

Sławomir Wierzbicki

**Studium możliwości wykorzystania
biogazu do zasilania silników
o zapłonie samoczynnym**



Kolegium Wydawnicze UWM
Przewodniczący
ZBIGNIEW CHOJNOWSKI

Redaktor Działu
MAREK MARKOWSKI

Recenzenci
MIŁOSŁAW KOZAK
STANISŁAW SZWAJA

Redakcja wydawnicza
MAŁGORZATA KUBACKA

Projekt okładki
ADAM GŁOWACKI

Skład i łamanie
RYSZARD GLIŃSKI

Monografia opracowana w ramach projektu badawczego nr N N509 573039, finansowanego przez NCN, pt. „Optymalizacja sterowania gazowym silnikiem o ZS CR zasilanym paliwem odnawialnym II generacji w skojarzonym agregacie prądowtórczym”.
UWM Olsztyn, 2010–2014

ISBN 978-83-8100-032-1

© Copyright by Wydawnictwo UWM • Olsztyn 2016

Wydawnictwo UWM
ul. Jana Heweliusza 14, 10-718 Olsztyn
tel. 89 523 36 61, fax 89 523 34 38
www.uwm.edu.pl/wydawnictwo/
e-mail: wydawca@uwm.edu.pl

Ark. wyd. 11,2; ark. druk. 9,50
Druk: Zakład Poligraficzny UWM w Olsztynie, zam. 519

Spis treści

Wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń	7
Wstęp	11
1. Biogaz jako paliwo do silników spalinowych	15
1.1. Wytwarzanie biogazu	15
1.2. Właściwości biogazu i możliwości jego wykorzystania	19
2. Przegląd literatury w zakresie zasilania silników o zapłonie samoczynnym paliwami gazowymi	24
2.1. Strategie zasilania silników gazowych	24
2.2. Parametry charakteryzujące ładunek w komorze spalania dwupaliwowego silnika o zapłonie samoczynnym	28
2.3. Rozwój dwupaliwowych silników o zapłonie samoczynnym zasilanych paliwami gazowymi	30
2.4. Wpływ udziału paliwa gazowego na proces spalania w dwupaliwowym silniku o zapłonie samoczynnym	35
2.5. Kierunki rozwoju dwupaliwowych silników gazowych	36
3. Problem badawczy	39
3.1. Istota problemu	39
3.2. Cel podjęcia tematu pracy	40
3.3. Zakres badań	40
4. Stanowisko badawcze i metodyka badań	42
4.1. Obiekt badań	42
4.2. Stanowisko badawcze	44
4.3. Układ przygotowania paliwa gazowego o zmiennym składzie chemicznym	46
4.4. Metodyka wyznaczania parametrów procesu spalania na podstawie zarejestrowanych przebiegów ciśnienia w komorze spalania	51
5. Analiza wyników badań	54
5.1. Wpływ składu paliwa gazowego na parametry mieszanki gazowo-powietrznej	54
5.2. Wpływ składu paliwa gazowego na parametry mieszanki w komorze spalania	58
5.3. Analiza wpływu udziału biogazu w dawce zasilającej na efektywność pracy silnika o zapłonie samoczynnym z układem zasilania typu Common Rail	63
5.4. Wpływ parametrów dawki pilotującej na parametry pracy dwupaliwowego silnika o zapłonie samoczynnym	89

5.4.1. Wpływ parametrów dawki pilotującej na przebieg ciśnienia w cylindrze silnika	89
5.4.2. Wpływ parametrów wtrysku dawki paliwa ciekłego na przebieg wywiązywania się ciepła oraz temperaturę w komorze spalania ..	100
5.4.3. Wpływ parametrów wtrysku dawki inicjującej zapłon na zawartość związków toksycznych w spalinach	104
6. Laboratoryjny układ sterowania dwupaliwowym stacjonarnym silnikiem o zapłonie samoczynnym	109
6.1. Koncepcja budowy laboratoryjnego układu sterowania dwupaliwowym silnikiem o zapłonie samoczynnym	109
6.2. Budowa laboratoryjnego układu sterowania zasilaniem dwupaliwowego silnika o zapłonie samoczynnym	113
6.2.1. Układ sterowania doprowadzeniem paliwa ciekłego	113
6.2.2. Układ sterowania wtryskiwaczem elektromagnetycznym	116
6.2.3. Układ doprowadzenia paliwa gazowego o założonym składzie chemicznym	126
6.2.4. Układ sterowania stacjonarnym dwupaliwowym silnikiem o zapłonie samoczynnym	126
6.3. Badania dwupaliwowego silnika o zapłonie samoczynnym z wykorzystaniem zintegrowanego układu sterowania	129
Podsumowanie i wnioski	139
Literatura	143

Wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń

$A_s(\alpha)$	– łączna powierzchnia ścianek cylindra, denka tłoka i głowicy [m^2]
c_p	– ciepło właściwe ładunku w komorze spalania przy stałym ciśnieniu [$J \cdot kg^{-1} \cdot K$]
c_v	– ciepło właściwe ładunku w komorze spalania przy stałej objętości [$J \cdot kg^{-1} \cdot K$]
$C_{V_{pi}}$	– współczynnik zmienności ciśnienia indykowanego [%]
G_{CNG}	– dawka paliwa gazowego doprowadzana do silnika [$Ndm^3 \cdot min^{-1}$]
G_{on}	– zużycie paliwa ciekłego [$kg \cdot h^{-1}$]
G_p	– masa zasysanego powietrza [$kg \cdot h^{-1}$]
$H_c(\alpha)$	– współczynnik wymiany ciepła [$J \cdot s^{-1} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
I_1, I_2, I_3	– kolejne mierzone wartości natężenia prądu na cewce wtryskiwacza [A]
k_{O_2}	– koncentracja tlenu w mieszance gazowo-powietrznej [%]
L_t	– teoretyczna ilość powietrza potrzebna do spalania paliwa [kg powietrza $\cdot kg^{-1}$ paliwa]
L_{tg}	– teoretyczna ilość powietrza potrzebna do spalania paliwa gazowego [$Nm^3 \cdot Nm^{-3}$]
L_{ton}	– teoretyczna ilość powietrza potrzebna do spalania paliwa ciekłego [$Nm^3 \cdot kg^{-1}$]
M	– moment obrotowy [$N \cdot m$]
\dot{m}_{CNG}	– strumień sprężonego gazu ziemnego doprowadzanego do silnika [$Ndm^3 \cdot min^{-1}$]
\dot{m}_{on}	– strumień paliwa ciekłego (oleju napędowego) zasilającego silnik podczas pracy jednopaliwowej [$kg \cdot min^{-1}$]
M_{toe}	– milion ton przeliczeniowych oleju napędowego – energetyczny równoważnik jednej metrycznej tony ropy naftowej o wartości opałowej równej $10\,000\text{ kcal} \cdot kg^{-1}$
N	– moc [kW]
n	– prędkość obrotowa [obr $\cdot min^{-1}$]
Nm^3	– m^3 normalny, tj. objętość gazu przeliczona do tzw. normalnego stanu, czyli przy ciśnieniu 1,013 bar i temperaturze $0^\circ C$
p	– ciśnienie w komorze spalania [MPa]
p_e	– ciśnienie efektywne [MPa]
p_i	– wartość średnia ciśnienia indykowanego [MPa]
p_w	– ciśnienie wtrysku paliwa ciekłego (oleju napędowego) [MPa]
Q	– całkowita ilość ciepła wydzielonego w komorze spalania [J]
Q_n	– ilość ciepła netto wydzielonego w komorze spalania [J]
Q_s	– ilość ciepła brutto (skorygowanego) wydzielonego w komorze spalania [J]
q_{on}	– dawka oleju napędowego na wtrysk [mg/wtrysk]
T	– temperatura ładunku w cylindrze dla każdego kąta OWK [K]
T_p	– temperatura powietrza [K]

