w skład stanowiska to silnik badawczy AVL 5804 z hamulcem prądnicowym asynchronicznym (rys. 6.1b). Jest to jednocylindrowy silnik o zapłonie samoczynnym z bezpośrednim wtryskiem paliwa. Komora spalania silnika AVL 5804 umieszczona jest w tłoku [8], natomiast jej kształt został dostosowany do centralnie umieszczonego wtryskiwacza. Objętość komory w tłoku wraz z wnękami zaworowymi wynosi 23,63 cm^3. Czas trwania wtrysku oraz kąt wyprzedzenia wtrysku są w silniku dowolnie regulowane z poziomu komputera PC (rys. 6.1a). Za pomocą dedykowanego programu komputerowego istnieje możliwość zmiany nastawy dawki paliwa. Dodatkowo istnieje możliwość zmiany kąta wyprzedzenia wtrysku, może on być regulowany co 1 ºOWK. Rysunek 6.1 przedstawia schemat stanowiska badawczego wykorzystanego podczas badań silnikowych.



Rys. 6.1. Widok stanowiska badawczego wykorzystanego w badaniach silnikowych:
(a) pulpit sterujący, (b) silnik badawczy oraz aparatura pomiarowa

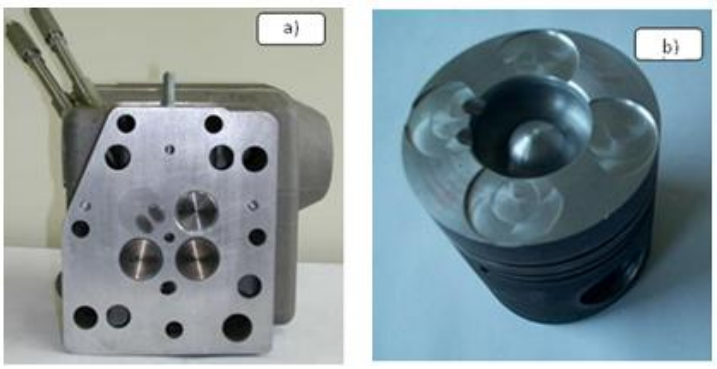
Dodatkowo silnik badawczy AVL 5804 przystosowany jest do badań indykatorowych oraz do pomiarów emisji toksycznych składników spalin. Parametry

pracy silnika tj.: prędkość obrotowa oraz obciążenie zadawane są hamulcem elektrycznym AMK. Hamulec prądnicowy charakteryzuje się tym, że może pracować w dwóch trybach pracy [92, 105]. W pierwszym trybie spełnia on swoje podstawowe zadanie – służy do zadawania obciążenia dla pracującego silnika spalinowego, tzw. „hamowania silnika". W tym trybie hamulec pracuje jako prądnica. Natomiast drugi tryb pracy pozwala na zewnętrzny napęd silnika spalinowego, w tym trybie hamulec pracuje jako silnik elektryczny. Podstawowe parametry hamulca przy nominalnym napięciu zasilania przedstawiono w tabeli 6.2.



Rys. 6.2. Schemat stanowiska badawczego wykorzystanego w badaniach silnikowych: 1 – Silnik AVL 5804, 2 – Zbiornik ON, 3 – Pompa niskiego ciśnienia, 4 – Filtr paliwa, 5 – Pompa wysokiego ciśnienia, 6 – Szyna CR common rail, 7 – Czujnik ciśnienia ON w szynie, 8 – Wtryskiwacz CR, 9 – Sterownik CR, 10 – Czujnik położenia wału korbowego, 11 – butle z H_2, C_2H_2 i LPG, 12 – Reduktor z zaworem jednokierunkowym, 13 – układ zasilania wodorem i gazami palnymi, 14 – Komputer sterujący pracą silnika, 15 – komputery rejestrujący przebieg badań indykatorowych, 16 – sygnał z czujnika ciśnienia indykowania, 17 – sygnał z czujnika ciśnienia paliwa

Silnik AVL 5804 jest jednocylindrowym silnikiem wyposażonym w cztero zaworową głowicę z dwoma wałkami rozrządu. Widok głowicy oraz tłoka silnika przedstawiono na rysunku 6.3. Podstawowe parametry silnika badawczego AVL 5804 zostały zaprezentowane w tabeli 6.1.



Rys. 6.3. Podzespoły silnika AVL 5804: głowica (a) i tłok (b)

Tabela 6.1. Parametry silnika badawczego AVL 5804

Lp.	Parametr	Symbol	Wielkość	Jednostka
1	Pojemność skokowa	V_s	510,7	cm^3
2	Średnica cylindra	D	85	mm
3	Skok tłoka	S	90	mm
4	Objętość komory spalania	V_k	23,63	cm^3
5	Stopień sprężania	ε	19,9	–
6	Moc maksymalna	$N_{e\ max}$	16 przy 4200 obr/min	kW
7	Moment obrotowy	$M_{o\ max}$	53 przy 2000 obr/min	N·m
8	Średnie ciśnienie użyteczne w wersji doładowanej	p_e	1,22 przy 2000 obr/min	MPa
9	Jednostkowe zużycie paliwa przy $M_{o\ max}$	g_e	251	g/(kW·h)
10	Jednostkowe zużycie paliwa	g_e	287 przy mocy znamionowej	g/(kW·h)
11	Maksymalna prędkość obrotowa	n_{max}	5000	obr/min
12	Maksymalne ciśnienie w cylindrze	p_{max}	15,0	MPa

W warunkach pracy stanowiska badawczego, gdy zachodzi konieczność utrzymania stałej wartości prędkości obrotowej silnika spalinowego, niezależnie od ilości paliwa dostarczanej do spalania w cylindrze, hamulec może pracować na przemian w obu trybach pracy, w zależności od energii wytwarzanej przez silnik spalinowy (tab. 6.2.). W momencie, kiedy energia pochodząca z procesu spalania paliwa w cylindrze silnika jest na tyle duża, aby pokonać opory ruchu przy ustalonej prędkości obrotowej i napęd ze źródła zewnętrznego nie jest potrzebny, to hamulec samoczynnie przechodzi z trybu pracy jako silnik elektryczny w fazę pracy, jako hamulec prądnicowy. Zmianę trybu pracy zauważyć można na wskaźniku momentu obrotowego. W sytuacji pracy hamulca jako silnik elektryczny na wskaźniku wyświetlana jest ujemna wartość momentu obrotowego, a kiedy pracuje jako hamulec prądnicowy, moment obrotowy przyjmuje wartości dodatnie.

Tabela 6.2. Parametry hamulca przy nominalnym napięciu zasilania

Lp.	Parametr	Wielkość	Jednostka
1	Napięcie zasilania	350	V
2	Nominalne natężenie prądu	80	A
3	Moment obrotowy	120	N·m
4	Moc znamionowa	39	kW
5	Prędkość maksymalna	9000	obr/min

Stanowisko jest dodatkowo wyposażone w zewnętrzny układ stabilizacji temperatury cieczy chłodzącej silnika i oleju smarującego AVL 577. W jego skład wchodzą:

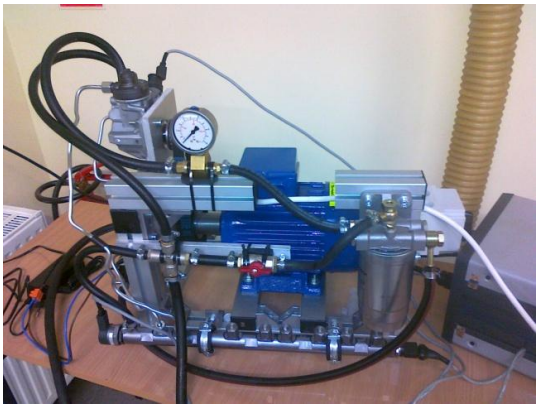
- pompa oleju i cieczy,
- wymiennik ciepła (woda/woda),
- wymiennik ciepła (woda/olej),
- układy elektrycznego podgrzewania wody i oleju z czujnikami temperatury.

Zakresy pracy i kontroli układu wynoszą:

- olej: 20-135^{o}C,

– woda: 20-100^{o}C.

Druga część stanowiska to laboratoryjny układ zasilania paliwem Common Rail IV generacji (rys. 6.4). Przedstawiona poniżej pompa wraz z układem napędowym, stanowi odrębną część stanowiska i jest napędzana niezależnym silnikiem elektrycznym, zapewniającym płynną regulację prędkości obrotowej. Pompa tego typu jest wykorzystywana w nowoczesnych układach zasilania silników o zapłonie samoczynnym, umożliwiając osiąganie ciśnień wtrysku rzędu 200 MPa.



Rys. 6.4. Układ zasilania paliwem Common Rail IV generacji

Brak możliwości zaadoptowania całego układu na silnikowym stanowisku badawczym, przede wszystkim z powodu jego znacznych gabarytów, wymusił konieczność wykorzystania tylko niektórych zasadniczych jego elementów. Pozwoliło to na użycie najważniejszych elementów układu tj. pompy wysokiego ciśnienia, zasobnika ciśnienia, przewodów oraz regulatora w zasadniczej części podjętych w pracy badań silnikowych.

Trzecia część stanowiska to układ zasilania paliwem gazowym, w rozważanym przypadku dostarczany do kolektora dolotowego za pomocą przepływomierza mechanicznego na niskie ciśnienie firmy Air Liquide. Instytut Silników Spalinowych Politechniki Poznańskiej dysponuje dwoma przepływomierzami, wykonanymi ze stopów lekkich i mosiądzu pozwalających na przepływ wodoru w zakresach 0,5-5 litrów/min (rys. 6.5) oraz 4-60 litrów/min (rys. 6.6), specyfikacje przepływomierzy podano w tabeli. 6.3.



Rys. 6.5. Widok przepływomierza wodoru o zakresie przepływu 0,5-5 litrów/min firmy Air Liquide



Rys. 6.6. Widok przepływomierza wodoru o zakresie przepływu 4-60 litrów/min firmy Air Liquide

Tabela 6.3. Specyfikacja przepływomierzy mechanicznych na niskie ciśnienia formy Air Liquide

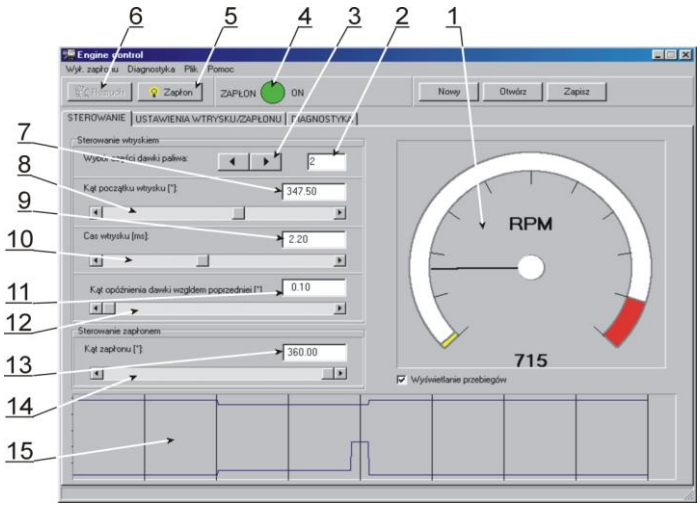
Lp.	Parametr	Wielkość	Jednostka
1	Ciśnienie na wejściu	2,5 - 4	bar
2	Ciśnienie na wyjściu	atmosferyczne	-
3	Max ciśnienie robocze	4	bar
4	Zakres temperatur roboczych	-20 – +50	^{o}C
5	Dokładność odczytu przepływu	±10	%

Kolejnym elementem wykonawczym jest system elektronicznego sterowania układem badawczym typu Common Rail. System sterowania pracą wtryskiwacza Control CR wykorzystany w badaniach, skonstruowany i zbudowany został w celu stworzenia szerokich możliwości sterowania układem zasilania silnika o zapłonie samoczynnym. Pozwala on na podział wtryskiwanej dawki paliwa na części z indywidualną regulacją czasu trwania każdej z nich, a także regulacją przesunięcia kątowego między każdą z części dawki. Znaczny zakres regulacji kąta początku wtrysku stwarza możliwość podawania paliwa w dowolnej fazie cyklu pracy silnika.

Sterowanie systemem odbywa się przy pomocy komputera, który został wyposażony w cyfrową kartę wejście/wyjście PCI 6533. Układ wykorzystuje dodatkowo optoelektroniczny czujnik położenia wału rozrządu. Z otrzymanego sygnału określana jest średnia prędkość obrotowa w cyklu pracy silnika. Pojawiający się raz na cykl pracy sygnał wyzwalający aktywuje sprzętowo wcześniej zapisane w pamięci procedury czasowe sterowania elementami wykonawczymi. Do złącza karty podłączony jest interfejs dopasowujący sygnały wejściowe do standardów pracy karty komputerowej. Z karty wyprowadzono sygnały położenia wału rozrządu, a także sygnały wyzwalające pozwalające na rejestrację wraz z wartościami ciśnienia indykowanego oraz ciśnienia w przewodzie wtryskowym przed wtryskiwaczem. Następnie sygnały sterujące doprowadzane są do elektronicznego układu generującego sygnał prądowy. Urządzenia wykonawcze tworzą odrębne elementy układu i są oddzielone od części cyfrowej urządzenia zapewniając dzięki temu bezpieczeństwo użytkowania, a także uniemożliwiając uszkodzenie części cyfrowej w przypadku przebicia prądowego elementów wykonawczych.

Sterowanie wtryskiwaczem odbywa się w dwóch fazach. W pierwszej fazie otwierania wtryskiwacza, która trwa 0,2 ms, natężenie prądu wynosi 20 A, natomiast

w drugiej fazie, podtrzymującej otwarcie, natężenie prądu wynosi 12 A. Zmienne nastawy tj. kąt wtrysku, czas trwania impulsu elektrycznego otwarcia wtryskiwacza oraz pozostałe parametry pracy zadawane były przy użyciu programu Engine Control, którego panel sterujący przedstawia rysunek 6.7.

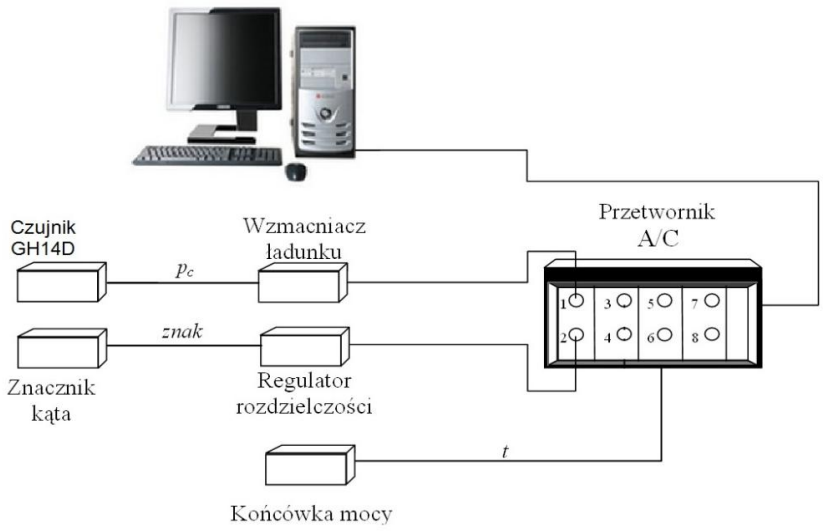


Rys. 6.7. Okno programu komputerowego sterowania układem wtryskowym:
1 – obrotomierz, 2 – odczyt aktualnie konfigurowanej elementarnej dawki paliwa, 3 – wybór elementarnej części dawki, 4 – wskaźnik kontrolny włączenia/wyłączenia układu, 5 – przycisk włączenie/wyłączenie układu, 6 – włączenie/wyłączenie rozrusznika, 7 – pole odczytu i wprowadzania kąta początku wtrysku (w przypadku podziału dawki na kilka oddzielnych części jest to kąt pierwszej z nich), 8 – regulacja kąta początku wtrysku, 9 – odczyt i wprowadzanie czasu wtrysku (w przypadku kilku dawek paliwa jest to czas aktualnie konfigurowanej części), 10 – regulacja czasu wtrysku, 11 – odczyt i wprowadzanie kąta opóźnienia części dawki paliwa względem poprzedniej, 12 – regulacja kąta opóźnienia dawki wtrysku względem poprzedniej, 13 – odczyt i wprowadzanie kąta wyprzedzenia zapłonu (dla silnika ZI), 14 – regulacja kąta zapłonu (dla silnika ZI), 15 – pole przedstawiające przebiegi sygnałowe

Zastosowany w badaniach program pozwala na wykorzystanie zbudowanego układu do sterowania pracą różnych elementów wykonawczych stosowanych w silnikach. Przystosowanie systemu do określonego elementu wykonawczego opiera się na zastosowaniu odpowiedniego układu generującego sygnał prądowy, zapewniający prawidłową pracy oraz dobór odpowiedniego źródła zasilania. Dzięki temu tak zbudowany układ ma możliwość przestronnego zastosowania w silnikowych pracach badawczych, jak również zapewnia poprawność działania sterowanych elementów wykonawczych. System sterowania w połączeniu z programem przeznaczony jest do sterowania układem wtryskowym typu Common Rail, jednocylindrowego silnika badawczego wykorzystanego w badaniach. Ze względu na jego liczne zalety wykorzystany został w części badań silnikowych prowadzonych w ramach tematu rozprawy. Stanowi on wszechstronne i pomocne narzędzie do badań nad rozwojem systemów spalania silników spalinowych.

Czwartą część silnikowego stanowiska hamulcowego stanowił układ pomiarowy szybkozmiennych wielkości silnikowych oraz system akwizycji danych. Wykorzystany został do tego celu system pomiarowy AVL INDISET 620. System ten umożliwiał pomiar następujących wielkości tj. ciśnienie gazów w cylindrze silnika, ciśnienie paliwa

przed wtryskiwaczem oraz wartość natężenia prądu sterującego pracą wtryskiwacza, określającego czas jego otwarcia. Wartość natężenia prądu sterującego pracą wtryskiwacza mierzona jest bezpośrednio w układzie generującym sygnał prądowy. System pomiarów szybkozmiennych z wbudowaną funkcją oscyloskopu, pozwala na równoczesny pomiar wielkości na wszystkich kanałach. Schemat systemu AVL INDISET 620 przedstawiono na rysunku 6.8, natomiast szczegółową jego charakterystykę przedstawiono w tabeli 6.3.



Rys. 6.8. Układ pomiarowy szybkozmiennych wielkości silnikowych AVL INDISET 620 [82]

Tabela 6.3. Charakterystyka systemu pomiarów szybkozmiennych wykorzystanego w badaniach silnikowych [99]

Lp.	Parametr	Wielkość
1	Liczba kanałów pomiarowych wzmacniacza operacyjnego	8
2	Częstotliwość próbkowania	1 MHz
3	Dokładność rejestracji sygnału amplitudy	12 bit
4	Napięcie wejścia na kartę A/C	± 10 V
5	Rozdzielczość pomiarowa	0,1; 0,2; 0,3; 0,5 lub 1^{o}OWK (maks. do 500 μs)
6	Pamięć przetwornika	2 MB

Wykonane w badaniach pomiary wartości ciśnień prowadzone były z wykorzystaniem przetworników ciśnienia. Czujnik ciśnienia gazów w cylindrze umieszczony był w głowicy silnika, natomiast czujnik ciśnienia paliwa przed wtryskiwaczem, bezpośrednio na przewodzie wtryskowym, który łączył wtryskiwacz z zasobnikiem paliwa. Uzyskane sygnały z przetworników ciśnienia były doprowadzone do wzmacniacza ładunku typu AVL Micro IFEM. Wzmacniacz tego typu wyposażony jest w regulację wzmocnienia, a także w układ kompensacji zera. Czujnik GH14D pracuje w zakresie 0-250 bar, natomiast jego czułość wynosi 18,84 pC/bar [97, 98].

Synchronizacja mierzonych sygnałów z kątowym położeniem wału korbowego zapewniona jest systemowo, natomiast wykorzystywanym sygnałem w tym przypadku jest sygnał ze znacznika kąta usytuowanego bezpośrednio na wale korbowym silnika. Zależność systemu sterowania układem wtryskowym oraz systemu rejestracji wyników

pomiarów AVL INDISET 620, otrzymano dzięki zastosowaniu dwóch czujników kąta obrotu wału korbowego na wale korbowym oraz na wałku rozrządu silnika. Dodatkowo podczas prowadzonych badań w sposób ciągły z wykorzystaniem czujników rezystancyjnych mierzono temperaturę cieczy chłodzącej, a także oleju smarującego silnika.

Podsumowując, zaproponowany system spalania powinien odznaczać się następującymi pozytywnymi cechami:

- niewielkim zakresem modyfikacji silnika bazowego o zapłonie samoczynnym. Jak widać z przedstawionego schematu .zaproponowane układy zasilania nie wymagają ingerencji w zasadnicze układy silnika. Układy zasilania paliwami współspalanymi (H_2, LPG lub C_2H_2) są w zasadzie przystawkami do istniejącej konstrukcji silnika bazowego,
- łatwością rozruchu i pracy tego typu silnika − proces ten sprowadza się do regulacji kąta i dawki dla silnika zasilanego olejem napędowym,
- łatwością sterowania początkiem procesu spalania. Ta cecha wynika z opanowania tego procesu w silnikach zasilanych standardowo olejem napędowym, szczególnie przy wykorzystaniu wysokociśnieniowych systemów zasilania typu common rail,
- poprawa sprawności ogólnej szczególnie w zakresie obciążeń zbliżonych do nominalnych, co dodatkowo uzasadnia możliwość uzyskania porównywalnych osiągów si1nika dwupaliwowego w porównaniu do silnika zasilanego standardowo,
- możliwością spalania przy mniejszych wartościach współczynnika nadmiaru powietrza dla obu paliw.

Proponowany układ zasilania może także cechować się zjawiskami niekorzystnymi. Do najważniejszych z nich należy zaliczyć:

- zjawisko samozapłonu mieszaniny wodoru, gazu propan-butan czy też acetylenu z powietrzem. Efekt ten może się pojawić mimo dużej wartości liczby oktanowej stosowanych paliw, szczególnie przy pracy silnika w zakresie obciążeń zbliżonych do znamionowych, w którym to zakresie mieszanina paliwa głównego i powietrza ulega wzbogaceniu. Należy jednak pamiętać, że w tym obszarze obciążeń mieszaniny te charakteryzuj się współczynnikiem nadmiaru powietrza $\lambda \approx 2\text{-}3$, co sprzyja odsunięciu niebezpieczeństwa występowania tego zjawiska. Czynnikiem sprzyjającym powstawaniu samozapłonów jest jednak stopień sprężania charakterystyczny dla silników o zapłonie samoczynnym ($\varepsilon = 16$ dla badanego silnika),
- wystąpieniem spalania stukowego i wypadania zapłonu po rozpoczęciu procesu spalania. Zjawiska tego można się spodziewać w części komory spalania poza zasięgiem strugi oleju napędowego. Ta część zgromadzonej mieszaniny palnej paliwa głównego i powietrza może charakteryzować się spalaniem stukowym w wyniku wzrostu ciśnienia i temperatury w komorze spalania po rozpoczęciu procesu spalania od dawki oleju napędowego.

6.2. Aparatura do pomiarów emisji stężeń substancji szkodliwych w spalinach

Pomiary zużycia paliwa i emisji szkodliwych składników spalin, przeprowadzone w ramach realizacji pracy, wymagały zastosowania specjalistycznej aparatury do badań toksyczności spalin. Z racji charakteru wykonywanych badań – w warunkach rzeczywistej eksploatacji pojazdów – użyta została mobilna aparatura badawcza typu PEMS (*Portable Emissions Measurement System*) [76, 77]. Posiadanie tego rodzaju aparatury badawczej pozwoliło na określenie składu spalin oraz sprawności przetwarzania przez silnik energii chemicznej pochodzącej z paliwa (wartości zużycia paliwa przez jednostkę).

Do pomiarów wykorzystana została następująca aparatura:

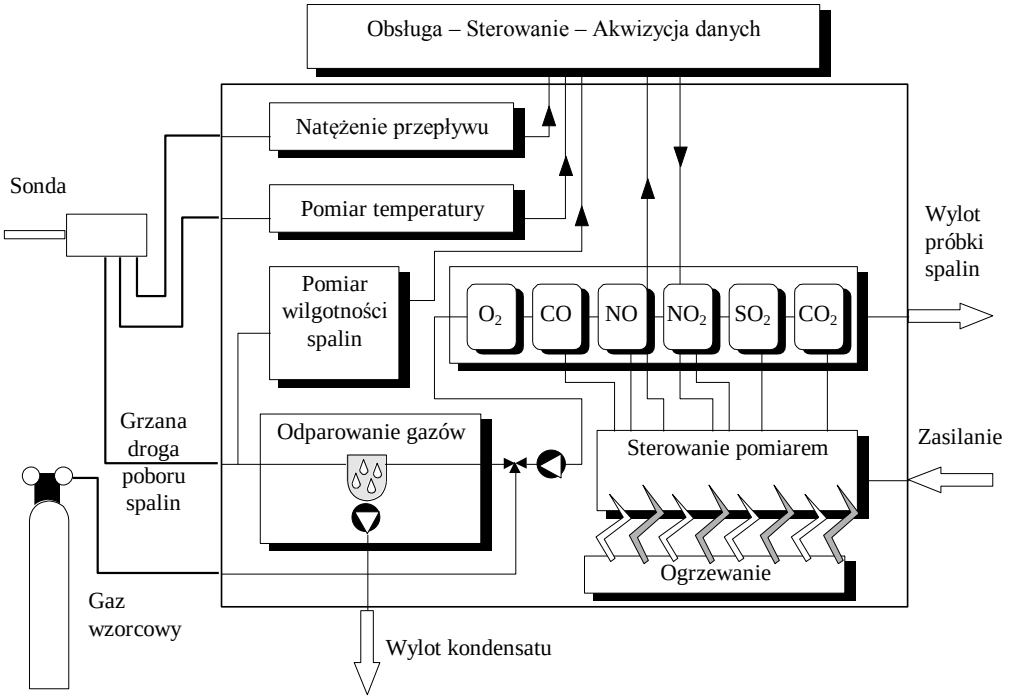
– analizator do badań toksyczności spalin Testo typ 360 – pomiar stężenia związków gazowych,
– Engine Exhaust Particle Sizer 3090 firmy TSI Inc. (TSI) – pomiar stężenia cząstek stałych.

Aparaturą, z której korzystano w trakcie prowadzonych badań było urządzenie Testo typ 360. Na rysunku 6.9 zamieszczono widok ogólny analizatora, natomiast na rysunku 6.10 znajduje się schemat jego budowy.

Do pomiaru stężeń tlenku węgla, dwutlenku siarki, tlenków azotu zastosowano w tym urządzeniu analizator amperometryczny [45]. Do pomiaru dwutlenku węgla analizator NDIR. Do pomiaru tlenu – analizator galwaniczny. Do pomiarów węglowodorów – analizator wykorzystujący zmianę rezystancji opornika pokrytego katalizatorem. Zmiana rezystancji związana jest ze zmianą temperatury opornika, która wzrasta na skutek utleniania na katalizatorze składników spalin.



Rys. 6.8. Widok analizatora spalin Testo typ 360



Rys. 6.9. Schemat budowy analizatora Testo typ 360 do pomiaru stężenia szkodliwych składników spalin [100]

Zakresy i dokładność pomiarową tego urządzenia przedstawiono w tabeli 6.4. Na wyposażeniu omawianego analizatora spalin znajduje się komputer, dzięki któremu możliwy jest zapis danych otrzymanych w trakcie pomiarów.

Tabela 6.4. Zakres i dokładność pomiaru związków mierzonych analizatorem spalin Testo 360 [100]

L.p	Wielkość mierzona	Zakres pomiaru	Błąd pomiaru
1	CO	0 – 10 000 ppm	poniżej 2,0% zakresu
2	CO_2	0 – 25% obj.	poniżej 1,5% zakresu
3	HC	0 – 5% obj.	poniżej 10% zakresu
4	NO_x	0 – 3 500 ppm	poniżej 3,8% zakresu
5	SO_2	0 – 5 000 ppm	poniżej 2,5% zakresu
6	O_2	0 – 21% obj.	poniżej 1,2% zakresu
7	Temperatura spalin	20 – 800^oC	4^oC

Do pomiaru wielkości cząstek stałych wykorzystano Spektrometr masowy – TSI EEPS 3090 (ang. *Engine Exhaust Particle Sizer™ Spectrometer*) firmy TSI Incorporated, którego widok ogólny zamieszczono na rysunku 6.10 [45]. Podstawowe dane techniczne analizatora opisane zostały w tabeli 6.5. Urządzenie pozwala na przeprowadzenie ciągłego pomiaru wielkości cząstek stałych emitowanych przez użyty w badaniach silnik.

Spektrometr EEPS™ jest wysokiej klasy urządzeniem, umożliwiającym pomiar stężenia cząstek stałych, z częstotliwością pomiaru 10 razy na sekundę.

