



Silniki o zapłonie samoczynnym mieszanki homogenicznej kluczem do dalszego rozwoju tłokowych silników spalinowych

GRZEGORZ SZAMREJ

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu, ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa,
grzegorz.szamrej@wat.edu.pl

Streszczenie. W artykule przedstawiono syntetycznie sposoby zapłonu mieszanki paliwowo-powietrznej w silnikach spalinowych wraz z charakterystyką ich kluczowych wad oraz zalet, problematyką ich stosowania oraz możliwością rozwoju. Dalszy rozwój tłokowych silników będzie wymagał drastycznego ograniczenia emisji szkodliwych składników spalin oraz dwutlenku węgla będącego najistotniejszym gazem cieplarnianym emitowanym przez silniki spalinowe. Z tego powodu zmianom muszą ulec nie tylko same silniki spalinowe, lecz także przede wszystkim stosowane paliwa. Aby były najskuteczniejsze, powinno się wykorzystywać samozapłon homogenicznej mieszanki paliwowo-powietrznej, co przy dzisiejszym stanie rozwoju technicznego nie jest możliwe w sposób pozwalający na realizację najbardziej zaawansowanych sposobów samozapłonu. W literaturze zagranicznej można znaleźć wiele publikacji dotyczących różnych sposobów zapłonu samoczynnego (ZS) w silnikach spalinowych, w tym zapłonu samoczynnego w silnikach dwupaliwowych. W literaturze krajowej nie ma jednak na ten temat wielu pozycji i choć można znaleźć prace dotyczące zapłonu samoczynnego w silnikach jednopaliwowych [1-10], to temat dwupaliwowego zasilania silników o ZS nie jest zbyt obszernie opisany. Z tego powodu godne uwagi wydaje się opublikowanie artykułu poruszającego ten istotny dziś temat.

Słowa kluczowe: silnik spalinowy, silnik o zapłonie samoczynnym, mieszanka homogeniczna, silnik dwupaliwowy, ZS, RCCI, DUAL FUEL, HCCI, PCCI, PPCI, PCI, SPCCI, SACI

DOI: 10.5604/01.3001.0016.0535

Wykaz skrótów

CDC	—	<i>Classic Diesel Combustion</i>
CH ₄	—	Metan
CI	—	<i>Compression Ignition</i>
CNG	—	<i>Compressed Natural Gas</i>
CCNR	—	<i>Central Commission for the Navigation of the Rhine</i>
CIDI	—	<i>Compressed Ignition Direct Injection</i>
CO	—	<i>Carbon Monoxide</i>
CO ₂	—	<i>Carbon Dioxide</i>
DDFS	—	<i>Direct Dual Fuel Stratification</i>
DI	—	<i>Direct Injection</i>
ECU	—	<i>Electronic Control Unit</i>
EDC	—	<i>Electronic Diesel Control</i>
GDCI	—	<i>Gasoline Direct-Injection Compression Ignition</i>
GHG	—	<i>Greenhouse Gases</i>
GMP	—	Górne Martwe Położenie
HC	—	<i>Hydrocarbons</i>
HCCI	—	<i>Homogeneous Charge Compression Ignition</i>
HCNG	—	<i>Hydrogen (enriched) Compressed Natural Gas</i>
HFO	—	<i>Heavy Fuel Oil</i>
HPDI	—	<i>High Pressure Direct Injection</i>
LPG	—	<i>Liquefied Petroleum Gas</i>
MGO	—	<i>Marine Gas Oil</i>
NO _x	—	<i>Nitrogen Oxides</i>
ON	—	Olej Napędowy
PDI	—	<i>Port Dual Injection</i>
PCCI	—	<i>Premixed Charge Compression Ignition</i>
PCI	—	<i>Partially Pre-mixed Combustion</i>
PFI	—	<i>Port Fuel Injection</i>
PM	—	<i>Particulate Matter</i>
PN	—	<i>Particle Number</i>
PPC	—	<i>Partially Premixed Combustion</i>
PPCI	—	<i>Partially Premixed Compression Ignition</i>

RCCI	—	<i>Reactivity-Controlled Compression Ignition</i>
SACI	—	<i>Spark Assist Compression Ignition</i>
SCCI	—	<i>Stratified Charge Compression Ignition</i>
SPCCI	—	<i>Spark (Plug) Controlled Compression Ignition</i>
STD	—	<i>Standard Diesel</i>
THC	—	<i>Total Hydrocarbons</i>
TS	—	<i>Thermal Stratification</i>
UHC	—	<i>Unburned Hydrocarbons</i>
ZI	—	Zapłon Iskrowy
ZS	—	Zapłon Samoczynny

1. Wprowadzenie

Obecnie rozwój tłokowych silników spalinowych został zatrzymany i prawdopodobnie jest, że prace nad nimi nie będą kontynuowane na kontynencie europejskim, a także w dalszej kolejności w pozostałych częściach świata. Pakiet „Fit for 55” zaaprobowany przez Parlament Unii Europejskiej prowadzi nieuchronnie do zakończenia produkcji samochodów napędzanych silnikami spalinowymi. Już w najbliższych latach silniki będą musiały spełniać bardziej restrykcyjne normy emisji spalin określane jako Euro 7, a ich realizacja stanowi problem dla wielu współczesnych silników [1]. Wprowadzane na przestrzeni lat zmiany konstrukcyjne w silnikach spalinowych pozwalały dotąd uwzględniać kolejne restrykcje dotyczące dopuszczalnego poziomu emisji szkodliwych składników spalin, jednak ich kolejne edycje mogą doprowadzić do wyparcia silnika spalinowego jako źródła napędu samochodów lub wymusić na konstruktorach gruntowne zmiany nie tylko konstrukcji samego silnika, lecz także zmianę wykorzystywanych przez niego paliw.

Historycznie w silnikach tłokowych wykorzystywane były różne rodzaje paliw — najczęściej paliwa węglowodorowe, z których jako paliwa podstawowe stosowane dziś w silnikach wyróżnia się benzynę przeznaczoną do silników o zapłonie iskrowym (ZI) oraz olej napędowy do silników o zapłonie samoczynnym (ZS). Wraz z rozwojem techniki i równoległym pogłębianiem się kryzysu klimatycznego na świecie coraz większą wagę przywiązuje się do emisji toksycznych oraz cieplarnianych składników spalin powstających podczas procesów spalania. Do ich ograniczenia w znacznej mierze może przyczynić się zmiana stosowanych w tym procesie paliw. Połączenie tych zmian z nowoczesnymi sposobami zapłonu i spalania mieszanki może dać efekty pozwalające na dalszy rozwój motoryzacji opartej na klasycznym silniku spalinowym [2].

2. Sposoby zapłonu samoczynnego w silnikach

W literaturze dostępnej w języku polskim obecnie nie znajdziemy zbyt wielu pozycji naukowych czy nawet informacji popularnonaukowych dotyczących sposobów zapłonu samoczynnego innego niż klasyczny zapłon samoczynny — *Classic Diesel Combustion* (CDC). Już na wstępie należy zaznaczyć, że bezpośrednie tłumaczenia skrótów i zwrotów, jakich używa się na określenie różnych sposobów zapłonu w literaturze zagranicznej, nie powinny być traktowane dosłownie. Dobrym przykładem jest skrót ZS — zapłon samoczynny, w języku angielskim silniki tego typu oznacza się popularnie skrótem CI oznaczającym „*Compressed Ignition*”, co w bezpośrednim tłumaczeniu odpowiada określeniu „zapłon ciśnieniowy” bądź „zapłon kompresyjny”.

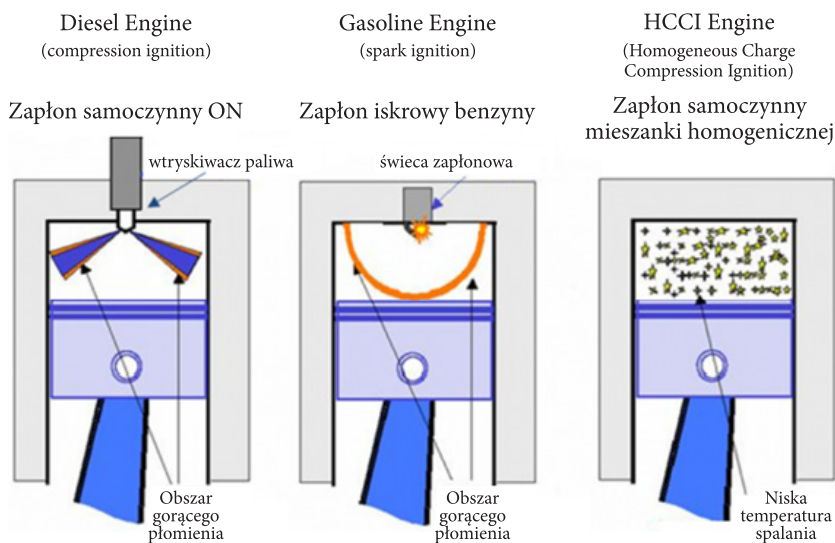
Precyzyjne skróty stosowane do określenia silnika popularnie nazywanego w Polsce niepoprawnie „silnikiem Diesla” to CDC czy CIDI — *Compression-Ignition Direct Injection*. CIDI mówi zarówno o sposobie zapłonu, jak i wtrysku paliwa w silnikach tłokowych, opisując dokładnie pracę klasycznego silnika o ZS zasilanego olejem napędowym, którego sposób działania widać także w akronimie CDC. Paliwo spalające się samoczynnie pod wpływem wysokiego ciśnienia i temperatury panujących w cylindrze silnika wtryskiwane jest bezpośrednio do komory spalania i w nomenklaturze polskojęzycznej nazywa się go po prostu silnikiem o zapłonie samoczynnym [2].

Mimo około wieku rozwoju klasyczny silnik o ZS charakteryzuje się jednak pewnymi ograniczeniami, których eliminowanie doprowadziło do rozwinięcia nowych sposobów na samozapłon mieszanki paliwowo-powietrznej w silnikach tłokowych, gdzie kluczowym elementem pozwalającym na poprawę sprawności pracy silnika jest dziś stworzenie homogenicznej mieszanki paliwowo-powietrznej w komorze spalania przed doprowadzeniem jej do zapłonu lub samozapłonu.

Stąd opis pochodzących z literatury anglojęzycznej akronimów należy rozpocząć od najbardziej rozpoznawalnego, ale i ważnego ze względów technicznych, znanego powszechnie ze źródeł popularnonaukowych samozapłonu HCCI. HCCI — *Homogeneous Charge Compression Ignition* — to zapłon samoczynny mieszaniny jednorodnej, pozwala na jednoczesny zapłon całej objętości mieszanki paliwowo-powietrznej znajdującej się w komorze spalania. W rozwiązaniu tym paliwo dostarczane jest do silnika odpowiednio wcześniej, aby zdążyło należycie wymieszać się z powietrzem, i stosowane są w tym przypadku PDI (*Port Dual Injection*). Możliwe jest wykorzystanie paliw o wysokiej liczbie oktanowej, takich jak benzyna, które dzięki jednorodnemu zmieszaniu z powietrzem ulegają zapłonowi w sposób analogiczny do oleju napędowego w silniku o ZS [3]. Jak już wcześniej opisano, przy zapłonie tym czas na wymieszanie paliwa z powietrzem jest maksymalnie wydłużony — stanowi to podstawę charakteryzującą ten typ zapłonu i odróżniającą ją od samozapłonu PCCI (*Premixed Charge Compression Ignition*) [4].

Warto zaznaczyć, że silniki o samozapłonie typu PCCI, gdzie zachodzi zapłon samoczynny mieszanki kinetycznej, to obecnie najwyższa forma rozwoju technologii samozapłonu paliwa w silniku tłokowym, pozwalająca na sterowanie momentem zapłonu oraz stopniem wymieszania mieszanki z powietrzem. W silniku HCCI paliwo i powietrze mają więcej czasu na zmieszanie się ze sobą, ładunek wprowadzony do komory spalania pod koniec suwu sprężania jest już uwarstwiony jednorodnie, natomiast w przypadku PCCI czas na zmieszanie paliwa z powietrzem jest krótszy, w silnikach tych stosowany jest bowiem wtrysk bezpośredni, co nie jest praktykowane w rozwiązaniach HCCI. Można zaryzykować uproszczenie określające silnik PCCI jako odmianę silnika HCCI wyposażoną we wtrysk bezpośredni. Różni się on bowiem od standardowego silnika o ZS pracującym na oleju napędowym przede wszystkim momentem, w jakim wtryskiwane jest paliwo. W silniku PCCI do jego wtrysku dochodzi bowiem nie w okolicy górnego martwego położenia (GMP) tłoka, ale znacznie wcześniej, często jeszcze przed rozpoczęciem suwu sprężania.

W tym przypadku zapłonowi samoczynnemu ulega mieszanka jednorodna. W mieszance, w której odparowane paliwo i utleniacz są wstępnie zmieszane w sposób równomierny, płomień powstający w procesie ich spalania jest „wstępnie zmieszany” i nazywa się kinetycznym (*premixed*). Jako kontrprzykład posłużyć może spalanie, w którym paliwo i utleniacz mieszają się dopiero w obszarze powstawania płomienia — płomień taki nazywa się płomieniem dyfuzyjnym, a spalanie — spalaniem dyfuzyjnym.



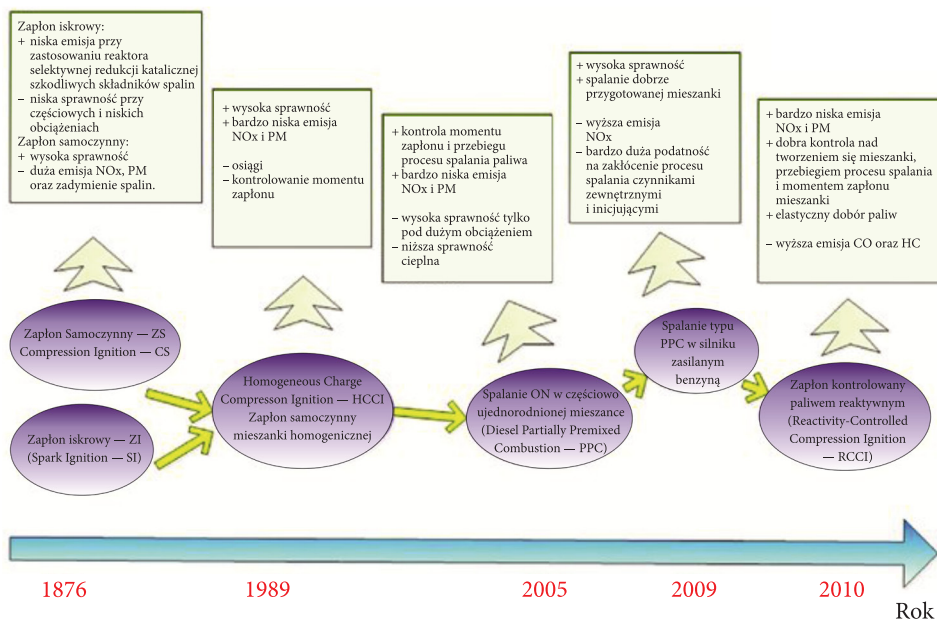
Rys. 1. Schematyczne przedstawienie współczesnych podstawowych metod zapłonu mieszanki w silnikach tłokowych

Źródło: opracowanie własne na podstawie [7]

Płomienie można podzielić także ze względu na ich kinetykę, na laminarne lub turbulentne. W silniku tłokowym spalanie przebiega zasadniczo głównie z udziałem turbulentnego płomienia, ze względu na budowę i charakterystykę pracy silników tłokowych, gdzie czas na zajście procesu spalania jest ograniczony. W klasycznych silnikach o ZS spalanie przebiega dyfuzyjnie przy kinetycznej charakterystyce płomienia, a znajdujące się początkowo w fazie ciekłej drobinki paliwa są podczas procesu spalania otoczone przez dyfuzyjny płomień, w którym w turbulentny sposób utleniają się odparowujące z kropelek oleju napędowego opary paliwa [6].

Ponieważ przepływ powietrza w cylindrze jest turbulentny, proces spalania oleju napędowego występuje głównie w postaci niestabilnego płomienia dyfuzyjnego. Samozapłon, wynikający z wysokiego ciśnienia i temperatury w cylindrze w momencie rozpoczęcia wtrysku, doskonałe właściwości samozapłonowe oleju napędowego oraz jego skuteczne mieszanie się z powietrzem pozwalające na kontrolę momentu rozpoczęcia zapłonu to wyróżniki charakteryzujące proces spalania oleju napędowego w klasycznych silnikach CIDI. Spalanie oleju napędowego w wysokiej temperaturze i pod wysokim ciśnieniem powoduje tworzenie się wielu szkodliwych substancji, takich jak np. NO_x , których powstawanie konstruktorzy silników pracujących jedynie na oleju napędowym starają się bezskutecznie ograniczać. Poza możliwością oczyszczania powstałych w procesie spalania spalin w układzie wydechowym silnika najskuteczniejszą znaną obecnie metodą ograniczenia powstawania szkodliwych substancji trudnych do wyeliminowania w klasycznych silnikach o ZS jest spalanie mieszanki homogenicznej. Zanim jednak rozwinięte zostały pierwsze silniki, w których spalana była homogeniczna mieszanka paliwowo-powietrzna, pracowano nad zapłonem PCI i PPCI — *Partially Pre-mixed Combustion* lub *Partially Premixed Compression Ignition*: metody te pozwalają na spalanie mieszanki wstępnie zmieszanej z powietrzem, gdzie ostatnia dawka paliwa w momencie jej wtrysnięcia do cylindra tworzy przy zapłonie mieszkę paliwowo-powietrzną. Stąd w przeciwieństwie do PCCI czy HCCI w nazwie podkreślone jest, że jedynie część paliwa uległa przed samozapłonem wymieszaniu z powietrzem. Dzięki tej metodzie spalania paliwa duża jego część spalana jest wcześniej niż w przypadku klasycznego zapłonu samoczynnego.

