

Article citation info:

Różycki A, Skrzek T. Analysis of the impact of degree of recirculation of exhaust gases and energy fraction of gaseous fuel on overall efficiency and basic parameters of combustion process of dual-fuel diesel (self-ignition) engine fed by natural gas. The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji. 2018; 79(1): 65-77, <http://dx.doi.org/10.14669/AM.VOL79.ART5>

Analiza wpływu stopnia recyrkulacji spalin oraz udziału energetycznego paliwa gazowego na sprawność ogólną i podstawowe parametry procesu spalania dwupaliwowego silnika o ZS zasilanego gazem ziemnym

ANDRZEJ RÓŻYCKI¹, TOMASZ SKRZEK²

**Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny
im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu**

Streszczenie

W Zakładzie Pojazdów i Silników Spalinowych Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu od szereg lat są prowadzone badania dwupaliwowego silnika o zapłonie samoczynnym z wykorzystaniem różnych paliw zastępczych o małej wartości liczby cetanowej. Dotychczasowe badania wykazały możliwości stosowania znacznych udziałów energetycznych paliwa gazowego [1, 8, 9]. W niniejszym artykule zaprezentowano wybrane wyniki badań dotyczących wykorzystania gazu ziemnego. W trakcie badań zaobserwowano że wraz ze zmianą udziału energetycznego paliwa gazowego oraz zmianą stopnia recyrkulacji spalin zmienia się sprawność ogólna silnika a także parametry procesu spalania. W artykule podjęto próbę oceny wpływu stosowania różnych udziałów paliwa gazowego oraz stopnia recyrkulacji spalin na parametry procesu spalania. Podjęto także próbę wyjaśnienia przyczyn zmian wartości sprawności ogólnej w wyniku zaobserwowanych zmian przebiegu spalania.

¹ Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, Wydział Mechaniczny, Instytut Eksploatacji Pojazdów i Maszyn, Al. Bolesława Chrobrego 45, 26-600 Radom, Polska, e-mail: a.rozycki@uthrad.pl

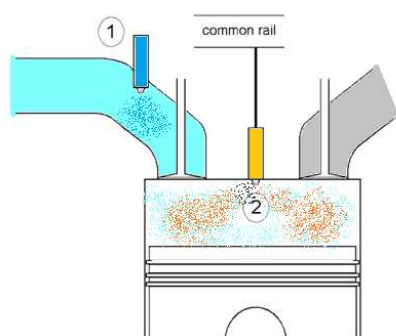
² Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, Wydział Mechaniczny, Instytut Eksploatacji Pojazdów i Maszyn, Al. Bolesława Chrobrego 45, 26-600 Radom, Polska, e-mail: t.skrzek@uthrad.pl

Słowa kluczowe: silnik dwupaliwowy o zapłonie samoczynnym, gaz ziemny, recykulacja spalin, sprawność ogólna

1. Wstęp

Tłokowy silnik spalinowy jest obecnie najbardziej rozpowszechnionym silnikiem stosowanym do napędu pojazdów samochodowych oraz różnego rodzaju agregatów stacjonarnych. Jest także stosowany do napędu pojazdów szynowych oraz jednostek pływających. Bardzo popularnym rodzajem silnika jest silnik o zapłonie samoczynnym. O jego powszechności decyduje głównie większa sprawność ogólna w porównaniu ze sprawnością silnika o zapłonie iskrowym. Większa sprawność ogólna silnika przekłada się na mniejsze koszty jego eksploatacji. Wydaje się, że w wielu zastosowaniach (takich jak napęd samochodów ciężarowych, autobusów międzymiastowych, lokomotyw, jednostek pływających) w najbliższej przyszłości tłokowy silnik spalinowy o zapłonie samoczynnym będzie dominującym, jeśli nie jedynym rozwiązaniem. Wyzwania związane z emisją związków szkodliwych ale także z chęcią korzystania z paliw zastępczych (sprzyjających często zmniejszeniu emisji zanieczyszczeń) powodują, że silnik o zapłonie samoczynnym podlega wyraźnym modyfikacjom, szczególnie w zakresie układu zasilania. Coraz częściej pojawiają się koncepcje zastosowania paliw gazowych do takiego rodzaju silnika. Ogólnie rzecz biorąc wprowadzenie paliwa gazowego gwarantuje zmniejszenie stężenia cząstek stałych oraz węglowodorów w spalinach. Pojawia się jednak problem poprawnej i pewnej inicjacji zapłonu paliw gazowych wobec faktu, że paliwa te z reguły charakteryzują się małą wartością liczby cetanowej. Z tego też powodu nie można liczyć na pewny samozapłon tego paliwa nie mówiąc już o trudności związanej z realizacją jego wtrysku do komory spalania i o konieczności wyraźnego zwiększenia stopnia sprężenia takiego silnika. Coraz częściej postrzeganym rozwiązaniem sygnalizowanych problemów wynikających z różnych własności paliwa gazowego w porównaniu z właściwościami paliwa tradycyjnego (oleju napędowego) jest zastosowanie układu zasilania dwupaliwowego. Świadczą o tym liczne publikacje wynikające z badań prowadzonych w wielu ośrodkach naukowo-badawczych, jak np. [1, 5, 7÷11]. Takie rozwiązanie układu zasilania pozwala na inicjację zapłonu, przygotowanej wcześniej