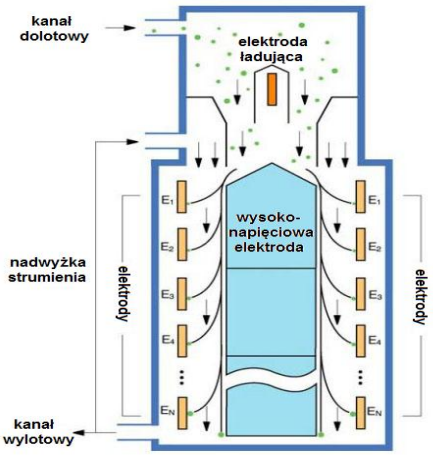


Rys. 6.10. Widok analizatora rozkładu cząstek stałych TSI EEPS 3090 [100]

Tabela 6.5. Dane techniczne analizatora wielkości cząstek stałych EEPS [100]

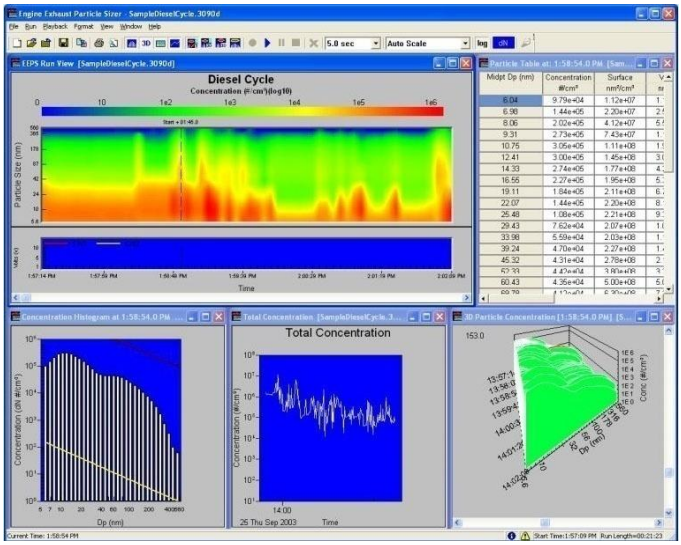
Lp.	Parametr	Wielkość
1	Rozmiar mierzonych cząstek	5,6 ÷ 560 nm
2	Liczba kanałów pomiarowych	16 kanałów na dekadę (32 całkowicie)
3	Liczba kanałów elektrod	22
4	Rozdzielczość	10 rozmiarów kanałów/sekundę
5	Przepływ próbki spalin	10 dm^3/min
6	Przypływ sprężonego powietrza	40 dm^3/min
7	Temperatura próbki wejściowej	10 ÷ 52 °C
8	Temperatura pracy urządzenia	0 ÷ 40 °C

Cząstki doprowadzane są do analizatora w postaci strumienia gazów wylotowych z silnika. Początkowy filtr wyłapuje cząstki większe niż 1 µm, tj. te będące poza zakresem pomiarowym urządzenia. Po przejściu przez filtr cząstki kierowane są na elektrodę ładującą, gdzie generowane są jony. Połączenie cząstek i ładunku elektrycznego pozwala sklasyfikować cząstki według ich rozmiaru. Elektroda jest umiejscowiona na samej górze urządzenia. Następnie cząstki trafiają na szczelinę pierścieniową, będącą przestrzenią pomiędzy dwoma koncentrycznymi cylindrami. Szczelinę otacza doprowadzany z zewnątrz strumień czystego powietrza. Cylinder wylotowy zbudowany jest w formie stosu bardzo czułych elektrod, ułożonych w formie pierścienia w taki sposób, iż są od siebie izolowane. Elektrody z jednej strony podłączone są do czułego wzmacniacza, z drugiej zaś uziemione. Takie połączenie powoduje powstanie pola elektrycznego pomiędzy cylindrami zbudowanymi z elektrod. Przepływająca pomiędzy nimi mieszanka świeżego powietrza i cząstek stałych, które naładowane dodatnio odpychane są od wysokonapięciowej elektrody i kierowane pomiędzy czułe elektrody. Cząstki uderzając w elektrody powodują generowanie prądu, który w czasie rzeczywistym odczytywany jest przez sterownik z dokładnością odczytu dziesięciu różnych wielkości cząstek na sekundę (rys. 6.11).



Rys. 6.11. Schemat działania analizatora rozkładu cząstek stałych TSI EEPS 3090 [83]

Układ obsługiwany jest przez oprogramowanie dostarczane przez producenta, umożliwiające obserwację wyników w czasie rzeczywistym na wewnętrznym ekranie urządzenia lub komputera podłączonego do urządzenia (rys. 6.12).

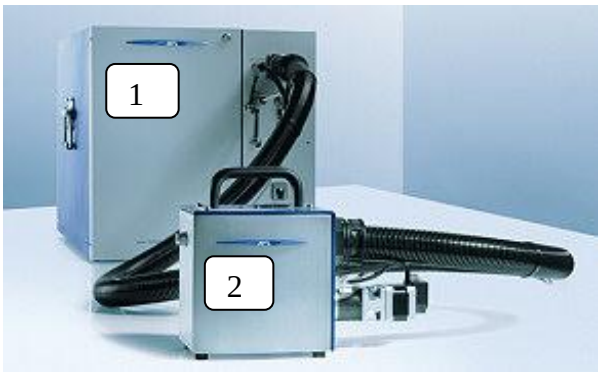


Rys. 6.12. Widok ekranu oprogramowania sterującego analizatorem EEPS 3090 firmy TSI

Pomiar liczby cząstek stałych wykonano przy użyciu licznika cząstek stałych – AVL Particle Counter 3790 CPC, jest to mobilny analizator firmy AVL (rys.6.13). W tabeli 6.6 zamieszczono podstawowe dane techniczne urządzenia.

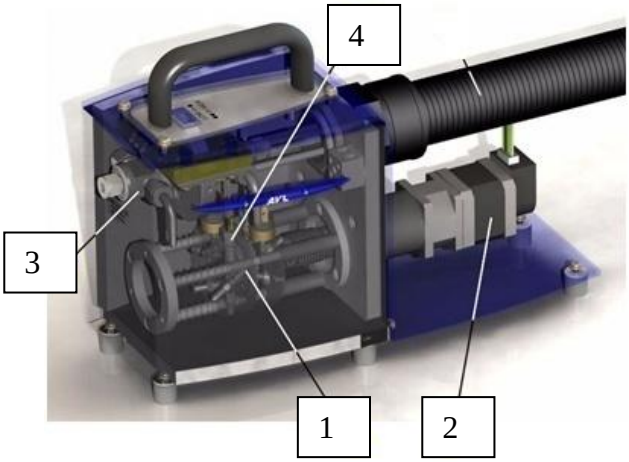
Tabela 6.6 Dane techniczne licznika cząstek stałych firmy AVL [98]

Lp.	Parametr	Wielkość
1.	Zakres działania	0 ÷ 10 000 p/cm^3
2.	Limit pomiarowy	≤ 0,1 p/cm^3
3.	Czas dostępu	≤ 5 s
4.	Przepływ próbki pomiarowej	1 ÷ 5 dm^3/min
5.	Napięcie zasilające	230 V, 50 Hz, zużycie mocy: 600 W
6.	Zapotrzebowanie na powietrze	30 l/min.
7.	Warunki pracy urządzenia	0 ÷ 40 °C, 0 ÷ 90 % wilgotności
8.	Temperatura spalin dolotowych	< 200 °C
9.	Norma określająca	ECE/TRANS/WP.29/GRPE/2007/10



Rys. 6.13. Widok licznika cząstek stałych AVL Particle Counter 3790 CPC:
1 – jednostki centralna 2 – urządzenie rozcieńczające [98]

Próbka spalin znajdująca się wewnątrz urządzenia pomiarowego, uprzednio pobrana z przepływomierza i rozcieńczona sprężonym powietrzem w urządzeniu rozcieńczającym (rys. 6.14), doprowadzona zostaje do rury odparowującej. Rozcieńczony gaz jest w niej podgrzewany do temperatury, w której następuje odparowanie wszystkich lotnych części gazowych [104].

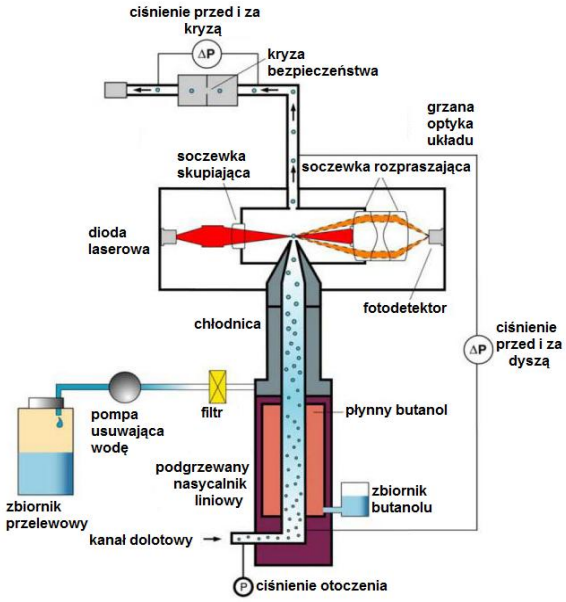


Rys. 6.14. Schemat układu rozcieńczania
1 – dysk wirujący, 2 – silnik krokowy, 3 – zawór kulowy, 4 – wkład grzewczy,
5 – grzana droga gazowa (przewód spalinowy) [98]

W próbce pomiarowej w wyniku opisanego procesu pozostają tylko stałe części spalin. Spaliny są ponownie rozcieńczane w specjalnej rurze o porowatych ściankach i kierowane do właściwego elementu pomiarowego (rys. 6.15). Próbka, która została doprowadzano kanałem dolotowym, zostaje następnie skierowana do podgrzewanego nasycalnika liniowego (temp. 38,3°C), w którym znajduje się wkład z płynnym butanolem. Butanol na drodze odparowania miesza się z frakcją lotną próbki spalin. W kolejnym kroku w chłodnicy temperatura par butanolu zostaje obniżona do poziomu 30,8°C, powodując ich skraplanie do postaci niejednorodnego kondensatu. Panująca temperatura jest nieznacznie poniżej poziomu temperatury powodującej powstanie jednorodnego kondensatu. Skraplające się w tym czasie pary butanolu, osadzają się na ściankach chłodnicy i odprowadzane są do zbiornika z kondensatem. Tak wzmocniona próbka cząstek stałych trafia do części pomiarowej. Część ta składa się z dyszy, diody

lasera, soczewki skupiającej, soczewek rozpraszających i fotodetektora. Wiązka promieniowania laserowego zostaje skupiona na punkcie przepływu próbki pomiarowej, na końcu dyszy. Cząstki stałe przepływające przez wiązkę promieniowania powodują jej rozproszenie. Tak rozproszona cząstka skupiana jest ponownie i trafia do fotodetektora. Cały system optyczny utrzymywany jest w temperaturze 40°C, w celu zapobieżenia dostania się w światło wiązki lasera skondensowanych części butanolu. Urządzenie ponadto wyposażone jest w kryzę bezpieczeństwa, która dzięki monitorowaniu ciśnienia na wejściu urządzenia, na wyjściu z sekcji pomiarowej oraz na wyjściu z urządzenia, zapewnia stałą jego wartość wewnątrz urządzenia. Jest to istotne ze względu na stały i prawidłowy przepływ próbki pomiarowej przez urządzenie.

Opisywany analizator pozwala dokonywać pomiarów cząstek stałych, większych od 23 nm z dokładnością 50 ± 12 %, oraz cząstek większych od 30 nm z dokładnością 70 ± 12 %. Cząstki mniejsze nie są mierzone. Urządzenie połączone jest z komputerem, pozwalającym dzięki wgranemu oprogramowaniu na zapis i późniejszą analizę danych.



Rys. 6.15. Schemat działania licznika cząstek stałych AVL Particle Counter 3790 CPC [45]

Licznik cząstek stałych pozwala na dokonywanie pomiarów w dwóch różnych trybach:

– tryb koncentracji – wyniki prezentowane są, jako zależność koncentracji cząstek [cm^{-3}] w czasie trwania pomiaru,
– tryb całkowitej liczby cząstek – wyniki prezentowane są jako całkowita skumulowana liczbą cząstek stałych w czasie trwania pomiaru.

Tryb koncentracji zaleca się stosować podczas podstawowych pomiarów, tryb skumulowanej liczby cząstek stosowany jest w przypadkach pomiarów bardzo małej koncentracji cząstek w próbce pomiarowej.

Koncentracja cząstek stałych obliczana jest według zależności:

$$koncentracja = \frac{całałkowita}{całałkowity} \frac{liczba}{przepłrz} \frac{cząstek}{gazu} = \frac{n}{F_g \cdot t_p} \tag{6.1}$$

gdzie:

F_g – przepływ gazu, (nominalny 1 000 [cm^3/min]; 16,7 [cm^3/sek.])

t_p – czas poboru próbki [s].

6.3. Koncepcja realizacji badań

Opisując koncepcję spalania oleju napędowego w mieszaninie powietrzno-wodorowej zakładano, że ocena wybranych wielkości termodynamicznych wymienionych w rozdziale 3.1 dokonana zostanie w sposób porównawczy. Zatem badania wykonano dwuetapowo: z wykorzystaniem dodatku wodoru dostarczanego do kolektora dolotowego, współspalanego z olejem napędowym oraz z wykorzystaniem zasilania konwencjonalnego. Intensywność wymieszania wodoru z powietrzem zależy od dwóch czynników: od ilości dostarczonego gazu oraz bodźca termodynamicznego. Aby ustalić wpływ dodatku wodoru współspalanego z olejem napędowym na wielkości termodynamiczne i ekologiczne procesu spalania, dokonywano zmian ilości dostarczanego wodoru, acetylenu i gazu propan-butan odbywała się przez regulację wydatku przepływu, w wyniku czego otrzymywano mieszaninę o udziale od 0,5% do 25% objętości gazu, względem dostarczanego do komory spalania powietrza.

Uwzględniając powyższe i wnioski przyjęto, że dla ustalonego i stałego we wszystkich przypadkach ciśnienia wynoszącego 50 bar w zasobniku układu typu *common rail* wykonano serie badań dla trzech różnych obciążeń jednostki spalinowej: 5, 10, i 15 Nm. Każda seria obejmowała pomiary dla trzech różnych prędkości obrotowych silnika i dla trzech różnych obciążeń. Obciążenia są ustalane przez zmianę czasu wtrysku. Ciśnienie w zasobniku paliwa ustalono na 50 MPa.

Z zakresu pracy silnika AVL 5804 wybrano trzy prędkości obrotowe wału korbowego: n = 1000, 1500 i 2000 obr/min, przy których silnik zasilano paliwem, zachowując identyczne dla obu serii nastawy czasu otwarcia wtryskiwacza. Dla odpowiednich prędkości obrotowych wynoszą one dla silnika AVL 5804 przy 1000 obr/min – 0,8; 0,95; 1,10 i 1,25 ms, przy 1500 obr/min – 0,88; 1,00; 1,15; 1,33 oraz przy 2000 obr/min – 0,95; 1,05; 1,21 i 1,41 ms. Przy niezmiennych czasach wtrysku uzyskiwane wartości momentu obrotowego są wartościami wynikowymi.

Dla celów porównawczych przy tych samych nastawach i w tych samych warunkach wykonano pomiary parametrów pracy silnika przy zasilaniu olejem napędowym bez dodatku wodoru i innych gazów palnych do kolektora dolotowego. W każdym przypadku zapewniono identyczne wartości nastaw ciśnienia w zasobniku układu zasilania oraz odpowiednie czasy otwarcia wtryskiwacza, odpowiadające wyznaczonym punktom pracy silnika przy współspalaniu dodatku wodoru z olejem napędowym, oraz współspalaniu wodoru z LPG i wodoru z acetylenem. Dodatkowym parametrem, który ma istotne znaczenie na emisję spalin jest temperatura cieczy chłodzącej silnik. Podczas prowadzonych badań temperaturę cieczy chłodzącej silnik oraz oleju smarującego utrzymywano na stałym poziomie 85^{o}C za pomocą systemu stabilizacji temperatury.

W każdym z ustalonych punktów pracy silnika dokonywano rejestracji przebiegu ciśnienia indykowanego w cylindrze p_c, ciśnienia paliwa w przewodzie wtryskowym przed wtryskiwaczem p_w, oraz przebiegu natężenia prądu wyzwalającego otwarcie wtryskiwacza t. Wyniki badań silnikowych uzupełniono wynikami pomiaru emisji stężeń szkodliwych składników spalin. Dla ułatwienia identyfikacji nastaw i warunków pracy silnika na etapie analizowania wyników każdy pomiar oznaczono kodem. Użyte w nich symbole mają następujący sens: ON – dotyczy serii pomiarów z olejem napędowym bez dodatku wodoru, ON + H_2 (2-25 %) – seria, w której dawka oleju napędowego dostarczanego do komory spalania była na tym samym poziomie, jak dla zasilania jednostki napędowej czystym olejem napędowym. wzbogacana dodatkiem wodoru dostarczanego do kanału dolotowego w stosunku 2-25 % objętości względem powietrza.

Wykonano serię badań, w których dostarczano do kanału dolotowego mieszaninę wodoru i gazu propan-butan (o składzie: 60 % propanu, 40 % butanu) dla tych samych warunków pracy jednostki napędowej. Wyniki badań współspalania oleju napędowego z dodatkiem wodoru i LPG oznaczono ON + H_2 + LPG.

Ponadto wykonano serię badań, w których dostarczano do kanału dolotowego mieszaninę wodoru i acetylenu dla tych samych warunków pracy jednostki napędowej. Wyniki badań współspalania oleju napędowego z dodatkiem wodoru i acetylenu oznaczono ON + H_2 + C_2H_2.

6.4. Niepewność pomiarowa

Do oszacowania niepewności pomiarowej przeprowadzonych badań w ramach dysertacji wpływu dodatku wodoru do silnika ZS zasilanego konwencjonalnie wykorzystano metodę typu A [82]. Obliczenia wykonano z wykorzystaniem zależności opisanych w poniższych równaniach 6.2-6.5. Należy wspomnieć, że w podrozdziale tym zawarto jedynie wybrane wyniki, dotyczące analizowanych w pracy substancji szkodliwych zawartych w spalinach silnika AVL 5804.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} \tag{6.2}$$

gdzie:

x_i – wartość otrzymana w i-tym pomiarze,

n – liczba wykonanych pomiarów.

$$s(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} \tag{6.3}$$

$$u(x) = s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} \tag{6.4}$$

gdzie:

s(x) – odchylenie standardowe z próbki (niepewność przypadkowa pojedynczego pomiaru),

u(x) – niepewność standardowa (odchylenie standardowe średnich arytmetycznych).

$$x_g = \bar{x} + t_{\alpha,k} \cdot s(\bar{x})$$
$$x_d = \bar{x} - t_{\alpha,k} \cdot s(\bar{x}) \tag{6.5}$$

gdzie:

x_g – górna granica przedziału ufności dla wartości średniej,

x_d – dolna granica przedziału ufności dla wartości średniej,

t – zmienna losowa w rozkładzie Studenta,

α – poziom istotności,

k – liczba stopni swobody, równa liczbie pomiarów n pomniejszonej o 1,

$\pm t_{\alpha,k} \cdot s(\bar{x})$ – dokładność pomiaru.

W tabeli 6.7 umieszczono wartości stężeń poszczególnych związków toksycznych zmierzonych w spalinach silnika badawczego AVL 5804. W analizowanym punkcie zmierzono wpływ dodatku wodoru oznaczony w pracy ON + H1 na stężenie substancji szkodliwych w spalinach silnika ZS dla prędkości obrotowej 1000 obr/min oraz obciążenia 10 Nm (patrz podrozdz. 7.3). Liczba wykonanych prób – pomiarów wartości stężeń spalin dla każdego związku wynosiła 10.

Tabela 6.7. Wartości stężeń związków toksycznych z przeprowadzonych po sobie 10 pomiarów dla ON + H1

Lp.	Nr pomiaru	CO [ppm]	CO_2 [%]	HC [%]	NO_x [ppm]	PM [mg/m^3]
1	1	347	4,2	0,131	364	2,57
2	2	328	4,9	0,129	367	2,55
3	3	337	4,3	0,125	369	2,51
4	4	341	4,2	0,122	364	2,54
5	5	343	4,8	0,119	371	2,49
6	6	338	4,9	0,13	368	2,53
7	7	335	5,1	0,122	371	2,57
8	8	340	4,9	0,125	369	2,59
9	9	350	4,8	0,126	370	2,61
10	10	351	4,9	0,121	367	2,54
11	**Średnia**	**341**	**4,7**	**0,125**	**368**	**2,55**

Przykładowy tok obliczeń przedstawiono poniżej:

– średnie stężenie CO z 10 kolejno wykonanych pomiarów

$$CO_{\text{śr}}^{H1} = \frac{347+328+337+341+343+338+335+340+350+351}{10} = 341 \ \ ppm$$

– odchylenie standardowe s($CO_{śr}^{H1}$) z 10-ciu kolejno wykonanych pomiarów

$$s(CO_{śr}^{H1}) = \sqrt{\frac{(347-341)^2 + (328-341)^2 + ... + (350-341)^2 + (351-341)^2}{10-1}} = 7 \ \ ppm$$

– niepewność standardowa u($CO_{śr}^{H1}$)

$$u(CO_{śr}^{H1}) = s(CO_{śr}^{H1}) = \frac{7{,}1}{\sqrt{10}} = 2{,}24 \ \ ppm$$

Zapis zapisu wyniku stężenia dwutlenku węgla w spalinach w wykorzystaniem metody typu A [70] niepewność standardowa ma postać:

$$CO^{H1} = (341 \pm 2) \ \ ppm$$

jednak powyższa wartość niepewności standardowej jest właściwa z szansą popełnienia błędu szacowaną na około 32 %.

Dla poziomu istotności α = 0,05 i liczby stopni swobody k = n – 1 = 9 odczytana wartość $t_{\alpha,k}$ z tablic dla statystyki Studenta t jest równa 2,262. Przedział ufności dla wartości średniej można więc zapisać jako (6.5)

$$x_g^{H1} = 341 + 2{,}262 \cdot 2{,}24 = 346,$$
$$x_d^{H1} = 341 - 2{,}262 \cdot 2{,}24 = 336.$$

Interpretując uzyskane wartości stężeń podczas badań, można więc stwierdzić, iż szansa popełnienia błędu równa 5 % (poziom istotności α = 0,05), dla wartości stężeń analizowanych związków toksycznych w spalinach silnika badawczego AVL 5804 zasilanego olejem napędowym i dodatkiem wodoru mieszczą się w poniżej zapisanych przedziałach, co przedstawia również tablica 6.8:

$$CO^{H1} = (341 \pm 5) \ \ ppm$$
$$CO_2^{H1} = (4{,}7 \pm 0{,}3) \ \ \%$$
$$HC^{H1} = (0{,}125 \pm 0{,}03) \ \ \%$$
$$NO_X^{H1} = (368 \pm 2) \ \ ppm$$
$$PM^{H1} = (2{,}55 \pm 0{,}03) \ \ mg/m^3$$

Tabela 6.8. Dokładność pomiaru stężeń związków toksycznych emitowanych przez silnik badawczy AVL5804 (n = 1000 obr/min, M_o = 10 Nm) dla pomiaru oznaczonego ON + H1

Lp.	**Wielkość**	**CO [ppm]**	**CO_2 [%]**	**HC [%]**	**NO_x [ppm]**	**PM [mg/m^3]**

1	Wartość średnia	341	4,7	0,125	368	2,55
2	Odchylenie standardowe	7	0,4	0,004	3	0,04
3	Niepewność standardowa	2,24	0,13	0,001	0,80	0,011
4	Dokładność pomiaru dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$	5,0692	0,3016	0,0029	1,8158	0,0259
5	Górna granica przedziału ufności dla wartości średniej	346	5,0	0,128	370	2,58
6	Dolna granica przedziału ufności	336	4,4	0,122	366	2,52

W celu porównania niepewności pomiarowych dla różnych wartości dodatku wodoru współspalanego z olejem napędowym w silniku badawczym przeprowadzono także statystyczną analizę wyników pomiarów dla dodatku wodoru wynoszącego 50 l/min, oznaczonego w pracy ON + H4 (tab. 6.9). Ocenę niepewności i jej porównania dokonano w oparciu o wyniki stężeń substancji szkodliwych w spalinach silnika ZS dla takiej samej prędkości obrotowej 1000 obr/min i obciążenia 10 Nm, jak powyżej. Liczba wykonanych prób – pomiarów wartości stężeń spalin dla każdego związku wynosiła tak, jak we wszystkich przeprowadzonych pomiarach 10.

Tabela 6.9. Wartości stężeń związków toksycznych z przeprowadzonych po sobie 10 pomiarów dla pomiaru oznaczonego ON+H4

Lp.	**Nr pomiaru**	**CO [ppm]**	**CO_2 [%]**	**HC [%]**	**NO_x [ppm]**	**PM [mg/m^3]**
1	1	649	5,1	0,529	321	4,73
2	2	655	5,8	0,497	307	4,69
3	3	642	4,7	0,511	347	4,51
4	4	632	4,4	0,496	329	4,82
5	5	637	5,7	0,445	344	4,79
6	6	649	5,5	0,419	331	4,76
7	7	629	6,1	0,437	319	4,79
8	8	624	5,3	0,561	318	4,97
9	9	637	6,1	0,472	329	4,88
10	10	646	5,3	0,493	325	4,96
11	**Średnia**	**640**	**5,4**	**0,486**	**327**	**4,79**

Następny przykładowy tok obliczeń przedstawiono poniżej:

– średnie stężenie CO z 10 kolejno wykonanych pomiarów

$$CO^{H4}_{śr} = \frac{649+655+642+632+637+649+629+624+637+646}{10} = 640 \ \ ppm$$

– odchylenie standardowe s($CO^{H4}_{śr}$), tak samo z 10-ciu kolejno wykonanych pomiarów

$$s(CO^{H4}_{śr}) = \sqrt{\frac{(649-640)^2+(655-640)^2+...+(637-640)^2+(646-640)^2}{10-1}} = 8{,}6 \ \ ppm$$

– niepewność standardowa u($CO^{H4}_{śr}$)

$$u(CO^{H4}_{śr}) = s(CO^{H4}_{śr}) = \frac{8{,}6}{\sqrt{10}} = 2{,}73 \ \ ppm$$

Zapis wyniku stężenia dwutlenku węgla w spalinach w wykorzystaniem metody typu A [70], wówczas niepewność standardowa ma postać:

$$CO^{H4} = (640 \pm 3) \ \ ppm$$

jednak powyższa wartość niepewności standardowej jest właściwa z szansą popełnienia błędu szacowaną na około 32%.

Natomiast dla poziomu istotności α = 0,05 i liczby stopni swobody k = n – 1 = 9 odczytana wartość $t_{\alpha,k}$ z tablic dla statystyki Studenta t jest równa 2,262. Przedział ufności dla wartości średniej podany w 6.5 można więc również zapisać jako:

$$x_g^{H4} = 640 + 2{,}262 \cdot 2{,}73 = 646,$$
$$x_d^{H4} = 640 - 2{,}262 \cdot 2{,}73 = 637.$$

Interpretując uzyskane wartości stężeń podczas badań, można więc stwierdzić, iż szansa popełnienia błędu równa 5 % (poziom istotności α = 0,05), dla wartości stężeń analizowanych związków toksycznych w spalinach dla silnika badawczego AVL 5804 zasilanego olejem napędowym i dodatkiem wodoru wynoszącym 50 l/min mieszczą się w poniżej zapisanych przedziałach, co przedstawiono również w tablicy 6.8:

$$CO^{H4} = (640 \pm 6) \ \ ppm$$
$$CO_2^{H4} = (5{,}4 \pm 0{,}4) \ \ \%$$
$$HC^{H4} = (0{,}486 \pm 0{,}017) \ \ \%$$
$$NO_X^{H4} = (327 \pm 3{,}5) \ \ ppm$$
$$PM = (4{,}79 \pm 0{,}05) \ \ mg/m^3$$

Tabela 6.10. Dokładność pomiaru stężeń związków toksycznych emitowanych przez silnik badawczy AVL5804 (n = 1000 obr/min, M_o = 10 Nm) dla pomiaru oznaczonego ON + H4

Lp.	Wielkość	CO [ppm]	CO_2 [%]	HC [%]	NO_x [ppm]	PM [mg/m^3]
1	Wartość średnia	640	5,4	0,486	327	4,79
2	Odchylenie standardowe	8,6	0,46	0,024	4,9	0,07
3	Niepewność standardowa	2,73	0,15	0,008	1,54	0,023
4	Dokładność pomiaru dla poziomu istotności α = 0,05	6,17	0,33	0,018	3,49	0,051
5	Górna granica przedziału ufności dla wartości średniej	646	5,7	0,504	330	4,85
6	Dolna granica przedziału ufności	634	5,1	0,468	324	4,74

W celu odniesienia niepewności pomiarowych dla różnych wartości dodatków wodoru współspalanego z olejem napędowym w silniku badawczym względem wyników badań dla oleju napędowego przeprowadzono także statystyczną analizę wyników pomiarów dla spalania czystego oleju napędowego, oznaczonego w pracy ON (tab. 6.11). Ocenę niepewności i jej porównania dokonano w oparciu o wyniki stężeń substancji szkodliwych w spalinach silnika ZS dla tej samej prędkości obrotowej 1000 obr/min i obciążenia 10 Nm, jak powyżej. Liczba wykonanych prób – pomiarów wartości stężeń spalin dla każdego związku była niezmienna i wynosiła tak, jak wcześniej – 10.