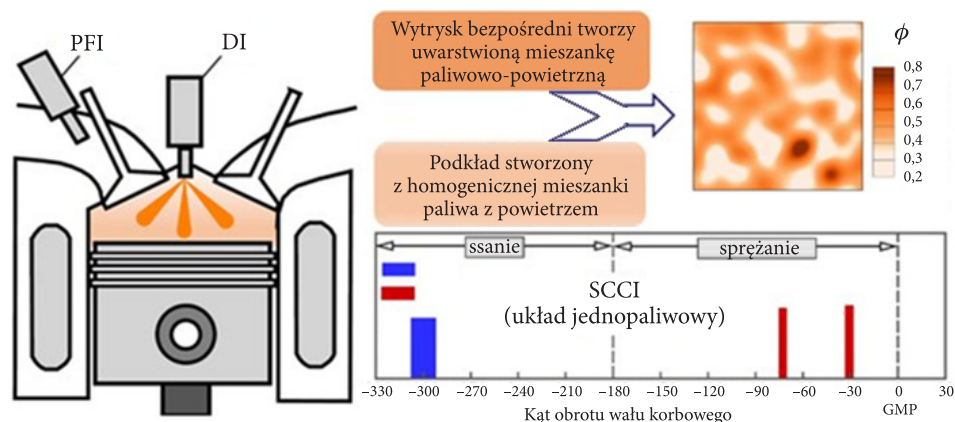
Warto jeszcze wspomnieć o zapłonie GDCI — *Gasoline Direct-Injection Compression Ignition* (zapłon samoczynny przy bezpośrednim wtrysku benzyny) — silniku pracującym zasadniczo na tej samej zasadzie co PPCI lub nawet PCCI, z tym że paliwem używanym w tym przypadku jest benzyna. Stabilna praca takiego silnika w pełnym zakresie obciążeń i prędkości obrotowych jest trudna do utrzymania, ale od 2010 r. jego koncepcja jest stale rozwijana [8]. Rozwój różnych sposobów zapłonu w silnikach tłokowych w czasie pokazuje rysunek 2.



Rys. 2. Lata wprowadzenia na rynek silników o wybranych sposobach zapłonu wraz z informacją krótko charakteryzującą każdy z nich
 Źródło: opracowanie własne na podstawie [9]

W przypadku rozważania procesu spalania z tak zaawansowanymi sposobami zapłonu paliwa jak wymienione wyżej warto przytoczyć zjawisko stratyfikacji termicznej (TS — *Thermal Stratification*) określające rozkład temperaturowy w opisywanej w tym procesie substancji, jaką mogą być spaliny bądź mieszanka paliwowo-powietrzna. W przypadku spalania mieszaniny jednorodnej jej nierównomierny rozkład jest kluczowym czynnikiem uniemożliwiającym prawidłowy samozapłon mieszaniny paliwowo-powietrznej w silnikach HCCI i PCCI. Zjawisko to opisuje także problemy, jakie dotyczą silniki o samozapłonie SCCI — *Stratified Charge Compression Ignition* (zapłon samoczynny ładunku uwarstwionego –warstwowego) — współczesne silniki z wtryskiem bezpośrednim działają na tej zasadzie zapłonu. Mając mieszankę z różnym składem, po wtrysnięciu paliwa do cylindra w różnych częściach komory spalania zapłon części dostarczonego paliwa pozwala na dalszy samoczynny zapłon pozostałego paliwa znajdującego się w cylindrze. Realizacja tak skomplikowanego procesu jest możliwa dzięki sekwencyjnemu wtryskowi paliwa podzielonego na kilka niezależnych dawek wtryskiwanych do komory spalania w ciągu jednego cyklu pracy silnika [10].

Istotą kontrolowania momentu zapłonu, przebiegu oraz czasu spalania zastosowanych w silniku paliw jest czas wtrysku i właściwości paliwa reaktywnego, stąd taka nazwa tej metody samozapłonu. Należy tu zaznaczyć, że metoda ta wyewoluowała z koncepcji, w której do uwarstwienia paliwa wtrysniętego pośrednio i zapłonu całości mieszanki paliwowo-powietrznej zainicjowanej wtryskiem bezpośrednim używano się jednego rodzaju paliwa. Ze względu na trudności wynikające z właściwości fizykochemicznych użytego jednego paliwa osiągi tak zasilanego silnika są niedostateczne jak na dzisiejsze standardy. Rysunek 3 pokazuje przytoczony tu i opisany wcześniej system zapłonu SCCI.



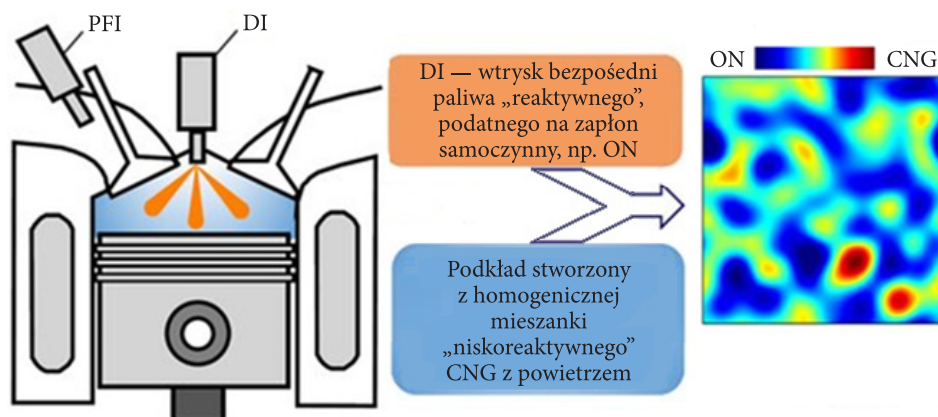
Rys. 3. Schematyczne przedstawienie zasady działania silnika SCCI, zobrazowanie stopnia uwarstwienia mieszanki paliwowo-powietrznej oraz strategii zasilania silnika w paliwo, gdzie akronimem PFI — *Port Fuel Injection* — oznacza się wtrysk pośredni paliwa, natomiast DI — *Direct Injection* — oznacza wtrysk bezpośredni paliwa

Źródło: opracowanie własne na podstawie [11]

Jeśli poza paliwem ciekłym, jakim pierwotnie jest olej napędowy, w komorze spalania znajduje się już inne paliwo, np. CNG bądź LPG, samozapłon oleju napędowego inicjuje także zapłon dostarczonego wcześniej paliwa gazowego. W przypadku klasycznego silnika o ZS wyposażonego w dodatkową instalację paliwową CNG lub LPG może być to albo tzw. gazodiesel, wykorzystujący klasyczny zapłon samoczynny, przy okazji którego spalane jest zarówno dostarczone wcześniej paliwo gazowe jak i paliwo wtryskiwane do komory spalania i inicjujące samozapłon, jak i bardziej zaawansowany sposób zapłonu, znany jako RCCI (*Reactivity-Controlled Compression Ignition*).

W silnikach RCCI paliwo niskoreaktywne, jakim może być benzyna, alkohol, CNG, LPG, HCNG, biometan bądź inne paliwa o wysokiej liczbie oktanowej, dostarczane jest do silnika razem z powietrzem przez układ dolotowy silnika. Następnie po wprowadzeniu do cylindra jest sprężane i mieszane z powietrzem, tworząc

wstępnie wymieszaną, palną mieszanekę paliwowo-powietrzną. Dzięki wysokiej liczbie oktanowej i odporności na samozapłon mieszanka ta nie ulega zapłonowi mimo wysokiej temperatury i ciśnienia, jakie już panują w cylindrze. W pobliżu GMP następuje wtrysk paliwa reaktywnego, którym mogą być olej napędowy bądź różnego rodzaju biopaliwa. Paliwo to musi się charakteryzować wysoką liczbą cetanową, niską temperaturą zapłonu i zdolnością do osiągnięcia niskich wartości średniego rozkładu średnicy kropeł paliwa w procesie jego wtrysku. Dzięki takim własnościom po czasie, jaki upływa od momentu wtrysku, określanym jako opóźnienie samozapłonu, następuje samozapłon wtrysniętego paliwa inicjujący przy tym zapłon już znajdującego się w cylindrze paliwa niskoreaktywnego (wysokooktanowego). Na rysunku 4 widać sposób zasilania tego typu silnika w paliwo [11].

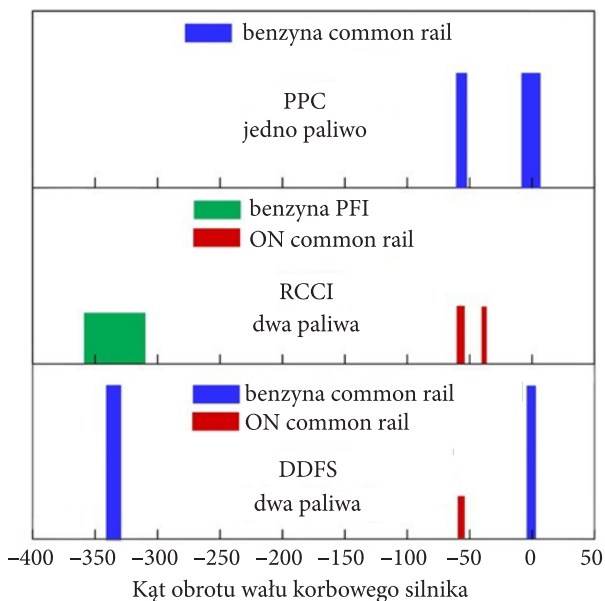


Rys. 4. Zasilanie silnika RCCI w CNG oraz ON. Schematyczne przedstawienie zasady działania silnika SCCI, stopnia uwarstwienia mieszanki oraz strategii zasilania silnika w paliwo
Źródło: opracowanie własne na podstawie [11]

W zależności od uwarstwienia i stopnia wymieszania paliwa wysokooktanowego z powietrzem przebieg jego spalania można scharakteryzować na różne sposoby i to często stanowi kluczowe zagadnienie w badaniach spalania typu RCCI. Jeśli uda się bowiem stworzyć mieszaninę homogeniczną paliwa gazowego z powietrzem, paliwo to również może ulec samozapłonowi pod wpływem ciśnienia, jakie wywrze na nim gwałtownie spalające się paliwo reaktywne, na podobnej zasadzie, na jakiej świeca zapłonowa doprowadza do zapłonu paliwa w *Spark Plug Controlled Compression Ignition* — SPCCI. W ten sposób efektywność spalania obu paliw staje się bardzo wysoka, a silniki RCCI stanowiły istotny krok w dalszych badaniach samozapłonu w silnikach tłokowych, pozwalając na rozwinięcie koncepcji PPCI, HCCI i PCCI. Obecnie w silnikach stosowanych w przemyśle motoryzacyjnym w pełnym zakresie pracy silnika w komercyjnym zastosowaniu można wykorzystać jedynie silniki RCCI.

Pozostałe wymienione „wyższe” formy spalania samoczynnego paliwa w silnikach o ZS wciąż znajdują się na etapie badań. Należy tu jednak zaznaczyć, że także silniki RCCI wymagają dalszych badań i analiz ze względu na ciągle rozwijający się przemysł paliwowy, motoryzacyjny oraz stawiane obu branżom wymagania związane z emisją szkodliwych składników spalin [12].

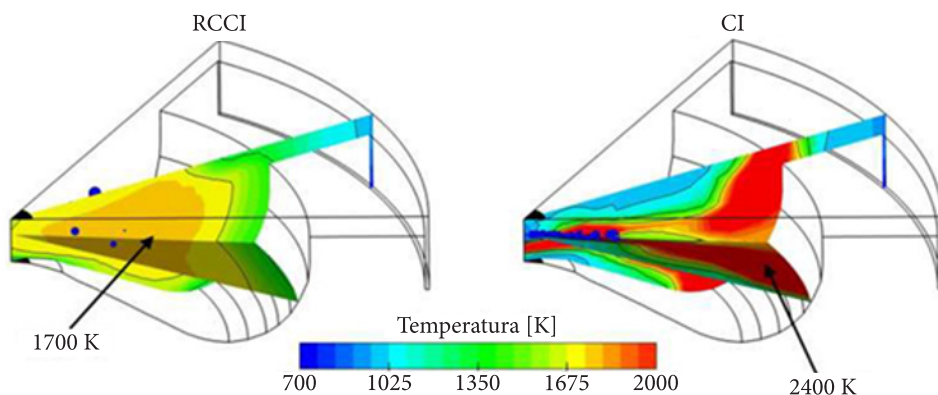
Udało się już, przy niskich obciążeniach silnika, w pewnym stopniu ograniczyć emisję szkodliwych składników spalin, takich jak m.in. produkty niezupełnego oraz niecałkowitego spalania paliwa (tlenek węgla oraz niespalone węglowodory), których zwiększona emisja jest cechą charakterystyczną silników RCCI. Wynika to z niskiej sprawności cieplnej tego rodzaju zapłonu przy niskim obciążeniu silnika. Poprawę sprawności cieplnej silnika oraz mniejsze zapotrzebowanie na wysoką energię inicjującą zapłon (samozapłon zachodzi przy niższej temperaturze i ciśnieniu) udało się osiągnąć dzięki zastosowaniu bezpośredniego wtrysku obu stosowanych paliw, zwanego *Direct Dual Fuel Stratification* (DDFS). Okazało się to możliwe dzięki nowoczesnym metodom wtrysku paliwa, ale zakres stosowania tej metody dotyczy głównie paliw badawczych i jej zastosowanie z wykorzystaniem gazu ziemnego z olejem napędowym nie jest szeroko opisane w literaturze. Strategia zasilania w standardowym silniku RCCI oraz DDFS jest przedstawiona na schemacie na rysunku 5.



Rys. 5. Strategie zasilania w silnikach PPC (Partially premixed combustion), RCCI i DDFS w paliwo niskoreaktywne (benzyna) oraz wysokoreaktywne (ON).

Źródło: opracowanie własne na podstawie [13]

W porównaniu z RCCI zoptymalizowana konstrukcja komory spalania wyposażonej we wtryskiwacze obu stosowanych paliw w DDFS wykazuje wyższą sprawność cieplną, niższą emisję CO i HC oraz wyższy potencjał odzyskiwania energii ze spalonych paliw. W odróżnieniu od spalania jednostopniowego w RCCI, DDFS charakteryzuje spalanie dwustopniowe, którego drugi stopień jest spowodowany wtryskiem oleju napędowego w pobliżu GMP, pierwszy natomiast następuje zaraz po wtrysku pierwszego paliwa. W porównaniu z RCCI DDFS wymaga niższej temperatury początkowej inicjującej zapłon, co pozwala opóźnić proces samozapłonu i spalania, a także większego stopnia recyrkulacji spalin, aby skutecznie kontrolować ilość powstających tlenków azotu i możliwość wystąpienia spalania stukowego. Czas wtrysku oleju napędowego jest podobny dla silników RCCI i DDFS i określa się go jako kompromis między wydajnością procesu spalania i stratami pochodzącymi z wymiany ciepła. Dla silników RCCI preferowany jest duży kąt rozpylenia wtryskiwacza oleju napędowego, aby kierować strumień oleju napędowego na wargę tłoka. W DDFS wymagany jest niewielki kąt ($< 30^\circ$) rozpylenia wtryskiwacza oleju napędowego dla pełniejszego utleniania paliwa, a w przypadku metanolu bądź metanu wymagany jest już większy ($> 30^\circ$) kąt rozpylenia wtryskiwacza, aby uniknąć nadmiernych strat przenikania ciepła do ścian komory spalania [14].



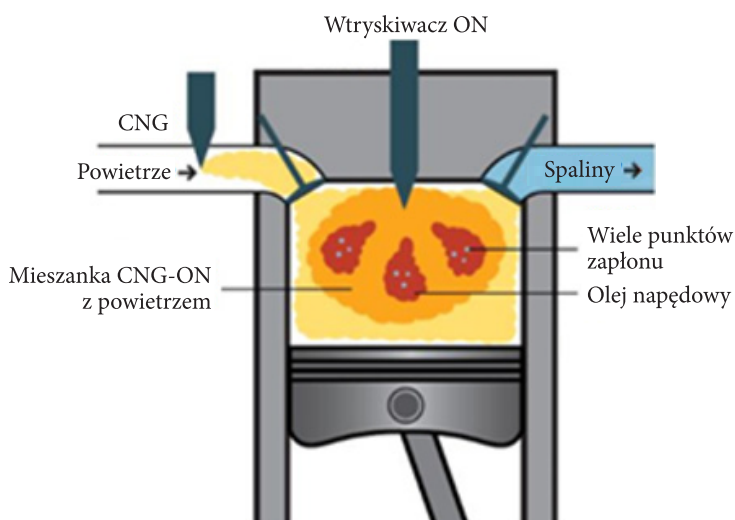
Rys. 6. Rozkład temperatury w komorze spalania dla silnika RCCI zasilanego CNG i ON oraz klasycznego silnika o ZS zasilanego ON

Źródło: [14]

Do cech wspólnych obu metod zasilania silnika w paliwo „niskoreaktywne” należy zaliczyć niższą niż w klasycznych silnikach o ZS temperaturę spalania oraz równomierny rozkład temperatury spalającej się mieszanki paliwowo-powietrznej w komorze spalania. Dzięki równomiernemu i niskotemperaturowemu przebiegowi procesu spalania podobnie jak w klasycznym silniku HCCI obniżeniu ulega emisja tlenków azotu, cząstek stałych i sadzy. Wysoka temperatura płomienia jest bowiem jednym z głównych czynników powodujących powstawanie tlenków azotu

podczas spalania. Tlenki azotu nie powstają w silnikach RCCI tak intensywnie jak w klasycznym silniku o ZS, także ze względu na spalanie w składzie zbliżonym do stechiometrycznego, ilość powietrza, które znajduje się w komorze spalania podczas procesu, ulega więc zmniejszeniu w porównaniu z klasycznym silnikiem zasilanym olejem napędowym.