i sprężonej mieszaniny powietrza i paliwa gazowego, od palącej się już, wcześniej wtrysniętej niewielkiej dawki oleju napędowego. Jak wykazują dotychczasowe badania, przy poprawnym doborze parametrów wtrysku dawki inicjującej, można doprowadzić do objętościowego charakteru procesu spalania paliwa zastępczego co zbliża ten proces do postrzeganego jako bardzo korzystnego, opisywanego również przez wielu badaczy systemu HCCI. Należy podkreślić, że w rozwiązaniu dwupaliwowym zagwarantowana jest pełna kontrola nad położeniem kątowym początku procesu spalania co w przypadku typowego rozwiązania HCCI nastrocza wiele trudności. Schemat zasilania dwupaliwowego przedstawiony został na (rys.1).



Rys. 1. Schemat dwupaliwowego silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym zasilanego gazem ziemnym

- 1) wtryskiwacz gazu
- 2) wtryskiwacz oleju napędowego

Należy wyraźnie podkreślić, że wszystkie współczesne silniki o zapłonie samoczynnym są wyposażone w układ recyrkulacji spalin. Są to silniki turbodoładowane co sprawia, że dobór parametrów regulacyjnych silnika dwupaliwowego staje się zagadnieniem skomplikowanym. Jest to bardzo istotne, gdyż zarówno zmiana udziału energetycznego paliwa zastępczego jak i zmiana stopnia recyrkulacji spalin wpływa na wartość sprawności ogólnej silnika oraz na szereg jego parametrów eksploatacyjnych. W niniejszym artykule przedstawiono wybrane wyniki badań dwupaliwowego silnika o zapłonie samoczynnym zasilanego gazem ziemnym.

Wcześniejsze badania wykazały, że na sprawność ogólną silnika dwupaliwowego wpływa zarówno stopień recyrkulacji spalin, jak i udział energetyczny paliwa gazowego w stosunku do energii dostarczonej przez oba paliwa. Podjęto zatem próbę wyjaśnienia przyczyn zmniejszenia wartości sprawności ogólnej silnika dwupaliwowego wraz ze wzrostem stopnia recyrkulacji spalin oraz udziału energetycznego paliwa gazowego. W tym celu przeanalizowano zmienność parametrów procesu spalania. W trakcie badań starano się zachować stałą wartość współczynnika nadmiaru powietrza (całkowitą dla obu stosowanych paliw) dla każdego przyjętego stopnia recyrkulacji spalin, a także stałą wartość obciążenia silnika (momentem obrotowym $M \cong 23 \text{ N}\cdot\text{m}$). Badania wykonano przy stałej prędkości obrotowej silnika $n = 1200 \text{ obr/min}$ na jednocyndrowym silniku badawczym firmy AVL. W trakcie badań udział paliwa gazowego zmieniono od $E_{\text{NG}} = 10\%$ do $E_{\text{NG}} = 70\%$.

Wskaźnik udziału energetycznego paliwa gazowego opisany jest wzorem.

$$E_{\text{NG}} [\%] = \frac{E_{\text{NG}}}{E_{\text{NG}} + E_{\text{ON}}} \cdot 100 [\%] \quad (1)$$

E_{NG} – energia pochodząca od dawki gazu ziemnego [J/cykl]

E_{ON} – energia pochodząca od dawki oleju napędowego [J/cykl]

Wobec faktu iż, współczesne silniki wyposażone są w system recyrkulacji spalin, postanowiono także przeanalizować wpływ stopnia recyrkulacji spalin na podstawowe parametry pracy silnika. Przyjęto cztery wartości tego wskaźnika: 10%, 20%, 30%, 40%. Stopień recyrkulacji spalin EGR% określono poniższym wzorem.

$$\text{EGR} [\%] = \frac{\text{CO}_{2\text{int}} - \text{CO}_{2\text{air}}}{\text{CO}_{2\text{exh}} - \text{CO}_{2\text{int}}} \cdot 100 [\%] \quad (2)$$

$\text{CO}_{2\text{int}}$ – stężenie dwutlenku węgla w kolektorze dolotowym [ppm]

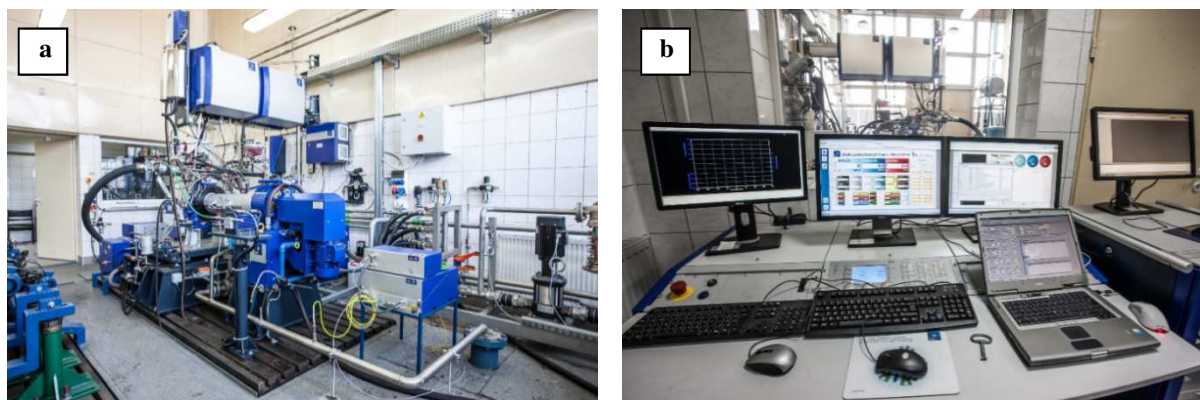
$\text{CO}_{2\text{air}}$ – stężenie dwutlenku węgla w powietrzu [ppm]