Tabela 6.11. Wartości stężeń związków toksycznych z przeprowadzonych po sobie 10 pomiarów dla ON

Lp.	Nr pomiaru	CO [ppm]	CO_2 [%]	HC [%]	NO_x [ppm]	PM [mg/m^3]
1	1	227	4,5	0,056	383	1,55
2	2	231	4,6	0,053	384	1,54
3	3	226	4,6	0,054	382	1,54
4	4	224	4,7	0,055	379	1,55
5	5	225	4,3	0,057	381	1,53
6	6	230	4,4	0,054	382	1,53
7	7	225	4,6	0,056	381	1,52
8	8	231	4,7	0,056	384	1,55
9	9	224	5	0,055	383	1,56
10	10	227	4,6	0,054	381	1,53
11	**Średnia**	**227**	**4,6**	**0,055**	**382**	**1,54**

Kolejny przykładowy tok obliczeń dla tego samego związku przedstawiono poniżej:

– średnie stężenie CO z 10 kolejno wykonanych pomiarów

$$CO^{ON}_{\text{śr}} = \frac{227+231+226+224+225+230+225+231+224+227}{10} = 227 \ \ ppm$$

– odchylenie standardowe s($CO^{ON}_{\text{śr}}$) tak samo z 10-ciu kolejno wykonanych pomiarów

$$s(CO^{ON}_{\text{śr}}) = \sqrt{\frac{(227-227)^2+(234-227)^2+...+(224-227)^2+(227-227)^2}{10-1}} = 2{,}8 \ \ ppm$$

– niepewność standardowa u($CO^{ON}_{\text{śr}}$)

$$u(CO^{ON}_{\text{śr}}) = s(CO^{ON}_{\text{śr}}) = \frac{2{,}8}{\sqrt{10}} = 0{,}87 \ \ ppm$$

Zapis wyniku stężenia dwutlenku węgla w spalinach w wykorzystaniem metody typu A [70], niepewność standardowa ma postać:

$$CO^{ON} = (227 \pm 1) \ \ ppm$$

w tym przypadku również powyższa wartość niepewności standardowej jest właściwa z szansą popełnienia błędu szacowaną na około 32 %.

Dla poziomu istotności α = 0,05 i liczby stopni swobody k = n – 1 = 9 odczytana wartość $t_{\alpha,k}$ z tablic dla statystyki Studenta t jest równa 2,262. Przedział ufności dla wartości średniej można więc tak samo zapisać z wykorzystaniem 6.5, jako:

$$x_g^{ON} = 227 + 2{,}262 \cdot 0{,}87 = 229,$$
$$x_d^{ON} = 227 - 2{,}262 \cdot 0{,}87 = 225.$$

Interpretując uzyskane wartości stężeń podczas badań, można więc stwierdzić, iż szansa popełnienia błędu równa 5 % (na poziomie istotności α = 0,05), dla wartości stężeń analizowanych związków toksycznych w spalinach dla silnika badawczego AVL 5804 zasilanego olejem napędowym bez dodatku wodoru mieszczą się w poniżej zapisanych przedziałach, co przedstawiono w tablicy 6.12:

$$CO^{ON} = (227 \pm 2)\ \ ppm$$
$$CO_2^{ON} = (4{,}6 \pm 0{,}1)\ \ \%$$
$$HC^{ON} = (0{,}055 \pm 0{,}001)\ \ \%$$
$$NO_X^{ON} = (382 \pm 1)\ \ ppm$$
$$PM^{ON} = (1{,}54 \pm 0{,}01)\ \ mg/m^3$$

Tabela 6.12. Dokładność pomiaru stężeń związków toksycznych emitowanych przez silnik badawczy AVL5804 (n = 1000 obr/min, M_o = 10 Nm) dla badań oznaczonych ON

Lp.	Wielkość	CO [ppm]	CO_2 [%]	HC [%]	NO_x [ppm]	PM [mg/m^3]
1	Wartość średnia	227	4,6	0,055	382	1,54
2	Odchylenie standardowe	2,8	0,19	0,0012	1,562	0,0125
3	Niepewność standardowa	0,87	0,06	0,0004	0,494	0,0039
4	Dokładność pomiaru dla poziomu istotności α = 0,05	1,97	0,13	0,00089	1,12	0,0089
5	Górna granica przedziału ufności dla wartości średniej	229	4,73	0,056	383	1,55
6	Dolna granica przedziału ufności	227	4,47	0,054	381	1,53

Analizując powyższe wyniki badań silnika AVL 5804 można zestawić ze je sobą i dokonać oceny porównawczej niepewności pomiarowych dokonanych metodą typu A dla wszystkich powyższych przypadków (tab. 6.13). Jest to w pełni uzasadnione i możliwe do zrealizowania, poprzez uzyskanie różnych wartości wyników stężeń dla oleju napędowego oraz dla oleju napędowego z różnymi wartościami dodatku wodoru zanotowane podczas następujących po sobie badań w czasie 60 sekund i 10 pomiarów.

Podsumowując uzyskane wyniki pomiarów dla ON i ON + H1 oraz ON + H4, można stwierdzić, że przy założonym poziomie istotności α = 0,05, wraz ze wzrostem ilości dostarczanego do kolektora dolotowego wodoru mamy do czynienia z sytuacją, w której zwiększa się niepewność pomiarowa, przez co zmniejsza się dokładność pomiaru podczas wykonywanych badań w pozornie stałych warunkach, o czym świadczy zróżnicowanie wyników stężeń poszczególnych związków. Wraz ze wzrostem dodatku wodoru zmniejsza się koncentracja wartości stężeń wokół pewnej wartości, czyli można powiedzieć o większym statystycznym rozrzucie wyników. Uniknięcie niepewności przypadkowych nie jest możliwe także w tych przypadkach, gdyż

wynikają one z wielu, często trudnych do określenia przyczyn, w tym przede wszystkim związanych z przyrządem pomiarowym, metodą pomiarową oraz z obserwatorem.

Ponadto niepewności przypadkowe związane z przyrządem pomiarowym wynikają często zarówno z jego statycznych, jak i dynamicznych wielkości, jak również ze zmieniających się warunków otoczenia (np. temperatury, wilgotności powietrza itp.).

Tabela 6.13. Zestawienie wyznaczonych niepewności pomiarowych dla badań oznaczonych jako: ON, ON + H1 oraz ON + H4 przy n = 1000 obr/min i M_o = 10 Nm

Lp.	Oznaczenie pomiaru	Wielkość	CO [ppm]	CO_2 [%]	HC [%]	NO_x [ppm]	PM [mg/m^3]
1	**ON**	Odchylenie standardowe	3	0,2	0,001	2	0,01
2		Niepewność standardowa	0,87	0,06	0,0004	0,5	0,004
3		Dokładność pomiaru dla poziomu istotności α = 0,05	1,97	0,13	0,0009	1,12	0,0089
4	**ON + H1**	Odchylenie standardowe	7	0,4	0,004	3	0,04
5		Niepewność standardowa	2,24	0,13	0,001	0,8	0,011
6		Dokładność pomiaru dla poziomu istotności α = 0,05	5,07	0,30	0,0029	1,82	0,0259
7	**ON + H4**	Odchylenie standardowe	9	0,5	0,024	5	0,07
8		Niepewność standardowa	2,73	0,15	0,008	1,54	0,023
9		Dokładność pomiaru dla poziomu istotności α = 0,05	6,17	0,33	0,018	3,49	0,051

7. Badania silnika AVL 5804 zasilanego olejem napędowym i dodatkiem wodoru

7.1. Badania silnika zasilanego olejem napędowym

Pełną ocenę osiągów i emisji badanego silnika zasilanego jednopaliwowo oparto na analizie wykresów indykatorowych i stężeń emisji związków toksycznych emitowanych przez jednostkę napędową. W celu zwiększenia dokładności przeprowadzonych analiz badania silnika poszerzono o dodatkowe pomiary osiągów i emisji wykonywane przy prędkościach n = 1000, 1500 i 2000 obr/min.

Podczas sporządzania charakterystyk silnika zasilanego standardowo zastosowano stały kąt początku wtrysku α równy 20 ^{o}OWK przed GMP.

W trakcie badań mierzone były:

- osiągi silnika (zużycie paliwa, powietrza),
- ciśnienia w cylindrze,
- emisja spalin.

Badania miały charakter porównawczy w związku z czym przebiegały kilkuetapowo. W opisywanym etapie badań wyznaczono przebiegi wartości ciśnienia indykowanego i wartości emisji związków szkodliwych zawartych w spalinach w ustalonych punktach pracy silnika, przy zasilaniu olejem napędowym. Pomiary te stanowiły tło dla badań prowadzonych w kolejnych etapach, w których silnik zasilano olejem napędowym z dodatkiem gazów palnych. Wyniki pomiarów wielkości mających bezpośredni związek z procesem spalania poddano analizie porównawczej. Badania prowadzono realizując nastawy wyznaczonych punktów zgodnie z ustaloną metodyką. Parametry nastawcze realizowane w trakcie badań oraz nazwy poszczególnych serii pomiarowych przedstawiono w tabeli 7.1.

Tabela 7.1. Punkty pracy silnika AVL5804 zasilanego olejem napędowym

Lp.	Prędkość obrotowa wału korbowego silnika n [obr/min]	Moment obrotowy M_o [Nm]	Dawka paliwa [kg/h]	Strumień masy powietrza $\dot{m}$ [kg/h]	Temperatura cieczy chłodzącej T_c [^{o}C]	Temperatura oleju smarującego T_o [^{o}C]
1.	1000	5	0,39	14,2	85	85
2.	1000	10	0,51	14,1	85	85
3.	1000	15	0,63	14,0	85	85
4.	1500	5	0,39	22	85	85
5.	1500	10	0,52	21,8	85	85
6.	1500	15	0,62	21,8	85	85
7	2000	5	0,41	25,4	85	85
8	2000	10	0,52	25,1	85	85
9	2000	15	0,62	24,8	85	85

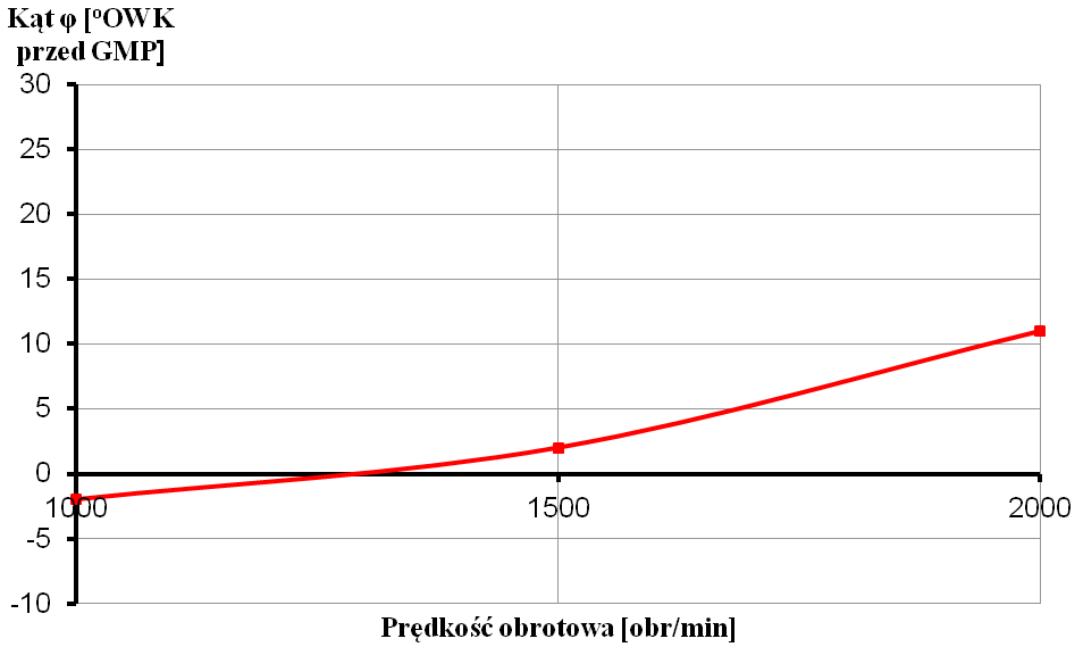
Do każdego z wykresów zawierających przebiegi ciśnień p_c i p_w dołączono przebieg sygnału wymuszającego t. Należy stwierdzić dobrą powtarzalność sygnału sterującego. Ze względu na dużą szybkość jego zmian próbkowanie odbywało się z krokiem 0,2 ^{o}OWK.

7.2. Metodyka doboru kątów początku wtrysku inicjującej zapłon dawki ON przy zasilaniu dwupaliwowym z dodatkiem wodoru

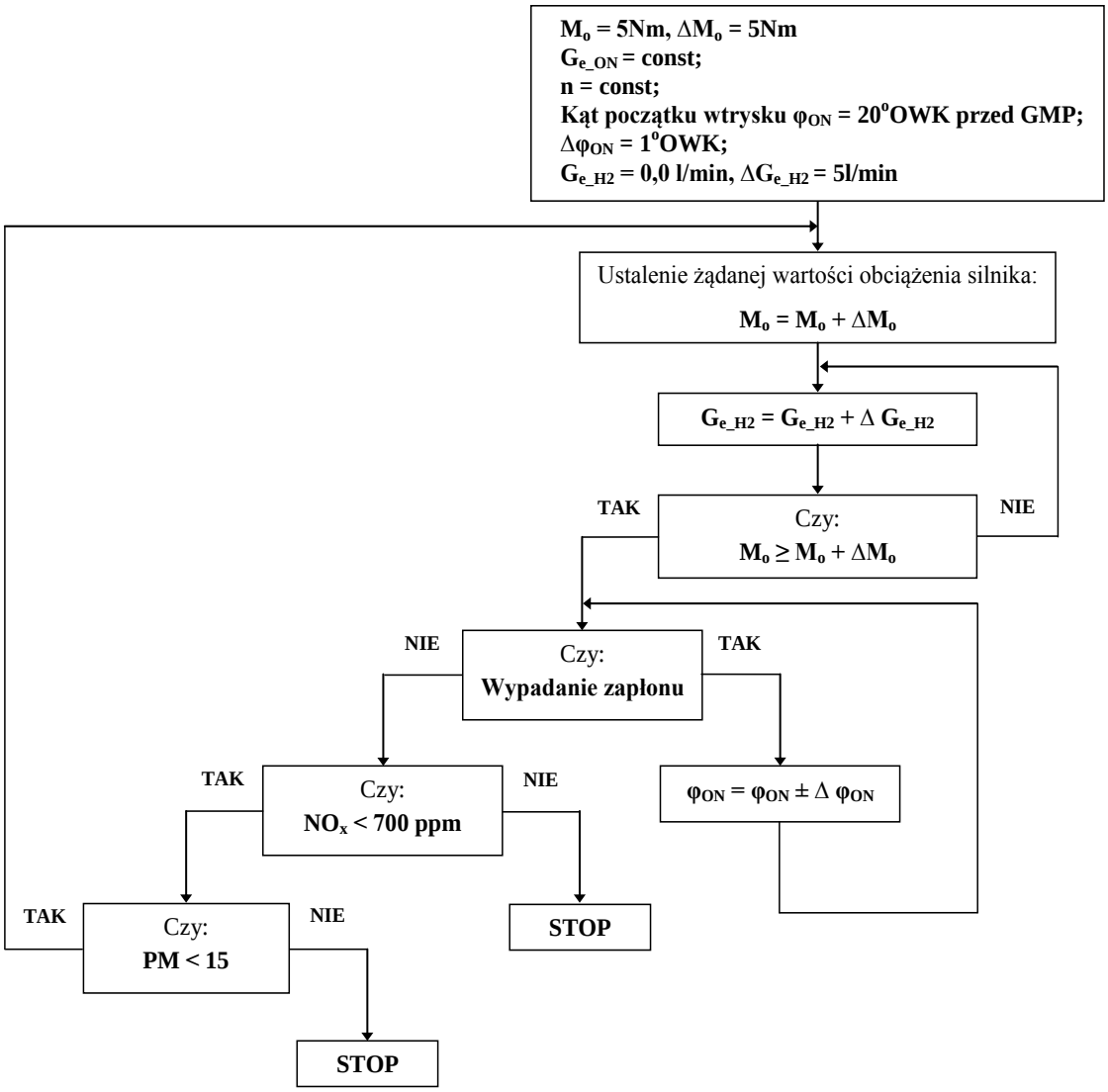
W trakcie badań silnika dwupaliwowego zasilanego olejem napędowym z dodatkiem wodoru przyjęto sposób wtrysku z pojedynczą dawką inicjującą zapłon ON z optymalizowanym kątem początku wtrysku. Ustalono każdorazowo wartość energetyczną inicjującą zapłon dawki ON tak, by umożliwiała stabilną pracę silnika przy obciążeniach M_o = 5, 10 i 15 Nm.

Kąt początku wtrysku dawki inicjującej zapłon ON wynosił φ = 20 ^{o}OWK przed GMP dla obciążenia M_o = 5 Nm i każdej z wybranych prędkości obrotowych silnika. Przy zwiększaniu obciążenia kąt ten każdorazowo był optymalizowany według algorytmu, którego schemat blokowy zamieszczono na rysunku 7.2. Przy opracowaniu algorytmu wykorzystano kryteria: wypadania zapłonu, emisji tlenków azotu oraz zadymienia spalin.

Wykorzystując powyższy algorytm dobrano regulacje kąta początku wtrysku inicjującej zapłon dawki ON. W wyniku optymalizacji kąta początku wtrysku inicjującej zapłon dawki ON otrzymywano maksymalne udziały dodatku wodoru w mieszance powietrzno-wodorowej. Charakterystykę prędkościową kąta φ zamieszczono na rysunku 7.1.



Rys. 7.1. Charakterystyka prędkościowa regulacji kąta początku wtrysku inicjującej zapłon dawki ON przy zasilaniu dwupaliwowym ON-H_2



Rys. 7.2. Algorytm ustalania kąta początku wtrysku φ dla zapłonu dawki ON przy zasilaniu dwupaliwowym ON i H_2

7.3. Charakterystyki obciążeniowe stężeń składników toksycznych spalin (CO, CO_2, HC, NOx i PM) = f(M_o)

W trakcie sporządzania charakterystyk obciążeniowych dla 5, 10, 15 Nm i prędkościach obrotowych 1000, 1500 i 2000 obr/min rejestrowano zawartość podstawowych składników szkodliwych w spalinach, tj.: tlenek węgla, dwutlenek węgla, węglowodory, tlenki azotu i stężenie cząstek stałych, które zaprezentowano na poniższych rysunkach.

Pomiary stężenia związków toksycznych silnika AVL 5804 wykonano w wybranych punktach pracy silnika (tab. 7.1). Parametrami, które zmieniano były: prędkość obrotowa wału korbowego silnika i obciążenie, określane dawką paliwa dostarczoną do cylindra silnika. Serie pomiarowe dla oleju napędowego i oleju

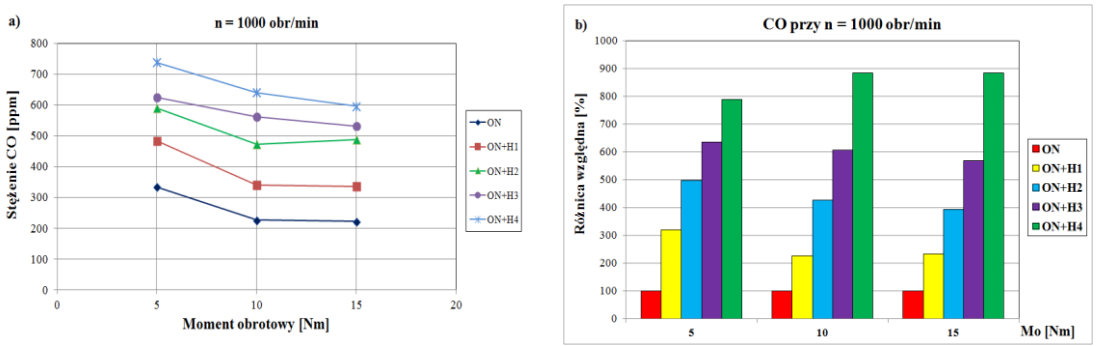
napędowego z dodatkiem wodoru wykonano dla takich samych nastaw silnika. Obciążenie silnika było określone dawką paliwa wtryskiwanego do komory spalania silnika; co było parametrem zmiennym. W pierwszej kolejności wykonano badania dla oleju napędowego i dodatku wodoru dostarczanego mieszalnikiem do kanału dolotowego.

Wartości parametrów nastawczych przyjęto na podstawie wcześniej opisanego algorytmu badań. Wartości parametrów wtrysku przyjęto z zakresu pracy silnika, po to by uzyskać możliwie największe podobieństwo pracy układu wtryskowego do warunków rzeczywistych przy zasilaniu silnika. Przebadane nastawy dla dodatku wodoru do paliwa konwencjonalnego przedstawiono w tab. 7.2.

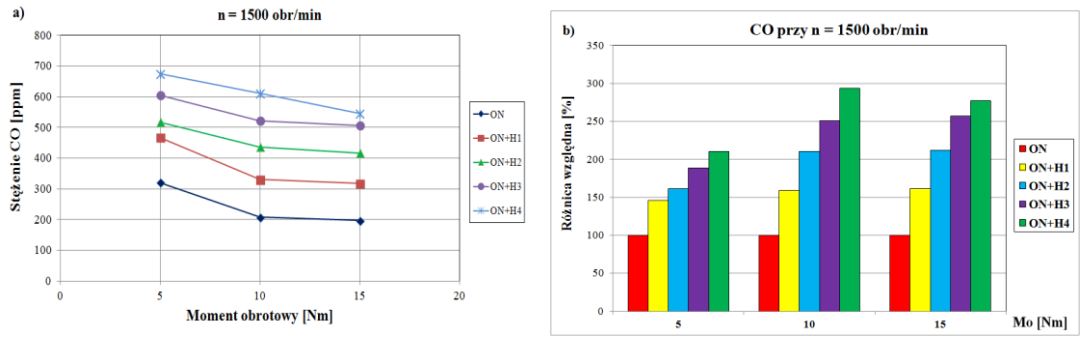
Tabela 7.2. Parametry nastaw silnika AVL5804 zasilanego olejem napędowym i dodatkiem wodoru

Lp.	Oznaczenie	Dawka wodoru [l/m]	Ciśnienie na wyjściu [bar]
1.	ON	–	–
2.	ON + H1	5	3
3.	ON + H2	10	3
4.	ON + H3	25	3
5.	ON + H4	50	3

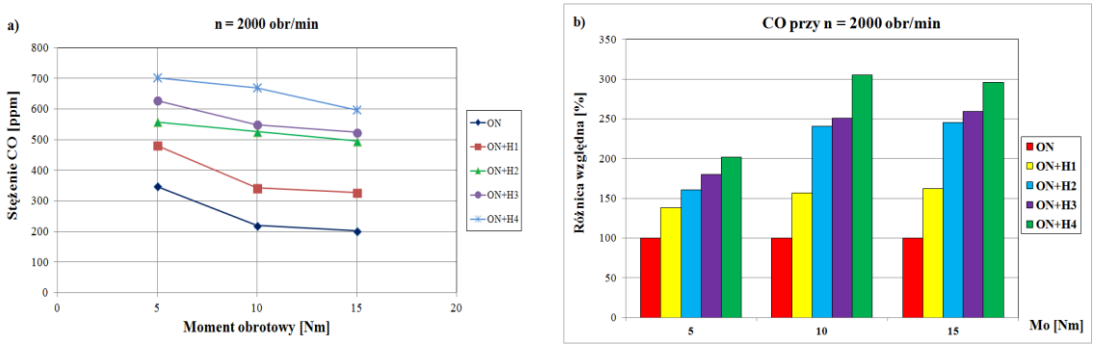
W badaniach dokonano ciągłej rejestracji stężeń składników spalin w czasie 60 sekund pracy silnika w każdym punkcie, które powtarzano 10-cio krotnie. Zamieszczone dalej wyniki badań emisji wykonywane na silniku AVL 5804 są wartościami uśrednionymi.



Rys. 7.3. Zmiana stężenia i różnica względna CO w warunkach charakterystyki obciążeniowej dla n = 1000 obr/min

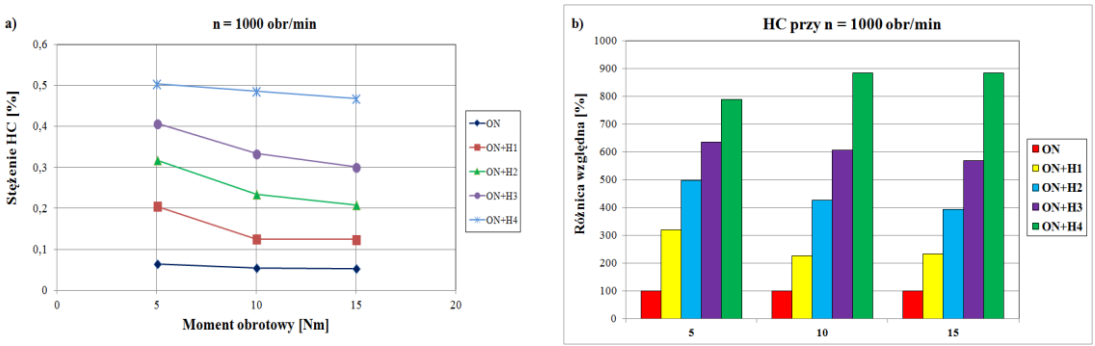


Rys. 7.4. Zmiana stężenia i różnica względna CO w warunkach charakterystyki obciążeniowej dla n = 1500 obr/min

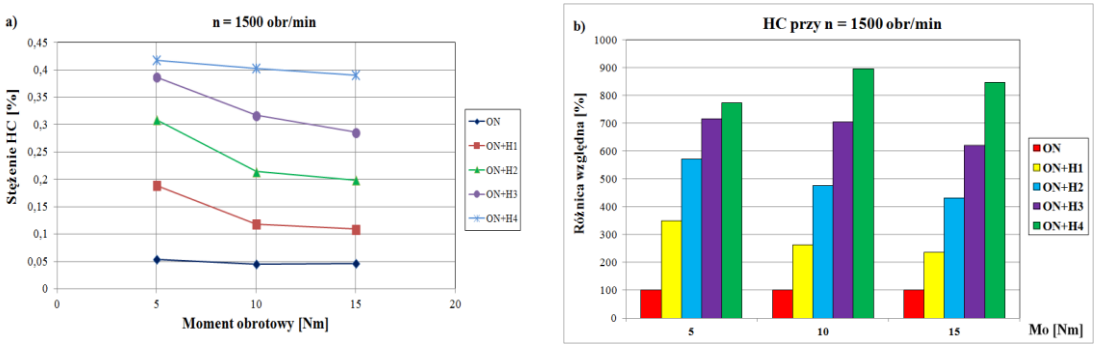


Rys. 7.5. Zmiana stężenia i różnica względna CO w warunkach charakterystyki obciążeniowej dla n = 2000 obr/min

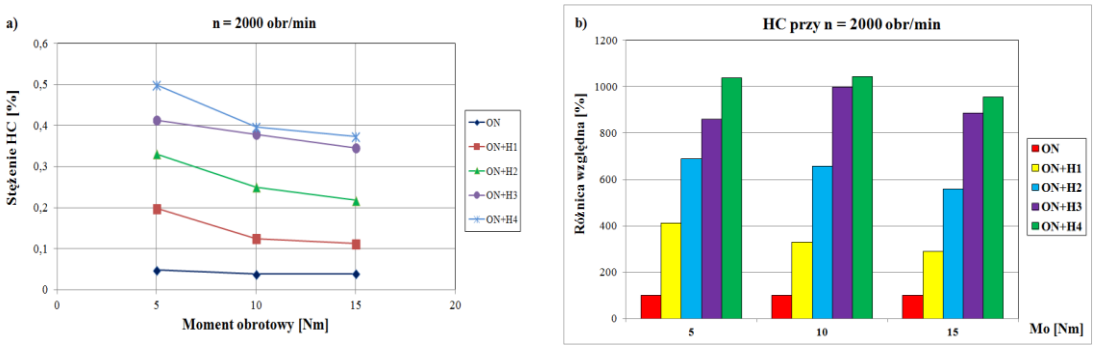
Dokonano pomiaru stężeń wybranych składników spalin w ustalonych punktach pracy silnika. Porównując zmiany stężenia tlenku węgla CO (rys. 7.3-7.5) w spalinach, można stwierdzić wyraźną tendencję do jego podwyższenia w przypadku zasilania olejem napędowym i dodatkiem wodoru. Stężenie CO zmniejsza się wraz ze wzrostem obciążenia silnika, szczególnie w zakresie niskich prędkości obrotowych. W tych warunkach odnotowano nawet trzykrotne zwiększenie stężenia CO. Emisja tlenku węgla świadczy przede wszystkim o lokalnym niedoborze tlenu do potrzeb spalania. Jej podstawową przyczyną jest niewłaściwe dopasowanie zawirowania ładunku do strugi paliwa. Natomiast w mniejszym stopniu zależy od struktury rozpylenia paliwa. W związku z tym wskaźnik ten pełni drugorzędną rolę w ocenie przygotowania paliwa do spalania.