Dzięki użyciu homogenicznie zmieszanego z powietrzem CNG sprawność wykorzystania energii chemicznej zawartej w paliwie rośnie. Na jej wzrost ma wpływ również równomierny rozkład temperatury w komorze spalania. Dzięki temu zmniejsza się sumaryczna ilość ciepła przedostającego się do ścianek cylindra oraz nie dochodzi do powstania gorących punktów w obrębie cylindra.



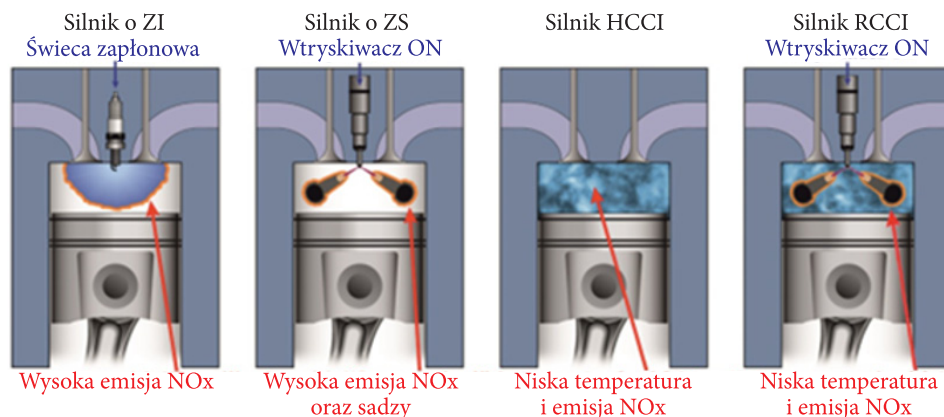
Rys. 7. Schematyczne przedstawienie zapłonu i sposobu zasilania silnika RCCI
Źródło: opracowanie własne na podstawie [15]

W przypadku silników RCCI wtryskiwane paliwo ciekłe jest dozowane w postaci dawki pilotującej inicjującej zapłon paliwa już dostarczonego do komory spalania. Silnik zasilany dwupaliwowo paliwami CNG/ON wymaga do zainicjowania zapłonu jedynie pilotującej dawki oleju napędowego. Przy wykorzystywaniu jako dodatkowego paliwa LPG konieczne jest zwiększenie ilości wtryskiwanego oleju napędowego z powodu niedostatecznej odporności dodatkowego paliwa gazowego na spalanie stukowe, niebezpieczne ze względu na możliwość uszkodzenia silnika. Jego wystąpienie jest uzależnione od wielu czynników, ale głównie od typu paliwa oraz stopnia sprężania w silniku. Spalanie stukowe powoduje powstawanie niekontrolowanych ognisk samozapłonu paliwa, utrudniających prawidłowy przebieg procesu spalania i pracę silnika spalinowego. Jego występowanie determinuje możliwość

zastosowania paliwa w silniku i stopień zastąpienia paliwa podstawowego, jakim jest olej napędowy, w dwupaliwowym silniku o ZS paliwem dodatkowym. Rysunek 7 pokazuje schematycznie sposób zasilania i zapłonu w silniku RCCI zasilanym mieszanką CNG i ON.

Procesy odparowania i rozpylania paliwa, mieszania go z powietrzem oraz spalania w przypadku prawidłowo przebiegającego cyklu pracy trwają do momentu, gdy przejdzie przez nie całe dostarczone do silnika paliwo. Poza tym mieszanie pozostałego w cylindrze powietrza z gazami powstałymi w procesie spalania trwa przez cały cykl suwu pracy, jest również kontynuowane w dalszych etapach pracy silnika, gdy występuje nadmiar powietrza względem ilości dostarczonego paliwa. Tak więc w przypadku klasycznych silników o ZS prędkość przebiegu procesu spalania zależy od prędkości, z jaką paliwo miesza się z powietrzem. Opóźnienie zapłonu paliwa jest więc kluczowym czynnikiem wpływającym na czas przebiegu procesu spalania w silniku tłokowym.

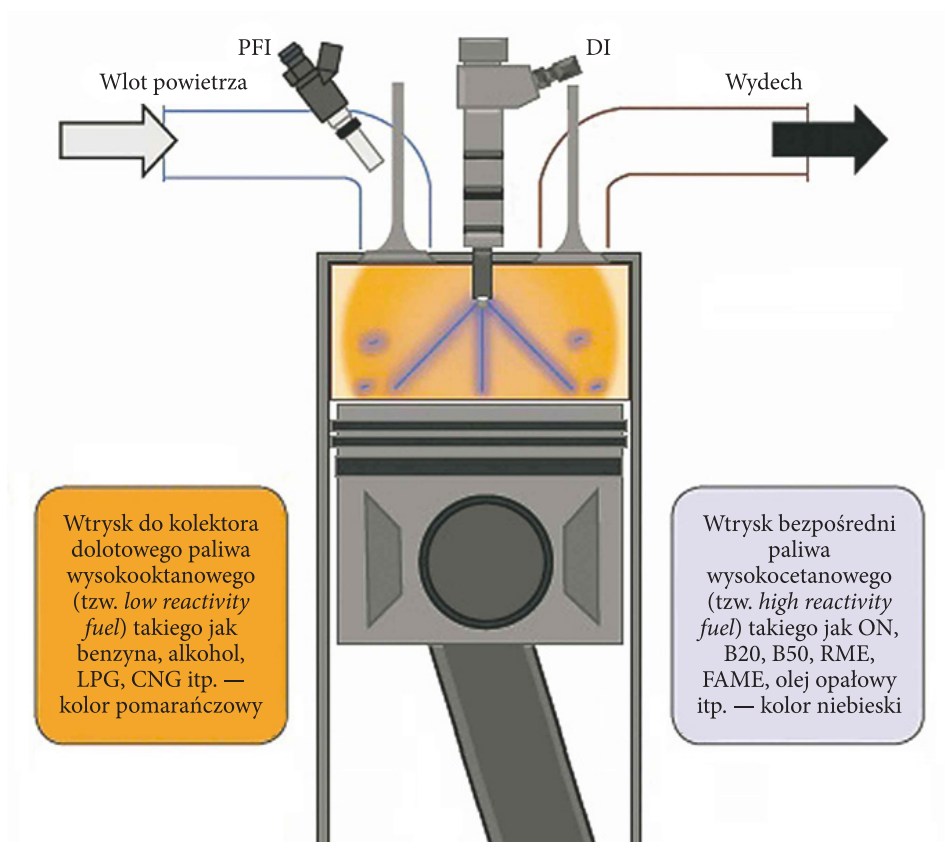
Dotyczy to zarówno klasycznych silników o ZS typu CIDI, jak i silników RCCI, DDFS czy PPCI, a także w pewnej mierze PCCI. Nie ma natomiast wpływu na silniki HCCI [4].



Rys. 8. Schematyczne przedstawienie procesów zapłonu w silnikach o ZI oraz ZS, w tym HCCI oraz RCCI
Źródło: opracowanie własne na podstawie [16]

W przypadku niedostatecznego zmieszania paliwa z powietrzem powstaje zjawisko zwane *non-premixed flames* lub płomieniami dyfuzyjnymi. Aby reakcja spalania przebiegła prawidłowo, musi nastąpić proces wymieszania paliwa gazowego z powietrzem, bowiem w przeciwnym wypadku pojawia się zjawisko dyfuzyjnych płomieni. Większość zawartej w paliwie chemicznej energii uwalniana jest w postaci cienkiej, reagującej z powietrzem warstwy zlokalizowanej w bezpośrednim sąsiedztwie oparów paliwa, gdzie spalanie przebiega w stechiometrycznym składzie mieszanki.

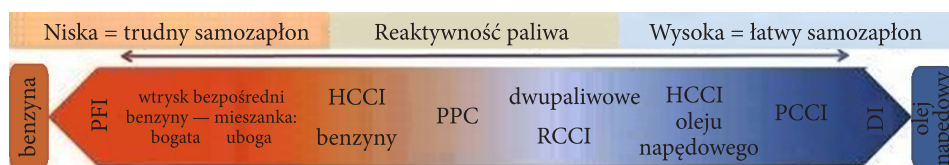
W przypadku zastosowania dwóch paliw w RCCI zasilanym paliwem CNG i ON w powszechnym dostępie praktycznie nie znajdziemy informacji na temat osiągnięć silnika czy przebiegu spalania przy bezpośrednim wtrysku obu paliw do cylindra silnika. Najpowszechniejszym sposobem zasilania jest zasilanie bezpośrednie w ON oraz pośrednie w CNG, tak jak widać to na rysunku 9.



Rys. 9. Schematyczne przedstawienie standardowego sposobu zasilania w silniku RCCI
 Źródło: opracowanie własne na podstawie [17]

W zagranicznej literaturze funkcjonuje wiele określeń definiujących rozmaite sposoby na określanie metody samoczynnego zapłonu mieszanki paliwowo-powietrznej we współczesnych silnikach tłokowych. W ramach tego opracowania należy je dokładniej scharakteryzować, ponieważ stanowią podstawę do zrozumienia powodu, dla czego stawia się na rozwój silników zasilanych jednocześnie dwoma różnymi paliwami. Ścieżka rozwoju silników o ZS z wtryskiem bezpośrednim

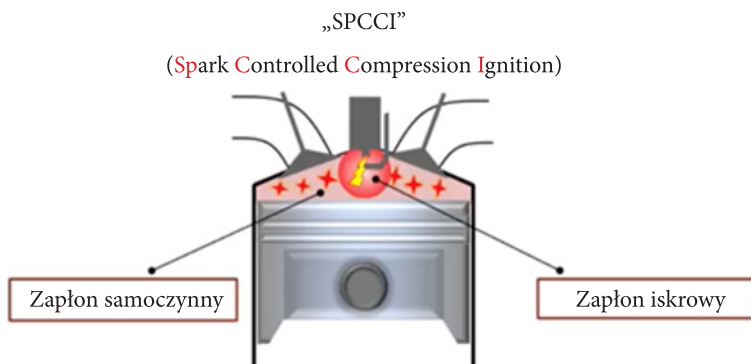
proceed through two-fuel systems, and Figure 10 clearly shows the moment when simultaneous science regarding the development of ignition in internal combustion engines is taking place.



Rys. 10. Obrazowe przedstawienie zależności występujących dla różnych sposobów zapłonu mieszanki paliwo-powietrznej w silnikach tłokowych od sposobu zasilania silnika oraz rodzaju stosowanego paliwa. Źródło: [18]

Figure 10 shows what has been achieved in the matter of effective ignition of the fuel-air mixture in internal combustion engines. The possibility of effective use of HCCI or PCCI self-ignition over the entire operating range of engines fueled with diesel oil is a basic difficulty with the widespread introduction of this type of ignition in internal combustion engines, through which it currently remains outside the reach of researchers and designers. However, RCCI ignition is already achievable and there are already engines in which it is used [19]. Engines like that are currently the only available option for fueling them with a homogeneous mixture, which allows for the further development of this technology. Thanks to this, the efforts of scientists to develop an engine with HCCI self-ignition, and later PCCI, will be based on the experience from work on an engine operating on two fuels.

To achieve self-ignition of a homogeneous fuel-air mixture, various types of initiators are used to start the combustion process at a certain moment chosen by the designer. Among these solutions, which have already found widespread use, one should mention the technology SPCCI — *Spark (Plug) Controlled Compression Ignition* [20]. It is a self-ignition, whose start is initiated by the spark of the spark plug, which controls the moment of the start of combustion of the fuel-air mixture. It is a specific method of bringing the mixture to self-ignition of a homogeneous fuel-air mixture found in the combustion chamber at a certain distance from the spark plug. The ignition of the fuel found in the immediate vicinity of the spark plug leads to an increase in pressure in the combustion chamber and self-ignition of the remaining homogeneous fuel-air mixture found in the combustion chamber [21]. The engine with this type of ignition was first introduced to the market by the company Mazda in a car using a solution of the „SKYACTIV” series, which contains many technologies developed by the company, among which a key role is played by the possibility of using SPCCI in the engine. Figure 11 shows the moment of ignition of the mixture and it comes from the promotional materials of the company Mazda.



Rys. 11. Schematyczne przedstawienie procesu zapłonu w silniku SPCCI

Źródło: [22]

Dodatkowa faza wtrysku, pozwalająca na wzbogacenie mieszanki paliwowo-powietrznej w bezpośrednim sąsiedztwie świecy zapłonowej, następuje chwilę przed zainicjowaniem zapłonu przez świecę zapłonową. Zabieg ten pozwala na wzbogacenie mieszanki w obszarze działania świecy zapłonowej oraz doprowadza do stworzenia mieszanki łatwiej ulegającej zapłonowi.

Mieszanka znajdująca się w cylindrze przed nastąpieniem tego wtrysku nie jest bowiem stechiometryczna ze względu na zabezpieczenie mieszanki paliwowo-powietrznej przed niekontrolowanym zapłonem wynikającym ze sprężenia ładunku podczas suwu sprężania. Na podobnej zasadzie działa również SACI — *Spark Assist Compression Ignition* doprowadzający do samozapłonu mieszanki paliwowo-powietrznej przy użyciu iskry pochodzącej od świecy zapłonowej [23]. Wzrost ciśnienia wewnątrz komory spalania wywołany przez zapłon części mieszanki znajdującej się w pobliżu świecy zapłonowej powoduje wzrost ciśnienia i temperatury w obszarze całej komory spalania, doprowadzając do samozapłonu pozostałej części mieszanki paliwowo-powietrznej.

Metody alternatywne pozwalające na samozapłon mieszanki homogenicznej umożliwiają pracę silnika w wystarczającym zakresie obrotów i obciążeń, aby można było go stosować w seryjnie produkowanych samochodach. Aby jednak zrealizować tego typu zapłon samoczynny bez użycia dodatkowych urządzeń takich jak np. świeca zapłonowa, jedynie przy użyciu dostarczanego do silnika paliwa, niezbędny jest rozwój silników o zapłonie RCCI.

W związku z tym, że na takim sposobie zapłonu opierać się będzie według przewidywań autora dalszy rozwój silników o ZS, przedstawione zostaną krótko możliwości zasilania dwupaliwowego silników oraz wpływ takiego sposobu zapłonu na emisję szkodliwych składników spalin na przykładzie jednego silnika.

3. Klasyfikacja metod równoczesnego zasilania silników o ZS dwoma rodzajami paliwa

Podstawowa możliwość zasilania silnika o ZS dwoma rodzajami paliwa musi opierać się na możliwości skutecznego spalania obu paliw w komorze spalania silnika. Aby było to możliwe, musi dojść do samoczynnego zapłonu mieszanki, a do tego wymagane jest odpowiednie przygotowanie mieszanki paliwowo-powietrznej [24].

W tym rozdziale krótko przedstawione zostaną instalacje zasilania dwupaliwowego oraz same instalacje zasilania silników o ZS, ze względu na konieczność ich wykorzystania wraz z instalacją zasilania paliwem dodatkowym względem standardowego paliwa stosowanego w silnikach tego typu, ponieważ w przeważającej większości przypadków dodatkowa instalacja jest dokładana przy zachowaniu instalacji pierwotnej [25].

Ze względu na to, że najlepszy efekt ograniczenia emisji dwutlenku węgla daje stosowanie wysokooktanowego paliwa o niskiej zawartości węgla, np. wodoru, gazu ziemnego czy mieszanki obu tych paliw współspalanych z olejem napędowym, w tym opracowaniu analizie poddano instalacje pozwalające na zasilanie silnika w takie paliwa. Istnieje wiele analogii w sposobie zasilania silnika paliwem CNG i LPG. Występują jednak także pewne różnice, które należy tu wymienić. Przede wszystkim ciśnienie pojawiające się przy użyciu tych dwóch różnych paliw jest inne i różni się o cały rząd wielkości (25 MPa dla CNG do 2 MPa w przypadku LPG). Wytrzymalsze muszą być wszystkie elementy układu. Wysokociśnieniowe przewody paliwowe stosowane dla CNG są stalowe lub polimerowe i zawsze są wykonywane bezszwowe. Zwraca się również uwagę, aby były one odporne na korozję. Dla paliwa CNG z dodatkiem wodoru stosuje się raczej przewody polimerowe ze względu na niebezpieczeństwo wystąpienia choroby wodorowej stali. Używa się dwu-, a czasami nawet trzystopniowych reduktorów ciśnienia, z powodu stanu, w jakim znajduje się gaz ziemny, wysokie jest ciśnienie jego magazynowania. Reduktory używane w instalacjach CNG działają podobnie jak w instalacjach LPG, ale stan skupienia paliwa nie ulega zmianie w reduktorze. Zbiorniki na gaz wykonywane są albo ze stali wzmocnionej polimerowym zbrojeniem albo są one w pełni kompozytowe, wykonane z kompozytów włóknistych i lineru. Kompozytowe zbiorniki są w stanie wytrzymać ciśnienie do 73 MPa, ale takie ciśnienie stosuje się do przechowywania wodoru, a nie gazu ziemnego [26]. Należy mieć na uwadze rozwój paliwa HCNG i zmiany, jakie mogą zachodzić m.in. w sposobie jego przechowywania, gdzie wyższe ciśnienie gazu jest wskazane ze względu na jego niższą gęstość energetyczną w porównaniu z czystym gazem ziemnym [27]. W przypadku wtryskiwaczy paliw gazowych można znaleźć wiele analogii w ich budowie w porównaniu do budowy wtryskiwaczy paliw ciekłych, ale ze względu na niższą gęstość wtryskiwanego paliwa gazowego wtryskiwacze są większe, ponieważ dysze oraz kanały paliwowe muszą mieć większe przekroje. Istotne jest również, aby sterowanie wtryskiwaczami

było możliwe bezzwłocznie ze względu na dużą ilość paliwa, jaką należy wtrysnąć w możliwie krótkim czasie, i większe siły bezwładności w układzie części ruchomych wtryskiwaczy gazowych względem wtryskiwaczy paliwa ciekłego [28].