- T_s – średnia temperatura ścianek cylindra, denka tłoka i głowicy [K]
 t_1, t_2, t_3 – czas trwania kolejnych pomiarów [ms]
 U_{CNG} – procentowa zawartość gazu ziemnego w paliwie gazowym [%]
 U_{CO_2} – procentowa zawartość dwutlenku węgla w paliwie gazowym [%]
 U_g – udział energetyczny paliwa gazowego w dawce zasilającej silnik odniesiony do pracy jednopaliwowej silnika [%]
 U_{on} – udział energetyczny paliwa ciekłego (oleju napędowego) w dawce zasilającej odniesiony do pracy jednopaliwowej silnika [%]
 V – objętość komory spalania [m^3]
 V_1, V_2 – kolejne mierzone wartości napięcia prądu na cewce wtryskiwacza [V]
 V_B – napięcie zasilania [V]
 V_g – objętość paliwa gazowego [Nm^3]
 V_H – napięcie impulsu otwierającego wtryskiwacz [V]
 V_{ks} – maksymalna objętość komory spalania [m^3]
 V_{O_2} – objętość tlenu w paliwie gazowym [Nm^3]
 V_{pow} – objętość powietrza w mieszance powietrzno-gazowej [Nm^3]
 \dot{V}_g – strumień paliwa gazowego doprowadzanego do silnika [$\text{Nm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$]
 \dot{V}_p – strumień powietrza doprowadzanego do silnika [$\text{Nm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$]
 W_{CNG} – wartość opałowa sprężonego gazu ziemnego [$\text{kJ} \cdot \text{Ndm}^{-3}$]
 W_{on} – wartość opałowa oleju napędowego [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$]
CNG – sprężony gaz ziemny (ang. compressed natural gas)
CR – system bezpośredniego wtrysku paliwa w silnikach Diesla (ang. Common Rail)
DMP – dolne martwe położenie tłoka
EGR – układ recyrkulacji spalin (ang. exhaust gas recirculation)
FPGA – programowalna macierz bramek – rodzaj programowalnego układu logicznego (ang. field-programmable gate array)
GMP – górne martwe położenie tłoka
HCCI – system spalania mieszanki homogenicznej w silniku o zapłonie samoczynnym (ang. homogeneous charge compression ignition)
HCNG – mieszanina sprężonego gazu ziemnego i wodoru (ang. hydrogen + compressed natural gas)
LC – liczba cetanowa
LNG – skroplony gaz ziemny (ang. liquefied natural gas)
LPG – skroplona mieszanina propanu i butanu (ang. liquefied petroleum gas)
MN – liczba metanowa (ang. methane number)
 $^{\circ}\text{OWK}$ – stopień obrotu wału korbowego
PID – regulator proporcjonalno-całkująco-różniczkujący (ang. proportional-integral-derivative controller)
PWM – metoda regulacji sygnału prądowego lub napięciowego o stałej amplitudzie i częstotliwości (ang. pulse-width modulation)
 α – kąt obrotu wału korbowego [$^{\circ}\text{OWK}$]

Literatura

1. Albrecht A. 1995. *Dual-fuel engine developments at MAN B & W*. Diesel and Gas Turbine Worldwide, 27(8): 18–19.
2. Aleklett K. 2011. *The ASPO perspective on fossil fuels*. 9th International ASPO Conference. Brussels, Belgium. [Online] <http://aspo9.be/assets/ASPO9_Wed_27_April_Aleklett.pdf>, dostęp: 10.06.2016.
3. Alla G.H.A., Soliman H.A., Badr O.A., Rabbo M.F.A. 2000. *Effect of pilot fuel quantity on the performance of dual fuel engine*. Energy Conversion and Management, 41: 559–572.
4. Andoria-Mot Sp. z o.o. 2007. *Instrukcja serwisowa silnika wysokoprężnego ADCR*.
5. Assanis D.N., Filipi Z.S., Fiveland S.B., Syrimis M. 2005. *A predictive ignition delay correlation under steady-state and transient operation of a direct injection diesel engine*. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 125(2): 450–457.
6. Automex. 2011. *Hamownia silnikowa AMX2110*. Gdańsk.
7. Azimov U., Tomita E., Kawahara N., Dol S.S. 2012. *Combustion characteristics of syngas and natural gas in micro-pilot ignited dual-fuel engine*. World Academy of Science, Engineering and Technology, 72: 1618–1625.
8. Bach M., Grimme W. 2006. *Holzgas Schlepper*. Verlag Podszun-Motorbuchen GmbH.
9. Bagai R., Madamwar D. 1999. *Long-term photo-evolution of hydrogen in a packed bed reactor containing a combination of Phormidium valderianum, Halobacterium halobium and Escherichia coli immobilized in polyvinyl alcohol*. International Journal of Hydrogen Energy, 24: 31.
10. Bari S. 1996. *Effect of carbon dioxide on the performance of biogas/diesel dual-fuel engine*. Renewable Energy, 9(1–4): 1007–1010.
11. Barik D., Murugan S. 2014. *Investigation on combustion performance and emission characteristics of a DI (direct injection) diesel engine fueled with biogas-diesel in dual fuel mode*. Energy, 72: 760–771.
12. Barik D., Murugan S. 2015. *Experimental investigation on the behavior of a DI diesel engine fueled with raw biogas-diesel dual fuel at different injection timing*. Journal of the Energy Institute, 89(3): 373–388.
13. Basavarajappa H.Y., Banapurmath N.R. 2015. *Effect of CNG manifold injection on the performance, combustion and emission characteristics of a CNG-Biodiesel dual fuel operation*. International Journal of Automotive Engineering and Technologies, 4(4): 223–244.