$CO_{2\text{ exh}}$ – stężenie dwutlenku węgla w kolektorze wylotowym [ppm]

2. Opis stanowiska badawczego i przyjętego programu badań

Badania przeprowadzono na stanowisku badawczym firmy AVL wyposażonym w jednocylindrowy silnik o zapłonie samoczynnym przystosowany do zasilania dwupaliwowego w wyniku dostarczania gazu ziemnego przy użyciu wtryskiwacza osadzonego w kolektorze dolotowym silnika. Zarówno miejsce osadzania wtryskiwacza, jak i parametry wtrysku inicjującej zapłon dawki oleju napędowego, zostały przyjęte i ustalone na podstawie wcześniej przeprowadzonych badań [6, 7].

Ogólny widok stanowiska badawczego oraz sterowni przedstawiony został na (rys. 2)



Rys. 2. Widok silnika na hamowni (rys. a), widok sterowni (rys. b)

W skład stanowiska badawczego wchodzi:

- jednocylindrowy silnik badawczy firmy AVL 5402,
- hamulec elektrowirowy AVL,
- system do indykowania (IndiCom),
- system doładowania (AVL boost - sprężarka zasilana elektrycznie),
- system do analizy spalin (SESAM I 60),
- system pomiaru masowego stężenia cząstek stałych (Micro Soot Sensor),
- system pomiaru masowego natężenia przepływu oleju napędowego zużywanego przez silnik z kondycjonowaniem temperaturowym,
- system pomiaru masowego natężenia przepływu gazu ziemnego zużywanego przez silnik (mini CORI-FLOW).

Tabela 1. Podstawowe dane techniczne silnika AVL 5402

Liczba cylindrów	1
Średnica cylindra	85,01 mm
Skok tłoka	90,00 mm
Objętość skokowa	511,00 cm ³
System spalania	o zapłonie samoczynnym
Rozrząd	czterozaworowy

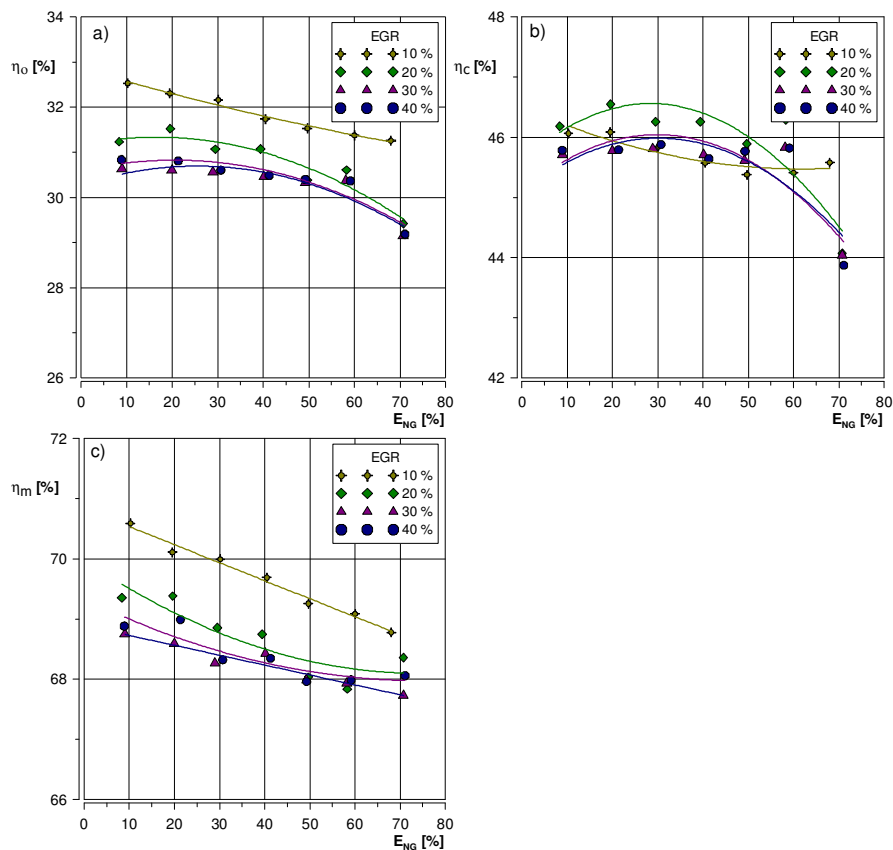
Stopień sprężania	17,5
System zasilania	układ zasobnikowy (Common Rail)
Maksymalna moc użyteczna, bez doładowania	6 kW
Maksymalna moc użyteczna, z doładowaniem	16 kW
Znamionowa prędkość obrotowa	4200 min ⁻¹
Ciśnienie wtrysku	180 MPa