3.1. Fabryczne instalacje zasilania dwupaliwowego

Współczesne instalacje zasilania dwupaliwowego w silnikach spalinowych obejmują przede wszystkim jednoczesne zasilanie silnika w paliwo ciekłe oraz paliwo gazowe. W przypadku silników o ZI dotyczy to przede wszystkim równoczesnego zasilania w benzynę i gaz LPG lub CNG, natomiast w przypadku silników o ZS dotyczy to przede wszystkim oleju napędowego i gazu ziemnego w postaci sprężonej lub skroplonej [29].

W obu przypadkach najpopularniejsze są instalacje niezależne — pracujące razem, ale dostarczające paliwo przy pomocy samodzielnych systemów paliwowych. Ich synchronizacja jest niezbędna do poprawnej pracy silnika i zapewniają ją dziś elektroniczne jednostki sterujące silnika: *Electronic Control Unit* — ECU, zwane także EDC — *Electronic Diesel Control* w przypadku sterowników przeznaczonych do silników o ZS. Układy te są standardowo przeznaczone do sterowania układem zasilania silnika w podstawowe paliwo ciekłe, natomiast w silnikach dwupaliwowych drugim sterownikiem jest ten odpowiadający za zasilanie silnika paliwem gazowym, również określany mianem ECU. W każdym przypadku są to układy elektroniczne pozwalające na zapewnienie skutecznego zasilania silnika paliwem [30].

W celu zasilenia silnika paliwem podstawowym, jakim w przypadku większości silników o ZS jest olej napędowy, stosuje się dziś jedynie układy wtryskowe typu Common Rail. Pozwalają one na wtryskiwanie paliwa ciekłego pod bardzo wysokim ciśnieniem, dochodzącym do 180 MPa przy 250 MPa ciśnienia paliwa znajdującego we wspólnym zasobniku. Wtryskiwacze piezoelektryczne stosowane w tym systemie pozwalają na wielokrotny wtrysk paliwa w ciągu jednego cyklu pracy silnika. Wielokrotne wtryski paliwa można charakteryzować, dzieląc je na kilka faz wtrysku. Wysokie ciśnienie oraz krótki czas wtrysku bezpośredniego do komory spalania pozwalają na stworzenie mgły paliwowej o pożądanym parametrach, dlatego w większości przypadków jest to standardowy sposób dostarczenia paliwa ciekłego w dwupaliwowych instalacjach CNG/ON.

Wtryskiwacze paliwa gazowego zapewniające bezpośredni wtrysk paliwa do komory spalania są elementami współczesnych układów zasilania o najwyższej precyzji wykonania. Wtryskiwacze przeznaczone dla paliwa gazowego są podobne w konstrukcji do wtryskiwaczy silnikowych paliw ciekłych [29]. Wtryskiwacze gazowe często nadają się zarówno do pracy z użyciem metanu, jak i mieszaniny propan-butan. Najczęściej stosowane konstrukcje wtryskiwaczy gazowych opierają się na konstrukcjach membranowo-płytkowych lub tłoczkowych. Poza nimi oddzielną grupę stanowią wtryskiwacze gazu płynnego, które zbudowane są tak

jak wtryskiwacze benzynowe oraz wtryskiwacze dwupaliwowe produkowane przez firmę WestPort i Delphi [31].

Elastyczna membrana bądź płytka blaszka we wtryskiwaczach membranowo-płytkowych dociskana jest elementem sprężystym, którego opór w celu wtrysnięcia paliwa pokonywany jest przy użyciu siły elektromagnetycznej. Wtryskiwacze te charakteryzuje duża szybkość działania spowodowana małą masą elementów ruchomych.

We wtryskiwaczach tłoczkowych gaz odcinany jest za pomocą metalowego tłoczka, również poruszanego za pomocą siły elektromagnetycznej. Ze względu na wyższą bezwładność elementów ruchomych są one mniej popularne [30].

Typ wtryskiwaczy obsługujący oba rodzaje paliwa zasilające silnik stosowany jest przy wtrysku bezpośrednim do komory spalania i opisany w dedykowanym podrozdziale w dalszej części artykułu.

3.2. Instalacje wprowadzające gaz ziemny pośrednio — przed komorą spalania

Instalacje tego typu są standardem w rozwiązaniach mających na celu zastosowanie gazu ziemnego jako paliwa dodatkowego w klasycznych silnikach o ZS niewyposażonych fabrycznie w instalację gazową. Instalacje te są budową w wielu aspektach podobne do instalacji LPG starszych generacji. Ich wykorzystanie dotyczy przede wszystkim modyfikacji pojazdu bądź samego silnika, dlatego zostaną opisane bardziej szczegółowo w innym rozdziale.

Jeśli chodzi o instalacje najnowszych generacji, są częściej stosowane jako fabryczne rozwiązanie zasilania silnika w LPG bądź CNG i zostaną tutaj krótko scharakteryzowane.

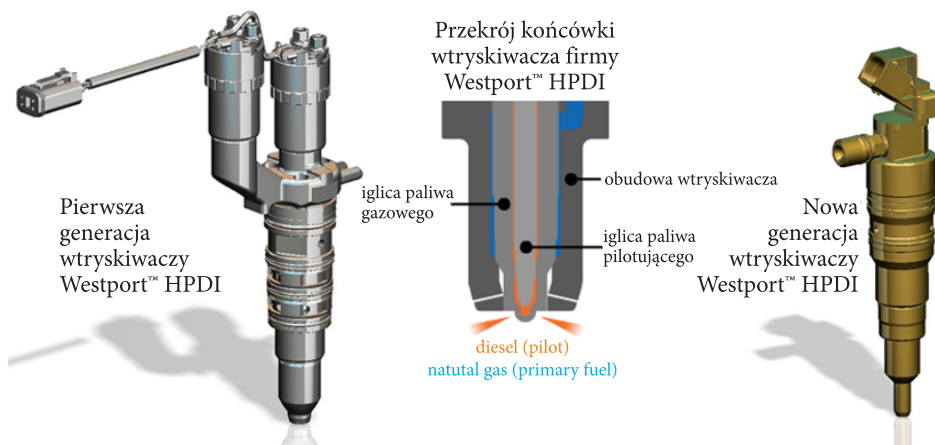
Zarówno fabrycznie, jak i do zasilania paliwem gazowym we współczesnych silnikach spalinowych stosowana jest instalacja generacji czwartej. Pozwala ona na sekwencyjny wtrysk gazu bezpośrednio przed zaworami ssącymi silnika. Jej zastosowanie wiąże się z wyposażeniem silnika w niezbędne czujniki bądź wykorzystaniem tych, w które silnik jest już wyposażony, a także w zaawansowaną jednostkę ECU, sterującą pracą instalacji i silnika. Generacja ta szybko zastąpiła generację trzecią, która nie jest już stosowana, ale zostanie krótko scharakteryzowana w podrozdziale o niefabrycznych instalacjach gazowych [26].

3.3. Instalacje wprowadzające gaz ziemny bezpośrednio do komory spalania

W tego typu instalacjach stosowane są prawie zawsze wtryskiwacze wysokociśnieniowe, są one znane jako instalacje *High Pressure Direct Injection* — HPDI. Ciśnienie wtryskiwanego gazu dochodzi do 30 MPa, a w przypadku paliwa płynnego, jakim może tu być olej napędowy, nawet do 200 MPa [32, 33].

Najbardziej rozwinięte technicznie i obiecujące względem przyszłego rozwoju są właśnie wtryskiwacze dwupaliwowe typu HPDI produkowane przez firmę WestPort [32]. Ich wykorzystanie pozwala na wtryskiwanie pod wysokim ciśnieniem dwóch paliw bezpośrednio do komory spalania przy pomocy jednego wtryskiwacza umieszczonego w głowicy silnika. System ten wykorzystywany jest jedynie w silnikach o pojemności skokowej przekraczającej 10 litrów i są to jednostki należące do firmy Weichai Group [34]. Poza tym rozwiązaniem stosowane mogą być także niezależne wtryskiwacze wysokociśnieniowe dwóch różnych paliw umieszczone w głowicy silnika [35].

Ze względu na największy potencjał w dalszym rozwoju i wykorzystaniu wtryskiwacza typu HPDI 2.0 jest dziś najnowocześniejszym rozwiązaniem, jakie można stosować w samochodowych silnikach średnioobrotowych.



Rys. 12. Przedstawienie wyglądu i schematycznego przekroju dwupaliwowych wtryskiwaczy firmy WestPort, gdzie wtryskiwacz znajdujący się po lewej stronie jest wtryskiwaczem pierwszej generacji, a po stronie prawej drugiej generacji, natomiast w części środkowej rysunku znajduje się schematyczny przekrój obrazujący ich działanie

Źródło: [31, 33]

W przypadku silników wolnoobrotowych rozwiązania pozwalające na wtrysk obu stosowanych paliw bezpośrednio do komory spalania nie są już rzadkie i znajdują powszechne zastosowanie np. w okrętownictwie, jednak w silnikach średnioobrotowych stosowanych w samochodach ciężarowych oraz osobowych seryjne rozwiązanie tego typu możliwe jest jedynie dzięki użyciu produktów firmy WestPort [33].

Należy również wspomnieć o pewnym rozwiązaniu pozwalającym na bezpośredni wtrysk do komory spalania zarówno paliwa gazowego, jak i paliwa ciekłego przy użyciu jednego wtryskiwacza. Jest to możliwe dzięki właściwościom dwóch paliw, które można ze sobą mieszać (rozpuścić jedno w drugim) przed ich wtrysnięciem do komory spalania silnika. W przypadku interesującego nas rozwiązania chodzi o możliwość rozpuszczenia gazu ziemnego w oleju napędowym przed jego

wprowadzeniem do komory spalania bądź układu dolotowego silnika — zostało to szczegółowo opisane w [36, 37]. Ze względu jednak na niewielkie ilości gazu ziemnego, jakie można wprowadzić w ten sposób do silnika, nie będzie to metoda poddana szczegółowej analizie w tym opracowaniu, jest przedstawiona jako jeden ze sposobów jednoczesnego zasilania silnika w dwa paliwa.

3.4. Niefabryczne rozwiązania zasilania silnika

W przypadku zastosowania CNG jako dodatkowego paliwa dla silnika o ZS wykorzystuje się zwykle rozwiązania podobne do tych znanych z instalacji zasilania silnika LPG. Pierwsze generacje zasilania tym paliwem można scharakteryzować jako podstawowe możliwe do zastosowania przy modyfikacji silnika o ZS. Dziś jednak nie są stosowane jako fabryczny produkt w dwupaliwowych instalacjach zasilania silników. Z tego powodu scharakteryzowane zostaną w tym podrozdziale.

Najstarszym typem zasilania gazowego silników były instalacje pierwszej generacji, gdzie paliwo wprowadzane było do układu dolotowego po rozprężeniu w reduktorze/ parowniku przez mikser gazu z zasilającym silnik powietrzem. Pozwala to na bardzo proste sterowanie ilością dostarczanego do silnika gazu i ten typ instalacji praktycznie nie jest już stosowany.

Druga generacja instalacji gazowej jest już wyposażona w elektroniczną jednostkę sterującą pracą instalacji. Register i attuator (element wykonawczy układu sterującego ilością doprowadzanego gazu) pozwalają na dokładniejsze sterowanie ilością doprowadzanego do miksera gazu na podstawie odczytów przetwarzanych w ECU z czujników, w jakie wyposażony jest silnik. Tak określana ilość podawanego do silnika gazu ma dużą dokładność, jednak możliwości jego wymieszania z powietrzem pozostają ograniczone.

Dlatego w generacji trzeciej wprowadzony został już wielopunktowy wtrysk gazu. Wtryskiwacze gazowe umieszczone są indywidualnie dla każdego cylindra w układzie dolotowym bezpośrednio przed zaworami ssącymi. Znacząco poprawia to wymieszanie paliwa gazowego z powietrzem doprowadzanym do silnika, ale generacja ta również należy już do technologii przestarzałych.

Generacja trzecia ustępuje bowiem pod wieloma względami generacji czwartej, w której został już zastosowany sekwencyjny wtrysk gazu opisany w dziale fabrycznych instalacji zasilania silników gazem. Największą wadą generacji trzeciej w porównaniu do czwartej jest zastosowany ciągły wtrysk gazu, którego efektywność znacząco wyprzedza wprowadzony później wtrysk sekwencyjny. Należy też pamiętać, że w generacji trzeciej zamiast wielopunktowego wtrysku paliwa występował również dozonator, stanowiący jednopunktowy wtrysk paliwa gazowego zastępujący znany z poprzednich generacji mikser gazu.

W piątej i szóstej generacji stosowany jest już wtrysk paliwa w fazie ciekłej, instalacje te obsługują więc paliwa LPG i LNG [26].

4. Jednoczesne stosowanie paliw w silnikach o ZS

We współczesnych silnikach o ZS wybór paliw silnikowych możliwych do wspólnego zastosowania przy odpowiednio zachowanej ich kombinacji jest zasadniczo nieograniczony. Analizując dostępną literaturę, łatwiej wytypować paliwa, które nie były jeszcze stosowane w układzie DDF niż te zaadaptowane z sukcesem. Należą do nich paliwa silnikowe, które wyszły już z użycia, jak gaz drzewny, gaz miejski, gaz generatorowy, olej arachidowy czy innego rodzaju, niestosowane już jako paliwo, różnego rodzaju oleje techniczne bądź spożywcze [38].

Warto wspomnieć, że technologia Dual Fuel w silnikach o zapłonie samoczynnym rewolucjonizuje również transport morski, w którym stosowanie gazu ziemnego współspalanego z mazutem jest popularyzowane ze względów ekonomicznych, ekologicznych oraz marketingowych [39].

4.1. LPG + ON

Olej napędowy stosowany wraz z mieszanką propanu i butanu — mogą być wykorzystywane wspólnie w silnikach o ZS. Na obecnym poziomie tej technologii w powszechnym użyciu instalacje pozwalają na osiągnięcie częściowego zastąpienia oleju napędowego przez LPG. Olej napędowy w klasycznych instalacjach tego typu stanowi nie mniej niż 70% wartości energetycznej dostarczanego do spalania paliwa. Według różnych źródeł informacji udaje się osiągać odmienny stopień zastąpienia paliwem gazowym [40], nie jest on jednak tak wysoki jak w przypadku stosowania gazu ziemnego.

4.2. CNG + ON

Zastosowanie gazu ziemnego wraz z olejem napędowym pozwala na zmniejszenie kosztów eksploatacyjnych silnika i poprawę parametrów ekologicznych jego pracy. Stopień zastąpienia oleju napędowego gazem ziemnym jest znacznie wyższy niż w przypadku LPG, głównie ze względu na wyższą odporność metanu na spalanie stukowe oraz większą wartość opałową CNG [41].

4.3. LNG + ON

Stosowanie gazu ziemnego w postaci ciekłej ma pewne zalety w porównaniu z formą sprężoną. Dotyczą one przede wszystkim eksploatacji pojazdu z zamontowaną instalacją tego typu. W przypadku przebiegu procesu spalania gazu może być on sprawniejszy, jeśli zastosuje się odpowiednią instalację paliwową, w której wykorzysta się wysokie ciśnienie gazu [42] lub stan fizyczny, w jakim się on znajduje [43].

4.4. Inne paliwa gazowe stosowane z gazem ziemnym

Wydobyty gaz ziemny w kolejnych etapach swojej przemiany w paliwo silnikowe może być wielokrotnie modyfikowany. Jego modyfikacja jest niezbędna ze względu na ilość zanieczyszczeń znajdujących się w surowym gazie ziemnym i znaczne różnice w składzie chemicznym w zależności od miejsca, z jakiego został wydobyty. Poza jego oczyszczaniem i wzbogacaniem w czysty metan istnieje bardzo obiecująca technologia, której produktem końcowym staje się nowe paliwo o nazwie marketingowej Hytan (Hythane), w Europie znane jako HCNG, a bazuje na dodaniu do gazu ziemnego wodoru [44].

Wodór współspalany z innymi paliwami pozwala na osiągnięcie lepszej efektywności spalania dotychczas wykorzystanych paliw oraz mniejszego stopnia zanieczyszczenia środowiska produktami ich spalania. Wodór różni się jednak od pozostałych paliw gazowych — jego wykorzystanie w silnikach tłokowych nie zostało do dziś rozpozszecznione na tyle, aby można było mówić o jego powszechnym stosowaniu jako paliwa silnikowego, pomimo wielu prób i badań naukowych z tym związanych [45].

W HCNG stosunek ilości poszczególnych gazów może być zmienny, nie powinien jednak przekraczać pewnego stężenia wodoru ustalonego odpowiednimi przepisami. W Europie HCNG może zawierać do 10% objętościowej zawartości wodoru, w Ameryce zaś „Hythan” zawiera około 20% objętościowej zawartości wodoru. Stężenie wodoru mieszanego z gazem ziemnym większe niż 30% jest obecnie trudne do dystrybucji, ze względu na intensywny wzrost oddziaływania wodoru na stal, z której budowana była dotychczasowa sieć dystrybucji metanu, oraz elementy metalowe silników. Mieszanina wodoru z metanem nie staje się silnie wybuchowa, dopóki nie przekroczy 50% zawartości wodoru [46].

Należy tu zwrócić uwagę, że wraz ze wzrostem zawartości wodoru w mieszance spada jej gęstość energetyczna, co wynika ze znacząco niższej gęstości wodoru, której stosunek do gęstości metanu jest kilkakrotnie niższy niż stosunek wartości opałowej wodoru do wartości opałowej metanu. Mimo to zużycie paliwa przy nie pogorszeniu osiągnięć silnika w pewnym przedziale stężenia wodoru w gazie jest niższe niż dla gazu zawierającego prawie sam metan bądź dużą ilość wodoru. Świadczy to bardzo dobrze o tym, jak takie paliwo wpływa na efektywność wykorzystania energii. Znalazienie optymalnego składu paliwa gazowego dla różnych instalacji paliwowych, silników oraz strategii zasilania jest ważne dla dalszego rozwoju tego paliwa.