14. Bedoya I.D., Arrieta A.A., Cadavid F.J. 2009. *Effects of mixing system and pilot fuel quality on diesel–biogas dual fuel engine performance*. Bioresource Technology, 100(24): 6624–6629.
15. Biały M., Wendeker M. 2014. *Badania symulacyjne bezpośredniego wtrysku gazu ziemnego do komory spalania dwupaliwowego silnika o zapłonie samoczynnym*. Logistyka, 6: 1876–1884.
16. Biernat K., Dziolał P., Gis W., Żółtowski A. 2012. *The Baltic biogas foresight: desk study on wider range of biogas production options and experiences including production potential scenarios for the Baltic Sea Region*. Baltic Biogas Bus European Project. Warszawa.
17. Biernat K., Gis W., Samson-Bręk I. 2012. *Review of technology for cleaning biogas to natural gas quality*. Combustion Engines, 1(148): 33–39.
18. Bora B.J., Saha U.K. 2016. *Experimental evaluation of a rice bran biodiesel–biogas run dual fuel diesel engine at varying compression ratios*. Renewable Energy, 87: 782–790.
19. Bromba M.U.A., Ziegler H. 1981. *Application hints for Savitzky-Golay digital smoothing filters*. Analytical Chemistry, 53(11): 1583–1589.
20. Brzeżański M. 2007. *Emisja dwutlenku węgla w aspekcie stosowanych paliw silnikowych*. Silniki Spalinowe, 4(131): 62–68.
21. Brzeżański M., Cisek J., Marek W., Mareczek M., Papuga T. 2013. *Badania systemów zasilania stacjonarnego silnika spalinowego zasilanego gazem ziemnym*. Combustion Engines, 52(3): 1049–1055.
22. Cebula J. 2009. *Biogas purification by sorption techniques*. Architecture – Civil Engineering – Environment, 2: 95–103.
23. Chłopek Z., Gis W., Menes E., Merkisz J., Waśkiewicz J. 2010. *Zasilanie silników biometanem jako przykład napędów gazowych*. Transport Samochodowy, 2: 63–76.
24. Chłopek Z., Lasocki J. 2012. *A comprehensive assessment of the emissions in conjunction with fuelling internal combustion engines with biogas*. Combustion Engines, 1(148): 82–87.
25. Chłopek Z., Szczepański T. 2012. *Zastosowanie paliwa biogazowego w transporcie publicznym w celu zmniejszenia zanieczyszczenia środowiska w strefach chronionych ekologicznie*. Inżynieria Ekologiczna, 30: 27–35.
26. Clark N.N., Atkinson Ch.M., Atkinson R.J., McDaniel T.I., Park T. 2002. *Optimized emission reduction strategies for dual fuel compression ignition engines*. [Online] <<http://www.cemr.wvu.edu/-englab/projects/Navistar/Navistar.html>>, dostęp: 7.06.2016.
27. Cupiał K., Jamrozik A., Kociszewski A. 2003. *Dwustopniowy system spalania w silniku gazowym*. VI Międzynarodowa Konferencja „Silniki Gazowe 2003”. Częstochowa.
28. Cupiał K., Szwaja S. 2010. *Producer gas combustion in the internal combustion engine*. Silniki Spalinowe, 49(2): 27–32.
29. Czerwiński J., Comte P. 2001. *Influences of gas quality on a natural gas engine*. Proceedings of the International Scientific Conference „Development of Design of Internal Combustion Engines and Quality of Fuels to Meet Future Levels”. Kraków.

30. Drivven. 2010. *DI driver module kit user's manual D000020 Rev E3*. Drivven, Inc.
31. Forster P., Ramaswamy V., Artaxo P., Berntsen T., Betts R., Fahey D.W., Nganga J. 2007. *Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing*. [W:] S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller (eds.). *Climate change 2007. The physical science basis*. Cambridge University Press. Cambridge.
32. Galal M., Abdel Aal M., El Kady M. 2002. *A comparative study between diesel and dual fuel engines: performance and emissions*. *Combustion Science and Technology*, 174(11–12): 241–256.
33. Gebert K., Beck J., Barkhimer R.L., Wong H.Ch. 1997. *Strategies to improve combustion and emission characteristics of dual-fuel pilot ignited natural gas engines*. SAE Technical Paper 971712.
34. Giernalczyk M. 2008. *Analiza możliwości stosowania dwupaliwowych silników tłokowych jako napędu głównego na gazowcach typu LNG*. *Journal of KONES*, 15(4): 147–155.
35. Gis W., Jakóbiec J., Żółtowski A. 2012. *Biogas as engine fuel*. *Combustion Engines*, 1(148): 40–45.
36. Gis W., Kulczycki A. 2012. *Biogas as a locally produced energy source for local automotive transport and local energy networks*. *Combustion Engines*, 1(148): 92–95.
37. Gis A., Żółtowski A., Grzelak P. 2013. *Potencjał produkcji biogazu w Polsce*. *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów*, 1(92): 13–19.
38. Grab-Rogaliński K., Szwaja W., Tutak W. 2014. *The Miller cycle based IC engine fuelled with a CNG/hydrogen*. *Journal of KONES*, 21(4): 137–144.
39. Graba M., Lachowicz A., Mamala J., Bieniek A. 2010. *Wielofazowy wtrysk paliwa dla silników z zapłonem samoczynnym wyposażonych w rzędową pompę wtryskową*. *Inżynieria Rolnicza*, 5(123): 29–35.
40. Günther H. 2010. *Układy wtryskowe Common Rail w praktyce warsztatowej*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa.
41. Heywood J.B. 1988. *Internal combustion engines fundamentals*. McGraw-Hill Inc.
42. Hountalas D.T., Papagiannakis R.G. 2001. *A simulation model for the combustion process of natural gas engines with pilot diesel fuel as an ignition source*. SAE Technical Paper 2001-01-1245.
43. Informator techniczny Bosch. 2004. *Sterowanie silników o zapłonie samoczynnym*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa.
44. Informator techniczny Bosch. 2009. *Czujniki w pojazdach samochodowych*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa.
45. Informator techniczny Bosch. 2009. *Układ wtryskowy Common Rail*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa.
46. Kaleemuddin S., Prasad Rao G.A. 2009. *Development of dual fuel single cylinder natural gas engine an analysis and experimental investigation for performance and emission*. *American Journal of Applied Sciences*, 6(5): 929–936.