Rys. 7.6. Zmiana stężenia i różnica względna HC w warunkach charakterystyki obciążeniowej dla n = 1000 obr/min

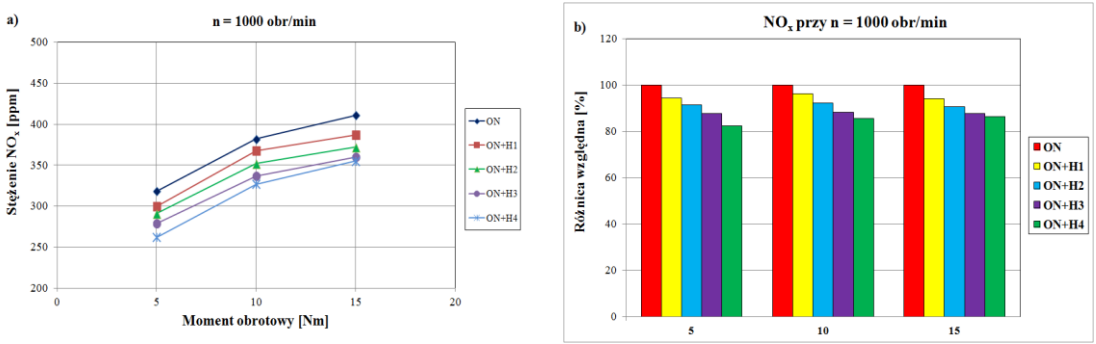


Rys. 7.7. Zmiana stężenia i różnica względna HC w warunkach charakterystyki obciążeniowej dla n = 1500 obr/min

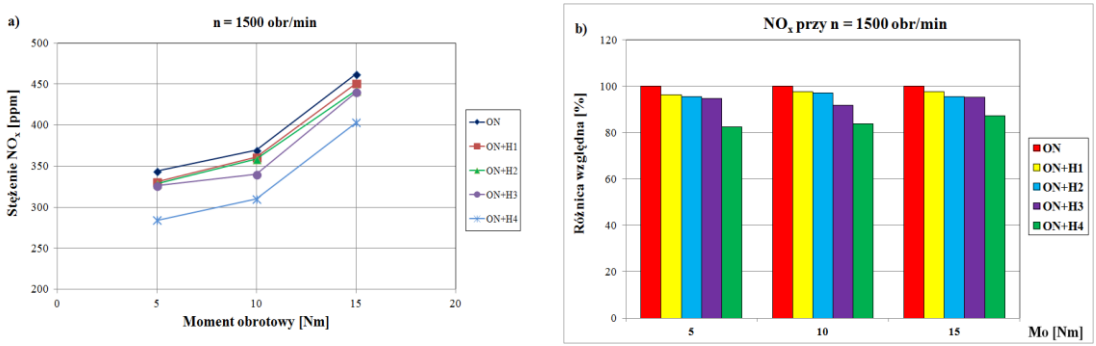


Rys. 7.8. Zmiana stężenia i różnica względna HC w warunkach charakterystyki obciążeniowej dla n = 2000 obr/min

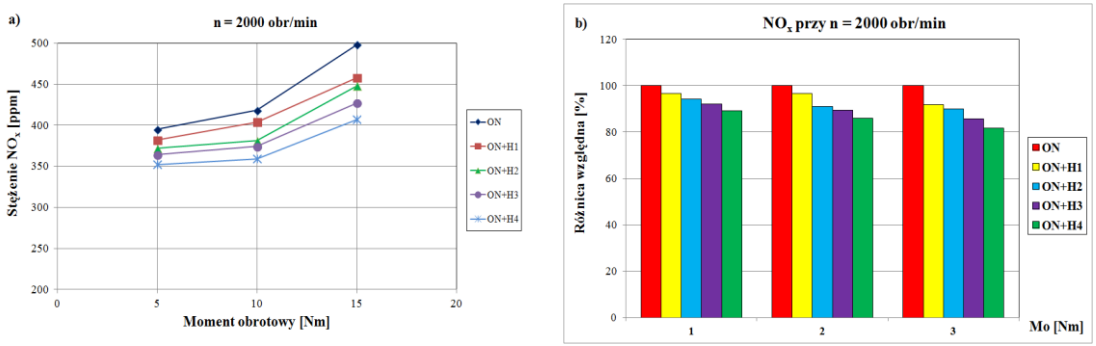
Fakt zwiększenia dla wszystkich pomiarów stężenia węglowodorów w spalinach (rys. 7.6-7.8) należy przypisywać pogorszeniu spalania, a w konsekwencji wolniejszemu odparowaniu paliwa w porównaniu do zasilania konwencjonalnego. Maksymalne zwiększenie równe ok. 480% zaobserwowano dla serii pomiarowej 15 Nm i 2000 obr/min (dodatek wodoru do kanału dolotowego 50 l/min – 25 % objętości względem powietrza) dla wszystkich analizowanych obciążeń silnika. Dla obydwóch charakterystyk obciążeniowych mierzone stężenie węglowodorów w układzie wylotowym ma tendencje do zwiększania się wraz ze wzrostem ilości i stężenia dodatku wodoru.



Rys. 7.9. Zmiana stężenia i różnica względna NO_x w warunkach charakterystyki obciążeniowej dla n = 1000 obr/min

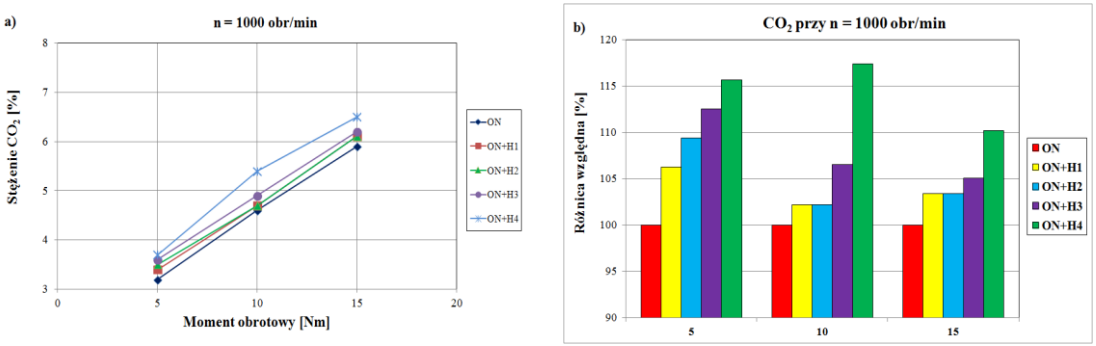


Rys. 7.10. Zmiana stężenia i różnica względna NO_x w warunkach charakterystyki obciążeniowej dla n = 1500 obr/min

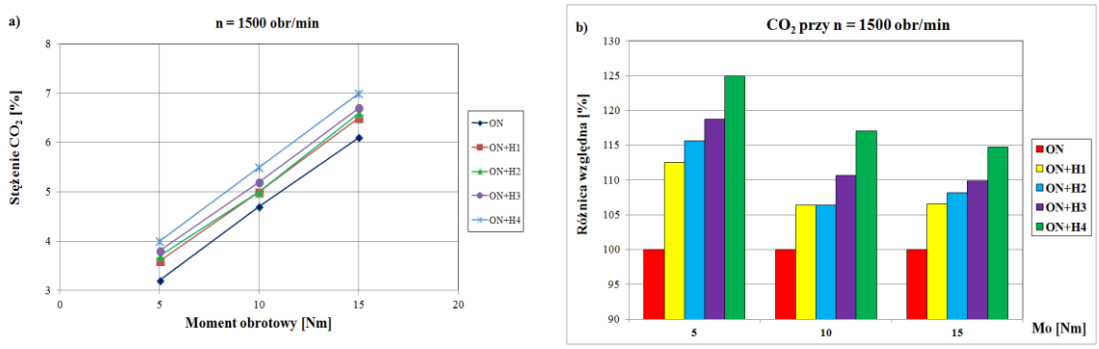


Rys. 7.11. Zmiana stężenia i różnica względna NO_x w warunkach charakterystyki obciążeniowej dla n = 2000 obr/min

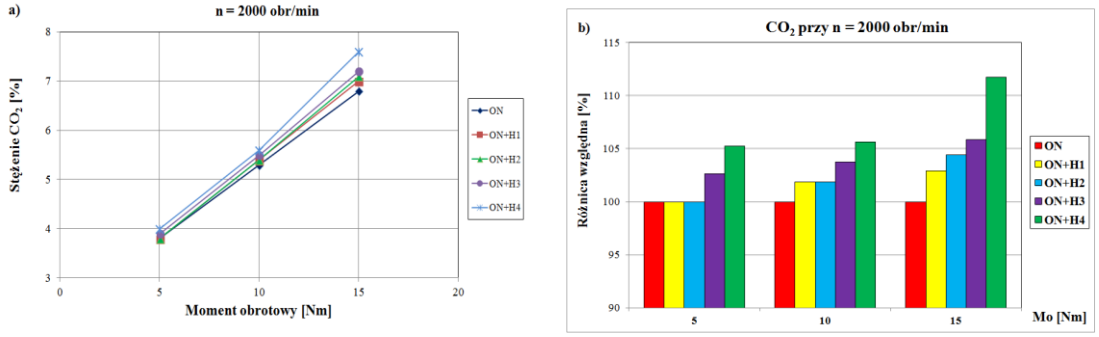
Jednoznaczny spadek stężenia NO_x pokazany na rys. 7.9-7.11, przy zasilaniu dwupaliwowym z dodatkiem wodoru w porównaniu do zasilania czystym olejem bez dodatku wodoru, świadczy o spadku temperatury czynnika w czasie spalania, szczególnie dotyczy to wartości maksymalnych. Spadek temperatury jest możliwy na skutek spowolnienia szybkości procesu spalania i samozapłonu paliwa, tzn. musiał pojawić się czynnik, który tę szybkość zmniejszył. O spadku temperatury nie mogła zaważyć zmiana ilości doprowadzanego paliwa, gdyż w obu przypadkach zasilania ciśnienie w zasobniku utrzymywano na tym samym poziomie, a układ sterowania wtryskiem generował taki sam sygnał elektryczny, zasilający elektromagnes wtryskiwacza. Zatem spadek szybkości spalania musi wynikać ze zmiany struktury spalania oleju napędowego w mieszaninie paliwowo-powietrznej. Wprowadzenie dodatku wodoru do powietrza w celu całkowitego i zupełnego spalenia oleju napędowego musiało wywołać pogorszenie reakcji spalania z punktu widzenia procesu fizykochemicznych.



Rys. 7.12. Zmiana stężenia i różnica względna CO_2 w warunkach charakterystyki obciążeniowej dla n = 1000 obr/min

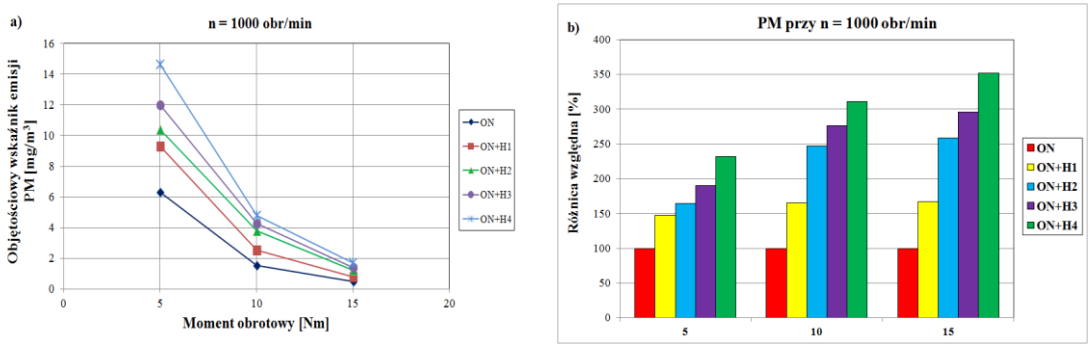


Rys. 7.13. Zmiana stężenia i różnica względna CO_2 w warunkach charakterystyki obciążeniowej dla n = 1500 obr/min

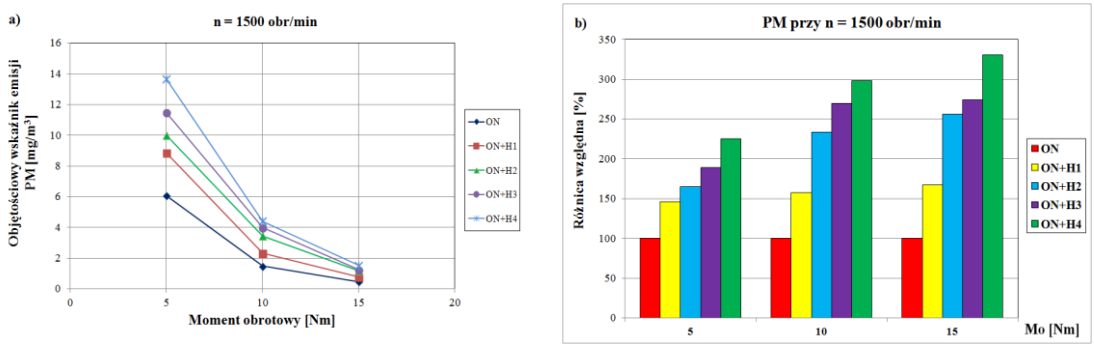


Rys. 7.14. Zmiana stężenia i różnica względna CO_2 w warunkach charakterystyki obciążeniowej dla n = 2000 obr/min

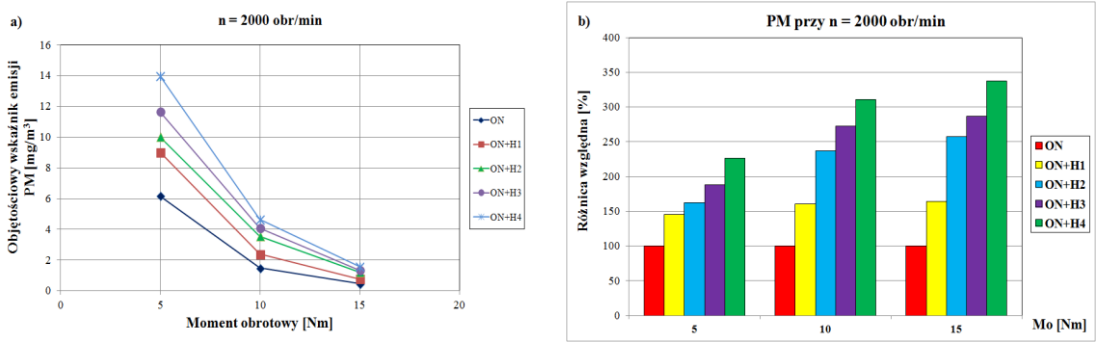
We wszystkich przypadkach pomiarów przy zasilaniu silnika dwupaliwowo z dodatkiem wodoru stwierdzono jednoznaczne i zdecydowane podwyższenie wartości dwutlenku węgla w porównaniu do zasilania olejem napędowym bez wodoru (rys. 7.12-7.14), prawie o 20 % w obszarach pracy silnika .



Rys. 7.15. Zmiana objętościowego wskaźnika emisji i różnica względna PM w warunkach charakterystyki obciążeniowej dla n = 1000 obr/min



Rys. 7.16. Zmiana objętościowego wskaźnika emisji i różnica względna PM w warunkach charakterystyki obciążeniowej dla n = 1500 obr/min



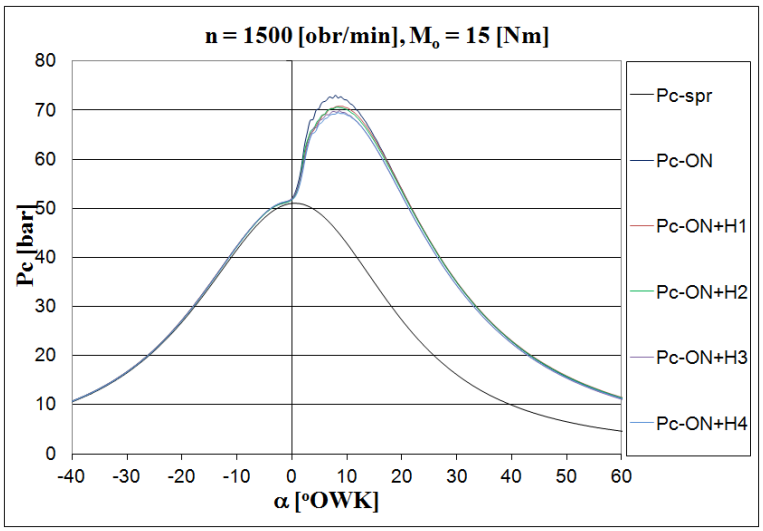
Rys. 7.17. Zmiana objętościowego wskaźnika emisji i różnica względna PM w warunkach charakterystyki obciążeniowej dla n = 2000 obr/min

Wyniki pokazane na rysunkach 7.15-7.17 wskazują jednoznacznie, że wraz ze zwiększaniem udziału objętościowego wodoru w mieszaninie powietrzno-wodorowej dostarczanej do komory spalania i współspalanej z paliwem konwencjonalnym znacząco wzrasta stężenie cząstek stałych w spalinach. Wysoce reaktywny wodór w połączeniu z tlenem inhibituje reakcje wolnorodnikowe oleju napędowego, które to są najważniejszym czynnikiem utleniania sadzy. Ponadto czynnikiem dodatkowym jest tutaj efekt obniżenia temperatury wywołany przez dezaktywację nadtlenków, co znacząco zmniejsza szybkość reakcji pirolizy i może powodować wzrost stężenia cząstek stałych w spalinach. Przedstawione wyniki podkreślają fundamentalne aspekty wpływu dodatku wodoru na powstawanie sadzy i utleniania.

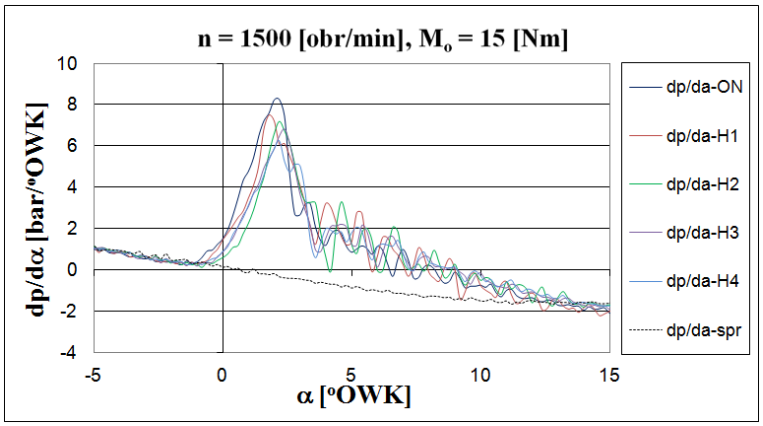
7.4. Analiza procesu spalania w silniku o ZS zasilanym olejem napędowym i dodatkiem wodoru

W trakcie sporządzania charakterystyk obciążeniowych w każdym punkcie pomiarowym rejestrowano także wybrane przebiegi ciśnień w komorze spalania w funkcji kąta obrotu wału korbowego. Każdorazowo rejestrowano po 30 kolejnych przebiegów. Uzyskane wyniki uśredniono, a następnie sporządzono charakterystyki uśrednione dla przyjętych parametrów pracy silnika (prędkości obrotowej [obr/min] oraz momentu obrotowego [Nm]).

W niniejszym podrozdziale zestawiono charakterystyki dla silnika zasilanego standardowo olejem napędowym oraz dla silnika zasilanego olejem napędowym z dodatkiem wodoru. Zaprezentowane badania przedstawiają wyniki dla prędkości obrotowej n = 1500 obr/min i obciążenia M_o = 10 Nm rys. (7.18), kierowano się zasadą, by możliwe było zestawienie i porównanie omawianych charakterystyk dla każdego z rozpatrywanych przypadków zasilania silnika badawczego AVL 5804.



Rys. 7.18. Zmiany przebiegu procesu spalania w komorze spowodowane dodatkiem wodoru do kanału dolotowego współspalanego z olejem napędowym na dla n = 1000 obr/min, p_w = 50 MPa, M_o = 15 Nm

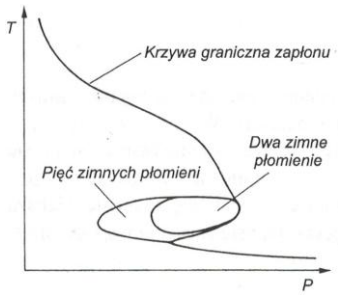


Rys. 7.19. Zmiany szybkość narastania ciśnienia dp/dα spowodowane dodatkiem wodoru do kanału dolotowego współspalanego z olejem napędowym na dla n = 1000 obr/min, p_w = 50 MPa, M_o = 15 Nm

Na rysunkach 7.18 i 7.19 przedstawiono wpływ dodatku gazu LPG i wodoru dostarczanych wraz z powietrzem do komory spalania na przebieg ciśnienia w cylindrze p_c i zmiany szybkości narastania ciśnienia $dp_c/d\alpha$ jako funkcji kąta obrotu wału korbowego α. W porównaniu do zasilania konwencjonalnego obecność wodoru w mieszance powietrzno-wodorowej wywołuje zauważalne zmiany w przebiegu wartości p_c. Znaczące zmniejszenie maksymalnej wartości p_c odnotować można dla dodatku wodoru 25 l/min, co w przeliczeniu na objętościowy udział wodoru względem powietrza daje 12,5 % wodoru, 87,5 % powietrza. Wynik ten świadczy o tym, że większa ilość wodoru mieszance powietrzno wodorowej w znaczącym stopniu zmienia parametry fizykochemiczne spalanego oleju napędowego, które determinują ściśliwość i bezwładność ośrodka zmniejszając ciśnienie maksymalne o prawie 4 bary.

7.5. Zmiany chemiczne oleju napędowego z dodatkiem wodoru

Podczas chemicznego opóźnienia samozapłonu w mieszance palnej zachodzą reakcje chemiczne, pozwalające na przygotowanie paliwa do spalania. Reakcje te dla większości paliw węglowodorowych przebiegają dwustopniowo, w konsekwencji czego zachodzą one po prawej stronie krzywej granicznej wybuchowości (rys. 7.20) [KA].



Rys. 7.20. Krzywa graniczna samozapłonu we współrzędnych P-V obrazująca wielostopniowość procesu zapłonu paliw węglowodorowych

Po pewnym czasie ogrzewania mieszaniny dochodzi do pojawienia się tzw. zimnych płomieni. W reakcjach chemicznych, którym płomienie te towarzyszą, powstają cząsteczki mające charakter nietrwały. Są to:

- wolne rodniki alkilowe (tj. cząsteczki węglowodorów pozbawione atomu wodoru), oznaczone w pracy literą R,
- nadtlenki, tj. związki typu ROO oraz związki typu ROOH,
- aldehydy, np. formaldehyd HCHO i acetaldehyd CH_3CHO, tj. związki typu RCHO.

Procesy zachodzące podczas tych reakcji mogą być przedstawione za pomocą następującego schematu:

zainicjowanie łańcucha – powstanie wolnego rodnika alkilowego:

$$RH + O_2 \rightarrow HO_2 + R \qquad (7.1)$$

rozwinięcie łańcucha – powstanie nadtlenków lub formaldehydu:

$$R + O_2 \rightarrow ROO \tag{7.2}$$

$$ROO + RO \rightarrow ROOH + R \tag{7.3}$$

$$ROOH \rightarrow RO + OH \tag{7.4}$$

równolegle z reakcją 7.4 przebiegają następujące reakcje:

$$ROOH + H \rightarrow H_2 + ROO \tag{7.4'}$$

$$ROOH + OH \rightarrow H_2O + ROO \tag{7.4''}$$

Zależność czasu opóźnienia zimnych płomieni od ciśnienia i temperatury uwzględnia wzór:

$$\tau_1 = k_1 P_0^{-n} \tag{7.5}$$

gdzie:

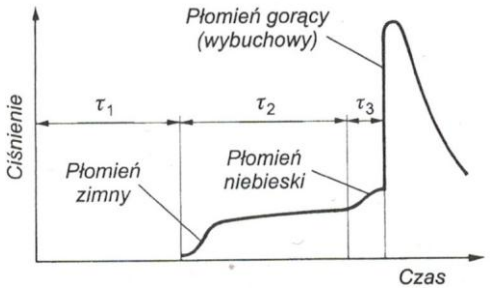
- $k_1 = k_1(T)$,
- n – wykładnik węglowodorowy, w zakresie temperatur 440÷570 ^oC wynosi 0,5÷1,1.

W czasie krytycznej koncentracji nadtlenków następuje kolejno ich rozpad. Wówczas w temperaturze 300÷400 ^oC pojawiają się zimne płomienie (promieniowanie o długości fali 360÷450 nm) i towarzysząca im chemiluminescencja, jest bezpośrednią konsekwencją reakcji chemicznej, w wyniku której powstaje wzbudzony chemicznie formaldehyd, którego formowanie opisują poniższe reakcje:

$$\begin{gathered} CH_3 + HO_2 \rightarrow HCHO^* + H_2O \\ CH_3 + CHO_3 \rightarrow HCHO^* + H_2O + CO \\ CH_3CO + O_2 \rightarrow HCHO^* + CO + OH \end{gathered} \tag{7.6}$$

* – stan wzbudzenia chemicznego

Reakcjom chemicznym okresu zimnych płomieni towarzyszy zwiększanie ciśnienia, które w czasie całego tego okresu utrzymuje się na stałym poziomie (rys. 7.21) [KA].



Rys. 7.21. Wielostopniowość opóźnienia procesu samozapłonu paliw węglowodorowych, gdzie: τ_1 – czas opóźnienia zimnych płomieni, τ_2 – czas opóźnienia niebieskich płomieni, τ_3 – czas opóźnienia gorących (inicjujących wybuch) płomieni

W dalszej kolejności reakcje przechodzą wg nadtlenkowego lub formaldehydowego schematu, przy czym warto dodać, że w wyższych temperaturach zachodzą reakcje wg schematu formaldehydowego, natomiast przy pewnym krytycznym stężeniu następuje rozpad formaldehydu, czemu towarzyszy przyrost ciśnienia i pojawiają się niebieskie płomienie. Pojawiające się promieniowanie pochodzi od chemicznie wzbudzonych cząsteczek oznaczonych w pracy, jako: CH* i HCO*, przy czym te drugie formują się zgodnie z reakcjami (7.7).

$$HCHO + O_2 \rightarrow \begin{cases} HCO^* + HO_2 \\ \\ CO + 2OH \end{cases} \tag{7.7}$$

$$HCHO + OH \rightarrow HCO^* + H_2O \tag{7.8}$$

Towarzyszące niebieskim płomieniom reakcje są wysoce egzotermiczne i zachodzą przy stosunkowo małym nadmiarze powietrza ($\lambda \geq 1$). W temperaturze 500÷800 °C dochodzi do utleniania węglowodorów na CO oraz w dalszym procesie na CO_2. Czas występowania niebieskich płomieni jest stosunkowo krótki i prowadzi do powstawania gorących płomieni (spalanie wybuchowe), czemu towarzyszy gwałtowny przyrost ciśnienia.

W wyniku realizacji założeń pracy doktorskiej polegających na zbadania wpływu dodatku wodoru dostarczanego do kanału dolotowego wraz z powietrzem i dalej do komorzy spalania silnika badawczego AVL 5804 w celu współspalania go z olejem napędowym. W związku z powyższym inicjujące reakcje zachodzące między danym węglowodorem RH, a tlenem cząsteczkowym miały najprawdopodobniej następujący przebieg (w wyniku czego uzyskano wykazane w dysertacji pogorszenie procesu spalania i wskaźników ekologicznych silnika badawczego):

$$RH + O_2 \rightarrow R^{\cdot} + HO_2 \tag{7.9}$$

powstałe w wyniku tej reakcji wolne rodniki $R^{\cdot}$ reagują dalej z tlenem, powodując powstanie nadtlenków:

$$R^{\cdot} + O_2 \rightarrow RO_2 \tag{7.10}$$

które następnie reagują z węglowodorem, tworząc wodoronadtlenki oraz odtwarzając wolne rodniki:

$$RH + RO_2 \rightarrow RO_2H + R^{\cdot\cdot} \tag{7.11}$$

gromadzące się w tej reakcji wodoronadtlenki ulegają podczas spalania gwałtownemu rozpadowi:

$$RO_2H \rightarrow RO^{\cdot} + OH^{\cdot} \tag{7.12}$$

W związku z czym powstałe rodniki mogą w analizowanych w pracy warunkach zapoczątkować utlenianie wyjściowych węglowodorów. Wszystkie powyższe reakcje są przykładami łańcuchowych reakcji spalania.

W wyniku dostarczenia wodoru do kolektora dolotowego wszystkie reakcje spalania węglowodorów mogą przebiegać przez formę nadtlenków (7.10), które są promotorem reakcji wolnorodnikowych w reakcjach 7.11 i 7.12.

W rozpatrywanym przypadku wodór w sposób naturalny może dezaktywować tlenki przekształcając je w wodę, co powoduje wyraźne hamowanie rozwoju łańcuchowych reakcji spalania:

$$RO_2 + H_2 \rightarrow RO^{\cdot} + H_2O \qquad (7.13)$$

W efekcie nie zachodzi więc **najważniejsza** reakcja wodoronadtlenków z wyjściowym węglowodorem – reakcja 7.11.

Ponadto wodór może również inhibitować wyżej wymienione reakcje wolnorodnikowe spalanie węglowodorów ze względu na wysoką w porównaniu z olejem napędowym liczbę oktanową (odpowiednio 130 i 30). W wyniku utleniania wodoru może powstawać woda, która wyraźnie hamuje procesy wolnorodnikowe.

Wykonane badania wpływu dodatku wodoru na poprawę wskaźników ekologicznych silników z zapłonem samoczynnym zasilanych paliwami konwencjonalnymi miały charakter badań rozpoznawczych z istotnym aspektem możliwości aplikacyjnych ich wyników. Uwidoczniły one znaczący, negatywny wpływ dodatku wodoru dostarczanego kolektora dolotowego, który skutkował pogorszeniem właściwości emisyjnych jednostki badawczej oraz obniżeniem ciśnień maksymalnych w komorze spalania.

Jednostkę napędową zasilaną dwupaliwowo charakteryzuje poprawa sprawności ogólnej przy zachowaniu ustalonego momentu obrotowego. Wynikać ona może z lepszej sprawności cieplnej silnika.

Należy wskazać w tym przypadku na znaczny wzrost wartości stężeń CO i THC zwiększający się wraz ze zwiększaniem udziału objętościowego wodoru względem powietrza. Spowodowane to może być niecałkowitym i niezupełnym spalaniem paliwa konwencjonalnego a także wygaszaniem płomienia w przestrzeni pomiędzy denkiem tłoka a głowicą. Wywołane to może zostać przez dezaktywację tlenków, które to poprzez udział wodoru przekształcają się w wodę hamując tym samym rozwój łańcuchowych reakcji spalania, hamując tym samym procesy wolnorodnikowe co prowadzi do obniżenia temperatury w komorze spalania.