Łatwo policzyć, że w paliwie HCNG i „Hythan” na dwa atomy węgla przypada dziewięć atomów wodoru. Badania nad paliwami tego typu pozwalają więc zwiększać wiedzę na temat procesów spalania wodoru. Dodawanie wodoru do metanu znacząco zmniejsza ilość toksycznych składników spalin (mniej atomów węgla bierze udział w reakcjach). Generalnie gaz ziemny wzbogacony w wodór wykorzystywany w silniku tłokowym charakteryzuje się zmniejszeniem zużycia paliwa, mocy maksymalnej silnika, a także mniejszą emisją CO, CO₂ i NO_x. Według niektórych badaczy bez większych zmian pozostaje ilość emitowanych związków HC [47].

5. Wpływ zastosowania instalacji CNG/ON na emisję

Spośród wymienionych paliw najbardziej rozsądne przy obecnych dyspozycjach prawnych UE [48] jest wykorzystanie gazu ziemnego – w postaci CNG – oraz wodoru. Dziś znacznie bardziej dostępny jest gaz ziemny, którego zastosowanie w postaci sprężonej — CNG — umożliwia dodatkowe mieszanie go z wodorem, co niesie ze sobą dodatkowe korzyści, z których najważniejszą jest ograniczenie emisji dwutlenku węgla, co jest kluczowe w spełnianiu nowo przyjmowanych norm emisji spalin. Dlatego właśnie paliwo CNG może okazać się najlepszym sposobem na zasilanie silników RCCI [49].

CNG jest złożony w większości z metanu, którego zawartość jest unormowana określonymi przepisami i opisana jako dodatkowy parametr dystrybuowanego paliwa. Gaz ziemny ma najwyższą po wodorze wartość wynoszącą maksymalnie do 50 MJ/kg w przypadku czystego metanu i około 48 MJ/kg w przypadku niewzbogacanych sztucznie w metan najbogatszych w ten składnik gazów ziemnych. W przypadku wysokometanowego gazu ziemnego (ponad 82% zawartości metanu) jego zapotrzebowanie na powietrze przy spalaniu stechiometrycznym wynosi 7,8 m³ powietrza na 1 m³ spalanego gazu. W przypadku zastosowania czystego metanu zapotrzebowanie na powietrze wynosi już 9,52 m³ powietrza na 1 m³ metanu. Przedstawienie jednej dokładnej charakterystyki paliwa gazowego, jakim jest gaz ziemny, nie jest możliwe ze względu na bardzo zróżnicowany skład chemiczny gazów występujących na rynku. Te różnice próbowano pokazać w artykule [49], w którym charakteryzowane były różne źródła gazu ziemnego dostarczanego na polski rynek. Należy mieć na uwadze, że zawartość metanu w czystym gazie ziemnym może zawierać się w przedziale od 39 do 99% [50], a składnikami mieszaniny tworzącej gaz ziemny mogą w dużym zakresie być gazy takie jak etan, propan czy butan. Trzeba o tym pamiętać, odwołując się do przeprowadzonych badań, i odnosić się do źródła, z jakiego pochodziło wykorzystywane paliwo.

Do głównych zalet gazu ziemnego jako paliwa należą:

- wysoka wartość opałowa i liczba oktanowa;
- dobre właściwości zapłonowe;
- szeroki zakres zapalności i dobra dyfuzyjność;
- niewielka zawartość szkodliwych substancji w spalinach;
- cichsza praca silnika spalinowego;
- wysoka temperatura samozapłonu;
- jego pozyskanie może być niezależne od wydobycia ropy naftowej;
- ekologiczny skład spalin powstałych w wyniku jego spalania, ich głównym składnikiem jest woda.

Na potrzeby wykorzystania CNG w silnikach spalinowych gaz ziemny jest sprężany do ciśnienia 20-25 MPa. Jest to wartość nie mniej niż 10-krotnie większa od wartości, w jakiej przechowywany jest LPG. Spośród paliw gazowych wykorzystywanych

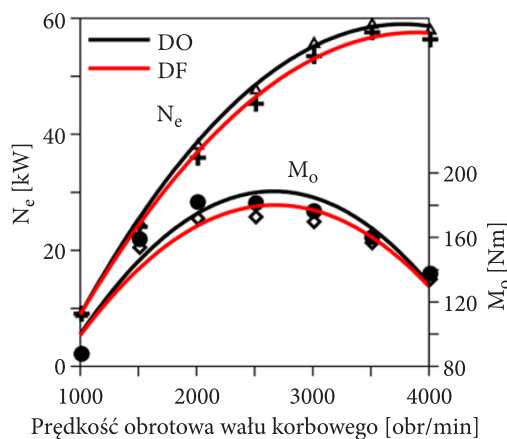
w motoryzacji pod wyższym ciśnieniem przechowywany jest wodór, gdzie wytrzymałość ciśnieniowa zbiorników potrafi dochodzić do 700 MPa [47].

Zasilając silnik dwoma rodzajami paliwa, bardzo istotny jest stosunek jednego paliwa do drugiego. Zmniejszony udział oleju napędowego na korzyść CNG pozwala na obniżenie emisji cząstek stałych, sadzy oraz zmniejszenie zadymienia spalin. Głównym powodem emisji tych składników spalin jest duży udział oleju napędowego w spalanych paliwach, dlatego od proporcji energetycznych użytych w silnikach RCCI paliw zależy także emisja szkodliwych składników spalin.

Wysoki udział energetyczny paliwa gazowego pozwala na obniżanie emisji wymienionych tu szkodliwych składników spalin. Wraz ze wzrostem obciążenia silnika rośnie udział ON w proporcji wykorzystywanych paliw. Doprowadza to do nieznacznego wzrostu emisji szkodliwych składników spalin, ale ma również wpływ na emisję dwutlenku węgla, którego w procesie spalania ON powstaje więcej niż w procesie spalania CNG [51].

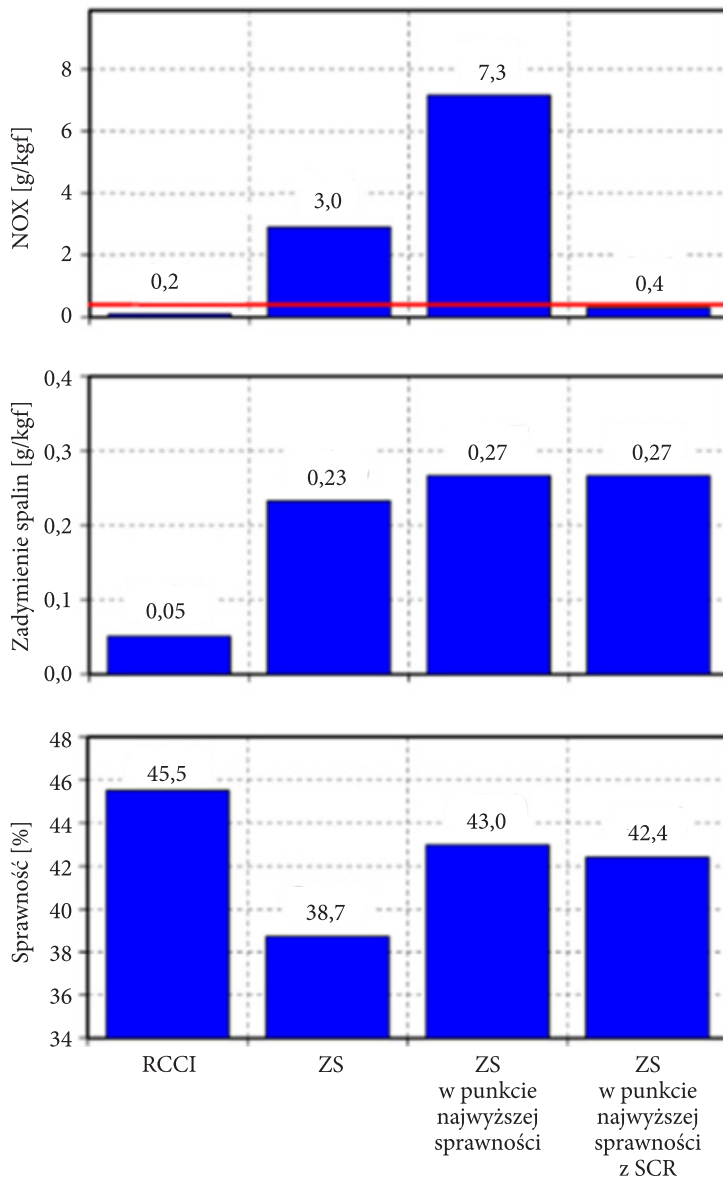
5.1. Przykładowe badania silnika dwupaliwowego spalającego niehomogeniczną mieszankę paliwowo-powietrzną

Wysoki udział ON nie jest pożądany ze względu na emisję gazów cieplarnianych (GHG — *Greenhouse Gases*) oraz szkodliwych składników spalin, ale zbyt wysoki udział CNG doprowadza do obniżenia maksymalnych osiągnięć parametrów roboczych silnika. Widać to na wykresie obrazującym parametry robocze silnika zasilanego oboma paliwami przy jego maksymalnym obciążeniu w porównaniu do silnika pracującego jedynie na ON.



Rys. 13. Wykres przedstawiający parametry robocze silnika o ZS zasilanego przez ON (kolor czarny) oraz dwupaliwowo przez CNG i ON (kolor czerwony). Na wykresie widać maksymalną moc oraz moment obrotowy badanego silnika

Źródło: [52]



Rys. 14. Wykresy przedstawiające zadymienie spalin, stężenie NO_x oraz sprawność ogólną silnika o ZS zasilanego w trybie RCCI paliwami CNG i ON oraz ON w klasycznym, jednopaliwowym trybie pracy silnika o ZS

Źródło: [53]

Jak widać, przebieg charakterystyki zewnętrznej silnika zasilanego dwupaliwowo różni się od charakterystyki silnika zasilanego jedynie ON, ale nieznacznie i nie ma zasadniczego wpływu na możliwości eksploatacyjne silnika. Zasilanie silnika spalinowego mieszanką CNG/ON ma istotny wpływ na emisję szkodliwych składników spalin — zarówno w sytuacji, gdy ulega zapłonowi RCCI, jak i przy klasycznym, niehomogenicznym zapłonie mieszanki. W ramach tego podrozdziału przedstawione zostaną wyniki badań przeprowadzonych na silniku 1.3 Multijet Euro 5 w pracy [52].

Poza tym na rysunku 14 pokazane zostały zmiany sprawności indykowanej silnika, stężenie NO_x oraz zadymienie spalin zobrazowane na wykresie opracowanym w [53].

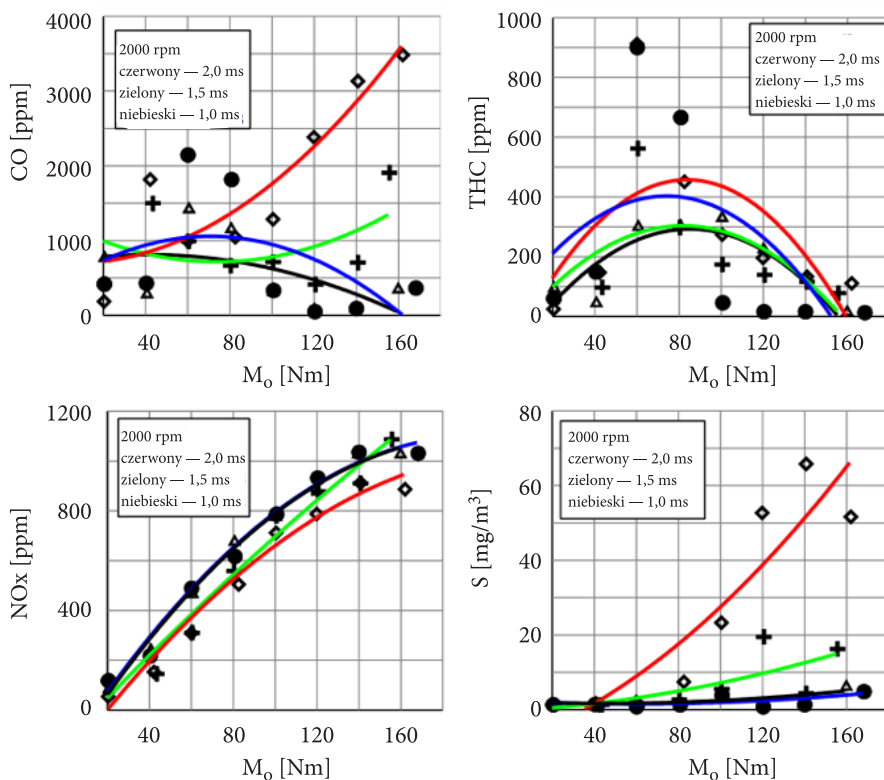
Widoczne na wykresach przedstawionych na rysunku 14 wartości pokazują skalę zmian zachodzących w silniku o ZS, w którym zastosowano instalację dwupaliwową, a zapłon mieszanki paliwowo-powietrznej można przeprowadzić w trybie RCCI. Stężenie tlenków azotu może być zmniejszone do wartości mniejszych niż emitowane przez silnik fabrycznie wyposażony w reaktor selektywnej redukcji katalitycznej spalin, a maksymalna osiągnięta przez ten silnik sprawność ogólna jest o ponad 3% większa przy zasilaniu dwupaliwowym. Należy mieć to na uwadze i przytaczać jako główny powód wdrażania instalacji dwupaliwowej typu CNG/ON do badań i powszechnego stosowania.

Zastosowanie paliwa CNG w silniku spalinowym ma znaczący wpływ na jego parametry ekologiczne. Wykorzystanie CNG zarówno jako paliwa samodzielnego, jak i dodatkowego w silnikach o ZS pozwala na znaczące zmniejszenie emisji szkodliwych składników spalin (wszystkich zmierzonych w procedurach testowych emisji silników spalinowych) oraz gazu cieplarnianego, jakim jest dwutlenek węgla. Problem może stanowić jednak zwiększona emisja metanu, która może ulec zwiększeniu, kiedy silnik jest nierozgrzany i dochodzi do nieskutecznego zapłonu mieszanki paliwowo-powietrznej oraz w przypadku gdy konstrukcja komory spalania jest niedostosowana do wykorzystania paliwa gazowego. Tego typu problem może być w silnikach dwupaliwowych rozwiązany poprzez minimalizację użycia CNG podczas rozruchu zimnego silnika.

W większości przypadków przytaczana i opisana już w poprzednich rozdziałach literatura przedstawiała w sposób opisowy korzyści ekologiczne, jakie daje stosowanie paliwa CNG wraz z ON i nie jest to szerzej zbadana problematyka. Podstawową informacją powszechnie opisywaną w literaturze jest spełnianie przez silniki zasilane paliwem CNG normy Euro 6, nawet jeśli silnik, w którym zastosowane było to paliwo, nie był fabrycznie przystosowany do spełnienia tak wysokiej normy emisji. Równie istotne co zmniejszenie emisji szkodliwych składników spalin jest zmniejszenie emisji CO_2 . Można je wykazać już na podstawie porównania samych kart paliw, w których zawartość cząsteczek węgla znacząco się różni. W przypadku spalania oleju napędowego do atmosfery emitowane jest 74,1 kg CO_2 na każdy

wytworzony GJ energii, natomiast w przypadku CNG jest to odpowiednio 55,43 kg CO₂ z jednego wytworzonego gigadżula energii cieplnej [54]. Analiza własna autora, bazująca na wcześniej wymienionych danych, wykazała większy wpływ wysokiego udziału CNG w mieszaninie paliw CNG/ON na efektywne obniżanie emisji CO₂ niż na spadek sumaryczny ceny obu paliw — na dzień 15.03.2021.

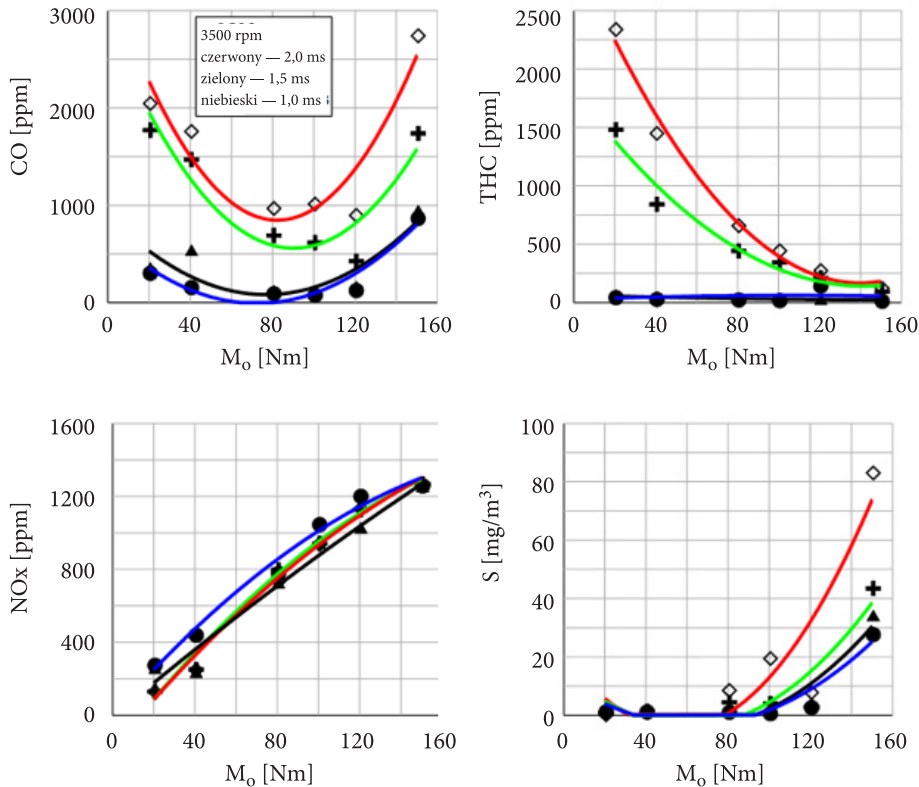
Stężenie poszczególnych szkodliwych składników spalin podczas zasilania dwupaliwowego silnika pracującego przy częściowym obciążeniu i stałej prędkości obrotowej wynoszącej 2000 obr/min można zobaczyć na rysunku 15.