47. Karim G.A. 2003. *Combustion in gas fuelled compression: ignition engines of the dual fuel type*. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 125(3): 827–836.
48. Karim G.A., Jones W., Raine R.R. 1989. *An examination of the ignition delay period in dual fuel engines*. SAE Technical Paper 892140.
49. Karim G.A., Wierzba I. 1983. *Comparative studies of methane and propane for spark ignition and compression ignition engines*. SAE Technical Paper 831196.
50. Kniaziewicz T., Piaseczny L. 2012. *Selected aspects of application of dual fuel marine engines*. Combustion Engines, 1(148): 25–34.
51. Korakianitis T., Namasivayam A.M., Crookes R.J. 2011. *Diesel and rapeseed methyl ester (RME) pilot fuels for hydrogen and natural gas dual-fuel combustion in compression-ignition engines*. Fuel, 90(7): 2384–2395.
52. Koten H., Yilmaz M., Gul M.Z. 2014. *Compressed biogas-diesel dual-fuel engine optimization study for ultralow emission*. Advances in Mechanical Engineering, 6, 571063.
53. Kowalczyk-Juśko A., Mazanek A. 2012. *Agricultural biogas – characteristics, substrates and its use*. Combustion Engines, 1(148): 8–14.
54. Kowalewicz A. 2008. *Adaptacja silnika wysokoprężnego do zasilania gazem naturalnym*. Czasopismo Techniczne. Mechanika, 105(7–M): 67–78.
55. Kowalewicz A., Wojtyniak M. 2007. *Natural gas engines – problems and challenges*. Journal of KONES, 14(2): 273–282.
56. Kowalewicz A., Wołoszyn R. 2011. *Comparison of performance and emissions of turbocharged CI engine fuelled either with diesel fuel or CNG and diesel fuel*. Silniki Spalinowe, 50(3) [płyta CD].
57. Kowalski Ł., Smerkowska B. 2012. *A Polish case study for biogas to biomethane upgrading*. Combustion Engines, 1(148): 15–24.
58. Kruczyński S., Pawlak G., Wołoszyn R. 2012. *The concept of the tractor powered by biodiesel and biogas*. Journal of KONES, 19(4): 339–346.
59. Kusaka J., Daisho Y., Kiahara R., Saito T., Nakayama S.H. 1998. *Combustion and exhaust gas emission characteristics of a diesel engine dual-fueled with natural gas*. The IVth International Symposium COMODIA Proceedings. Kyoto, 555–660.
60. Lejda K., Bojczenko S., Mateichyk V. 2014. *Perspektywy rozwoju transportu odnośnie paliw alternatywnych w Unii Europejskiej*. Wiśnik Nacionalnowo transportnowo uniwersitetu, 30(1): 213–219.
61. Liu Z., Karim G.A. 1995. *The ignition delay period in dual fuel engines*. SAE Technical Paper 950466.
62. Luft S. 2001. *Dobór parametrów regulacyjnych dwupaliwowego silnika o zapłonie samoczynnym zasilanego głównie ciekłym gazem propan-butan*. Journal of KONES, 8(3–4): 53–59.
63. Luft S., Michalczewski A. 2000. *Próba oceny wpływu kąta początku wtrysku inicjującej zapłon dawki oleju napędowego na podstawowe parametry dwupaliwowego silnika o ZS zasilanego głównie mieszaniną butanu i powietrza*. Journal of KONES, 7(1–2): 342–348.