Ponadto charakteryzujący się wysokim współczynnikiem dyfuzji wodór może powodować wzrost szybkości spalania laminarnego, przez co przebieg spalania dyfuzyjnego przebiega w fazie charakterystycznej dla dopalania paliwa, która to charakteryzuje się znacznie trudniejszymi warunkami, co pogarsza proces samozapłonu i spalania oleju napędowego. W wyniku dodatku wodoru dochodzi do zaburzenia równowagi pomiędzy liczbą powstałych łańcuchów a liczbą łańcuchów zerwanych, przez co zgodnie z kinematyką chemiczną zmieniona zostaje temperatura samozapłonu

Słuszne zatem wydaje się być stwierdzenie, że wraz ze wzrostem dodatku wodoru dostarczanego do kanału dolotowego silnika badawczego AVL 5804 następuje pogorszenie wskaźników ekologicznych wywołane pogorszeniem procesu samozapłonu i spalani oleju napędowego.

Zasilanie silnika AVL 5804 olejem napędowym z dodatkiem wodoru dostarczanego do kolektora dolotowego spowodowało wyraźną zmianę wskaźników termodynamicznych i ekologicznych tzn.:

- **maksymalne zmniejszenie szybkości narastania ciśnienia dp/dα o około 10%,**
- **maksymalne zmniejszenie wartości ciśnienia maksymalnego w komorze spalania o około 10%,**
- **zwiększenie stężenia tlenku węgla o około 200%,**
- **zmniejszenie stężenia tlenków azotu o około 20%,**
- **zmniejszenie stężenia nie spalonych węglowodorów o około 500%,**
- **zwiększenie stężenia cząstek stałych około 200%.**

8. Badania silnika AVL 5804 zasilanego olejem napędowym z dodatkiem wodoru i LPG

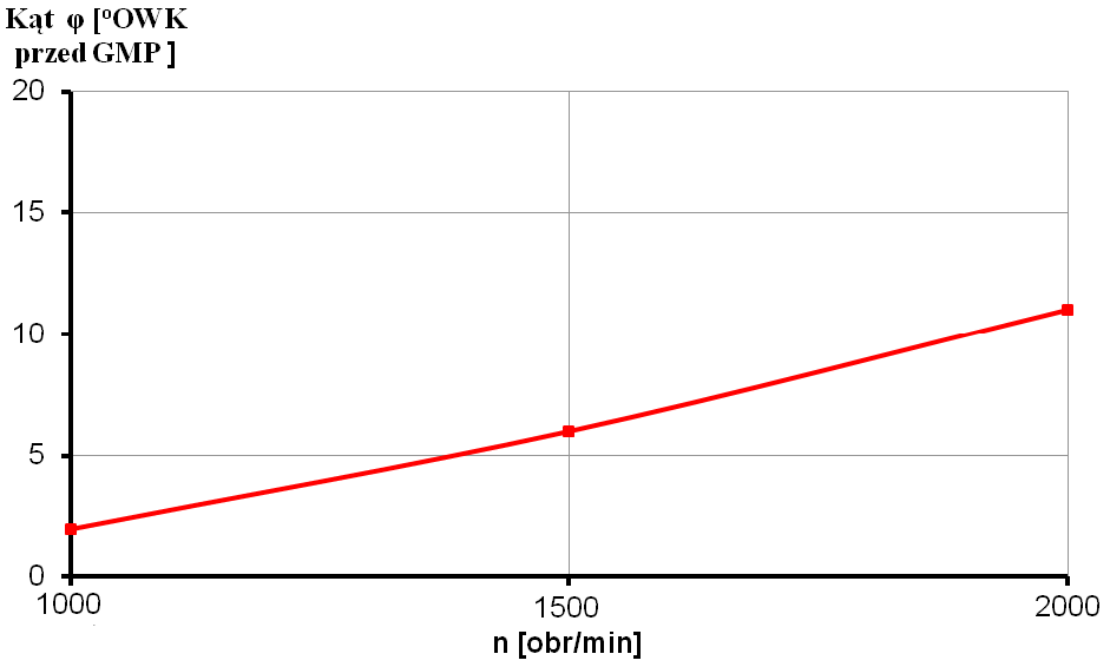
8.1. Metodyka doboru kątów początku wtrysku inicjującej zapłon dawki ON przy zasilaniu z dodatkiem wodoru i LPG

W niniejszym rozdziale zaprezentowano wyniki badań dwupaliwowego silnika zasilanego olejem napędowym z dodatkiem wodoru i gazu propan-butan (udział propanu 60%, udział butanu 40%) i porównano je z badaniami silnika bazowego zasilanego standardowo olejem napędowym. Zasilanie standardowe realizowane było z wtryskiem jednej dawki ON przy stałym kącie początku wtrysku (φ = 20 ^{o}OWK przed GMP).

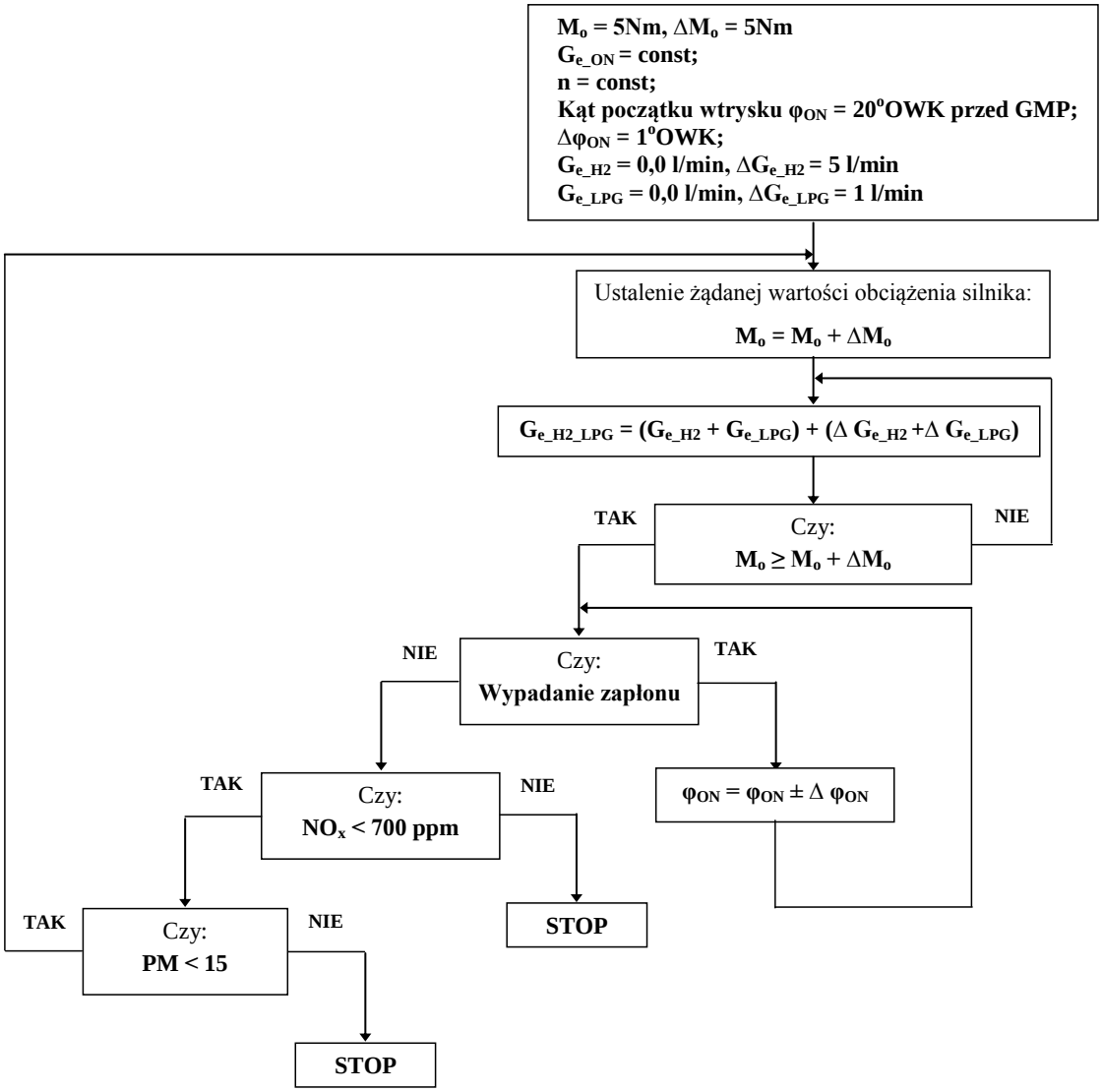
Wartości obciążeń wynosiły odpowiednio M_o = 5, 10 i 15 Nm dla przyjętych już wcześniej trzech prędkości obrotowych n = 1000, 1500 i 2000 obr/min.

Tak jak przy zasilaniu olejem napędowym z dodatkiem wodoru, przy zwiększaniu obciążenia kąt początku wtrysku każdorazowo był optymalizowany według algorytmu, którego schemat blokowy zamieszczono na rysunku 9.2. Przy opracowaniu algorytmu wykorzystano te same kryteria: wypadanie zapłonu, emisja tlenków azotu oraz zadymienie spalin.

Otrzymaną charakterystykę prędkościową kąta φ zamieszczono na rysunku 8.1.



Rys. 8.1. Charakterystyka prędkościowa regulacji kąta początku wtrysku inicjującej zapłon dawki ON przy zasilaniu dwupaliwowym ON + H_2 + LPG



Rys. 8.2. Algorytm ustalania kąta początku wtrysku φ dla zapłonu dawki ON przy zasilaniu dwupaliwowym ON oraz H_2 i LPG

8.2. Charakterystyki obciążeniowe stężeń składników toksycznych spalin (CO, CO_2, HC, NO_x i PM) = f(M_o)

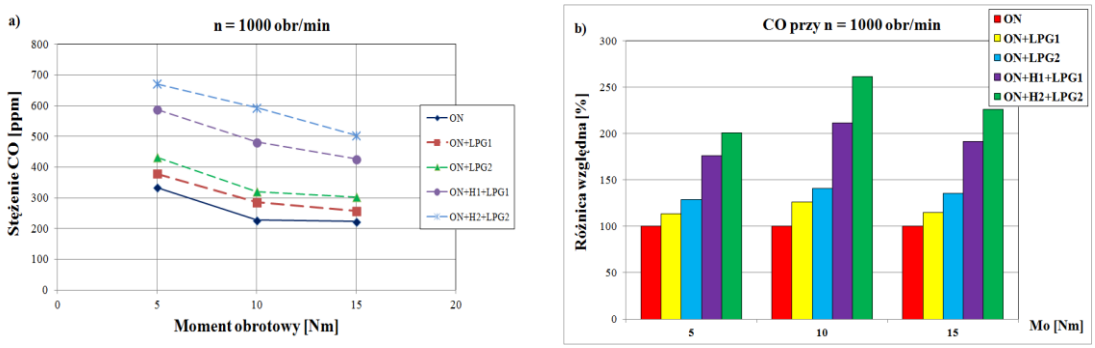
Sporządzono charakterystyki obciążeniowe, podczas których rejestrowano zawartość podstawowych składników szkodliwych w spalinach, tj.: tlenek węgla, dwutlenek węgla, węglowodory, tlenki azotu i stężenie cząstek stałych.

W celu możliwości wykonania szczegółowej analizy wyników pomiarów przyjęto wartości parametrów nastawczych zgodnie z opisanym algorytmem badań. Wartości parametrów wtrysku przyjęto z zakresu pracy silnika, po to by uzyskać możliwie największe podobieństwo pracy układu wtryskowego do warunków rzeczywistych przy zasilaniu silnika olejem napędowym z dodatkiem gazu LPG i wodoru. Przebadane nastawy przedstawiono w tab. 8.2.

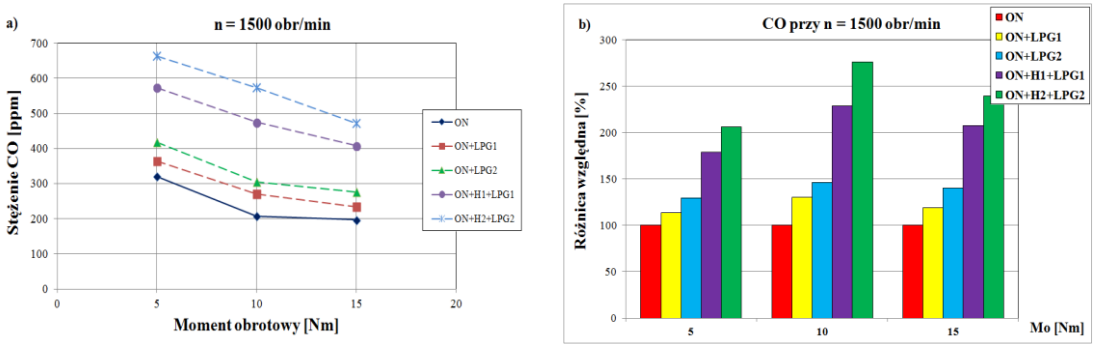
Tabela 8.2. Parametry nastaw silnika AVL5804 zasilanego olejem napędowym z dodatkiem wodoru i gazu LPG

Lp.	Oznaczenie	Dawka wodoru [l/m]	Dawka gazu LPG [l/m]	Ciśnienie na wyjściu [bar]
1.	ON	–	–	–
2.	ON + LPG1	–	2	3
3.	ON + LPG2	–	5	3
4.	ON + H1 + LPG1	2	2	3
5.	ON + H2 + LPG2	10	5	3

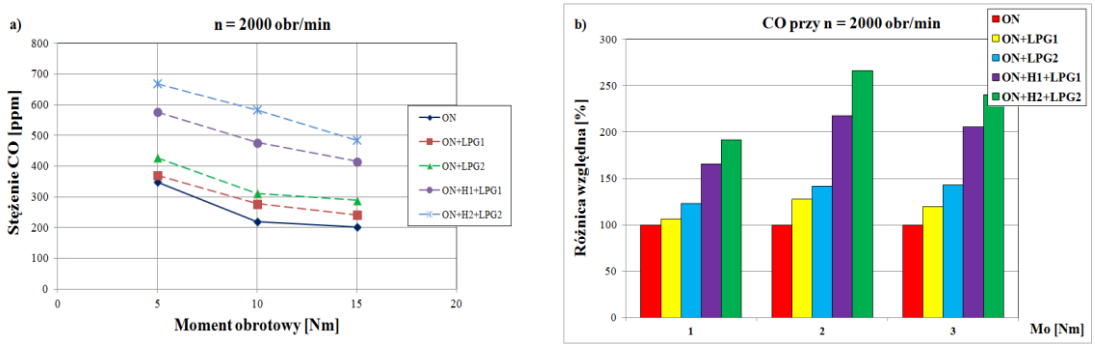
W badaniach dokonano tak, jak we wcześniejszych badaniach ciągłej rejestracji stężeń składników spalin w czasie 60 sekund pracy silnika w każdym punkcie, które powtarzano 10-cio krotnie. Zamieszczone dalej wyniki badań emisji wykonywane na silniku AVL 5804 były następnie uśredniane.



Rys. 8.3. Zmiana stężenia i różnica względna CO w warunkach charakterystyki obciążeniowej dla n = 1000 obr/min

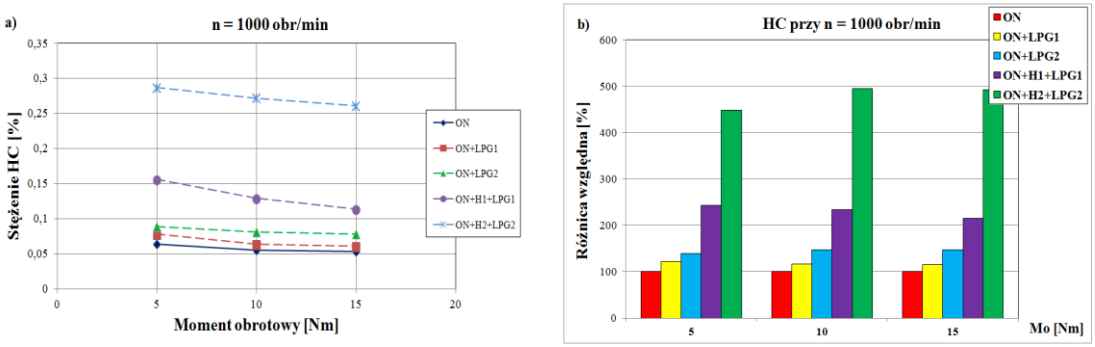


Rys. 8.4. Zmiana stężenia i różnica względna CO w warunkach charakterystyki obciążeniowej dla n = 1500 obr/min

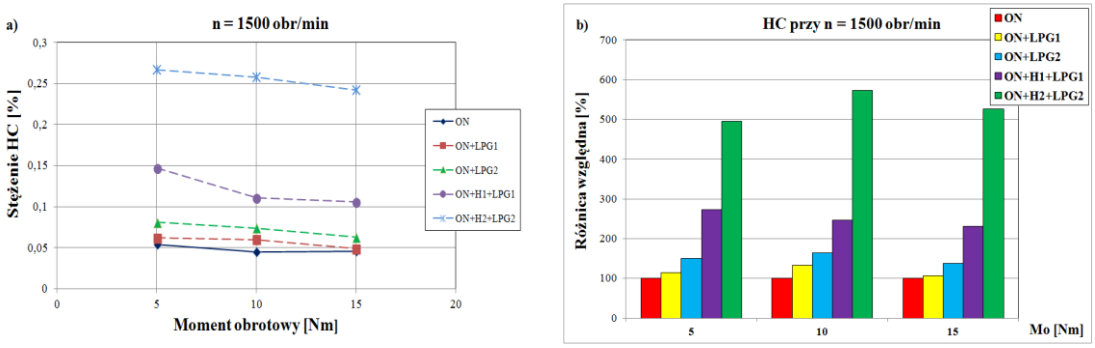


Rys. 8.5. Zmiana stężenia i różnica względna CO w warunkach charakterystyki obciążeniowej dla n = 2000 obr/min

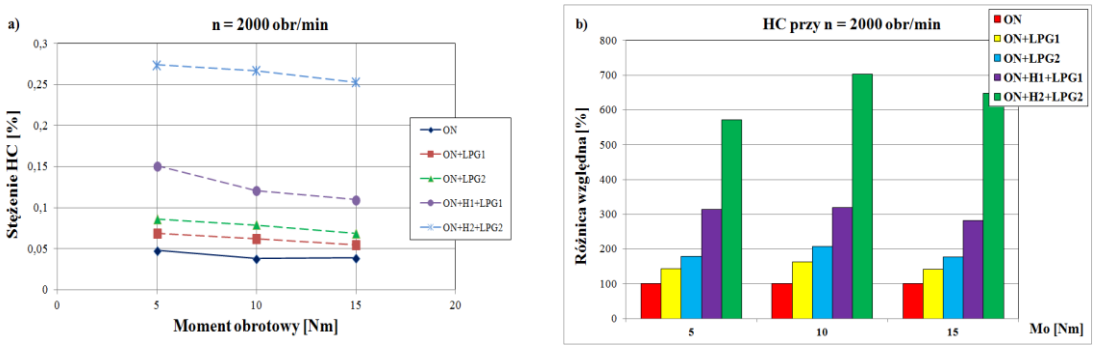
W kolejnym etapie badań wykonano pomiaru stężeń wybranych składników spalin w ustalonych punktach pracy silnika zasilanego dwupaliwowo z dodatkiem gazu propan-butan i analizowanego wcześniej wodoru. Porównując zmiany stężenia tlenku węgla CO (rys. 8.3-8.5) w spalinach, można stwierdzić nieznaczną tendencję jego podwyższenia w przypadku zasilania olejem napędowym i dodatkiem gazu LPG. Stężenie CO zmniejsza się wraz ze wzrostem obciążenia silnika, szczególnie w zakresie niskich prędkości obrotowych. Analizując zmiany stężenia CO w gazach wylotowych, można stwierdzić natomiast dużą tendencję jego podwyższenia w przypadku zasilania olejem napędowym z dodatkiem gazu LPG i wodoru. Emisja ta świadczy o lokalnym niedoborze tlenu do potrzeb spalania i zakłócaniu przebiegu reakcji spalania oleju napędowego. Jej podstawową przyczyną jest rozbijanie wiązań wodorowych, co ewidentnie pogarsza proces spalania oleju napędowego w silniku o zapłonie samoczynnym.



Rys. 8.6. Zmiana stężenia i różnica względna HC w warunkach charakterystyki obciążeniowej dla n = 1000 obr/min

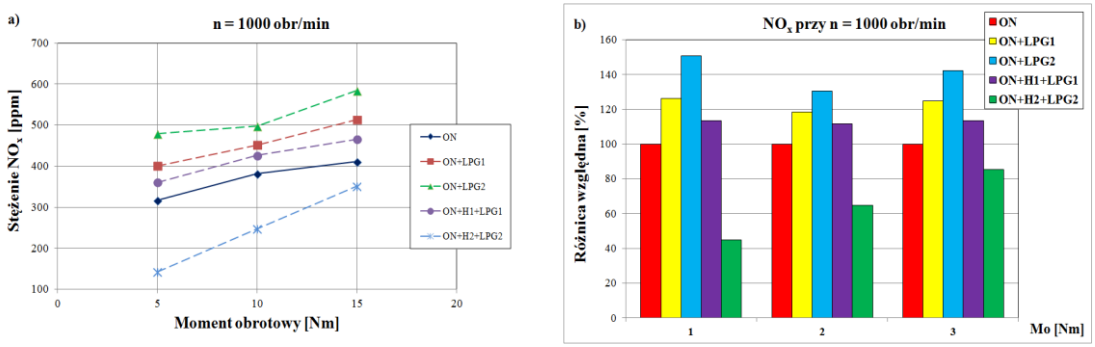


Rys. 8.7. Zmiana stężenia i różnica względna HC w warunkach charakterystyki obciążeniowej dla n = 1500 obr/min

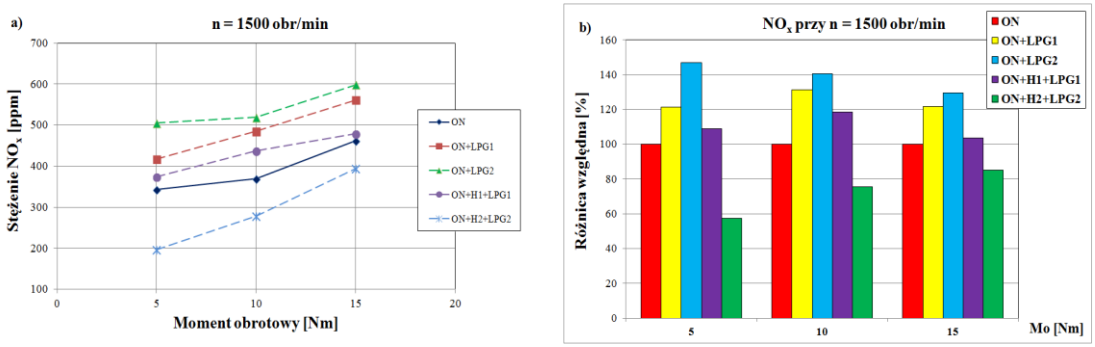


Rys. 8.8. Zmiana stężenia i różnica względna HC w warunkach charakterystyki obciążeniowej dla n = 2000 obr/min

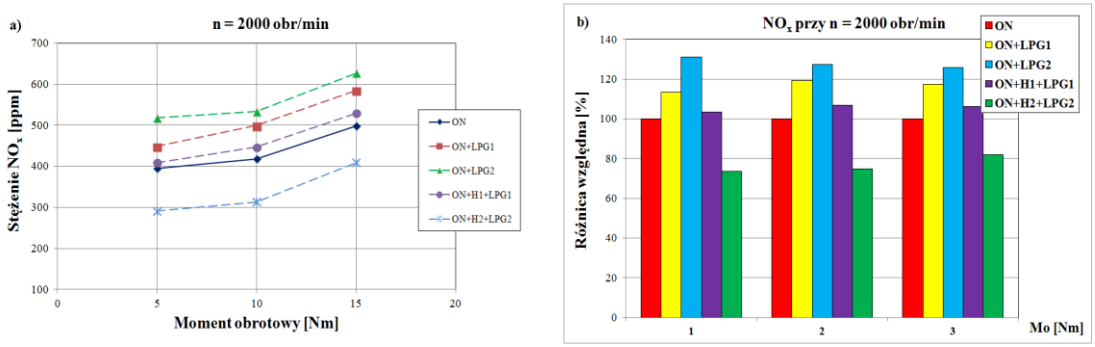
Fakt nieznacznego wzrostu wartości stężeń węglowodorów w spalinach (rys. 8.6-8.8) można powiązać z nieprzystosowaniem kory spalania do spalania paliwa gazowego propan-butan, a w konsekwencji prowadzi to do wolniejszego odparowaniu paliwa. Ogromny wzrost dla wszystkich wyników pomiarów stężenia węglowodorów w spalinach dla przypadku dodatku wodoru do gazu LPG do powietrza i próbie spalenia w tej mieszaninie oleju napędowego spowodowała drastyczny wzrost wartości HC, co można przypisywać pogorszeniu reakcji spalania węglowodorów z gazem propan-butan i wodorem spalania. Maksymalne zwiększenie równe ok. 200% zaobserwowano dla serii pomiarowej 10 Nm i 1000 obr/min (dodatek wodoru do kanału dolotowego 10 l/min, dodatek gazu LPG 5 l/min) dla wszystkich analizowanych obciążeń silnika. Dla wszystkich charakterystyk obciążeniowych mierzone stężenie węglowodorów w układzie wylotowym ma tendencje do drastycznego zwiększania się wraz ze wzrostem udziału dodatku wodoru.



Rys. 8.9. Zmiana stężenia i różnica względna NO_x w warunkach charakterystyki obciążeniowej dla n = 1000 obr/min

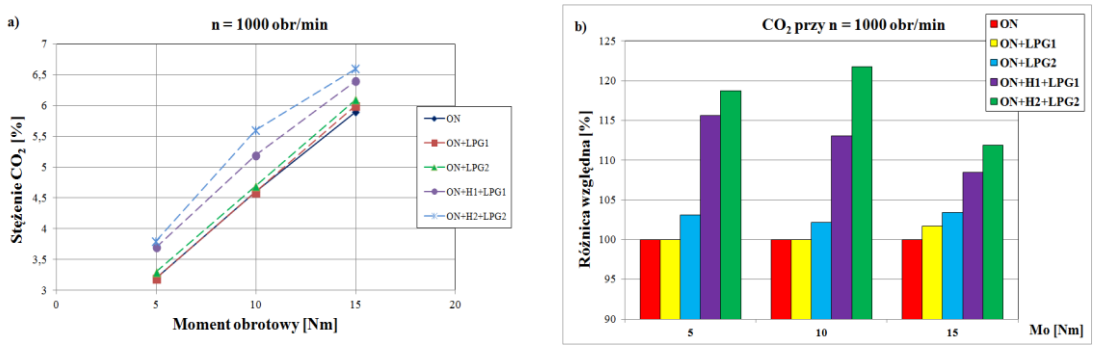


Rys. 8.10. Zmiana stężenia i różnica względna NO_x w warunkach charakterystyki obciążeniowej dla n = 1500 obr/min

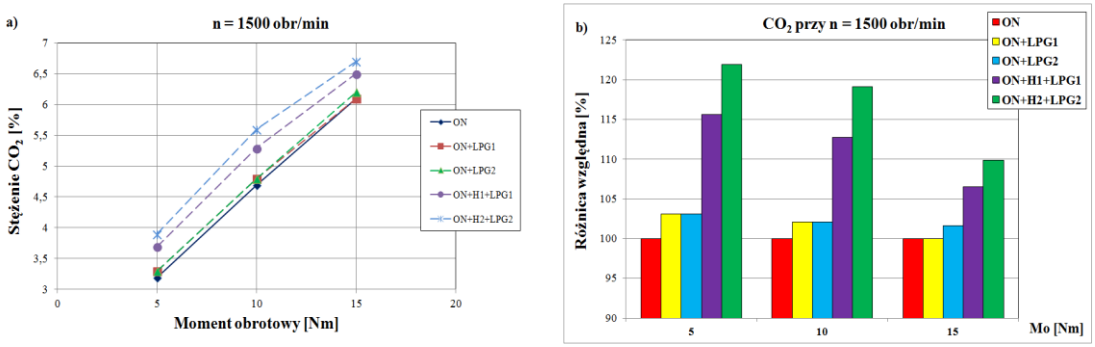


Rys. 8.11. Zmiana stężenia i różnica względna NO_x w warunkach charakterystyki obciążeniowej dla n = 2000 obr/min

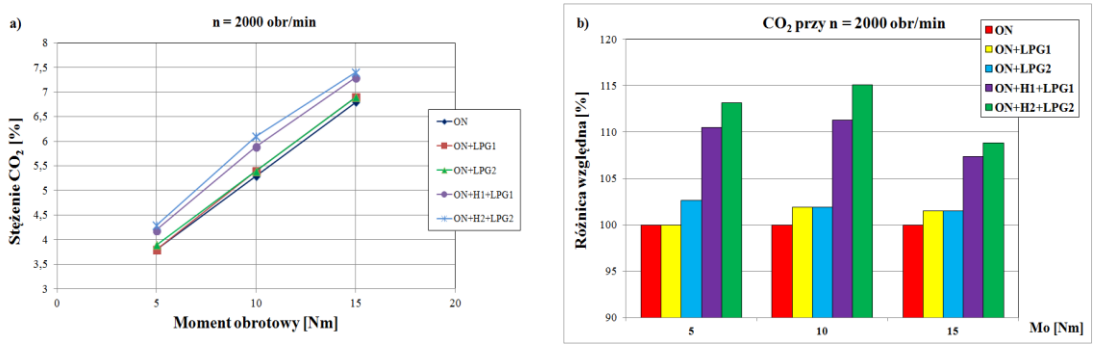
Obserwowany wzrost stężenia NO_x pokazany na rys. 8.9-8.11, przy zasilaniu dwupaliwowym z współspalaniem gazu LPG w porównaniu do zasilania olejem bez dodatku LPG, świadczy o wzroście temperatury czynnika w czasie spalania, szczególnie wartości maksymalnych. Wzrost temperatury jest wynika z większej szybkości procesu spalania i samozapłonu paliwa, widać z rysunku, iż w tym przypadku gaz LPG jest czynnikiem pomimo wysokiej liczby oktanowej, który tą szybkość zwiększa. Wzrost temperatury w tym przypadku można przypisać zwiększonej ilości doprowadzonego paliwa, które spala się z olejem napędowym. Wprowadzenie dodatku wodoru do mieszanki powietrzno-gazowej (w tym wypadku LPG) wyraźnie pogarsza reakcję spalania oleju napędowego i gazu LPG, co skutkuje obniżeniem temperatury w komorze spalania.