Rys. 15. Wykresy stężenia poszczególnych składników spalin z silnika 1,3 Multijet zasilanego jednocześnie paliwami CNG i ON przy różnych czasach otwarcia wtryskiwacza gazu, przy stałej prędkości obrotowej wału korbowego silnika na poziomie 2000 obr/min i zmiennym obciążeniu silnika
Źródło: [52]

Jak widać na powyższych wykresach, zwiększenie udziału CNG realizowanego przez wydłużenie czasu otwarcia wtryskiwacza skutkuje zwiększeniem stężenia CO, HC oraz zadymienia spalin, natomiast w przypadku tlenków azotu dochodzi do nieznacznego spadku ich stężenia dla całego zakresu obciążeń silnika.

Taki efekt dodania CNG jako dodatkowego paliwa (w tych pracach badawczych nie przekraczano udziału energetycznego CNG na poziomie kilkunastu procent) może wynikać z nieoptymalizowania pracy silnika na dwóch paliwach i niedostosowania instalacji zasilającej do wykorzystanego silnika. Dopracowanie możliwości skutecznej współpracy dwóch instalacji paliwowych wymaga dużo pracy i dokładności, a autorzy przyznają się do nieingerowania w fabryczne ustawienia sterowników.

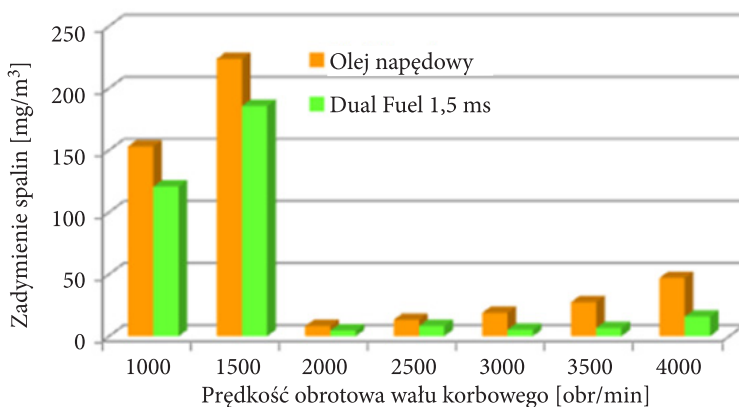


Rys. 16. Wykresy stężenia poszczególnych składników spalin z silnika 1,3 Multijet zasilanego jednocześnie paliwami CNG i ON przy różnych czasach otwarcia wtryskiwaczy gazu, przy stałej prędkości obrotowej wału korbowego silnika na poziomie 3500 obr/min i zmiennym obciążeniu silnika

Źródło: [52]

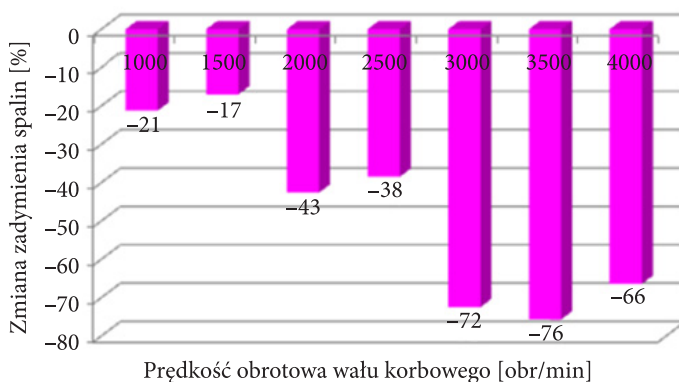
Kolejna seria wykresów obrazujących stężenie szkodliwych składników spalin przy częściowym obciążeniu, ale tym razem przy 3500 obrotach wału korbowego silnika na minutę, również pokazuje wzrost stężenia tlenku węgla, niespalonych węglowodorów oraz zadymienia spalin (przy większych czasach otwarcia wtryskiwaczy gazu) w całym zakresie obciążeń silnika. Dodatkowo wykazany został niewielki wzrost stężenia tlenków azotu.

Badacze [52] zwrócili jednak uwagę na zauważalne obniżenie zadymienia spalin przy pełnym obciążeniu silnika i przy krótkim czasie otwarcia wtryskiwaczy CNG. Sprawdzili tym samym dokładniej możliwość ograniczenia dymienia i emisji cząstek stałych przez silnik bez ingerencji w zaawansowane sposoby sterowania instalacją zasilającą. Poniższe wykresy przedstawiają zadymienie spalin dla różnych obrotów silnika przy jego pełnym obciążeniu (rys. 17) oraz zmiany, jakie udaje się osiągnąć względem klasycznego zasilania jedynie olejem napędowym (rys. 18).



Rys. 17. Wykres przedstawiający zadymienie spalin dla różnych prędkości wału korbowego silnika przy dodatku CNG w silniku Fiat 1.3 MultiJet przy maksymalnym obciążeniu i stałym czasie otwarcia wtryskiwaczy gazu wynoszącym 1,5 ms

Źródło: [52]



Rys. 18. Wykres pokazujący wpływ dodatku gazu na zmiany zadymienia spalin silnika Fiat 1.3 MultiJet przy maksymalnym obciążeniu i stałym czasie otwarcia wtryskiwaczy gazu wynoszącym 1,5 ms

Źródło: [52]

Zmiany zadymienia i przedstawionych stężeń szkodliwych składników spalin, jakie udało się osiągnąć badaczom, przemawiają na korzyść zastosowania instalacji dwupaliwowej w testowanym silniku. Pewne jest jednak, że konieczne są dalsze badania w tym temacie, ze względu na ewolucję zarówno technologii stosowanej w silnikach i ich osprzęcie, który może mieć istotny wpływ na pracę silnika i instalacji gazowej (kształt układu wylotowego i dolotowego, miejsce podania gazu, jego filtracja, filtracja powietrza, kształt komory spalania, zastosowane wtryskiwacze [55]), jak i przepisów dotyczących dopuszczalnych limitów emisji, do puli których dołączono emisję metanu oraz amoniaku, co nie było wymagane jeszcze w 2021 roku [49].

5.2. Przykładowe badania silników dwupaliwowych RCCI

Silniki RCCI dopiero zaczynają się pojawiać w komercyjnym użyciu. W transporcie czy przemyśle są jednak obecnie wykorzystywane incydentalnie, a wszystkie znane autorowi zastosowania komercyjne obejmują silniki wolnoobrotowe stosowane do napędu okrętów czy generowania energii elektrycznej. Pierwszym przykładem przerobienia istniejącego silnika stosowanego do napędu statku chwali się w swoich opracowaniach i cytowanych artykułach firma Arena Red [56], przedstawiając informacje o wykorzystaniu opracowanej przez nich technologii w silniku okrętowym i spełnienia przez niego normy emisji spalin na poziomie Stage 5 [57]. Zastosowana technologia przeróbki istniejących silników okrętowych miała więc swój debiut w roku 2020, mimo że sama koncepcja tego typu silnika jest o wiele starsza i prace nad nim są prowadzone w wielu laboratoriach.

Ze względu na taki kierunek rozwoju tych silników i zasadę mówiącą, że rozwój techniki zaczyna się w przemyśle, aby później znaleźć swoje zastosowanie w motoryzacji, autor przedstawił już w opracowaniach problemy związane z zasilaniem [58] i konstrukcją tego typu silników [59]. W marynistyce możliwości ograniczenia zużycia paliwa ze względu na osiągnięcie sprawności silników, którą trudno już podnieść w zastosowaniach mobilnych [60], obejmują przede wszystkim ograniczanie prędkości, z jaką porusza się statek [61]. Dodatkowym utrudnieniem w ograniczeniu kosztów przemieszczania się statków jest zmiana rodzaju paliwa, z jakiego od 2020 roku muszą zacząć korzystać statki, w 2020 roku zmianie uległy bowiem globalne przepisy dotyczące emisji siarki. Mają one olbrzymi wpływ na transport morski — wskazano [59], że ponad 70 000 statków [62, 63] musi przejść z ciężkiego oleju opałowego (HFO — *Heavy Fuel Oil*) na specjalne paliwo morskie, nazywane morskim olejem gazowym (MGO — *Marine Gas Oil*), zawierające niewielkie ilości siarki (0,1/0,5%), lub zainstalować system oczyszczania spalin, w tym system SCR — Selektywnej Redukcji Katalitycznej. Aby uniknąć kosztów związanych z wykorzystaniem zaawansowanych systemów oczyszczania spalin, powszechne w marynistyce jest zasilanie silników gazem ziemnym, którego stosowanie w silnikach RCCI jest w stanie dodatkowo zwiększyć ich sprawność ogólną [64].

Analizując dostępne publikacje, można znaleźć modele oraz symulacje silników RCCI w ramach modeli oznaczanych symboliką XCCI [65]. W obrębie takich badań sprawdzane są możliwości, jakie dawałoby wykorzystanie technologii RCCI w istniejących silnikach oraz optymalizowanie warunków pracy poszczególnych systemów silnika takich jak system recyrkulacji spalin [66], rozrządu [67], zasilania [64], kształt komory spalania [68] czy stopień sprężania silnika [69], a także optymalizacji składu samego paliwa niskoreaktywnego [70]. Nie ma jednak wielu empirycznych badań eksperymentalnych przedstawiających wyniki badań nad silnikami RCCI w publikacjach naukowych. Baza artykułów opisujących szczegółowo wyniki wykorzystania silników o ZS przerobionych na system zasilania typu *diesel-gas* jest znacznie większa, co pokazano w poprzednim podpunkcie czy też innym cyklu publikacyjnym autora, przedstawiającym osiągi silnika typu *heavy duty* wykorzystującego dwupaliwowy system zasilania [71]. Zaprezentowanie tutaj publikacji naukowych przedstawiających wyniki kompleksowych badań wolnoobrotowego silnika RCCI jest obecnie niemożliwe mimo istnienia już pracujących egzemplarzy takich silników, można jednak przytoczyć raporty z pracy tego typu silników, np. raport [72].

Dokument ten zawiera ocenę wyników badań pilotażowych tankowca śródlądowego „Argonon” obsługiwanego przez spółkę holdingową Deen Shipping. Statek wyposażony był w dwa silniki Caterpillar 3512C. Okres testów pilotażowych trwał od stycznia do czerwca 2020 roku. Raport przedstawia wyniki stacjonarnych badań hamownianych oraz badania pokładowe podczas normalnej eksploatacji tankowca. Przeróbka silników została wykonana ze względu na normy emisji Stage V, które zaczynały obowiązywać w branży marynistycznej w okresie wprowadzania modyfikacji tych silników. Podsumowanie wyników porównawczych emisji silnika pracującego w trybie RCCI oraz jedynie na ON przedstawia tabela 1.

Przedstawione wyniki pokazują wyraźnie możliwość spełnienia przez silnik RCCI norm emisji takich jak norma emisji Stage-V, która zastąpiła przestarzałą już normę CCNR II wymagań emisji dla statków poruszających się w przestrzeni śródlądowej, zgodnie z którą ten silnik RCCI nie spełniłby normy emisji THC, co jednoznacznie wskazuje na emisję niespalonych węglowodorów zawartych w paliwie. Świadczy to o opisywanych już w wielu publikacjach problemach związanych z niedostosowaniem kształtu komory spalania do spalania paliwa niskoreaktywnego, co dotyczy wszystkich silników zasilanych podstawowo przez ON, a dostosowanych do zasilania dwupaliwowego w postprodukcyjnym etapie ich eksploatacji.

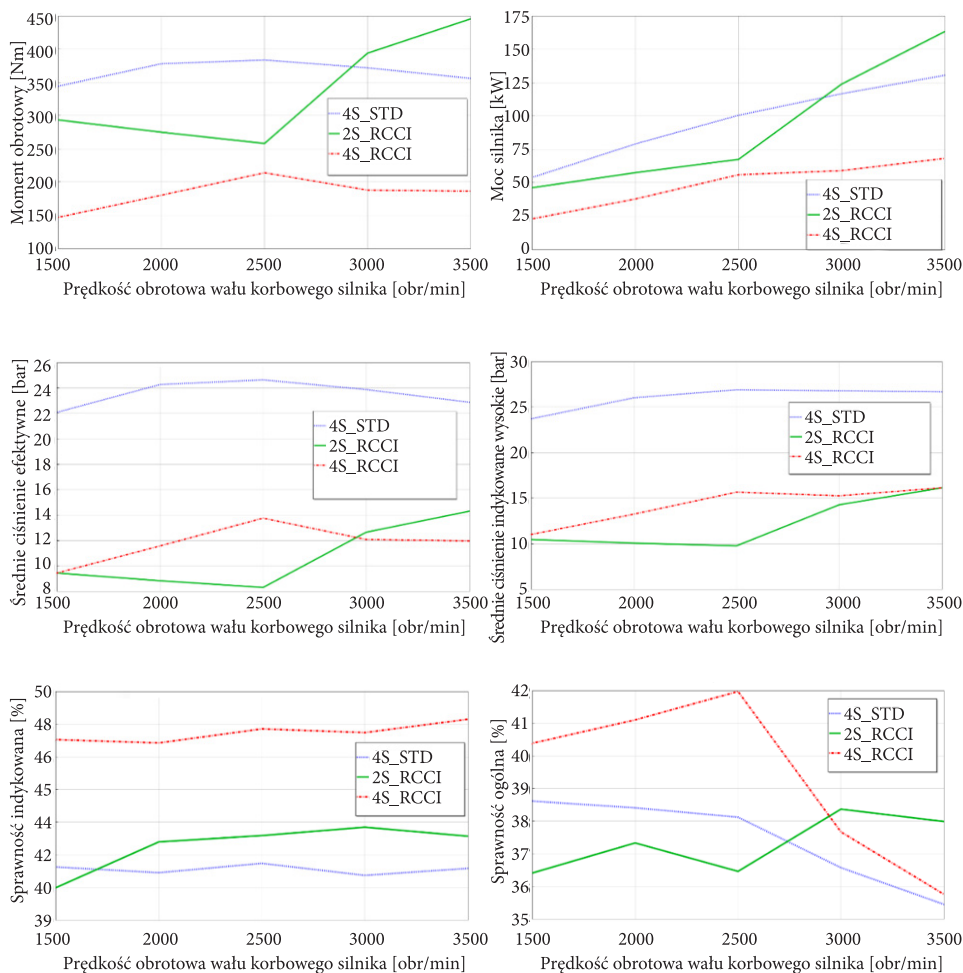
TABELA 1

Wyniki badań porównawczych emisji silnika Caterpillar 3512C pracującego na ON i CNG w trybie RCCI, wraz z wymaganiami emisji stawianymi przez normę Stage V

część mocy maksymalnej	wsp. wagowy testu	obroty wału korbowego	moc	THC (CH ₄)	CO	NO _x	PM	PN
%	%	obr/min	kW	g/kWh				
25	15	1007	261	5,60	0,0	1,0	0,044	< 1
50	15	1280	550	1,60	0,0	0,5	0,006	< 1
75	50	1459	826	5,30	0,0	0,3	0,007	< 1
100	20	1575	1020	5,50	0,0	0,2	0,010	< 1
-	100	-	-	4,83	0,0	0,42	0,013	< 1
Wyniki testów eksploatacyjnych pokładowych				(4,83)	0,0	0,42	0,01	-
Wymagania normy emisji CCNR II				0,19/(-)*	3,5	7,1	0,200	-
Wymagania normy emisji Stage-V				6,19	3,5	1,8	0,015	1

Mimo tego problemu, który przypuszczalnie można rozwiązać poprzez modyfikację konstrukcji komory spalania silnika, emisje pozostałych mierzonych szkodliwych składników spalin były o ponad rząd wielkości niższe niż dopuszczalne przez normy Stage-V bądź CCNR II, a w wymaganiach normy CCNR II wartość 0,19 g/kWh emisji THC jest wartością, która została przyjęta w cytowanym raporcie jako aktualizowana w roku 2020, gdzie oryginalnie wartość ta dla tej normy powinna wynosić 1 g/kWh, co nie zmienia jednak przekroczenia dopuszczalnej wartości emisji tego składnika przez badany silnik [73].

Tak kompleksowo przedstawionych badań wolnoobrotowych silników RCCI w dostępnej literaturze jest bardzo mało, istnieją jednak opracowania przedstawiające próby zastosowania silników RCCI w transporcie lekkim i chociaż są bardziej aktualne, to jednocześnie mniej zaawansowane, często przedstawiają jedynie modele, koncepcje lub silniki uważane dziś za bardzo niekonwencjonalne, takie jak np. silniki dwusuwowe, których zamodelowane osiągi porównano z modelowanymi osiągnięciami silników czterosuwowych pracujących w trybie RCCI [69]. W tej samej pracy badacze wykonali badania empiryczne oparte na przerobieniu pojedynczego cylindra w czterocyndrowym silniku spalinowym, sprawdzając zmiany, jakie udało się w ten sposób osiągnąć. Przedstawili jednocześnie większą liczbę interesujących wyników dotyczących osiągnięć szybkoobrotowych silników czterosuwowych i dwusuwowych pracujących w trybie RCCI (rys. 19).