W wyniku pomiaru osiąganego momentu obrotowego, prędkości obrotowej oraz masowego natężenia przepływu oleju napędowego zużywanego przez silnik, obliczono wartości sprawności ogólnej silnika. Rejestracja przebiegu ciśnienia w cylindrze w procesie spalania pozwoliła na obliczenie sprawności cieplnej oraz kolejno sprawności mechanicznej silnika. Znajomość przebiegów ciśnienia indykowanego w zależności od kąta obrotu wału korbowego pozwoliła na wyznaczenie poniżej wyszczególnionych podstawowych parametrów charakteryzujących proces spalania, zależnych od udziału energetycznego paliwa gazowego oraz różnych wartości stopnia recyrkulacji spalin:

- maksymalnego ciśnienia czynnika w procesie spalania,
- położenia kąтового maksymalnego ciśnienia czynnika w procesie spalania,
- maksymalnej szybkości narastania ciśnienia czynnika w procesie spalania,
- położenia kąтового początku procesu spalania,
- położenia kąтового wypalenia 50% i 90% ładunku.

3. Charakterystyki zmienności sprawności ogólnej, cieplnej i mechanicznej silnika - wyniki badań

W wyniku przeprowadzonych badań i stosownych obliczeń wyznaczono przebiegi sprawności ogólnej silnika, sprawności cieplnej, oraz sprawności mechanicznej w każdym punkcie pomiarowym. Wyniki zestawiono na (rys. 3).