Rys. 8.12. Zmiana stężenia i różnica względna CO_2 w warunkach charakterystyki obciążeniowej dla n = 1000 obr/min



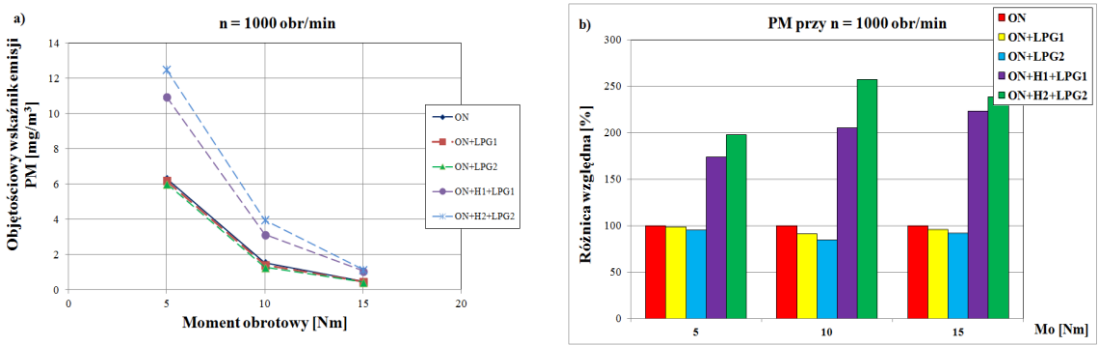
Rys. 8.13. Zmiana stężenia i różnica względna CO_2 w warunkach charakterystyki obciążeniowej dla n = 1500 obr/min



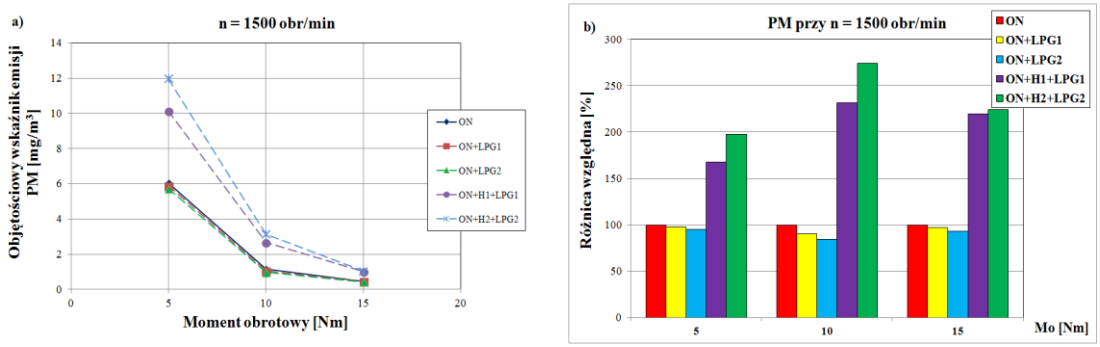
Rys. 8.14. Zmiana stężenia i różnica względna CO_2 w warunkach charakterystyki obciążeniowej dla n = 2000 obr/min

W większości przypadków wykonanych pomiarów przy zasilaniu silnika dwupaliwowo z dodatkiem gazu LPG stwierdzono nieznaczne podwyższenie wartości dwutlenku węgla w porównaniu do zasilania olejem napędowym (rys. 8.6). Jednakże w kolejnej fazie badań, gdzie dostarczano do kolektora dolotowego mieszaninę wodoru z gazem LPG zaobserwowano pogorszenie przebiegu procesu spalania o nawet 23 % dla prędkości obrotowej wynoszącej 1500 obr/min i obciążenia równego 10 Nm.

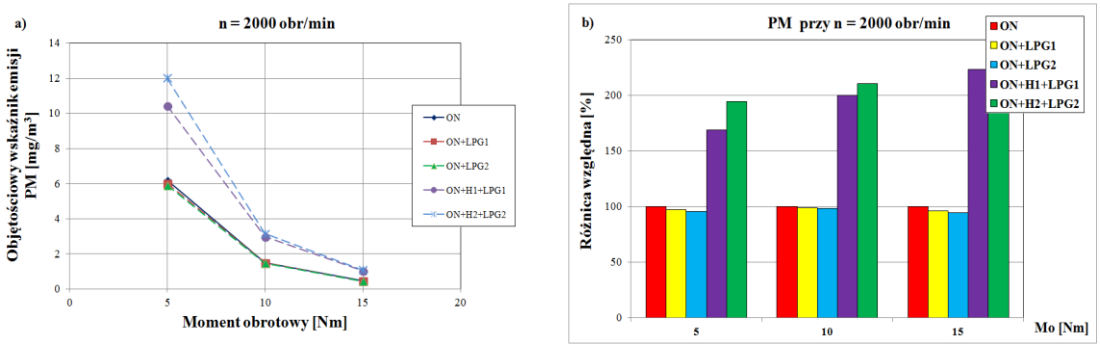
W celu dokonania szczegółowej interpretacji przeprowadzonych badań emisyjnych uzupełniono je o analizy przebiegów ciśnień w funkcji kąta obrotu wału korbowego (dla parametrów, tj. zmienność maksymalnego ciśnienia P_{max}, kąta φ_{Pmax} – położenia występowania tego ciśnienia, oraz kąta opóźnienia samozapłonu τ).



Rys. 8.15. Zmiana objętościowego wskaźnika emisji i różnica względna PM w warunkach charakterystyki obciążeniowej dla n = 1000 obr/min



Rys. 8.16. Zmiana objętościowego wskaźnika emisji i różnica względna PM w warunkach charakterystyki obciążeniowej dla n = 1500 obr/min



Rys. 8.17. Zmiana objętościowego wskaźnika emisji i różnica względna PM w warunkach charakterystyki obciążeniowej dla n = 2000 obr/min

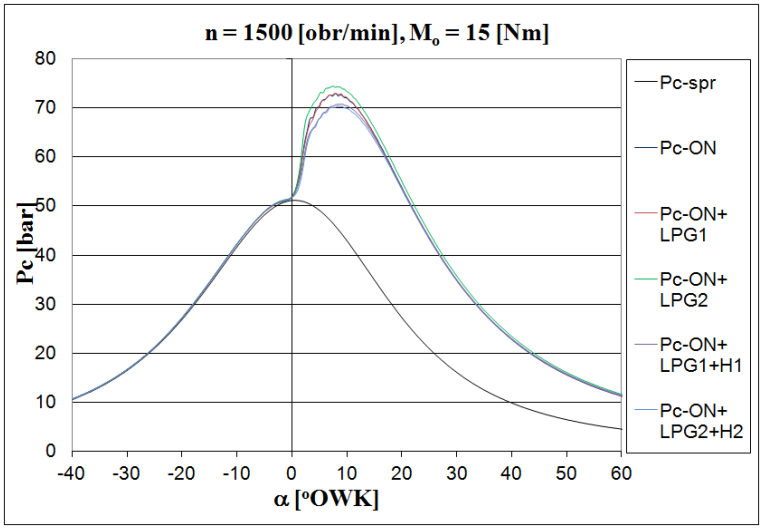
Rysunki 8.15-8.17 przedstawiają wpływ dodatku gazu LPG i gazu LPG z wodorem na stężenie cząstek stałych w spalinach silnika badawczego AVL 5804. Charakterystyki zmienności stężeń cząstek stałych wskazują, że przy małych obciążeniach silnika zasilanego olejem napędowym z dodatkiem gazu LPG jest nieznacznie mniejsza (kilka procent) w porównaniu do zasilania konwencjonalnego. Zauważalna jest tendencja, iż wraz ze wzrostem obciążenia do obszaru maksymalnego obserwujemy wyraźny spadek zadymienia spalin jednostki badawczej zasilanej dwupaliwowo. Wraz ze zwiększaniem udziału objętościowego wodoru w mieszaninie powietrzno-wodorowej dostarczanej do komory spalania z gazem LPG i współspalanej z paliwem konwencjonalnym stężenie cząstek stałych w spalinach wzrasta dwukrotnie.

8.3. Analiza procesu spalania w silniku o ZS zasilanym olejem napędowym i dodatkiem wodoru z LPG

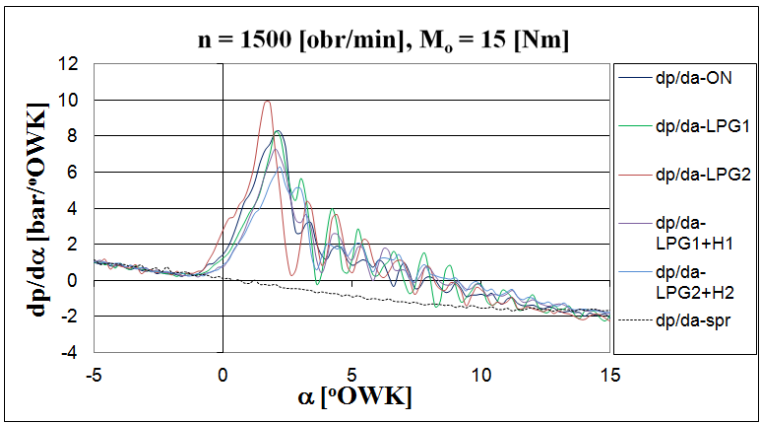
Wykonując charakterystyki obciążeniowe w wybranych punktach pomiarowym rejestrowano również przebiegi ciśnień w komorze spalania w funkcji kąta obrotu wału korbowego. Każdorazowo rejestrowano po 30 kolejnych przebiegów. Uzyskane wyniki uśredniono i sporządzono charakterystyki parametrów pracy silnika (prędkości obrotowej [obr/min] oraz momentu obrotowego [Nm]).

W podrozdziale tym przedstawiono charakterystykę dla silnika zasilanego standardowo olejem napędowym oraz dla silnika zasilanego dwupaliwowo: olejem napędowym z dodatkiem gazu propan-butan i mieszaniny z wodorem.

W pracy zaprezentowano wyniki badań przebiegów ciśnień szybkozmiennych zarejestrowanych w komorze spalania silnika badawczego AVL 5804 dla prędkości obrotowej n = 1500 obr/min i obciążenia M_o = 10 Nm (rys. 8.7), wszystko to pozwala na porównanie ze sobą wykonanych charakterystyk dla różnych paliw, którymi zasilana była badana jednostka napędowa i wyniki zaprezentowano w dysertacji. Ze względu na bardzo małe różnice w wartościach maksymalnych ciśnień z udziałem wodoru zdecydowano się w pracy przedstawić przebiegi ciśnień dla największego udziału wodoru w mieszance powietrzno-wodorowo-gazowej oznaczonej w pracy ON+LPG2+H2.



Rys. 8.18. Zmiany przebiegu procesu spalania w komorze z dodatkiem gazu LPG i wodoru do kanału dolotowego współspalanego z olejem napędowym na dla n = 1000 obr/min, p_w = 50 MPa, M_o = 15 Nm



Rys. 8.19. Zmiany szybkość narastania ciśnienia dp/dα z dodatkiem gazu LPG i wodoru do kanału dolotowego współspalanego z olejem napędowym na dla n = 1000 obr/min, p_w = 50 MPa, M_o = 15 Nm

Na rysunkach 8.18 i 8.19 przedstawiono zmiany przebiegu ciśnienia maksymalnego w komorze spalania i szybkości narastania ciśnienia w cylindrze wywołane zwiększaniem dodatku gazu LPG i gazu LPG z wodorem dostarczanych

wraz z powietrzem do komory spalania (max. dodatek wodoru 10 l/min, a gazu LPG 5 l/min). W porównaniu do zasilania konwencjonalnego obecność gazu LPG w mieszance powietrzno-gazowej w każdym przypadku wywołuje większą szybkość narastania ciśnienia w procesie spalania oraz większe wartości osiąganego ciśnienia maksymalnego. Z dokonanej analizy wnioskować można, iż wartości te silnie zależą od regulacji kąta wyprzedzenia wtrysku inicjującego zapłon dawki oleju napędowego. Natomiast przy dodatku wodoru i wymieszaniu go z gazem LPG i powietrzem zauważany jest duży spadek wartości ciśnienia maksymalnego w cylindrze silnika badawczego. Znaczące zmniejszenie maksymalnej wartości p_c odnotować można dla dodatku wodoru 10 l/min i gazu LPG na poziomie 5 l/min, co w przeliczeniu na objętościowy udział wodoru i LPG względem powietrza daje 7,5 % wodoru i LPG a 92,5 % powietrza. Wynik ten świadczy o tym, że większa ilość wodoru w mieszance powietrznej z wodorem i gazem LPG w znaczącym stopniu zmienia parametry fizykochemiczne spalanego oleju napędowego, które determinują ściśliwość i bezwładność ośrodka.

Reasumując w powyższej części badań określono wpływ dodatku gazu LPG i gazu LPG z wodorem na poprawę wskaźników ekologicznych silnika badawczego AVL 5804. Badania wykazały, że możliwe jest zasilanie dwupaliwowe z wykorzystaniem gazu LPG i gazu LPG z wodorem.

Należy wskazać, że dodatek gazu LPG dostarczany do kolektora dolotowego powodował nieznaczny wzrost wartości (kilka procent) dla stężeń CO i THC, natomiast wartości te zdecydowanie rosły w przypadku współspalania gazu LPG z wodorem w silniku zasilanym olejem napędowym. Zwiększający się objętościowy udziału gazu LPG względem powietrza powodował podwyższenie stężenia NOx, który najprawdopodobniej wywołany był wzrostem temperatury procesu spalania, co wynikało z większych przyrostów ciśnień przy wyższych prędkościach obrotowych. Ponadto gaz propan-butan zaliczany jest do skomplikowanych węglowodorów, podobnie, jak etyn, których spalanie w silniku ZS ma inny przebieg. W przypadku LPG samozapłon następuje w zakresie temperatur 300÷400 ^{o}C. Pojawiają się wówczas tzw. *zimne płomienie,* czemu towarzyszy półwyspu na krzywej ograniczającej obszar wybuchu od powolnego utleniania. Kształt krzywej dla gazu propan-butan [KA] sugeruje, że dla węglowodorów tych zasadniczą rolę mogą odgrywać wolne rodniki (aktywne centra), których zwiększająca się koncentracja przyspiesza reakcję chemiczną, powodując duże przyspieszenie reakcji chemicznej.

Dodatek wodoru natomiast w wyniku niecałkowitego i niezupełnego spalaniem paliwa konwencjonalnego a także wygaszaniem płomienia w przestrzeni pomiędzy denkiem tłoka a głowicą powodował duże obniżenie temperatury i ciśnienia w komorze spalania, czego wynikiem było mniejsze stężenie NO_x. W tym przypadku widać również dezaktywację tlenków, zwiększającą się wraz ze wzrostem udział wodoru, co wyraźnie wstrzymywało procesy wolnorodnikowe. Zmniejszyła się liczba aktywnych centrów, przez co widać zarówno na wykresie przebiegu ciśnienia, jak i stężeniach analizowanych związków, iż zmniejszyło to rozwój reakcji łańcuchowych i pogorszyło przebieg procesu spalania.

Zatem spostrzeżenie, że wraz ze wzrostem dodatku wodoru dostarczanego do kanału dolotowego silnika badawczego AVL 5804 i współspalanego z paliwem konwencjonalnym i gazem LPG powoduje znaczące pogorszenie wskaźników ekologicznych jednostki napędowej.

Zasilanie silnika AVL 5804 olejem napędowym z dodatkiem gazu LPG i wodoru dostarczanych do kolektora dolotowego spowodowało wyraźną zmianę wskaźników termodynamicznych i ekologicznych tzn.:

- **maksymalne zmniejszenie szybkości narastania ciśnienia dp/dα o około 7%,**
- **maksymalne zmniejszenie wartości ciśnienia maksymalnego w komorze spalania o około 8%,**
- **zwiększenie stężenia tlenku węgla o około 250%,**
- **zmniejszenie stężenia tlenków azotu o około 30%,**
- **zmniejszenie stężenia nie spalonych węglowodorów o około 400%,**
- **zwiększenie stężenia cząstek stałych około 200%.**

9. Badania silnika AVL 5804 zasilanego olejem napędowym z dodatkiem wodoru i C_2H_2

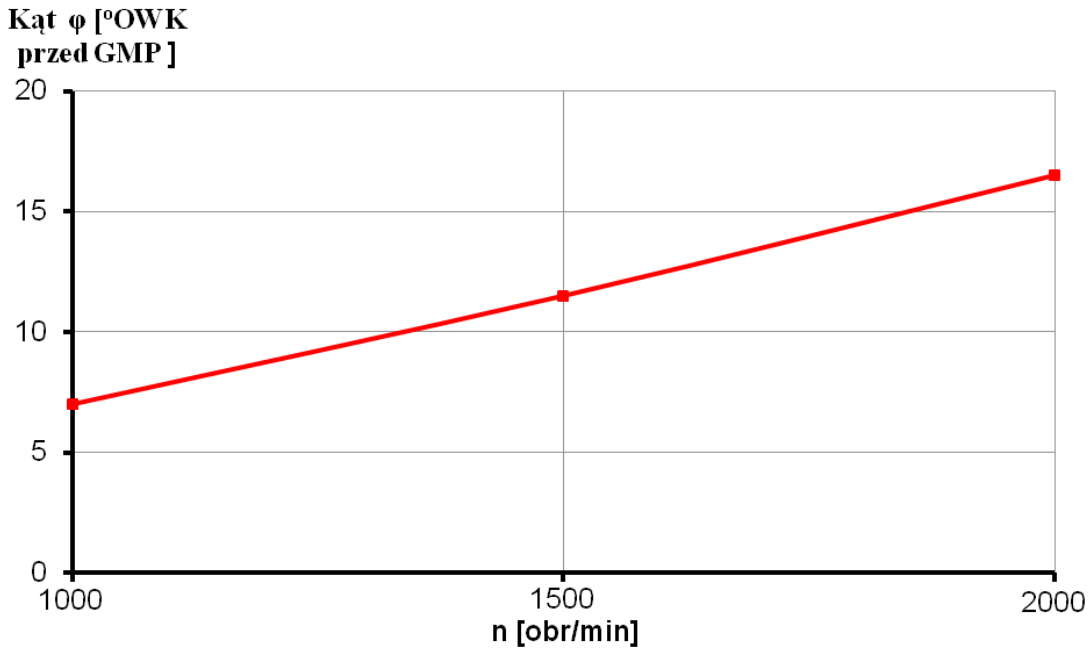
9.1. Metodyka doboru kątów początku wtrysku inicjującej zapłon dawki ON przy zasilaniu z dodatkiem wodoru i C_2H_2

W kolejnym rozdziale przedstawiono wyniki z wykonanych badań silnika badawczego AVL5804 zasilanego dwupaliwowo. Dawka oleju napędowego została utrzymana na tym samym poziomie, co dla badań z wykorzystaniem czystego oleju napędowego, ponadto w tym przypadku analizowano wpływ dodatku wodoru i acetylenu. Następnie wyniki zestawiono ze sobą i porównano je z badaniami silnika bazowego zasilanego standardowo olejem napędowym. Zasilanie standardowe realizowane było tak, jak we wcześniejszych przypadkach, czyli następował wtrysk takiej samej dawki oleju napędowego, jak dla badań podstawowych, z zachowaniem tego samego kąta początku wtrysku (φ = 20 ^{o}OWK przed GMP).

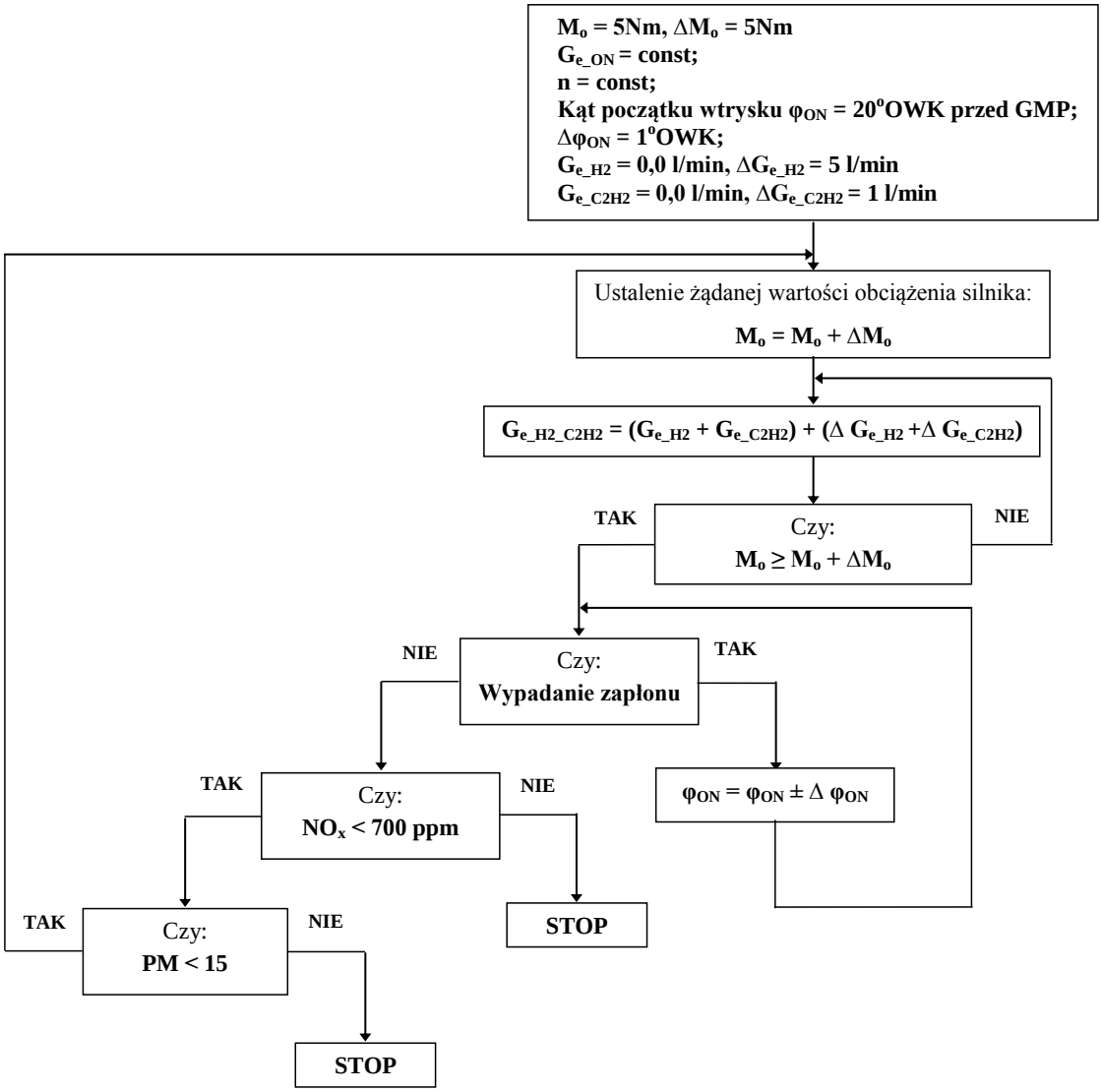
Wielkości obciążeń ustalone wcześniej wynosiły M_o = 5, 10 i 15 Nm dla takich samych, trzech prędkości obrotowych silnika n = 1000, 1500 i 2000 obr/min.

Przy zwiększaniu obciążenia podczas spalania oleju napędowego w mieszance powietrzno-wodorowo-acetylenowej kąt początku wtrysku był optymalizowany według przedstawianego wcześniej algorytmu, którego schemat blokowy przedstawia rysunek 10.2. Przy ustalaniu algorytmu wykorzystano wcześniej ustalone kryteria, tj.: wypadanie zapłonu, emisja tlenków azotu oraz zadymienie spalin.

Otrzymaną charakterystykę prędkościową kąta φ przedstawia rysunek 9.1.



Rys. 9.1. Charakterystyka prędkościowa regelacji kąta początku wtrysku inicjującej zapłon dawki ON przy zasilaniu dwupaliwowym ON + H_2 + C_2H_2



Rys. 9.2. Algorytm ustalania kąta początku wtrysku φ dla zapłonu dawki ON przy zasilaniu dwupaliwowym ON oraz H_2 i C_2H_2

9.2. Charakterystyki obciążeniowe stężeń składników toksycznych spalin (CO, CO_2, HC, NO_x i PM) = f(M_o)

Wykonano charakterystyki obciążeniowe w funkcji zawartość podstawowych składników szkodliwych w spalinach, tj.: tlenku węgla, dwutlenku węgla, węglowodorów i tlenków azotu stężenia cząstek stałych.

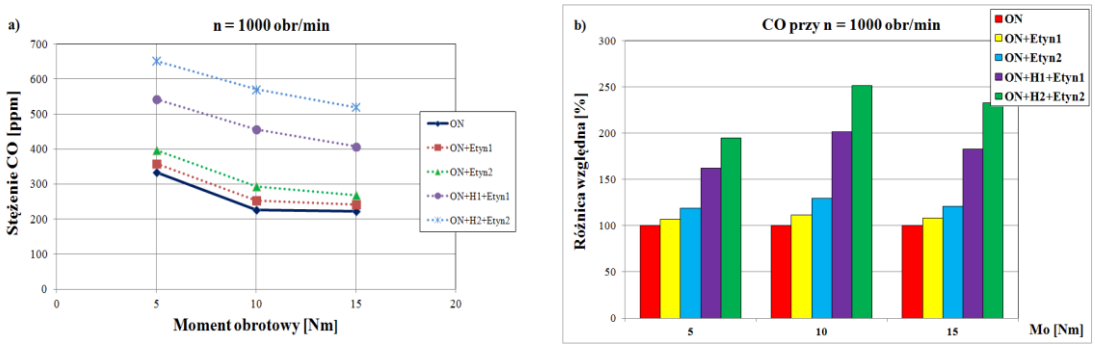
W celu możliwości zestawienia i odniesienia względem siebie wyników pomiarów również w tym przypadku przyjęto wartości parametrów nastawczych zgodnie z opisanym wcześniej algorytmem badań. Wartości parametrów wtrysku przyjęto z zakresu pracy silnika, by móc uzyskać możliwie największe podobieństwo pracy układu wtryskowego do warunków rzeczywistych przy zasilaniu silnika olejem

napędowym z dodatkiem etynu i wodoru. Przebadane nastawy przedstawiono w tab. 9.2.

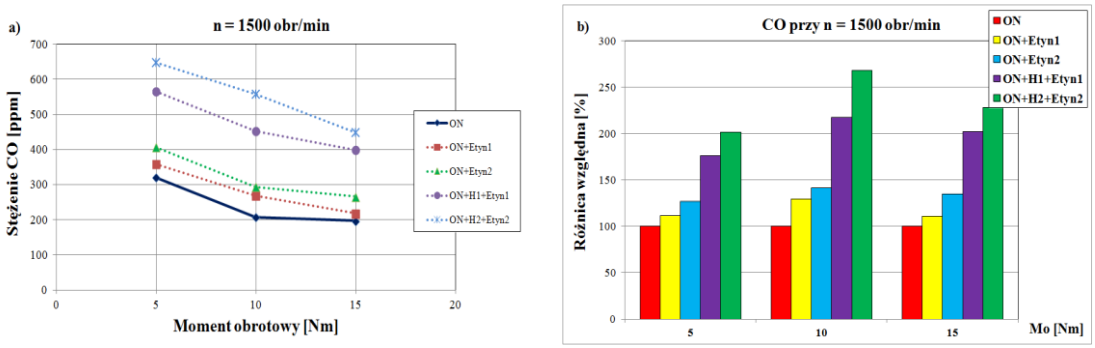
Tabela 9.2. Parametry nastaw silnika AVL5804 zasilanego olejem napędowym z dodatkiem wodoru i etynu

Lp.	Oznaczenie	Dawka wodoru [l/m]	Dawka etynu [l/m]	Ciśnienie na wyjściu [bar]
1.	ON	–	–	–
2.	ON + Etyn1	–	2	3
3.	ON + Etyn2	–	5	3
4.	ON + H1 + Etyn1	2	2	3
5.	ON + H2 + Etyn2	10	5	3

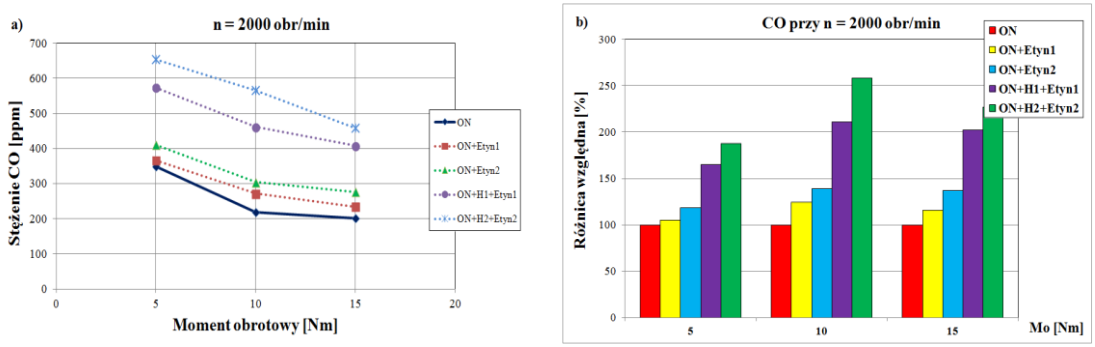
W badaniach dokonano również w tym wypasku ciągłej rejestracji stężeń składników spalin w czasie 60 sekund pracy silnika w każdym punkcie, które powtarzano 10-cio krotnie. Zamieszczone dalej wyniki badań emisji wykonywane na silniku AVL 5804 były następnie uśredniane.