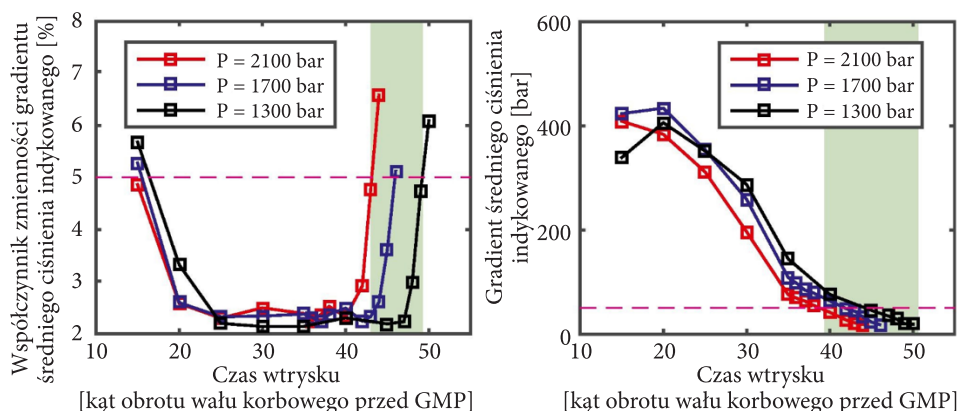


Rys. 19. Wykresy przedstawiające zależność między prędkością obrotową silnika przy jego pełnym obciążeniu a generowanymi przez niego: momentem obrotowym, mocą, średnim ciśnieniem efektywnym, średnim ciśnieniem indykowanym występującym w cyklu pracy i sprężania silnika (części ciśnienia wysokiego), sprawności indykowanej i sprawności ogólnej silnika

Źródło: [65]

Jak widać na rysunku 19, zarówno czterosuwowy, jak i dwusuwowy silnik RCCI wykazuje osiągi rozbieżne ze standardowym silnikiem o ZS. Zmiany widoczne na wykresach pokazują także znaczące rozbieżności pomiędzy poszczególnymi punktami, odpowiadającymi danej prędkości obrotowej wału korbowego silnika.

Sama koncepcja stosowania różnych rodzajów silników RCCI nie obejmuje całości problemu, z jakim muszą się zmierzyć konstruktorzy i badacze takich silników. Olbrzymi wpływ ma tutaj bowiem rodzaj zastosowanych w nim paliw. Poza gazem ziemnym istnieje bardzo dużo innych paliw wysokooktanowych, które mogą sprawdzić się w tego typu silnikach. Badacze w [74] pochyliли się nad problemem rodzaju benzyny, jaka może być wykorzystywana w silniku RCCI, i wpływu jej ilości na osiągi silnika, natomiast badacze w [75] sprawdzili dodatkowo, jak jej ilość przy współspalaniu z alternatywnym biopaliwem, jakim jest *Thevetia Peruviana*, może wpłynąć na osiągi silnika RCCI. Równie istotne są możliwości, jakie daje poprawne sterowanie ilością oraz momentem wtrysku każdego z paliw. Nad tym problemem w wielu badaniach bardzo wnikliwie skupia się profesor Rolf Reitz, m.in. w [76], gdzie pochyła się nad systemem sterowania silnikiem, lub w innych pracach, gdzie szczegółowo opisuje problemy, z jakimi muszą się zmagać konstruktorzy tych silników, np. w [77], gdzie szczegółowo została także opisana problematyka kształtu komory spalania takiego typu silnika. W wielu badaniach porównywane są osiągi nowoczesnych odmian silników HCCI, jakimi są silniki PCCI i RCCI [78]. W pracy [79] badacze skupili się natomiast na określeniu granic osiągow w tego typu silnikach, co jest istotne w ocenie możliwych zastosowań i rentowności wykorzystania takich silników. Jednak w przypadku silników będących na początkowym etapie rozwoju nadal bardzo istotne są badania podstawowe, takie jak np. zaprezentowane w artykule [80] — obejmujące wpływ czasu i momentu wtrysku paliwa wysokoreaktywnego na przebieg procesu spalania. Istotę problemu rozważanego w artykule obrazują wykresy przedstawione na rysunku 20 oraz 21.



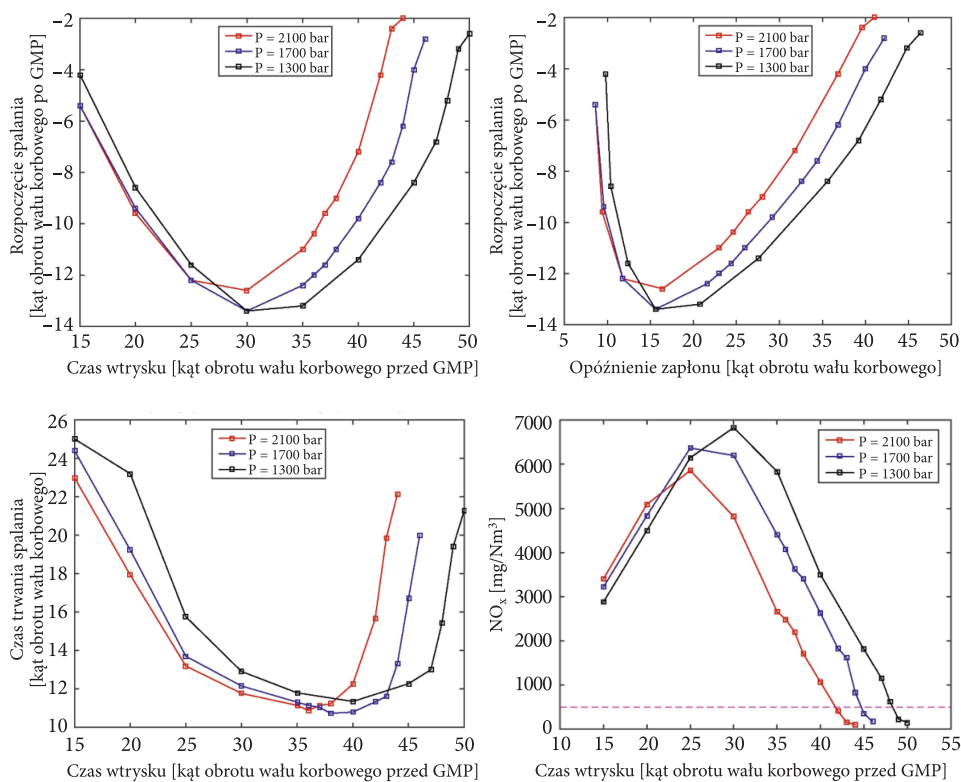
Rys. 20. Wykresy przedstawiające zależność wartości gradientu średniego ciśnienia indykowanego (po prawej) oraz współczynnika zmienności tego parametru (po lewej) od czasu wtrysku paliwa wysokoreaktywnego

Źródło: [79]

Badania nad istotą problemu pozwoliły twórcom artykułu [79] na wyciągnięcie wielu wniosków opartych na interpretacji otrzymanych wyników. Wyniki te obejmowały pewien obszar pracy silnika, ale jednoznacznie wykazały znaczny wpływ kąta wyprzedzenia i czasu wtrysku na przebieg procesu spalania i samozapłonu. Badania nad tym problemem wykazały istnienie niewielkiego zakresu optymalnych wartości kąta wyprzedzenia wtrysku i czasu otwarcia wtryskiwacza, w których udaje się osiągać pożądane wartości istotnych parametrów pracy silnika, a dla części z nich wartości te nie miały wzajemnego pokrycia. Badacze dowiedli w swojej pracy, że dystrybucja paliwa wysokoreaktywnego w komorze spalania ma duży wpływ nie tylko na sam proces jego spalania, lecz także na reaktywność powstałej mieszanki obu paliw z powietrzem, a co za tym idzie również na proces samozapłonu oraz spalanie paliwa niskoreaktywnego. Wyznaczony przez nich optymalny zakres wartości czasu otwarcia wtryskiwacza (czasu wtrysku paliwa wysokoreaktywnego) pozwalający na osiągnięcie niskich wartości gradientu średniego ciśnienia indykowanego, co wiąże się także z bardziej łagodnym, stabilnym i dłuższym przebiegiem procesu spalania, pozwala również na osiągnięcie najniższych wartości emisji NO_x , co widać na wykresach przedstawionych na rysunku 21.

Widoczna zależność czasu wtrysku i czasu trwania spalania oraz rozpoczęcia spalania ma swoje odzwierciedlenie również na wykresie obrazującym zależność momentu rozpoczęcia procesu spalania od wartości opóźnienia zapłonu, która jest nieliniowa i ma zauważalnie mniejszy wpływ na moment rozpoczęcia spalania, gdy opóźnienie zapłonu wynosi około $15\text{-}20^\circ$, co autorzy wyjaśniają stopniem wymieszania obu paliw z powietrzem, a osiągnięcie przebiegu spalania odpowiadającego wymaganiom silnika HCCI lub RCCI wymaga właśnie dobrego wymieszania obu paliw przed rozpoczęciem się procesu spalania. Autorzy wskazują jednak również na wady, jakie niesie ze sobą osiągnięcie większych wartości opóźnienia zapłonu, oznacza to bowiem, że większość paliwa wysokoreaktywnego tworzy mieszanekę ubogą, a w komorze na początku spalania nie bierze w nim udziału większość paliwa wysokoreaktywnego które nie osiąga warunków stechiometrycznych. Im wyższe ciśnienie wtrysku, tym uboższy rozkład paliwa wysokoreaktywnego osiągnano, co skutkowało wydłużaniem się opóźnienia zapłonu.

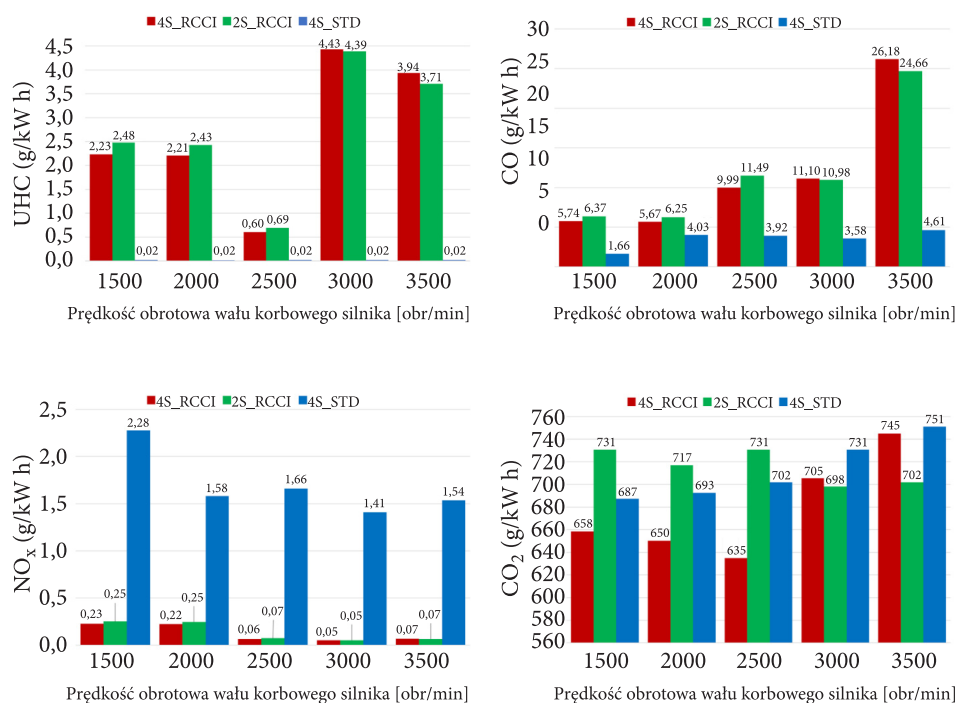
W przedstawionych wynikach jednym z ważniejszych parametrów jest wpływ parametrów wtrysku paliwa wysokoreaktywnego na emisję NO_x , gdzie wysoka wartość ciśnienia wtrysku wyraźnie obniża emisję, pozwalając także na przyspieszenie rozpoczęcia procesu spalania i skrócenie niezbędnego czasu otwarcia wtryskiwacza potrzebnego do osiągnięcia długiego czasu spalania paliwa.



Rys. 21. Wykresy przedstawiające zależność rozpoczęcia procesu spalania od czasu wtrysku paliwa wysokoreaktywnego, opóźnienia zapłonu wtrysniętego paliwa w przypadku dwóch górnych wykresów, a także zależność czasu trwania spalania i emisji NO_x w zależności od czasu wtrysku paliwa wysokoreaktywnego — wykresy dolne.

Źródło: [79]

Wszystkie prace badawcze wskazują, że główny problem może stanowić właśnie możliwość dostosowania silnika spalinowego do norm i przepisów, które musi spełniać. Wykresy przedstawione na rysunku 22 pochodzące z przytoczonej już wcześniej pracy [65] także obrazują różnice w poziomie emisji NO_x — zbyt wysoka emisja prowadzi do największego zwiększenia kosztów dalszego wykorzystywania silników spalinowych w transporcie i przemyśle.



Rys. 22. Wykresy przedstawiające emisję niespalonych węglowodorów (UHC – *Unburned Hydrocarbons*), tlenku węgla (CO), tlenków azotu (NO_x) i dwutlenku węgla (CO_2) przy pełnym obciążeniu silnika i różnych prędkościach obrotowych dla trzech modeli silników, w których kolorem czerwonym oznaczono emisję dla czterosuwowego silnika RCCI, kolorem zielonym dwusuwowego silnika RCCI, a niebieskim standardowego czterosuwowego silnika o ZS zasilanego ON

Źródło: [65]

Powyższe badania stanowią źródło informacji o tym, jak mogą wyglądać faktyczne osiągi w pierwszych szerzej stosowanych komercyjnych silnikach wykorzystujących opisywaną tu technologię. Badania te, pochodzące z roku 2022, warto potraktować jako wstęp do tego, jaki będzie w najbliższej przyszłości rozwój silników spalinowych opartych na spalaniu homogenicznej mieszanki paliwowo-powietrznej, i spodziewać się większej liczby prekursorskich publikacji w tej tematyce. Można bowiem przytoczyć wiele przykładów [81] zastosowań stacjonarnych silników dwupaliwowych, których praca z użyciem samozapłonu RCCI pozwoliłaby na znaczną poprawę osiągnięć i rentowności instalacji, w których pracują.

6. Podsumowanie

Zasilanie dwupaliwowe silników spalinowych otwiera nowe możliwości dla ich dalszego rozwoju, umożliwia bowiem spełnienie pewnych norm ograniczających emisję gazów cieplarnianych bądź szkodliwych składników spalin dotyczących silników o ZS, które w wielu konstrukcjach nie mogą już być spełnione przy klasycznym jednopaliwowym zasilaniu olejem napędowym. W wielu pojazdach samochodowych napędzanych silnikami spalinowymi o ZS takie zmiany systemu zasilania nie są łatwe do wprowadzenia na masową skalę, jednak istniejące silniki o ZS służące do wytwarzania energii elektrycznej, napędu statków czy różnego rodzaju urządzeń w fabrykach bądź maszynowniach mogą być konwertowane na zasilanie dwupaliwowe łatwiej, powszechniej i z większą korzyścią zarówno dla środowiska naturalnego, jak i podmiotów wykorzystujących te silniki. Przemysłowe silniki wolnoobrotowe mają bowiem większy potencjał do operatywnego wykorzystania konwersji na zasilanie dwupaliwowe i pozwalają na szybki zwrot kosztów poniesionej inwestycji.

Silniki mające zastosowanie w elektrowniach, pojazdach ciężkich, statkach czy fabrykach charakteryzują się wykorzystywaniem ich w pracy ciągłej, co wiąże się z wysoką konsumpcją paliwa, a ich przerobienie na zasilanie dwupaliwowe odegra większą rolę w ograniczeniu emisji gazów cieplarnianych niż adaptacja kilku mniejszych silników napędzających samochody osobowe czy nawet ciężarowe.

Każdy taki silnik jest także łatwiejszy w samej adaptacji do jednoczesnej pracy na dwóch paliwach ze względu na jego konstrukcję oraz dostępne możliwości konwersji tego typu silników, które wynikają bezpośrednio z trendów panujących wśród producentów, coraz częściej tworzących silniki już fabrycznie pracujące na paliwach gazowych. Producenci zdają sobie bowiem sprawę z konieczności wprowadzenia niezbędnych zmian, aby dostosować się do nowych norm emisji spalin.

Ze względu na to i na przedstawiane tu argumenty zalecane są dalsze prace i rozważania na ten temat. Obecnie nie ma wielu badań dwupaliwowych silników wolnoobrotowych, ale ich wpływ na dalszy rozwój silników spalinowych przy uwzględnieniu aktualnych zmian legislacyjnych może być kluczowy.

Źródło finansowania pracy — działalność statutowa Wojskowej Akademii Technicznej.

Artykuł wpłynął do redakcji 29.12.2021. Zatwierdzono do publikacji 20.07.2022.