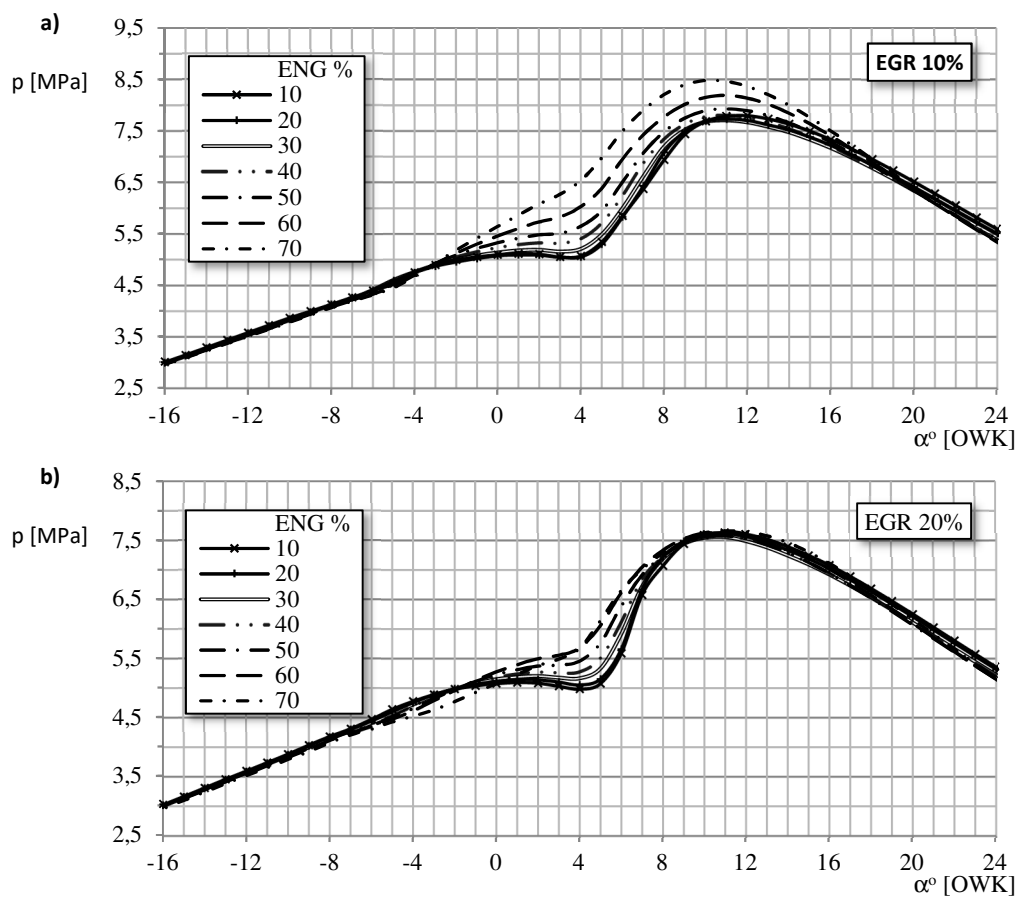


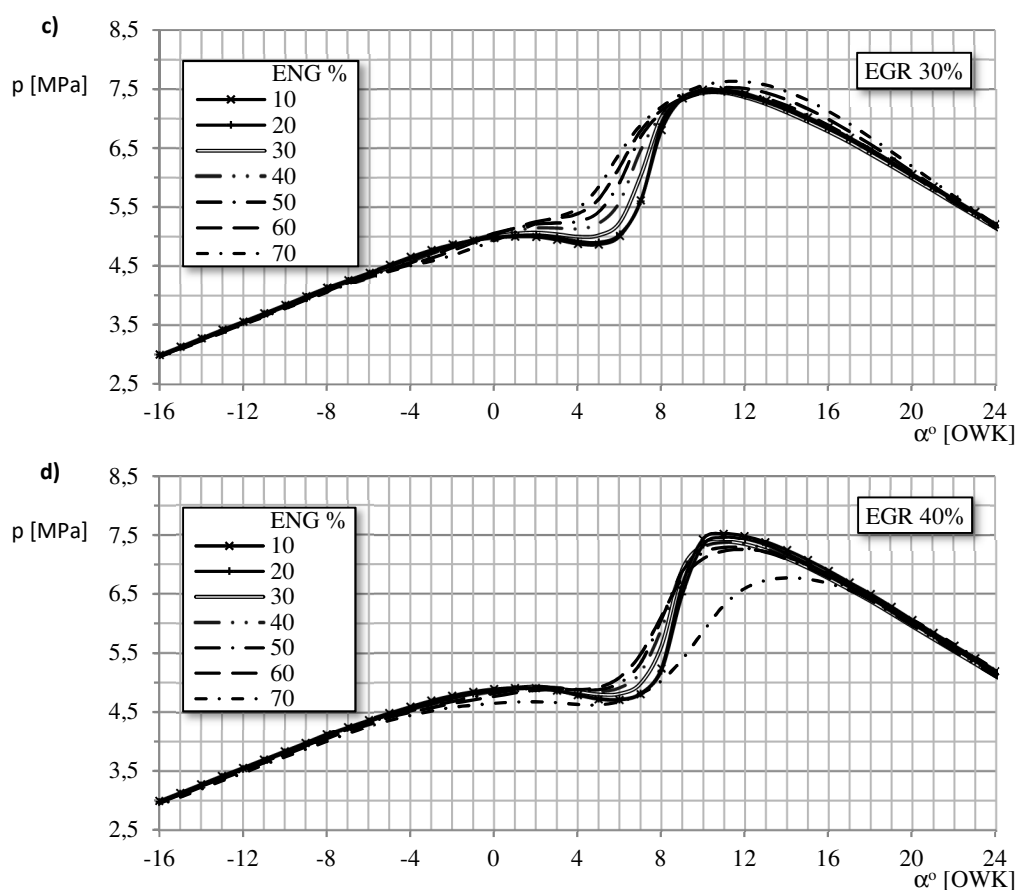
Rys. 3. Zależność sprawności ogólnej - η_o (rys. a), sprawności cieplnej - η_c (rys. b) i sprawności mechanicznej - η_m (rys. c) od wskaźnika udziału energii paliwa gazowego - E_{NG} dla różnych przyjętych wartości stopnia recyrkulacji spalin - EGR

Wobec wyraźnego związku charakteru przebiegu sprawności ogólnej (rys. 3a), z przebiegiem wartości sprawności mechanicznej (rys. 3c) uznano, że za charakter zmian sprawności ogólnej odpowiada zmienność sprawności mechanicznej. Podjęto także próbę wyjaśnienia przyczyn obserwowanej zmiany wartości sprawności mechanicznej wraz ze zmianą stopnia recyrkulacji spalin a także zmianą wskaźnika udziału paliwa gazowego. Zarejestrowane i obliczone przebiegi wykazują, że maksymalnym wartościom sprawności mechanicznej towarzyszą najmniejsze wartości stopnia recyrkulacji spalin. Należy zauważyć także, że wartości sprawności mechanicznej maleje wraz ze wzrostem udziału paliwa gazowego. Próbę wyjaśnienia przytoczonych wyżej zmian sprawności mechanicznej podjęto na podstawie rejestrowanych przebiegów ciśnienia czynnika w cylindrze, w zależności od kąta obrotu wału korbowego. Przebiegi te pozwoliły na wyznaczenie pozostałych istotnych parametrów procesu spalania.

4. Badania zmian podstawowych parametrów procesu spalania

W trakcie badań w każdym punkcie pomiarowym rejestrowano przebiegi ciśnienia czynnika w cylindrze w zależności od kąta obrotu wału korbowego. Przebiegi te zestawiono na (rys. 4) Należy nadmienić, że w trakcie badań utrzymywano stałe parametry wtrysku inicjującej zapłon dawki oleju napędowego. Dawka ta była podzielona na dwie części, dawkę pilotującą oraz dawkę główną tak jak ma to miejsce w większości współczesnych silników o zapłonie samoczynnym. Parametry wtrysku tychże dawek (kąty początku wtrysku oraz wartość dawek) ustalono na podstawie wcześniejszych badań [6].