Rys. 9.3. Zmiana stężenia i różnica względna CO w warunkach charakterystyki obciążeniowej dla n = 1000 obr/min

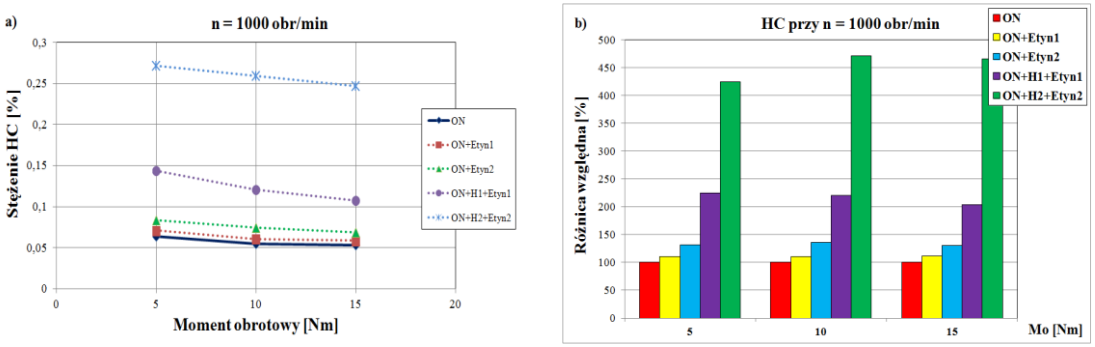


Rys. 9.4. Zmiana stężenia i różnica względna CO w warunkach charakterystyki obciążeniowej dla n = 1500 obr/min

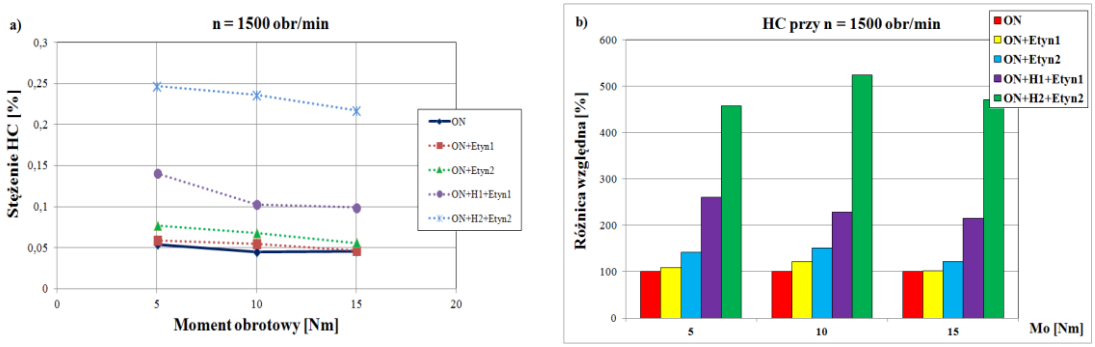


Rys. 9.5. Zmiana stężenia i różnica względna CO w warunkach charakterystyki obciążeniowej dla n = 2000 obr/min

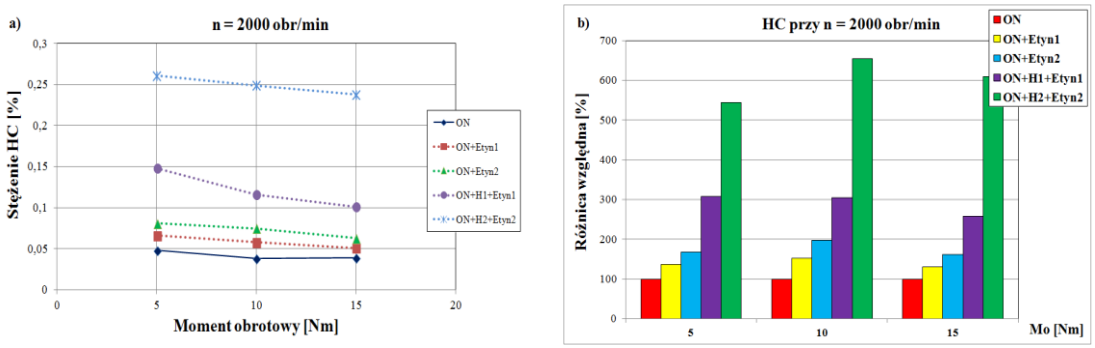
W trzecim etapie badań silnikowych zmierzono stężenia wybranych składników spalin w ustalonych punktach pracy silnika zasilanego dwupaliwowo z dodatkiem acetylenu i analizowanego wcześniej wodoru. Porównując zmiany stężenia tlenku węgla CO (rys. 9.3-9.5) w spalinach, można stwierdzić tendencję jego wzrostu w przypadku zasilania olejem napędowym i dodatkiem acetylenu. Stężenie CO waha się wraz ze wzrostem obciążenia silnika, szczególnie w zakresie niższych prędkości obrotowych. Podczas analizowania zmian stężeń CO w gazach wylotowych, można zaobserwować duży wzrost w przypadku zasilania olejem napędowym z dodatkiem acetylenu i wodoru. Emisja ta świadczy może świadczyć o lokalnym niedoborze tlenu do potrzeb spalania i zakłócaniu przebiegu reakcji spalania oleju napędowego wywołanym dodatkiem wodoru do mieszanki powietrze-acetylen. Pogorszenie procesu spalania węglowodorów przez wodór może wynikać z wysokiej reaktywności wodoru. W reakcji z tlenem paliwo to inhibituje dalsze reakcje wolnorodniowe, w wyniku czego węglowodory nie ulegają całkowitemu spaleniu.



Rys. 9.6. Zmiana stężenia i różnica względna HC w warunkach charakterystyki obciążeniowej dla n = 1000 obr/min

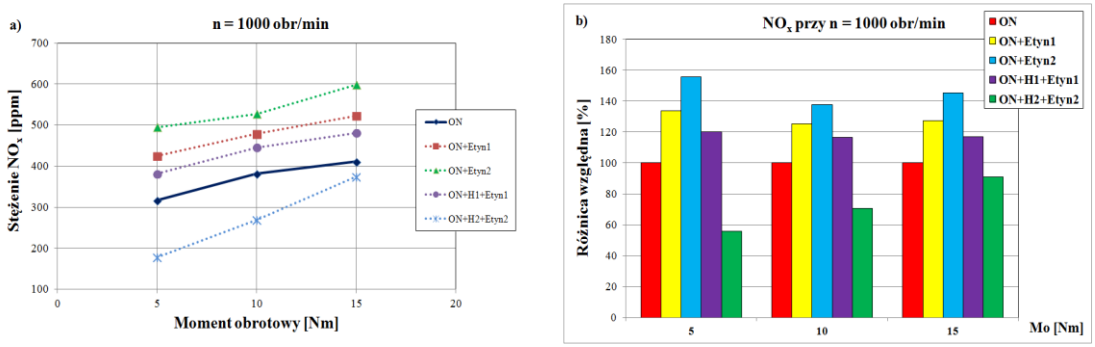


Rys. 9.7. Zmiana stężenia i różnica względna HC w warunkach charakterystyki obciążeniowej dla n = 1500 obr/min

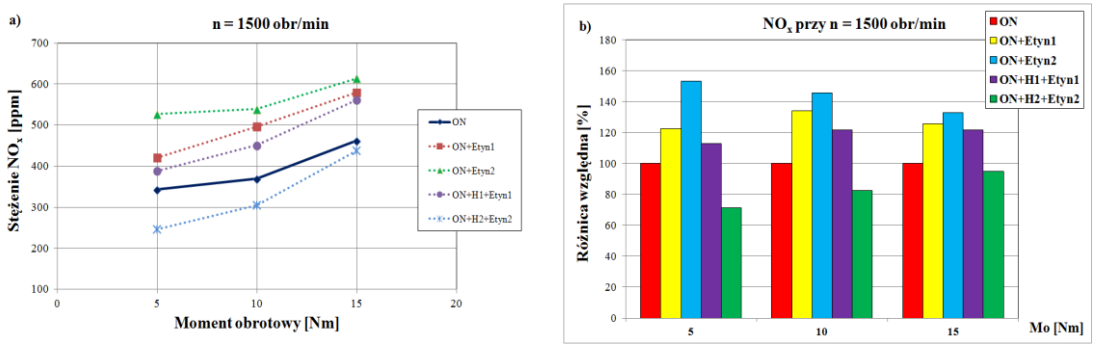


Rys. 9.8. Zmiana stężenia i różnica względna HC w warunkach charakterystyki obciążeniowej dla n = 2000 obr/min

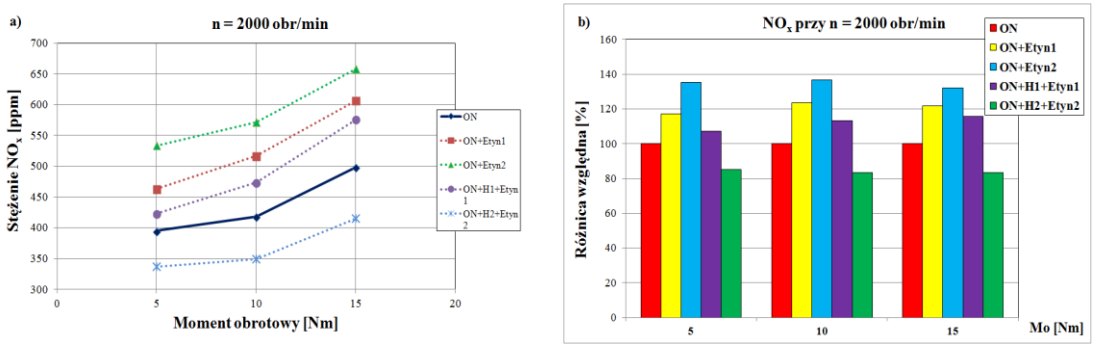
Zaobserwowany wzrost wartości stężeń węglowodorów w spalinach (rys. 9.4-9.8) można powiązać z dużą aktywnością acetylenu, co w konsekwencji prowadzi do szybkiego odparowania paliwa. Widoczny jest ogromny wzrost wartości stężeń dla wszystkich pomiarów węglowodorów w spalinach dla przypadku dodatku wodoru do acetylenu dostarczanego z powietrzem i próbie spalenia w mieszaninie oleju napędowego. Można to przypisać pogorszeniu reakcji spalania węglowodorów z acetylenem i wodorem (zauważalny jest gorszy przebieg procesu spalania w wyniku dodatku wodoru). Maksymalne zwiększenie równe ok. 240 % zaobserwowano dla serii pomiarowej 5 i 10 Nm przy prędkości obrotowej wynoszącej 1000 obr/min (dodatek wodoru do kanału dolotowego 10 l/min, dodatek acetylenu 5 l/min) dla wszystkich analizowanych obciążeń silnika. Dla wszystkich charakterystyk obciążeniowych mierzone stężenie węglowodorów w układzie wylotowym ma tendencje do drastycznego zwiększania się wraz ze wzrostem udziału dodatku wodoru, co wykazuje jego negatywny wpływ na współspalanie w silniku dwupaliwowym o zapłonie samoczynnym.



Rys. 9.9. Zmiana stężenia i różnica względna NO_x w warunkach charakterystyki obciążeniowej dla n = 1000 obr/min

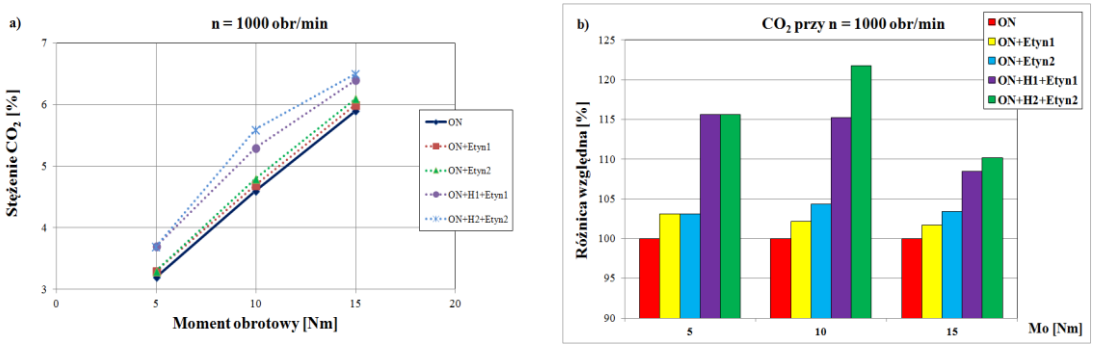


Rys. 9.10. Zmiana stężenia i różnica względna NO_x w warunkach charakterystyki obciążeniowej dla n = 1500 obr/min

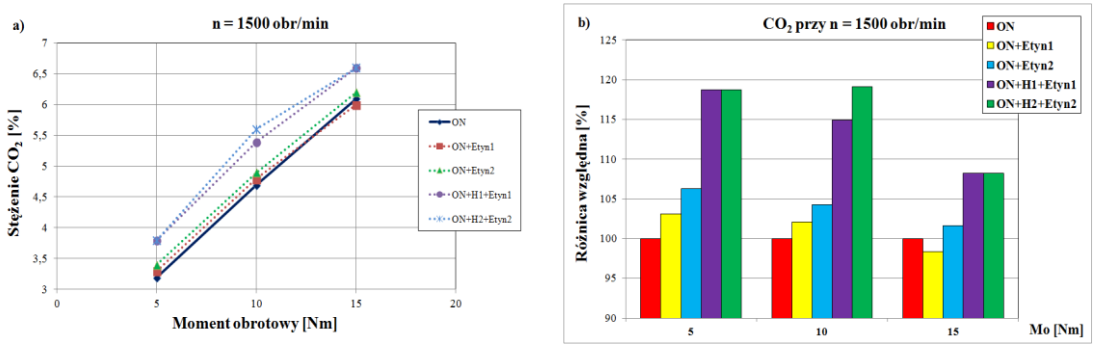


Rys. 9.11. Zmiana stężenia i różnica względna NO_x w warunkach charakterystyki obciążeniowej dla n = 2000 obr/min

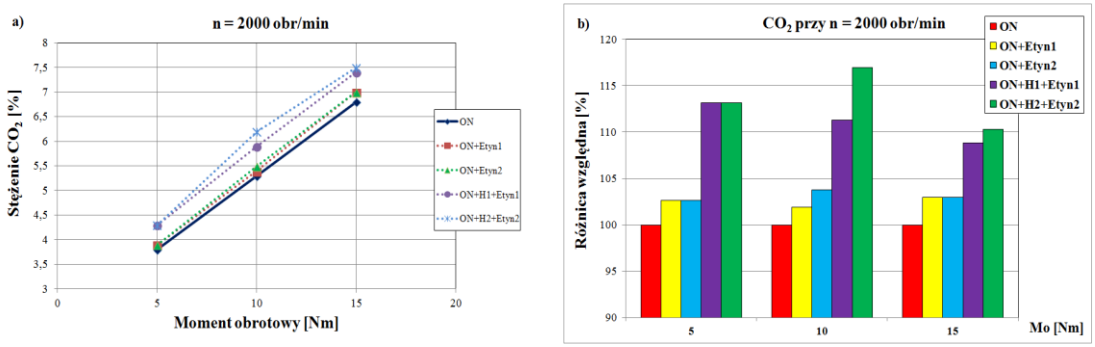
Obserwowany wzrost stężenia NO_x pokazany na rys. 9.9-9.11, przy zasilaniu dwupaliwowym z dodatkiem acetylenu w porównaniu do zasilania standardowym olejem bez dodatku acetylenu, świadczy spalaniu gazu a także wzroście temperatury czynnika w czasie spalania, szczególnie wartości maksymalnych. Wzrost temperatury wynika z większej szybkości procesu spalania i samozapłonu oleju napędowego w mieszance acetylenowo-tlenowej, widać z rysunku w tym przypadku acetylen jest czynnikiem zwiększającym liczbę cetanową, który tą szybkość zwiększa. Wzrost temperatury w tym przypadku można przypisać zwiększonej ilości doprowadzonego paliwa, które spala się z olejem napędowym. Wprowadzenie dodatku wodoru do mieszanki powietrzno-gazowej (w tym wypadku acetylen) wyraźnie pogarsza reakcję spalania oleju napędowego i etenu.



Rys. 9.12. Zmiana stężenia i różnica względna CO_2 w warunkach charakterystyki obciążeniowej dla n = 1000 obr/min

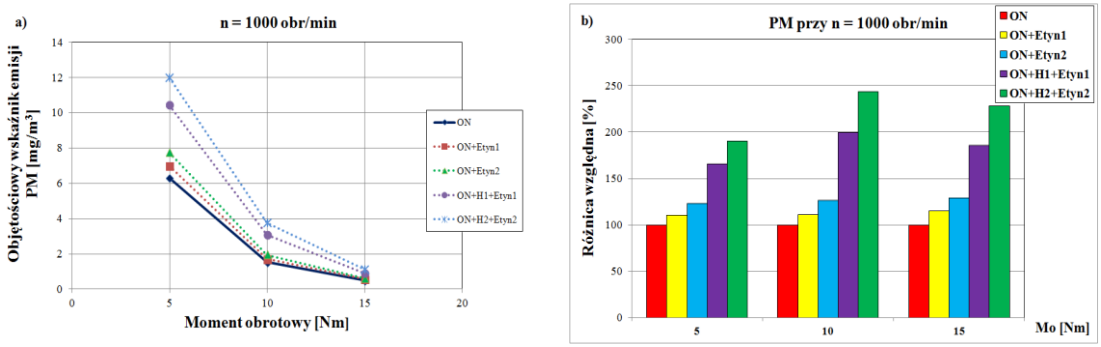


Rys. 9.13. Zmiana stężenia i różnica względna CO_2 w warunkach charakterystyki obciążeniowej dla n = 1500 obr/min

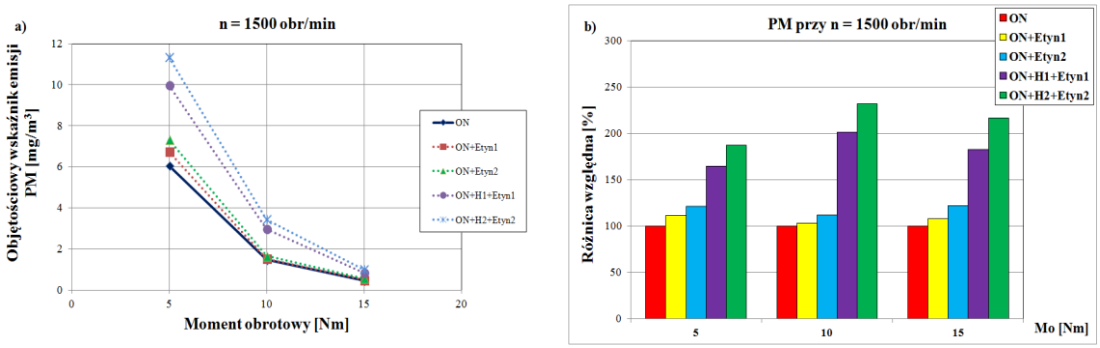


Rys. 9.14. Zmiany stężenia CO_2 w warunkach charakterystyki obciążeniowej dla n = 2000 obr/min

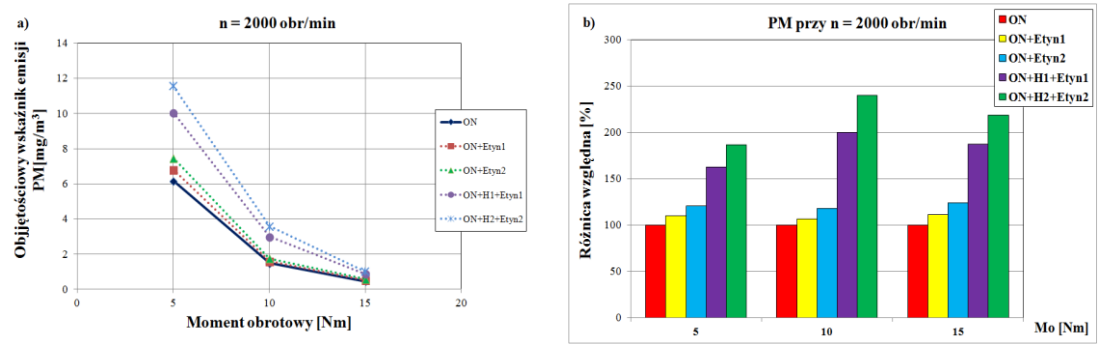
W przypadku zrealizowanych pomiarów dla silnika badawczego zasilanego dwupaliwowo z dodatkiem samego acetylenu zaobserwowano nieznaczne podwyższenie, a praktycznie utrzymywanie się na tym samym poziomie wartości dwutlenku węgla w odniesieniu do zasilania czystym olejem napędowym (rys. 9.12-9.14). W celu dokonania porównania wpływu dodatku wodoru do kanału dolotowego na parametry emisyjne współspalanego z olejem napędowym i acetylenem zachowano te same warunki procesu. W następnym kroku pomiarowym zwiększano ilość wodoru tworzącego mieszankę wodoru z acetylenem w proporcjach (2 l/min H_2 i 2 l/min C_2H_2 oraz 10 l/min H_2 i 5 l/min C_2H_2). W wyniku zwiększania ilości dostarczonego wodoru zaobserwowano wyraźne pogorszenie przebiegu procesu spalania o nawet 21 % dla prędkości obrotowej wynoszącej 1000 obr/min i obciążeniu 10 Nm.



Rys. 9.15. Zmiana objętościowego wskaźnika emisji i różnica względna PM w warunkach charakterystyki obciążeniowej dla n = 1000 obr/min



Rys. 9.16. Zmiana objętościowego wskaźnika emisji i różnica względna PM w warunkach charakterystyki obciążeniowej dla n = 1500 obr/min



Rys. 9.17. Zmiana objętościowego wskaźnika emisji i różnica względna PM w warunkach charakterystyki obciążeniowej dla n = 2000 obr/min

Wyniki przeprowadzonych badań emisyjnych uzupełniono o szczegółową analizę przebiegów ciśnień w funkcji kąta obrotu wału korbowego (dla parametrów, tj. zmienność maksymalnego ciśnienia P_{max}, kąta φ_{Pmax} – położenia występowania tego ciśnienia, oraz kąta opóźnienia samozapłonu τ).

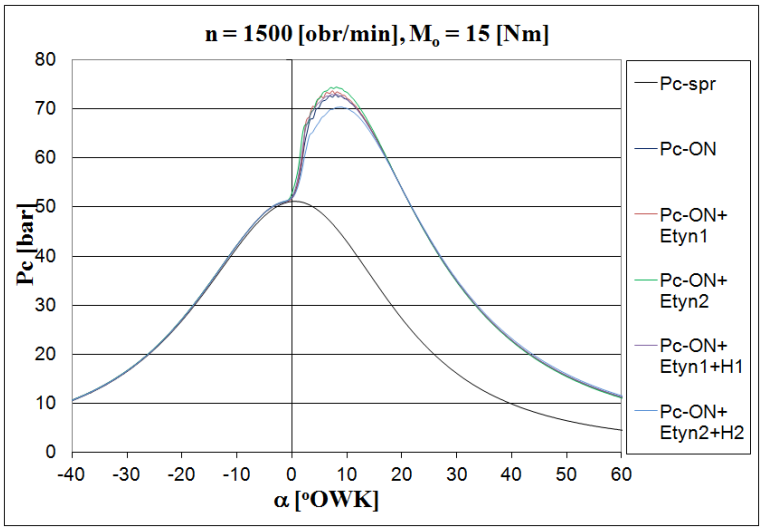
9.3. Analiza procesu spalania w silniku o ZS zasilanym olejem napędowym i dodatkiem wodoru z C_2H_2

Wykonując charakterystyki obciążeniowe w każdym punkcie pomiarowym rejestrowano również przebiegi wybranych ciśnień w komorze spalania w funkcji kąta

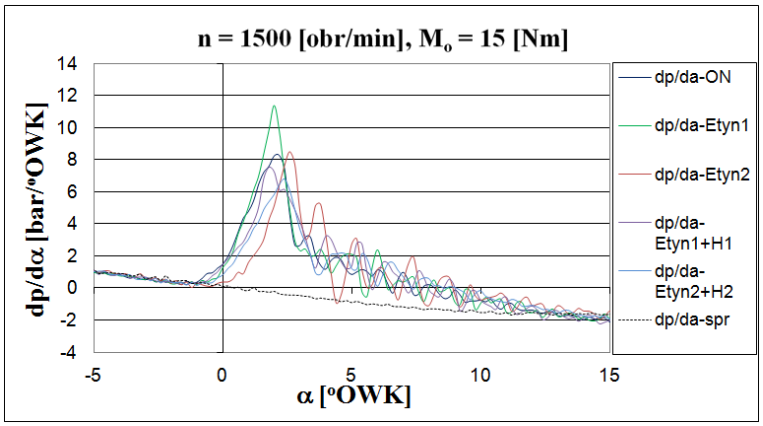
obrotu wału korbowego. Każdorazowo rejestrowano po 30 kolejnych przebiegów. Uzyskane wyniki uśredniono i sporządzono charakterystyki parametrów pracy silnika (prędkości obrotowej [obr/min] oraz momentu obrotowego [Nm]).

W podrozdziale tym przedstawiono charakterystyki dla silnika zasilanego standardowo olejem napędowym, olejem napędowym i dodatkiem etynu oraz dla silnika zasilanego olejem napędowym z dodatkiem mieszaniny wodoru i etynu.

Badania wykonano dla tych samych, co wcześniej parametrów pracy silnika – prędkości obrotowej n = 1500 obr/min i obciążenia M_o = 10 Nm (rys. 9.18). Wykonane badań z zachowaniem tych samych parametrów pozwoliły na zestawienie i porównanie ze sobą wykonanych charakterystyk dla analizowanych paliw.



Rys. 9.18. Zmiany przebiegu procesu spalania w komorze z dodatkiem Etynu i wodoru do kanału dolotowego współspalanego z olejem napędowym na dla n = 1000 obr/min, p_w = 50 MPa, M_o = 15 Nm



Rys. 9.19. Zmiany szybkość narastania ciśnienia dp/dα z dodatkiem Etynu i wodoru do kanału dolotowego współspalanego z olejem napędowym na dla n = 1000 obr/min, p_w = 50 MPa, M_o = 15 Nm

Na rysunkach 9.18 oraz 9.19 przedstawiono wpływ zwiększania dodatku acetylenu i mieszaniny acetylenu z wodorem dostarczanych wraz z powietrzem do komory spalania (zmiana dodatku wodoru 5-10 l/min, zmiana dodatku acetylenu 2-5 l/min) na przebieg ciśnienia w cylindrze P_c i szybkość narastania ciśnienia dp/dα. W porównaniu do zasilania konwencjonalnego obecność acetylenu w mieszance

powietrzno-gazowej wywołuje 1,5 % wzrost wartości p_c zwłaszcza w zakresie ciśnień maksymalnych i większą szybkość narastania ciśnienia. Natomiast przy dodatku wodoru i wymieszaniu go z acetylenem i powietrzem zauważany jest spadek wartości ciśnienia maksymalnego w cylindrze silnika badawczego o 3 %. Znaczące zmniejszenie maksymalnej wartości p_c odnotować można dla dodatku wodoru 10 l/min i acetylenu na poziomie 5 l/min, co w przeliczeniu na objętościowy udział wodoru i acetylenu względem powietrza daje 7,5 % wodoru i acetylenu w mieszaninie a 92,5 % powietrza. Wynik ten świadczy o tym, że większa ilość wodoru w mieszance powietrznej z wodorowo-acetylenowej znacząco pogarsza parametry fizykochemiczne procesu spalania oleju napędowego, a także samozapłonu.

Wyniki liczbowe określają negatywny wpływ dodatku etynu z wodorem na poprawę wskaźników ekologicznych silnika badawczego AVL 5804. Badania wykazały, że możliwe jest zasilanie dwupaliwowe z wykorzystaniem etynu, natomiast dodatek wodoru pogarsza parametry emisyjne jednostki.

Należy podkreślić, że dodatek etynu dostarczany do kolektora dolotowego powodował bardzo mały wzrost wartości stężeń CO i THC, natomiast dla przypadku współspalania etynu z wodorem i paliwem konwencjonalnym widać dwukrotny wzrost stężenia CO i kilkukrotny wzrost stężenia węglowodorów, co świadczy o pogarszaniu przebiegu procesu spalania wraz ze wzrostem ilości dostarczanego wodoru.