64. Luft S., Michalczewski A. 2002. *Analysis of chosen parameters of dual fuel CI engine fuelled with propane-butane gas as a main fuel*. SAE Technical Paper 2002-01-2234.
65. Luft S., Skrzek T. 2012. *Dwupaliwowy silnik o zapłonie samoczynnym – przegląd wybranych wyników badań*. Czasopismo Techniczne. Mechanika, 109(3-M): 169–182.
66. Luft S., Skrzek T. 2013. *Effect of the compression ratio on selected combustion process parameters in a natural gas fuelled compression ignition engine operating in a dual-fuel mode*. Combustion Engines, 154(3): 931–935.
67. Majerczyk A., Taubert S. 2002. *Układy zasilania gazem propan-butan*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa.
68. Makareviciene V., Sendzikiene E., Pukalskas S., Rimkus A., Vegneris R. 2013. *Performance and emission characteristics of biogas used in diesel engine operation*. Energy Conversion and Management, 75: 224–233.
69. Matyjasik M. 2012. *Akwizycja procesu spalania mieszaniny gaz-powietrze w silnikach dwupaliwowych przez podział dawki inicjującej oleju napędowego*. Praca doktorska. Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej.
70. Merkisz J., Gis W., Grzelak P., Żółtowski A. 2013. *The possibilities of reducing emission pollutants of exhaust from city buses by the use of biomethane*. Combustion Engines, 154(3): 562–569.
71. Merkisz J., Gis W., Żółtowski A. 2011. *Biogas as vehicle fuel*. Silniki Spalinowe, 50(3): 1–16.
72. Merkisz J., Nowak M., Rymaniak Ł., Ziółkowski A. 2012. *Perspektywy rozwoju rynku paliwa CNG w Polsce*. Logistyka, 3.
73. Mikulski M. 2014. *Budowa dwufazowego modelu spalania w wielopaliwowym silniku o zapłonie samoczynnym*. Rozprawa doktorska. Wydział Nauk Technicznych, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie.
74. Mikulski M., Wierzbicki S., Pięta A. 2015. *Zero-dimensional 2-phase combustion model in a dual-fuel compression ignition engine fed with gaseous fuel and a divided diesel fuel charge*. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, 17(1): 42–48.
75. Mikulski M., Wierzbicki S., Pięta A. 2015. *Numerical studies on controlling gaseous fuel combustion by managing the combustion process of diesel pilot dose in a dual-fuel engine*. Chemical and Process Engineering, 36(2): 225–238.
76. Mikulski M., Wierzbicki S., Śmieja M., Matijosius J. 2015. *Effect of CNG in a fuel dose on the combustion process of a compression-ignition engine*. Transport, 30(2): 162–171.
77. Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi. 2009. *Założenia programu rozwoju biogazowni rolniczych*. Warszawa.
78. Motyl K., Lisowski M. 2008. *Wpływ temperatury początkowej i składu mieszaniny palnej na pracę silnika HCCI zasilanego biogazem*. Inżynieria Rolnicza, 1(99): 311–317.