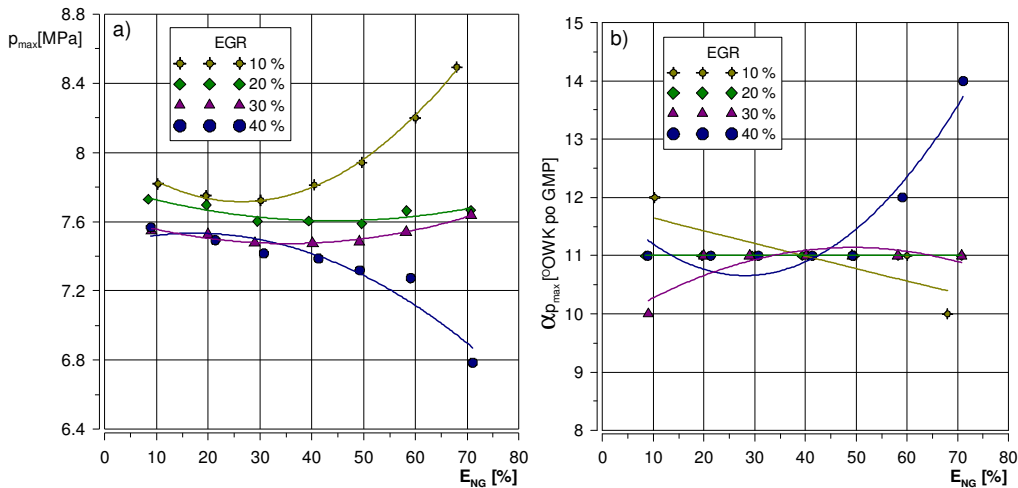




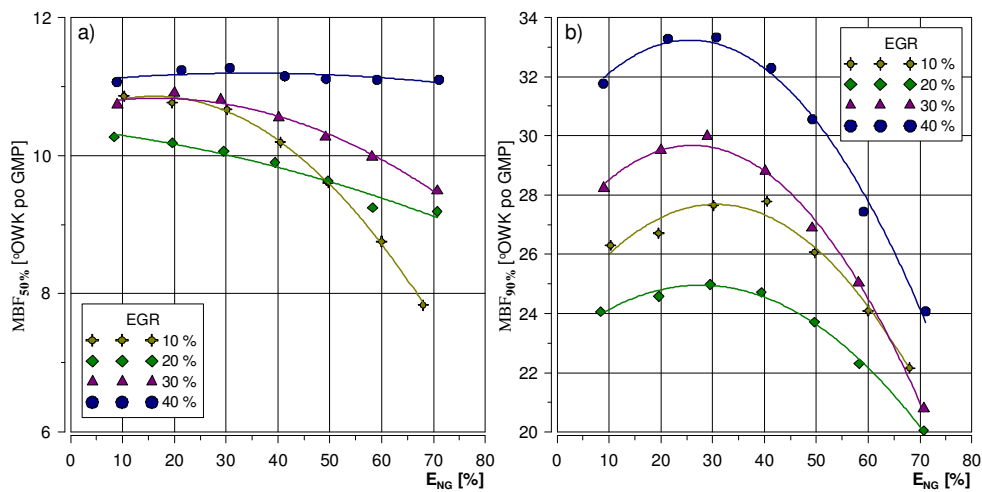
Rys. 4. Zarejestrowane przebiegi ciśnienia czynnika w cylindrze w zależności od kąta obrotu wału korbowego - α , dla różnych wartości wskaźnika udziału energii paliwa gazowego - ENG oraz różnych wartości stopnia recyrkulacji spalin - EGR: a) 10%, b) 20%, c) 30%, d) 40%
 Już wstępna wzrokowa analiza zamieszczonych na (rys. 4) przebiegów wykazuje, że charakter przebiegu ciśnienia czynnika w cylindrze w zależności od kąta obrotu wału korbowego zależy wyraźnie zarówno od wskaźnika udziału energetycznego paliwa gazowego, jak i od stopnia recyrkulacji spalin. Postanowiono zatem sporządzić charakterystyki podstawowych parametrów charakteryzujących proces spalania w funkcji udziału energetycznego paliwa gazowego dla przyjętych czterech wartości stopnia recyrkulacji spalin. Zarejestrowane i przedstawione na (rys. 4) przebiegi ciśnienia czynnika w cylindrze pozwoliły na wyznaczenie przebiegów podstawowych parametrów charakteryzujących proces spalania takich jak:

- maksymalnego ciśnienia czynnika w procesie spalania,
- położenia kąтового maksymalnego ciśnienia czynnika w procesie spalania,
- maksymalnych szybkości narastania ciśnienia czynnika w procesie spalania,
- początku procesu spalania,
- położenia kąтового wypalenia 50% i 90 % ładunku,