Warte podkreślenia jest sformułowanie, iż w każdym z przypadków silnika zasilanego dwupaliwowo możliwe jest uzyskanie porównywalnego lub nawet nieznacznie większego maksymalnego momentu obrotowego jednostki napędowej w porównaniu do wersji zasilanej konwencjonalnie. Wartości tych momentów zależą w głównej mierze od regulacji kąta wyprzedzenia wtrysku dawki oleju napędowego inicjującej zapłon. Ponadto jednostki napędowe charakteryzuje poprawa sprawności ogólnej w obszarach pełnych obciążeń silnika przy znacznym udziale paliwa konwencjonalnego, co zależy od przyjętych nastaw kąta wyprzedzenia wtrysku dawki inicjującej zapłon oleju napędowego. Dla jednostek napędowych zasilanych dwupaliwowo istnieje możliwość doboru takich regulacji kąta wyprzedzenia wtrysku dawki inicjującej zapłon oleju napędowego by osiągał poprawę zarówno maksymalnego momentu obrotowego oraz sprawności ogólnej.

W przypadku dodatku wodoru do paliwa konwencjonalnego z gazami palnymi widać wyraźne zwiększenie stężenia CO i THC, co świadczy o niepoprawnym przebiegu procesu spalania. może on wynikać z niecałkowitego spalania mieszaniny powietrze-wodrór-etyn i paliwa konwencjonalnego w obszarach komory spalania nieobjętych płomieniem od strugi wtryskiwanej dawki inicjującej oraz w wyniku dezaktywacji nadtlenków wywołanej przez wodór, co powoduje wytrącenie się wody i zahamowanie przebiegu rozwoju łańcuchowych reakcji spalania.

Analiza porównawcza charakterystyk emisji węglowodorów wykazuje, że następuje wzrost stężenia tego związku w obszarze obciążeń częściowych oraz nieznaczny spadek dla obszarów pracy jednostki zbliżonych do maksymalnych

obciążeń. Taki przebieg emisji powoduje niecałkowite spalanie, które wywołane może być zakłóceniem przebiegu reakcji wolnorodnikowych. Dodać należy, że wraz ze wzrostem obciążenia silnika wzbogaceniu ulega mieszanina paliwa głównego i powietrza, co w efekcie prowadzi do utrudnionego dostępu tlenu do drobin oleju napędowego i skutkuje pogorszeniem procesu spalania paliwa.

Zatem stwierdzić można, że wraz ze wzrostem dodatku wodoru dostarczanego do kanału dolotowego silnika badawczego AVL 5804 i współspalanego z paliwem konwencjonalnym oraz etynu następuje znaczne pogorszenie wskaźników ekologicznych jednostki napędowej.

Zasilanie silnika AVL 5804 olejem napędowym z dodatkiem etynu i wodoru dostarczanych do kolektora dolotowego spowodowało wyraźną zmianę wskaźników termodynamicznych i ekologicznych tzn.:

- **maksymalne zmniejszenie szybkości narastania ciśnienia dp/dα o około 5%,**
- **maksymalne zmniejszenie wartości ciśnienia maksymalnego w komorze spalania o około 6%,**
- **zwiększenie stężenia tlenku węgla o około 150%,**
- **zmniejszenie stężenia tlenków azotu o około 25%,**
- **zmniejszenie stężenia nie spalonych węglowodorów o około 300%,**
- **zwiększenie stężenia cząstek stałych około 150%.**

10. Zakończenie i podsumowanie

10.1. Wnioski końcowe

W pracy wykonano analizę, która miała doprowadzić do zrealizowania jej celów i udowodnienia sformułowanej tezy badawczej. Poznanie wpływu stosowania dodatku wodoru do mieszanki powietrzno-wodorowej i współspalanie go z olejem napędowym wymagało przeprowadzenia szczegółowych pomiarów toksyczności spalin i przebiegów ciśnień szybkozmiennych w komorze spalania, przy wykorzystaniu aparatury badawczej przystosowanej do tego typu badań. Dokonano oceny parametrów emisyjnych i procesu spalania obliczonych na podstawie zmierzonych ciśnień w komorze spalania, wykazując wpływ zasilania dwupaliwowego.

Przedstawione w pracy rezultaty badań zaprzeczyły możliwość skutecznej poprawy wskaźników emisyjnych powstałych przy zasilaniu wodorem silnika o zapłonie samoczynnym, wskazano zależności pomiędzy rozpatrywanymi wielkościami. W celu określenia wpływu wielkości dodatku wodoru i możliwości wspólspalania z innymi gazami analizy wykonano dla różnych prędkości obrotowych i obciążeń pracy silnika.

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów opracowano zależności dotyczące wpływu dodatku wodoru na i emisję spalin i procesy szybkozmienne w silniku o zapłonie samoczynnym. Uzyskano tym samym odpowiedzi na postawione pytania badawcze, które dotyczyły określenia wpływu dodatku wodoru na emisję substancji szkodliwych w spalinach i przebieg procesów szybkozmiennych w komorze spalania. Na tej podstawie można stwierdzić, że zrealizowano główny cel pracy, którym było:

Określenie wpływu dodatku wodoru do paliwa konwencjonalnego na poprawę wskaźników ekologicznych i parametrów pracy silnika o zapłonie samoczynnym

Na podstawie przeprowadzonych badań własnych i analiz ich wyników sformułowano następujące **wnioski główne i metodologiczne**:

1) Wysoka zawartość CO i THC i niska NO_x może wynikać z niedopalenia ON wskutek obniżenia maksymalnej temperatury spalania z powodu znacznego skrócenia zwłoki samozapłonu ON.
2) W wyniku skrócenia zwłoki samozapłonu ON faza spalania kinetycznego rozpocznie się wcześniej i może zakończyć sie przed kulminacja spalania dyfuzyjnego. Nie należy wykluczyć skrajnego przypadku, gdy płomień spalania kinetycznego może zgasnąć (wskutek wypalenia homogenicznej mieszanki powietrza z odparowanym ON) tuż po zainicjowaniu spalania dyfuzyjnego. Płomień kinetyczny co najwyżej uruchamia spalanie dyfuzyjne, ale nie towarzyszy mu, gdyż zbyt wcześnie dochodzi do samozapłon, przez co zbyt mała ilość ON ulega odparowaniu, przez co większa cześć ON spala się dyfuzyjnie.

3) W wyniku dostarczania dodatku wodoru do komory spalania stwierdzi można, że następuje przyspieszenie spalania kinetycznego, ponieważ lokalnie w obszarach odparowywanego ON zwiększy sie udział wodoru względem par ON.
4) Ze względu duży współczynnik dyfuzji wodór przyczynia sie do lepszego ujednorodnienia par ON z powietrzem a zatem wzrasta szybkość spalania laminarnego, nawet wtedy gdy tego wodoru jest niewiele. W związku z powyższym dalszy rozwój spalania dyfuzyjnego przebiega w fazie charakterystycznej dla dopalania paliwa czyli w znacznie trudniejszych warunkach z powodu:
   – braku płomienia kinetycznego,
   – niższej temperatury w cylindrze,
   – obecności dużej ilości spalin po spalaniu kinetycznym, co rozrzedza tlen w powietrzu (tworzą wewnętrzny EGR), co wpływa na dalsze spowolnienie procesu spalania.

Ponadto z przeprowadzonych badań na silniku stacjonarnym wyciągnięto następujące **wnioski szczegółowe.**

1) Wszystkie reakcje spalania węglowodorów przebiegają przez formę nadtlenków, które są promotorem reakcji wolno rodnikowych.
2) Wodór w sposób naturalny dezaktywuje nadtlenki przekształcając je na wodę, eliminując tym samym wolne rodniki z obszaru reakcji i w ten sposób hamuje rozwój łańcuchowych reakcji spalania.
3) Ze względu na wysoką reaktywność wodoru w reakcji z tlenem, olej napędowy inhibituje dalsze reakcje wolno rodnikowe spalania węglowodorów, w wyniku czego węglowodory nie ulegają całkowitemu spaleniu. Tworzy się więcej CO, aldehydów i cząstek stałych czyli węgla w postaci skondensowanych pierścieni aromatycznych (wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne-kancerogenne).

Podsumowując, należy stwierdzić że przedstawione wyniki badań stanowiskowych oraz wyciągnięte wnioski pozwoliły na zaprzeczenie zawartej w piątym rozdziale tezy pracy:

Niemożliwa jest poprawa wskaźników ekologicznych silników o zapłonie samoczynnym zasilanych paliwami konwencjonalnymi z domieszką wodoru przy zachowaniu osiągów porównywalnych z osiągami silnika o zapłonie samoczynnym

Pozytywny rezultat pracy, polegający na udowodnieniu/zaprzeczeniu powyższej tezy dla analizowanego przypadku, spowodowało, że tematyka ta stała się dzięki wykonanym badaniom niezwykle nurtującym przypadkiem dla ekspertów z dziedziny chemii i procesów zachodzących w komorze spalania silników o zapłonie samoczynnym.

Wyszczególnione wyżej ilościowe efekty wprowadzenia dodatku wodoru i gazów palnych do oleju napędowego dotyczą: przyjętego zakresu i warunków badań oraz

zastosowanego laboratoryjnego układu zasilania paliwem alternatywnym. Uzyskane zostały na stacjonarnym silniku badawczym wyposażonym w układ wtryskowy, w którym dokonywano zmian konstrukcyjnych i nastawczych uwzględniających specyfikę jego pracy.

10.2. Kierunki dalszych prac

Mimo, że wyczerpano zagadnienie związane z tematyką pracy, kolejnym krokiem w pracach naukowo-badawczych może być:

1) przeprowadzenie badań toksyczności spalin w warunkach rzeczywistych dla pojazdów osobowych, dostawczych i ciężarowych wyposażonych w silnik o zapłonie samoczynnym z dodatkiem wodoru,
2) określenie wpływu dodatku wodoru do silnika ZS na rozkład wymiarowy i liczbę cząstek stałych,
3) określenie wpływu dodatku wodoru na układy oczyszczania spalin (np. regeneracja filtrów cząstek stałych za pomocą dodatku wodoru),
4) wykonanie badań procesu spalania oraz analizy wywiązywania się ciepła oleju napędowego z dodatkiem wodoru w systemach zasilania silników ZS umożliwiających podział dawki paliwa na kilka części,
5) wykonanie badań wpływu dodatku wodoru na rozkład i ilość wolnych rodników formujących się w wyniku reakcji wspólspalania oleju napędowego z wodorem w silniku ZS za pomocą kamery do zdjęć szybkich.

Literatura

[1] Akansu O., Dulger Z., Kahraman N.: *Internal Combustion Engines Fueled by Natural Gas - Hydrogen Mixtures*. Int. Journal of Hydrogen Energy, 29/2004.

[2] Andrea T., Henshaw P., Thing D.: *The Addition of Hydrogen to a Gasoline – Fuelled Sl Engine*. Int. Journal of Hydrogen Energy, N° 2912004.

[3] Bajerlein M., Merkisz J., Daszkiewicz P.: *Ecological Research of Ownership Drive Train In the Real Traffic with the Engine Parameters Registration*. Applied Mechanics and Materials Vol. 518 (2013) pp 102-107. 2013 Indonesia.

[4] Baratta M., D'Ambrosio S., and Misul D.: *Performance and Emissions of a Turbocharged Spark Ignition Engine Fuelled with CNG and CNG/Hydrogen Blends*. SAE Technical Paper 2013-01-0866, 2013.

[5] Bielaczyc P., Merkisz J., Pielecha J.: *Stan cieplny silnika spalinowego a emisja związków toksycznych*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2001.

[6] Bilger R. W., Starner S.H., Murphy T.E., Scherrer H.C.: *Mixture formation and combustion in hydrogen engine using hydrogen storage technology*. Int. J. Hydrogen Energy, 7, 1982, 651-659.

[7] Braister U.J., Smailng R.: *Verbesserte Verbrennung durch Wasserstoffanreicherung*. MTZ, 10, 2005, 784-791.

[8] Borecki R., Szwaja S., Pyrc M.: *Dual-fuel hydrogen-diesel compression ignition engine*. Journal of Journal of Kones-Powertrain and Transport, Warszawa 2008, Vol. 15, 2/49.

[9] Bradley D., Lawes M., Kiu K.,Verhelst S., Woolley R.: *Laminar burning velocities of lean hydrogen air mixtures at pressures up 1 MPa*. Combust Flame 2007.

[10] Cecil W.: *On the application of hydrogen gas to produce a moving power in machinery*. Trans Cambridge Philosophical Society, 1, 1822, 217-40.

[11] Chenglong T., Huang Z., Jin C., He J., Wang J., Wang X., Miao FI.: *Explosion characteristics of hydrogen – nitrogen – air mixtures at elevated pressures and temperatures*. Int Journal of Hydrogen Energy, 34, 2009, 554-561.

[12] Cipolla G.: *Diesel perspective in global market vision*. Silniki Spalinowe/Combustion Engines, nr 2/2007 (129), s. 33–37.

[13] Choi G., Chung Y., Hans S.: *Performance and Emission Characteristics of a Hydrogen Enriched LPG Internal Combustion Engine*. Int. Journal of Hydrogen Energy, N° 30/2005

[14] Das L.M.: *Exhaust emission characterization of hydrogen operated engine system: nature of pollutants and their control techniques*. Int. Journal of Hydrogen, 1991, 765-775.

[15] Das L.M.: *Hydrogen-oxygen reaction mechanism and its implication to hydrogen engine combustion*. Int. Journal of Hydrogen Energy, 21, 1996, 703-715.

[16] Daszkiewicz P., Idzior M., Bajerlein M., Karpiuk W.: *Perspektywa progresu wskaźników ekologicznych silnika badawczego zasilanego olejem napędowym z domieszką wodoru*. Czas. Technika Transportu Szynowego, Zakopane 2013.

[17] Dolgykh L., Stolyarchuk J.: *The Use of Industrial Dehydrogenation Catalysts for Hydrogen Production from Bioethanol*. Int. Journal of Hydrogen Energy, 31/2006.
[18] Du, D. X., Axelbraum, R. L., Law, C. K.: *Soot Formation in Strained Diffusion Flames with Gaseous Additives*. Combustion and Flame, Vol. 102, 1995.
[19] Fanos CH., Athanasios M.: *Experimental investigation of the effects of separate hydrogen and nitrogen addition on the emissions and combustion of a diesel engine*. Int. Journal of Hydrogen Energy, 38, 2013, 10126-10140.
[20] Funk J.: *Thermochemical Hydrogen Production: Past and Present*. Int. Journal of Hydrogen Energy, N°26/2001.
[21] Guo H. , Neill W.S.: *The effect of hydrogen addition on combustion and emission characteristics of an n-heptane fuelled HCCI engine*. Int. Journal of Hydrogen Energy Vol. 38, 26, 2013, 11429-11437.
[22] Haeep H., Truong H.: *The Effect of Methanol/Diesel Fuel Emulsions on the Mixture Formation in Direct-Injection Diesel Engines.* A Theory on Spontaneous Evaporation. SAE Technical Paper Series 830376.
[23] Heffel J.W.: *NO_x emission reduction in a hydrogen fueled internal combustion engine at 3000 rpm using exhaust gas recirculation*. Int. Journal of Hydrogen Energy, 28, 2003, 1285-1292.
[24] Hoekstra R., Blarigan P., Mulligan N.: *NO emissions and efficiency of hydrogen, natural gas, and hydrogenlnatural gas blended fuels*. SAE Paper 961103, 1996.
[25] Hoekstra R., Collier K., Mulligan N., Chew L.: *Experimental study of a clean burning vehicle fuel*. Int. Journal of Hydrogen Energy, 20, 1995, 737-745.
[26] Janicka A., Walkowiak W.: *The discursive attitude of emission aspect vs. Air-fuel Mixture ignition delay in diesel engine*. Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 13/4. 2013.
[27] Jaros J.: *Wodór, współczesny nośnik energii*. Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2010.
[28] Jastrzębska G.: *Odnawialne źródła energii i pojazdy proekologiczne*. WNT, Warszawa 2009.
[29] Jaura A.K., Ortmann W., Stuntz R., Natkin B., Grabowski T.: *Fords H_2RV an industry first HEV propelled with a H_2 fueled engine a fuel efficient*. SAE Paper 2004-0 1 - 0058, 2004.
[30] Jiing-Ding L., Ying-Qing L., Tian-Shen D.: *Improvement on the combustion of a hydrogen fueled engine.* Int. Journal of Hydrogen Energy, 11, 1986, 661-668.
[31] Kalisinskas D., Keršys A.: *Improvement of diesel engine ecological and economic parameters by using hydrogen*. Transport Problems Vol. 8, 2013, 75-83.
[32] Kim Y.Y., Lee J.T., Choi G.H.: *An investigation on the causes of cycle variation in direct injection hydrogen fueled engines*. Int. Journal of Hydrogen Energy, 30, 2005, 69-76.
[33] Knorr H., Held W., Prumm W., Rudiger H.: *The MAN hydrogen propulsion system for city buses*. Int. Journal of Hydrogen Energy, 23, 2008, 201-208.
[34] Khan I. M.: *Factors Affecting Diesel Engine Smoke*. The Internal Combustion Engines Conference, Bucharest, Paper II, 1970.

[35] Kowalczyk M.: *Studium problemów dymienia silników wysokoprężnych z wtryskiem bezpośrednim*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. Seria Rozprawy, Nr 139, Poznań 1982.
[36] Kowalczyk M.: *Cieplne procesy silnikowe*. Wykład monograficzny dla studentów V roku, Politechnika Poznańska, 1999.
[37] Kowalczyk M.: *Wybrane zagadnienia wymiany ciepła w silnikach wysokoprężnych – wymiana przez promieniowanie*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2000.
[38] Kowalewicz A.: *Wybrane zagadnienia silników spalinowych*. Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom 2002.
[39] Kowalewicz A.: *Systemy spalania szybkoobrotowych silników spalinowych*. WKiŁ, Warszawa 1990.
[40] Lata D.B., Misra A., Medhekar S.: *Effect of hydrogen and LPG addition on the efficiency and emissions of a dual fuel diesel engine*. Int. Journal Hydrogen Energy 37/2012 6084-6096.
[41] Law C.K.: *A Compilation of Experimental Data on Laminar Burning Velocities, Reduced Kinetic Mechanisms for Applications in Combustion Systems*. Springer-Verlag, New York 1993.
[42] Le Anh T., Nguyen Duc K., Tran Thi Thu H., Cao Van, T.: *Improving Performance and Reducing Pollution Emissions of a Carburetor Gasoline Engine by Adding HHO Gas into the Intake Manifold*. SAE Technical Paper 2013-01-0104, 2013.
[43] Lejda K., Wojewoda P.: *Wodór jako paliwo w pojazdach samochodowych*. Materiały XVII Konferencja Międzynarodowa SAKON'06 pt. „Metody obliczeniowe i badawcze w rozwoju pojazdów samochodowych i maszyn roboczych samojezdnych. Zarządzanie i marketing w motoryzacji, Rzeszów-Przecław 2006.
[44] Lejda K.: *Wodór w aplikacjach do środków napędu w transporcie drogowym*. Wydawnictwo KORAW, Rzeszów 2013.
[45] Lee D., Hochgreb S.: *Hydrogen autoignition at pressures above the second explosion limit (0.6-4.0 MPa)*. Inc. Int. Journal of Chem. 30, 385-406, 1998.
[46] Luft S.: *Podstawy budowy silników*.Wydawnictwo Komunikacji i Łączności 2011.
[47] Luft S.: *Dwupaliwowy silnik o zapłonie samoczynnym – cechy charakterystyczne*. Czasopismo Combustion Engines 2/2010 (141).
[48] Luft S., Michalczewski A. *Próba wyjaśnienia poprawy sprawności ogólnej silnika o zapłonie samoczynnym zasilanego dwupaliwowo głównie LPG*. Journal of KONES Internal Combustion Engines 2002 No. 1-2 ISSN 1231 - 4005
[49] Luft S., Skrzek T. : *Dwupaliwowy silnik o zapłonie samoczynnym – przegląd wybranych wyników badań.* Czasopismo techniczne MECHANIKA 3-M/2012 zeszyt 8, 169-182.
[50] Łyszewski A. S.: *Razpyliwanije topliwa w sudowych dizeljach*. Leningrad, Sudostrojenije 1971.
[51] Malenshek M., Olsen D.B.: *Methane number testing of alternative gaseous fuels*. Fuel, 88, 2009, 650-656.

[52] Miyamoto, T., Hasegawa, H., Mikami, M., Kojima, N., Kabashima, H., Urata, Y., *Effects of Hydrogen Addition to Intake Gas on Exhaust Emission of a Diesel engine with EGR*. FISITA 2010 World Automotive Congress, No. F2010A112(2010).

[53] Merkisz J.: *Tendencje rozwojowe silników spalinowych*. Silniki Spalinowe /Combustion Engines, nr 1/2004 (118), s. 28-39.

[54] Merkisz J., Bajerlein M., Daszkiewicz P.: *The influence of applications photovoltaic Cells on the urban bus to reduce fuel consumption – CO_2 and emission of toxic compounds HC, PM and NOx.* International Conference on Power and Energy Systems will be held in Hong Kong, April 2012.

[55] Merkisz J., Idzior M., Bajerlein M., Daszkiewicz P.: *Wpływ dodatku wodoru do oleju napędowego na parametry silnika z zapłonem samoczynnym*. Czasopismo Techniczne, 3-M/2012, zeszyt 8, Wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków 2012.

[56] Merkisz J., Piekarski W., Słowik T.: *Motoryzacyjne zanieczyszczenia środowiska*. Wydawnictwo Akademii Rolniczej w Lublinie, Lublin 2005

[57] Merkisz J., Pielecha I.: *Alternatywne napędy pojazdów*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2006.

[58] Merkisz J., Pielecha j.: *Emisja cząstek stałych ze źródeł motoryzacji*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2013.

[59] Merkisz J., Pielecha J., Radzimirski S.: *Emisja zanieczyszczeń motoryzacyjnych w świetle nowych przepisów Unii Europejskiej*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2012.

[60] Merkisz J., Pielecha J., Radzimirski S.: *Pragmatyczne podstawy ochrony powietrza atmosferycznego w transporcie drogowym*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2009.

[61] Merkisz J., Radzimirski S.: *Stan obecny i przewidywane zmiany w europejskich przepisach o emisji zanieczyszczeń z samochodów ciężarowych i autobusów*. Transport Samochodowy, nr 2, 2009.

[62] Miyamoto T., Mikami M., Kojima N.: *Effect of Hydrogen Fraction in Intake Mixture on Combustion and Exhaust Emission Characteristics of a Diesel Engine*. SAE International 2009-24-0086.

[63] Naber J.D., Siebers D.L.: *Hydrogen combustion under diesel engine conditions*. Int. Journal of Hydrogen Energy, 23, 2008, 363-371.

[64] Nakayama S., Fukuma T., Matsunaga A., Miyake T., Wakimoto T.: *A new dynamic combustion control method based on charge oxygen concentration for diesel engines*. SAE Paper 2003-01-3181.

[65] Narayanan A. P.: *Down speeding the diesel engine – A performance analysis*. CHALMERS, Applied Mechanics, Master's Thesis 2011/50, Göteborg 2011.

[66] Niewiarowski K.: *Tłokowe silniki spalinowe*. Wydanie trzecie zmienione i poszerzone. WKiŁ, Warszawa 1983.

[67] Orbaiz, P., Brear, M., Abbasi, P., and Dennis, P.: A Comparative Study of a Spark Ignition Engine Running on Hydrogen, Synthesis Gas and Natural Gas. SAE Int. Journal Engines 6, 23-44, 2013.

[68] O'Rourke P.J., Amsden A.: *The Tab Method for Numerical Calculation of Spray Droplet Breakup*. SAE Technical Paper Series 872089.

[69] Pandey, P., Pundir, B. P., and Panigrahi, P. K.: *Influence Laminar Diffusion Flames on Soot Formation*. 4th Combustion Symposium, Lisbon, 2005.

[70] Park S.H., Lee K.M., Hwang C.H.: *Effects of hydrogen addition on soot formation and oxidation in laminar premixed C_2H_2/air flames*. Int. Journal of Hydrogen Energy, 36, 2011, 9304-9311.

[71] Postrzednik S., Żmudka Z.: *Termodynamiczne oraz ekologiczne uwarunkowania eksploatacji tłokowych silników spalinowych*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2007.

[72] Prechtl P., Dorer F.: *Wasserstoff Dieselmotor mit Direkteinspritzung, hoher Leistungsdichte und geringer Abgasemission. Teil 2: Untersuchung der Gemischbildung, des Zünd-und des Verbrennungsverhaltens*. MTZ Motortechnische Zeitschrift 60/1999.

[73] Pundir B. P., Kumar R.: *Combustion and Smoke Emission Studies on a Hydrogen Fuel Supplemented DI Diesel Engine*. SAE Technical Paper Series 2007-01-0055.

[74] Pundir B. P., Srivastava P. D. and Goel P. K.: *Influence of Cetane Number on Combustion in Automotive Diesel Engines*. ISI Bulletin, Vol. 25, No. 10; 1973.

[75] Rahman M., Kawahara N., Tomita E.: *Mixing Process of Direct Injection Hydrogen Jet in a Constant Volume Vessel by Using Spark-Induced Breakdown Spectroscopy*. SAE Technical Paper 2013-01-2526.

[76] Rubino L., Bonnel P., Carriero M., Krasenbrink A.: *Portable emission measurement system (PEMS) for heavy duty diesel vehicle PM measurement: the European PM PEMS program*. SAE Technical Paper Series 2009-24-0149.

[77] Rubino L., Bonnel P., Hummel R., Krasenbrink A., Manfredi U., De Santi G.: *On-road emissions and fuel economy of light duty vehicles using PEMS*: Chase-testing experiment. SAE Technical Paper Series 2008-01-1824.

[78] Rychter T., Teodorczyk A.: *Teoria silników spalinowych*. WKiŁ, Warszawa 2006.

[79] Saravanan N., Nagarajan G.: *An experimental investigation of hydrogen-enriched air induction in a diesel engine system*. Int. Journal of Hydrogen Energy, 33, 2008 1769-1775.

[80] Sazhina E.M., Sazhin S.S., Heikal M.R., Marooney C.J.: *The Shell autoignition model: applications to gasoline and diesel fuels*. Fuel, 78, 1999, 389-401.

[81] Schumacher, M., Mederer, T., and Wensing, M.: *Investigations on a New Engine Concept for Small Hydrogen Power Generation Units Using LOHCs*. SAE Technical Paper 2013-01-2525.

[82] Serdecki W.: *Badania silników spalinowych*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2012.

[83] Shahinian V. D.: *SENSOR Tech-CT Update Application Software for SEMTECH Mobile Emission Analyzers*. Sensors 4th Annual SUN (SEMTECH User Network) Conference,2007.

[84] Shommers J., Mikulic L., Möhrmann W.: *Hybrid oder Diesel – Verbrauchs-Konzepte der Zukunft*. Aachener Kolloquium Fahrzeug und Motorentechnik, Aachen 2005.

[85] Shudo T.: Nakajima Y., Futakuchi T.: *Thermal efficiency analysis in a hydrogen premixed combustion engine*. SAE Review, 21/2000, 177-182.
[86] Surygała J.: *Wpływ użytkowania paliw naftowych na środowisko*. Ekologia i Technika, Nr 14/2006.
[87] Surygała J.: *Wodór jako paliwo*. WNT, Warszawa 2008.
[88] Szwaja S.: *Studium pulsacji ciśnienia spalania w silniku tłokowym silniku spalinowym zasilanym wodorem*. Częstochowa, 2010.
[89] Szwaja S., Grab-Rogaliński K.: *Hydrogen combustion in a compression ignition diesel engine*. Int. Journal of Hydrogen Energy, 34/10, 2009, 4413-4421.
[90] Szwaja S., Grab-Rogalinski K.: *Hydrogen-diesel co-combustion anomalies in a CI engine*. Journal of Kones - Powertrain and Transport. Warsaw 2008, Vol. 15, No. 2, 109-118.
[91] Teodorczyk A.: *Scale effects on hydrogen – air fast deflagrations and detonations in small obstructed channels*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 21, 2008, 147-153.
[92] Tsolakis, A., Megaritis, A.: *Partially Premixed Charge Compression Ignition Engine with On-board H_2 Production by Exhaust Gas Fuel Reforming of Diesel and Biodiesel*. International Journal of Hydrogen Energy, 30 (2005), pp. 731-745.
[93] Tsujimura T., Mikami S., Achiha N., Takunaga Y., Senda J.: *A study of direct injection diesel engine fueled with hydrogen*. SAE Paper 2003-01-0761.
[94] Turlej A.: *Katalityczne wytwarzanie biowodoru na drodze reformingu parowego bioetanolu*. Archiwum Motoryzacji 01/2014.
[95] Zabłocki M.: *Wtrysk i spalanie paliwa w silnikach wysokoprężnych*. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1976.
[96] Zwierzycki W.: *Paliwa, oleje motoryzacyjne, płyny eksploatacyjne*. Wyd. Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 1998.
[97] AVL Micro Soot Sensor, Transient Sensitive Soot Measurement. AVL, 2010.
[98] Materiały firmy AVL List GmbH: www.avl.com.
[99] Materiały firmy Bosch Automotive Technology: www.bosch.com.
[100] Materiały firmy Sensors Inc.: www.sensors-inc.com.
[101] Raporty i opracowania organizacji międzynarodowych i krajowych dotyczące alternatywnych źródeł energii i pojazdów (lata 2008-2013).
[102] Raport Polskiego Związku Motoryzacyjnego 2013.
[103] Regulation (EC) 510/2011 of the European Parliament and of the Council of 11 May 2011 setting emission performance standards for new light commercial vehicles as part of the community's integrated approach to reduce CO_2 emissions from light-duty vehicles. OJ L 145/1.
[104] SEMTECH-DS on-board, Manual in-use emissions analyzer. Michigan 2007.
[105] Strony internetowe dotyczące wodoru i alternatywnych paliw w aplikacjach do środków transportu.