79. Mustafi N.N., Raine R.R., Verhelst S. 2013. *Combustion and emissions characteristics of a dual fuel engine operated on alternative gaseous fuels*. Fuel, 109: 669–678.
80. Nithyanandan K., Zhang J., Li Y., Meng X., Donahue R., Lee C.F.F., Dou H. 2015. *Diesel-like efficiency using CNG/diesel dual-fuel combustion*. American Society of Mechanical Engineers 2015 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference. Paper ICEF2015-1147.
81. Persson M., Jönsson O., Wellinger A. 2006. *Biogas upgrading to vehicle fuel standards and grid injection*. IEA Bioenergy. Task 37 – Energy from biogas and landfill gas. [Online] <http://www.energyineducation.ie/Renewables/Bioenergy/Bio-gas_upgrading_to_vehicle_fuel_standards_and_grid_connection_IEA.pdf>, dostę: 7.06.2016.
82. Prakash G., Shaik A.B., Remesh A. 1999. *An approach for estimation of ignition delay in a dual fuel engine*. SAE Technical Paper 1999-01-0232.
83. Pucher H. 1986. *Gasmotorentchnik. Technologie und Entwicklungstendenzen*. Expert Verlag.
84. Rada Ministrów. 2016. Projekt uchwały Rady Ministrów w sprawie ustanowienia programu wieloletniego pod nazwą „Przedsięwzięcia technologiczno-przyrodnicze na rzecz innowacyjnej, efektywnej i niskoemisyjnej gospodarki na obszarach wiejskich”.
85. Raine R.R. 1990. *A performance model of the dual fuel (diesel/natural gas) engine*. SAE Technical Paper 900387.
86. Rao G.A., Raju A.V.S., Rajulu K.G., Rao C.M. 2010. *Performance evaluation of a dual fuel engine (diesel + LPG)*. Indian Journal of Science and Technology, 3(3): 235–237.
87. Ray N.H.S., Mohanty M.K., Mohanty R.C. 2013. *A study on application of biogas as fuel in compression ignition engines*. International Journal of Innovations in Engineering and Technology, 3(1): 239–245.
88. Romaniszyn K. 2007. *Alternatywne zasilanie samochodów benzyną oraz gazami LPG i CNG*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa.
89. Romaniszyn K. 2009. *Gaz ziemny jako paliwo samochodowych silników spalinowych*. Silniki Spalinowe, 48: 316–325.
90. Różycki A. 2010. *Analysis of performances of a dual-fuel turbocharged compression ignition engine*. Journal of KONES, 17(3): 393–399.
91. Saito H., Kawabata Y., Sakurai T. 2000. *Study on the lean burn gas engine ignited by pilot fuel injection (part 4)*. Annual Technical Report Digest, 10.
92. Sasikala K., Ramana Ch.V., Raghuvver Rao P. 1992. *Photoproduction of hydrogen from the waste water of a distillery by Rhodobacter sphaeroides O.U. 001*. International Journal of Hydrogen Energy, 17(1): 23–27.
93. Skorek J., Kalina J. 2005. *Gazowe układy kogeneracyjne*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa.
94. Sorathia H.S., Yadav H.J. 2012. *Energy analyses to a CI-engine using diesel and bio-gas dual fuel – a review study*. International Journal of Advanced Engineering Research and Studies, 1(2): 212–217.

95. Stelmasiak Z. 2001. *Wpływ wielkości dawki inicjującej oleju napędowego na parametry pracy dwupaliwowego silnika zasilanego olejem napędowym i gazem ziemnym*. Journal of KONES, 8(3-4): 285-293.
96. Stelmasiak Z. 2003. *Studium procesu spalania gazu w dwupaliwowym silniku o zapłonie samoczynnym zasilanym gazem ziemnym i olejem napędowym*. Rozprawy Naukowe 5. Wydawnictwo Akademii Techniczno-Humanistycznej. Bielsko-Biała.
97. Stelmasiak Z. 2011. *Sterowanie spalaniem w dwupaliwowym silniku ZS przez podział dawki inicjującej*. Silniki Spalinowe, 50(3): 1-7.
98. Stelmasiak Z. 2013. *Dwupaliwowe silniki o zapłonie samoczynnym*. Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji. Radom.
99. Stelmasiak Z., Larisch J., Pietras D. 2015. *The influence of natural gas additive on the smoke level generated by diesel engines*. Combustion Engines, 161(2): 78-88.
100. Stelmasiak Z., Matyasik M. 2013. *Exhaust emissions of dual fuel self-ignition engine with divided initial dose*. Combustion Engines, 52(3): 944-952.
101. Sutkowski M., Latvasalo T. 2007. *The 20V23SG – a high-efficiency lean-burn gas engine for highly efficient Wartsila gas power plants*. Combustion Engines, SC1: 27-38.
102. Szczurowski K., Radkowski S., Walczak D., Zieliński Ł. 2015. *The effect of addition of LPG and camelina oil esters on noise and vibration in a dual fuel CI engine*. Diagnostyka, 15(4): 53-58.
103. Szénásy S.V. 1943. *Generatorbetrieb*. Richard Carl Schmidt & Co. Berlin.
104. Szwaja S. 2009. *Hydrogen rich gases combustion in the IC engine*. Journal of KONES, 16(4): 447-454.
105. Szwaja S., Grab-Rogaliński K. 2009. *Hydrogen combustion in a compression ignition diesel engine*. International Journal of Hydrogen Energy, 34(10): 4413-4421.
106. Szwaja S., Tutak W., Grab-Rogaliński K., Jamrozik A., Kociszewski A. 2012. *Selected combustion parameters of biogas at elevated pressure-temperature conditions*. Combustion Engines, 1(148): 40-47.
107. Śmieja M., Wierzbicki S. 2012. *The concept of an integrated laboratory control system for a dual-fuel diesel engine*. Journal of KONES, 19(3): 451-458.
108. Śmieja M., Wierzbicki S., Mamala J. 2013. *Sterowanie dawką wtryskiwanego paliwa w układzie Common Rail z wykorzystaniem środowiska LabView*. Silniki Spalinowe, 154(3): 542-548.
109. Tomita E., Kawahara N., Piao Z., Fujita Z. 2001. *Hydrogen combustion and exhaust emissions ignited with diesel oil in dual fuel engine*. SAE Technical Paper 2001-01-3503.
110. Tutak W., Jamrozik A. 2014. *Generator gas as a fuel to power a diesel engine*. Thermal Science, 18(1): 205-216.
111. Van Ga B., Hai N.V., Tu B.T.M., Van Hung B.L. 2015. *Utilization of poor biogas as fuel for hybrid biogas-diesel dual fuel stationary engine*. International Journal of Renewable Energy Research, 5(4): 1007-1015.