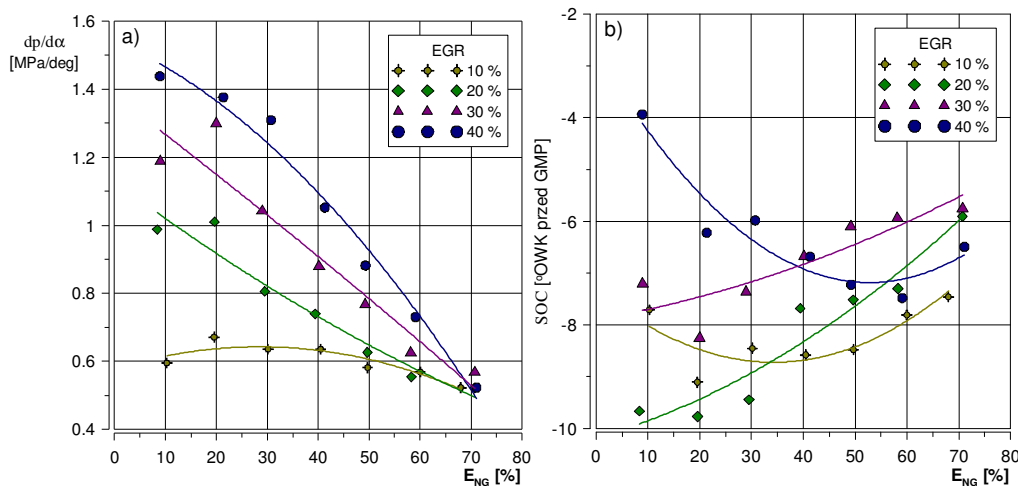
Wyniki analiz i obliczeń w postaci charakterystyk zestawiono na (rys.: 5, 6, 7).



Rys. 5. Zależność wartości ciśnień maksymalnych - p_{max} (rys. a), położenia kąтового maksymalnych wartości ciśnienia spalania - $\alpha_{p_{max}}$ (rys. b), od wskaźnika udziału energii paliwa gazowego - E_{NG} dla różnych przyjętych wartości stopnia recykulacji spalin - EGR



Rys. 6. Zależność położenia wału korbowego odpowiadającego wypaleniu ładunku w 50% (rys. a), i 90% (rys. b), od wartości wskaźnika udziału energii paliwa gazowego - E_{NG} dla różnych przyjętych wartości stopnia recykulacji spalin - EGR



Rys. 7. Zależność wartości maksymalnej szybkości narastania ciśnienia spalania - $dp/d\alpha$ (rys. a), kąтового położenia początku spalania - SOC (rys. b), od wskaźnika udziału energii paliwa gazowego - E_{NG} dla różnych przyjętych wartości stopnia recyrkulacji spalin - EGR

Analiza przedstawionych zależności wykazuje, że wartość podstawowych, istotnych parametrów procesu spalania silnika zależy zarówno od stopnia recyrkulacji spalin a także od wskaźnika udziału energetycznego paliwa gazowego. Postanowiono zatem przeanalizować wpływ podstawowych parametrów procesu spalania na sprawność mechaniczną i jak wcześniej wspomniano silnie związaną z nią sprawność ogólną silnika dwupaliwowego w dwóch obszarach: przy małym udziale paliwa gazowego $E_{NG} = 10\%$ i przy maksymalnym udziale paliwa gazowego $E_{NG} = 70\%$.

W zakresie małych udziałów energetycznych paliwa gazowego wraz ze wzrostem stopnia recyrkulacji spalin można zaobserwować, że:

- zwłoka samozapłonu inicjującej zapłon dawki oleju napędowego wyraźnie wzrasta, (początek spalania zbliża się ku GMP w suwie sprężania rys. 7b),
- wzrasta wyraźnie wartość maksymalnej szybkości narastania ciśnienia spalania (rys. 7a).

Te dwa zjawiska skutkują zbliżonymi wartościami ciśnień maksymalnych (rys. 5a) (niewielką zależnością wartości tego parametru od stopnia recyrkulacji spalin). Warto zauważyć, że położenie maksymalnego ciśnienia czynnika w procesie spalania dla wszystkich wartości stopnia recyrkulacji spalin koncentrują się stosunkowo blisko GMP (rys. 5b).

Zdaniem autorów spadek wartości sprawności mechanicznej a w efekcie ogólnej, dla analizowanych wartości stopnia recyrkulacji spalin w obszarze małych udziałów energetycznych gazu ziemnego (rys. 3c) wynika ze wzrostu obciążeń mechanicznych łożysk głównych i korbowych z tytułu sił gazowych, na skutek zbyt bliskiego GMP pojawienia się maksymalnych wartości ciśnienia spalania.

W zakresie maksymalnych udziałów paliwa gazowego $E_{NG} = 70\%$ można zaobserwować, że:

- opóźnienie samozapłonu inicjującej zapłon dawki oleju napędowego (początek spalania w nieznacznym stopniu zależy od stopnia recyrkulacji spalin rys. 7b) w sposób nieznaczny zwiększa się opóźnienie samozapłonu wraz ze wzrostem wartości stopnia recyrkulacji spalin,

- wartości maksymalnej szybkości narastania ciśnienia czynnika w procesie spalania, także wyraźnie stabilizują się i nie zależą od stopnia recyrkulacji spalin (rys. 7a),
- położenie maksymalnego ciśnienia obiegu przesuwają się wyraźnie ku suwowi rozprężenia szczególnie dla większych wartości stopnia recyrkulacji spalin (przypada na większe wychylenie wykorbienia wału korbowego po GMP rys. 5b), co potwierdza także położenie wypalenia 50% ładunku (rys. 6a).

Zdaniem autorów za spadek sprawności mechanicznej w tym obszarze (dużych udziałów energetycznych) szczególnie dla większych wartości stopnia recyrkulacji spalin odpowiada wzrost strat tarcia w układzie tłok cylinder w wyniku wzrostu wartości sił normalnych pochodzących od sił gazowych. Fakt ten wynika z opisanego wyżej przesunięcia maksymalnego ciśnienia obiegu w kierunku suwu rozprężania. Wydaje się, że jest to zjawisko dominujące pomimo spadku wartości ciśnień maksymalnych obiegu, wraz ze wzrostem stopnia recyrkulacji spalin.