Grzegorz Szamrej <https://orcid.org/0000-0001-8912-6221>

LITERATURA

- [1] *EU proposes radical „Fit for 55” climate action plan*, 14.07.2021, strona DieselNet, <https://dieselnet.com/news/2021/07eu.php> [dostęp: 19.12.2021].
- [2] SHALK S., *Progress Report for Fuels for Advanced CIDI Engines and Fuel Cells*, U.S. Department of Energy Office of Transportation Technologies, 1000 Independence Avenue, S.W. Washington, 2000.
- [3] DAHODWALA M., JOSHI S., KOEHLER E., FRANKE M., TOMAZIC D., NABER Y., *Investigation of Diesel-CNG RCCI Combustion at Multiple Engine Operating Conditions*, SAE International, USA, 2020.
- [4] FIRMANSYAH F., AZIZ A.R.A., HEIKAL M.R., PANCHATCHARAM N., EZRANN Z.Z.A., *Reactivity Controlled Compression Ignition (RCCI) of Gasoline - CNG Mixtures*, [in:] *Improvement Trends for Internal Combustion Engines*, 2017.
- [5] KULKARNI A.M., STRICKER K., BLUM A., SHAVER G., *PCCI Control Authority of a Modern Diesel Engine Outfitted with Flexible Intake Valve Actuation*, *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, 132, 5, 2010.
- [6] HEYWOOD J.B., *Internal Combustion Engine Fundamentals*, Second Edition, McGraw-Hill Education, 2018.
- [7] HACSI J., *Oxygen Supplemented Homogeneous Charge Compression Ignition*, Pueblo, USA, 2018.
- [8] GHADIKOLAEI M.A., *History of Gasoline Direct Compression Ignition (GDCI) Engine - A Review*, IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology, Department of Mechanical Engineering, A.M.U., Aligarh, U.P., India, 2014.
- [9] PAYKANI A., KAKAE A., RAHNAMA P., REITZ R., *Progress and recent trends in reactivity-controlled compression ignition engines*, *International Journal of Engine Research*, 2015.
- [10] LEE C., LEE K.H., *Experimental study on the stratified combustion characteristics according to compression ratio and intake temperature in a dig engine*, *International Journal of Automotive Technology*, 7, 6, 2006, 675-680.
- [11] LUONG M.B., SANKARAN R., YU G., H., YOO C.S., *On the effect of injection timing on the ignition of lean PRF/air/EGR mixtures under direct dual fuel stratification conditions*, *Combustion and Flame* 183, 2017.
- [12] T. PACHIANNAN, ZHONG W., RAJKUMAR S., HE Z., LENG X., WANG Q., *A literature review of fuel effects on performance and emission characteristics of low-temperature combustion strategies*, *Applied Energy*, 251, 113380, 2019.
- [13] LUONG M.B., SANKARAN R., YU G.H., YOO C.S., *On the effect of injection timing on the ignition of lean PRF/air/EGR mixtures under direct dual fuel stratification conditions*, *Combustion and Flame*, 183, 2017.
- [14] LIAB Y., JIAB M., XUAC L., BAIA X.-S., *Multiple-objective optimization of methanol/diesel dual-fuel engine at low loads: A comparison of reactivity controlled compression ignition (RCCI) and direct dual fuel stratification (DDFS) strategies*, *FUEL*, vol. 262, 2020.
- [15] *U. of Wisconsin RCCI combustion work progressing; modeled 53% gross indicated efficiency in a light-duty engine could result in 2x fuel savings compared to SI gasoline*, *Green Car Mechanism*, 2011.
- [16] HAIRUDDIN A.A., WANDEL A.P., YUSAF T., *A homogeneous charge compression ignition engine: an introduction*, 3rd Malaysian Postgraduate Conference MPC2013, Australia, Sydney 2013.
- [17] STOREY J.M., CURRAN S.J., LEWIS S.A., BARONE T.L., DEMPSEY A.B., MOSES-DEBUSK M., HANSON R.M., PRIKHODKO V.Y., NORTHROP W.F., *Evolution and current understanding of physico-chemical characterization of particulate matter from reactivity controlled compression ignition combustion on a multicylinder light-duty engine*, *International Journal of Engine Research*, 18, 5-6, 2016.

- [18] STOREY J., ORNL Team further characterizes PM from RCCI combustion; possible different PM formation process than conventional diesel, Green Car Congress, 2013.
- [19] BURKE J., A Commercial First for RCCI Retrofits, Diesel & Gas Turbine WorldWide, 2020.
- [20] US Patent Application 20140283784: Control Device of Spark-Ignition Engine, 2013.
- [21] HOWARD B., Mazda's 2019 Breakthrough: a Diesel Engine That Runs on Gasoline, ExtremeTech, 2017.
- [22] Mazda SPCCI uses spark plug as HCCI control factor; "air piston" to enhance compression, Green Car Congress, 2017.
- [23] ROBERTSON D., PRUCKA R., A Review of Spark-Assisted Compression Ignition (SACI) Research in the Context of Realizing Production Control Strategies, 14th International Conference on Engines & Vehicles, 2019.
- [24] WAJAND A., *Silniki o zapłonie samoczynnym*, WNT, Warszawa 1988.
- [25] LUFT S., *Dwupaliwowy silnik o zapłonie samoczynnym zasilany mieszaniną gazów propan-butan (LPG) i olejem napędowym*, Monografie, Politechnika Radomska, Radom 2002.
- [26] SOWA A., *Samochodowe instalacje zasilania gazem*, Kraków 2007.
- [27] HCNG, hasło w Wikipedii, <http://en.wikipedia.org/wiki/HCNG> [dostęp: 19.12.2021].
- [28] MAJCZAK A., BARAŃSKI G., SOCHACZEWSKI R., SIADKOWSKA K., *CNG injector research for dual fuel engine*, Advances in Science and Technology – Research Journal, 11, 1, 2017.
- [29] KASEDORF J., *Zasilanie wtryskowe benzyną*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1989.
- [30] KOWALEWICZ A., *Adaptacja silnika wysokoprężnego do zasilania gazem naturalnym*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Czasopismo Techniczne, 105, 7-M, 2008, 67-78.
- [31] Weichai Westport secures Chinese certification for WP12 natural gas engine powered by HPDI 2.0, Green Car Congress, 2020.
- [32] Dostęp online z: <https://investors.wfsinc.com/news/news-details/2013/Westport-Unveils-Next-Generation-High-Pressure-Direct-Injection-Westport-HPDI-20-System/default.aspx>, [dostęp: 19.12.2021].
- [33] Strona Westport Fuel Systems, <http://www.westport.com>, [dostęp: 19.12.2021].
- [34] Westport updates HPDI 2.0 dual fuel system with new Delphi injectors, upgraded LNG storage and supply, Green Car Congress 2014.
- [35] Westport unveils next-generation High Pressure Direct Injection (HPDI 2.0) natural gas system for HD trucks, Green Car Congress 2013.
- [36] BARTH J., RIPPERGER S., HÖRRHAMMER C., FLIERL R., *Solubility of Natural Gas in Diesel Fuel*, Chemical Engineering Technology, 39, 8, 2016.
- [37] WAHHAB H.A., MHADI I.A., AZIZ A.A.R., HEIKAL M.R., AL-KAYIEM H.H., *Modeling of a Spray of Diesel Fuel with Dissolved Liquefied Natural Gas*, Asian Journal of Applied Sciences, 10, 2, 2016, 88-95.
- [38] MISRA A., YADAV M., SHARMA A., SINGH G., *Methane–Diesel Dual Fuel Engine: A Comprehensive Review*, Proceedings of International Conference in Mechanical and Energy Technology, 2020.
- [39] SHIHADAH A., HOCHGREB S., *Diesel Engine Combustion of Biomass Pyrolysis Oils*, Energy Fuels, 14, 2, 2000, 260-274.
- [40] DJERMOUNI M., OUADHA A., *Thermodynamic analysis of an HCCI engine based system running on natural gas*, Energy Conversion Management, 88, 2014, 723-73.

- [41] WEI L., GENG P., *A review on natural gas/diesel dual fuel combustion, emissions and performance*, Fuel Processing Technology, 142, 2016, 264-278.
- [42] *Westport™ HPDI technology delivers CO₂ reductions for long haul transportation*, Westport Fuel Systems, <https://wfsinc.com/our-solutions/hpdi-2.0>, [dostęp: 20.12.2021].
- [43] DJERMOUNI M., OUADHA A., *Comparative assessment of LNG and LPG in HCCI engines*, Energy Procedia, 139, 2017, 254-259.
- [44] MA F., NAEVE N., WANG M., JIANG L., CHEN R., ZHAO S., *Hydrogen-Enriched Compressed Natural Gas as a Fuel for Engines*, State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy Tsinghua University, China, 2010.
- [45] MARIANI A., *Hydrogen - Natural Gas (HCNG) Mixtures as fuels in internal combustion engines*, International workshow of Hydrogen and Fuel Cells, Orlean 2012.
- [46] PIETKUN-GREBER I., JANKA M., *Analiza skutków oddziaływania wodoru na metale i stopy*, Chemia-Dydaktyka-Ekologia-Metrologia, 16, 1-2, 2011, 75-78.
- [47] SZAMREJ A.G., *Wodór jako paliwo wspomagające spalanie w silnikach tłokowych*, (praca inżynierska), Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2014.
- [48] KAŁDOŃSKI T., KOLIŃSKI K., PSZCZÓŁKOWSKI J., *Sterowanie procesem zapłonu paliw w warunkach rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym*, Journal of KONES Internal Combustion Engines, vol. 10, No 1-2, 2003.
- [49] KARCZEWSKI M., CHOJNOWSKI J., SZAMREJ G., *A Review of Low-CO₂ Emission Fuels for a Dual-Fuel RCCI Engine*, Energies, 14, 16, 2021, 5067.
- [50] MOLEND A., *Gaz ziemny: paliwo i surowiec*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1993.
- [51] VIRDI K., *Concept of reactivity controlled compression ignition a single cylinder automotive engine*, a thesis report, Mechanical Engineering Department, Thapar Institute of Engineering & Technology, 2019.
- [52] STELMASIAK Z., LARISCH J., PIETRAS D., *Wpływ dodatku gazu ziemnego na wybrane parametry pracy silnika Fiat 1.3 MultiJet zasilanego dwupaliwowo*, Combustion Engines, 162, 3, 2015, 672- 682.
- [53] REITZ R.D., *Reciprocating Internal Combustion Engines*, Engine Research Center, University of Wisconsin-Madison, Princeton CEFRC, 2014.
- [54] Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami, *Wartości opałowe (WO) i wskaźniki emisji CO₂ (WE) w roku 2016 do raportowania w ramach Systemu Handlu Uprawnieniami do Emisji za rok 2019*, KOBIZE, Warszawa 2018.
- [55] DZIUBAK T., DZIUBAK S.D., *Experimental Study of Filtration Materials Used in the Car Air Intake*, Materials, 13, 16, 2020, 3498.
- [56] KNIGHT S., *Real world RCCI: Reactively Controlled Ignition goes live*, The Motorship Marine Technology, 2020, <https://www.motorship.com/news101/ships-equipment/1346366.article> [dostęp: 18.05.2022].
- [57] BURKE J., *Diesel & Gas Turbine WORLDWIDE, Covering large horsepower prime movers in the power generation, marine propulsion, oil & gas and rail market*, 2020, <https://www.diesलगasturbine.com/news/A-Commercial-First-For-RCCI-Retrofits/7011943.article> [dostęp: 19.05.2022].
- [58] SZAMREJ G., KARCZEWSKI M., CHOJNOWSKI J., *A review of technical solutions for RCCI engines*, Combustion Engines, 189, 2, 2022, 36-46.
- [59] MIKULSKI M., RAMESH S., BEKDEMIR C., *Reactivity Controlled Compression Ignition for clean and efficient ship propulsion*, Elsevier, Energy, 182, 2019, 1173-1192.

- [60] KLIMSTRA J., HOTAKAINEN M., *Smart Power Generation*, 3rd ed., Avain Publishers, Helsinki 2011.
- [61] KUIKEN K., *Gas- and dual-fuel engines for ship propulsion, power plants and cogeneration*, Book III: *Operation and maintenance*, Target Global Energy Training, PJ Onnen, The Netherlands, 2016, 528-529.
- [62] IMO, *The 2020 global sulphur limit n.d.*, [http://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/GHG/Documents/2020 sulphur limit FAQ 2018.pdf](http://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/GHG/Documents/2020%20sulphur%20limit%20FAQ%202018.pdf), [dostęp: 27.05.2022].
- [63] HOEK D., Shell: *IMO 2020 readiness – fuels and lubricants*, Alternative Maritime Fuels and Ship Emissions Seminar, Delft 2018.
- [64] KUIKEN K., *Gas- and dual-fuel engines for ship propulsion, power plants and cogeneration*, Book I: *Principles*, Target Global Energy Training, PJ Onnen, The Netherlands, 2016, 46-84.
- [65] MATTARELLI E., RINALDINI C.A., MARMORINI L., CAPRIOLI S., LEGROTTAGLIE F., SCRIGNOLI F., *2-Stroke RCCI Engines for Passenger Cars*, *Energies*, 15, 2022, 1173..
- [66] MIKULSKI M., BALAKRISHNAN P.R., HUNICZ J., *Natural gas-diesel reactivity controlled compression ignition with negative valve overlap and in-cylinder fuel reforming*, *Appl Energy*, 254, 2019, DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.113638.
- [67] ELKELAWYA M., SHENAWYA E.A.E., MOHAMED S.A., ELARABIB M.M., BASTAWISSIA H.A.-E., *Impacts of EGR on RCCI engines management: A comprehensive review*, *Energy Conversion and Management*, X, 14, 2022, DOI: 10.1016/j.ecmx.2022.100216.
- [68] DADSETAN M., CHITSABZ I., AMANIA E., *A study of swirl ratio effects on the NOx formation and mixture stratification in an RCCI engine*, *Energy*, 182, 2019, 1100-1114.
- [69] AYDIN H., *An innovative research on variable compression ratio in RCCI strategy on a power generator diesel engine using CNG-safflower biodieselmy*, *Energy*, 231, 2021, 121002.
- [70] GHOLAMI A., JAZAYERI S.A., ESMALI Q., *A detail performance and CO2 emission analysis of a very large crude carrier propulsion system with the main engine running on dual fuel mode using hydrogen/diesel versus natural gas/diesel and conventional diesel engines*, *Process Safety and Environmental Protection*, 163, 2022, 621-635.
- [71] KARCEWSKI M., SZAMREJ G., CHOJNOWSKI J., *Experimental Assessment of the Impact of Replacing Diesel Fuel with CNG on the Concentration of Harmful Substances in Exhaust Gases in a Dual Fuel Diesel Engine*, *Energies*, 15, 2022, 4563, <https://doi.org/10.3390/en15134563>.
- [72] BEEN J., *Breakthrough LNG deployment in Inland Waterway*, Transport, Activity 2.3. Evaluation report pilot test MTS Argonon, Deen Shipping, Rotterdam, Holandia, 2020.
- [73] PILLOT D., GUIOT B., COTTIER P.L., PERRET P., TASSEL P., *Exhaust emissions from in-service inland waterways vessels*, TAP 2016, 21st International Transport and Air Pollution, Conference, May 2016, LYON, France, 205-225.
- [74] WILLEMS F., KUPPER F., RAMESH S., INDRAJUANA A., DOOSJE E., *Coordinated air-fuel path control in a diesel-E85 RCCI engine*, SAE Technical Paper, 2019.
- [75] HARARI P.A., BANAPURMATH N.R., YALIWAL V.S., YUNUS KHAN T.M., SOUDAGARE M.E.M., SAJJAN A.M., *Experimental studies on performance and emission characteristics of reactivity controlled compression ignition (RCCI) engine operated with gasoline and Thevetia Peruviana biodiesel*, *Renewable Energy*, 160, 2020.
- [76] PAYKANIA A., GARCIA A., SHAHBAKHTIC M., RAHNAMEAD P., REITZ R.D., *Reactivity controlled compression ignition engine: Pathways towards commercial viability*, *Applied Energy*, 282 A, 2021, DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.116174.

- [77] REITZ R.D., DURAISAMY A.G., *Review of high efficiency and clean reactivity controlled compression ignition (RCCI) combustion in internal combustion engines*, Progress in Energy and Combustion Science, 46, 2015, 12-71.
- [78] SINGH A.P., KUMAR V., AGARWAL A.K., *Evaluation of comparative engine combustion, performance and emission characteristics of low temperature combustion (PCCI and RCCI) modes*, Appl Energy, 278, 24, 2020, DOI:10.1016/j.apenergy.2020.115644.
- [79] BENAJES J., GARCÍA A., MONSALVE-SERRANO J., VILLALTA D., *Exploring the limits of the reactivity controlled compression ignition combustion concept in a light-duty diesel engine and the influence of the direct-injected fuel properties*, Energy Convers Manage, 157, 2018, 277-287.
- [80] VALLADOLID P.G., TUNESTÁL P., MONSALVE-SERRANO J., GARCÍA A., HYVÖNEN J., *Impact of diesel pilot distribution on the ignition process of a dual fuel medium speed marine engine*, Energy Convers Manage, 149, 2017, 192-205.
- [81] KUIKEN K., *Gas- and dual-fuel engines for ship propulsion, power plants and cogeneration. Book II: Engine systems and environment*, Target Global Energy Training, PJ Onnen, The Netherlands, 2016, 496-544.

G. SZAMREJ

Homogeneous mixture CI engines as a key to the further development of IC piston engines

Abstract. The article presents synthetically the methods of ignition of the air-fuel mixture in Internal Combustion (IC) engines along with the characteristics of their advantages and disadvantages, the problems of their use and the possibility of development. The further development of piston engines will require a drastic reduction in the emission of harmful exhaust components and carbon dioxide, which is the most important greenhouse gas emitted by IC engines. For this reason, not only the engines themselves must be changed but fuels as well. For the most effective use of them, self-ignition of a homogeneous fuel-air mixture should be implemented. In the present state of technical development is not possible to widespread use the most advanced ways of self-ignition methods. Typical homogeneous charge compression ignition (HCCI), where an engine uses only one type of the fuel and correctly self-ignite in the full scope of work is still not implemented in a serial production.

In the foreign literature, there is a significant number of publications on various methods of Compression Ignition (CI) in IC engines, including IC in Dual Fuel (DF) engines. The Polish literature, however, is extremely sparse in this matter, and one can find a number of works on CI in single-fuel engines [1-10], but the topic of DF fueling is not too extensively described. For this reason, it seems important to publish an article on this important topic today.

Keywords: internal combustion engines, CI engines, homogeneous mixture, dual-fuel engines, RCCI, DUAL FUEL, HCCI, ENGINES, PCCI, PPCI, PCI, SPCCI, SACI

DOI: 10.5604/01.3001.0016.0535