5. Podsumowanie

Analiza zamieszczonych wyników badań prowadzi do wniosków:

- Zmienność wartości sprawności ogólnej silnika dwupaliwowego (rys. 3a) wyposażonego w układ recyrkulacji spalin, wyraźnie zależy od zmienności sprawności mechanicznej (rys. 3c).
- Zmiany wartości sprawności mechanicznej wynikają ze zmian procesu spalania, który to zależy silnie od udziału energetycznego paliwa gazowego a także od stopnia recyrkulacji spalin.
- Przy stosowanych w czasie badań stałych regulacjach parametrów wtrysku inicjującej zapłon dawki oleju napędowego w zależności od wartości wyżej wymienionych wskaźników: udziału energii paliwa gazowego oraz wartości stopnia recyrkulacji spalin, zmianie ulegają takie parametry jak: maksymalna wartość ciśnienia czynnika w procesie spalania, początek procesu spalania, położenie katowe 50% i 90% wypalenia ładunku, maksymalna wartość szybkości narastania ciśnienia czynnika w procesie spalania. W wyniku opisanych zjawisk zdaniem autorów wyraźnym zmianom ulegają straty mechaniczne z tytułu sił normalnych oddziaływania tłoka na cylinder oraz sił obciążających łożyska wału korbowego.
- Możliwość poprawy sprawności ogólnej poprzez poprawę sprawności mechanicznej upatruje się we wprowadzeniu regulacji parametrów wtrysku inicjującej zapłon dawki oleju napędowego. Regulacje te powinny być uzależnione od stopnia recyrkulacji spalin jak też od wartości wskaźnika udziału energetycznego paliwa gazowego. Chodzi tu zarówno o podział inicjującej zapłon dawki oleju napędowego co do wartości oraz co do położenia dawki przedwtrysku i dawki głównej. Konieczność powyższego podziału dawki oleju napędowego zauważył już także prof. Stelmasiak [10]. Zagadnienia te w przypadku silnika dwupaliwowego są bardziej skomplikowane niż w przypadku silnika zasilanego standardowo. Jest rzeczą wielce prawdopodobną, że wprowadzenie zmiennej regulacji parametrów wtrysku inicjującej zapłon dawki oleju napędowego przyczyni się także do poprawy wartości sprawności cieplnej silnika szczególnie przy większych udziałach energetycznych paliwa gazowego.

Literatura

- [1] Luft S. Analysis of combustion process in a dual-fuel compression ignition engine fuelled with LPG in liquid phase J. KONES 2007, Powertrain and Transport; Vol. 14 No. 4.
- [2] Ogawa H, Zhao P, Kato T, And Shibata G. Improvement of Combustion and Emissions in a Dual Fuel Compression Ignition Engine with Natural Gas as the Main Fuel 2015; SAE Technical Papers 2015; DOI: 10.4271/2015-01-0863
- [3] Paykani A, Kakaee A.H, Rahnema P, Reitz R.D. Effects of diesel injection strategy on natural gas/diesel reactivity controlled compression ignition combustion. Energy October 2015 Volume 90; Pages 814-826; DOI:org/10.1016/j.energy.2015.07.112.
- [4] Pielecha I, Wislocki K, Cieřlik W, Borowski P. Analysis of a Dual-Fuel Combustion engine fueled with diesel fuel and CNG in transient operating conditions. SAE Technical Paper 2016, DOI:10.4271/2016-01-2305.
- [5] Rózycki A. Analysis of performances of a dual-fuel turbocharged compression ignition engine. Journal of KONES 2010; Powertrain and Transport, Vol. 17, No. 3.
- [6] Sayin C, Canakci M. Effects of injection timing on the engine performance and exhaust emissions of a dual-fuel diesel engine. Energy Conversion and Management 2009; Elsevier, Vol. 50; DOI: 10.1016/j.enconman.2008.06.007
- [7] Skrzek T. Effect of the diesel fuel dose division and the injection angle on operating parameters of a dual-fuel compression ignition engine. PTNSS 3/2015 (162) – 3480.
- [8] Skrzek T. Assessment of the effect of gaseous fuel delivery mode on thermal efficiency and fuel losses during the valve overlap period in a dual-fuel compression ignition engine. IOP Conference Series. Materials Science and Engineering, Number 1/2016; Volume 148, DOI:10.1088/1757-899X/148/1/012086
- [9] Stelmasiak Z. Combustion with low NO_x and smokeless in a dual fuel diesel engine fuelled with natural gas as the main fuel. Journal of KONES Internal Combustion Engines 2004. vol. II. No. 3-4, 218-225
- [10] Stelmasiak Z. Dwupaliwowe silniki o zapłonie samoczynnym. Bielsko-Biała – Radom ITE; 2013
- [11] Wierzbicki S. Effect of the parameters of pilot dose injection in a dual fuel diesel engine on the combustion process. Journal of KONES 2011, Powertrain and Transport; Vol. 18, No. 3; 499-506.