112. Warnatz J. 1992. *Resolution of gas phase and surface combustion chemistry into elementary reactions*. 24th Symposium (International) on Combustion, 24(1): 553–579.
113. Wei L., Geng P. 2016. *A review on natural gas/diesel dual fuel combustion, emissions and performance*. Fuel Processing Technology, 142: 264–278.
114. Wierzbicki S. 2012. *Biogas as a fuel for diesel engines*. Journal of KONES, 19(3): 477–482.
115. Wierzbicki S. 2013. *Analysis of the effect of the chemical composition of low calorific gaseous fuels on workload concentration in an engine's combustion chamber*. Journal of Polish CIMAC, 8: 89–96.
116. Wierzbicki S., Mikulski M., Śmieja M. 2015. *Effect of CO₂ content in CNG on the combustion process in a dual-fuel compression ignition engine*. Combustion Engines, 162(3): 91–101.
117. Wierzbicki S., Śmieja M. 2012. *The concept of an integrated laboratory control system for a dual-fuel diesel engine*. Journal of KONES, 19(3): 451–458.
118. Wierzbicki S., Śmieja M. 2014. *Sterowanie układem zasilania silnika o zapłonie samoczynnym w środowisku rapid-prototyping z wykorzystaniem LabView*. Pomiar, Automatyka, Kontrola, 60(11): 1049–1052.
119. Wierzbicki S., Śmieja M., Grzeszczyk R. 2013. *Zintegrowane sterowanie stanowiskiem badawczym silników o ZS w środowisku fast prototyping*. Combustion Engines, 154(3): 536–541.
120. Wierzbicki S., Śmieja M., Mikulski M., Pięta A. 2014. *Effect of pilot charge size and biogas composition on the operating efficiency of a dual-fuel compression-ignition engine*. Journal of KONES, 21(3): 279–284.
121. Wierzbicki S., Śmieja M., Pięta A. 2013. *Preliminary tests on an integrated laboratory control system for the feeding system of a dual-fuel diesel engine and its load*. Journal of KONES, 20(2): 393–399.
122. Wołoszyn R. 2008. *Dual fuel turbocharged CI engine equipped with Common Rail system fuelled with natural gas and diesel oil*. Journal of KONES, 15(4): 613–620.
123. Yanmar. 2007. *Service manual engines LN series*. Yanmar Co., Ltd.
124. Yao M., Zhang Q., Zheng Z., Zhang P. 2009. *Experimental study of effects of oxygen concentration on combustion and emissions of diesel engine*. Science in China. Series E: Technological Science, 52(6): 1527–1534.
125. Yoon S.H., Lee C.S. 2011. *Experimental investigation on the combustion and exhaust emission characteristics of biogas-biodiesel dual-fuel combustion in a CI engine*. Fuel Processing Technology, 92(5): 992–1000.
126. Zabłocki M. 1969. *Dwupaliwowe silniki o zapłonie samoczynnym napędzane paliwem ciekłym i gazowym*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa.
127. [Online] <<http://autoflesz.com/nowe-technologie-lpg/941-system-bezpo%C5%9Bredniego-wtrysku-paliwa-w-fazie-ciek%C5%82ej-do-slnik%C3%B3w-fsi,tsi-i-tfsi.html>>, dostęp: 24.02.2016.
128. [Online] <<http://lemvigbiogas.com/>>, dostęp: 23.02.2016.

129. [Online] <<http://www.auto-swiat.pl/eksploatacja/test-instalacji-lpg-do-auta-z-bezposrednim-wtryskiem-paliwa/r6phq>>, dostęp: 10.03.2016.
130. [Online] <<http://www.euroserv-er.org/pdf/baro200b.pdf>>, dostęp: 25.02.2016.
131. [Online] <<http://www.gzw.pl/wtrysk-bezposredni-i-lpg.html>>, dostęp: 17.03.2016.
132. [Online] <<http://www.valtra.pl/nowa-generacja-ciagnikow-napedzanych-na-biogaz>>, dostęp: 7.06.2016.
133. [Online] <http://www.4biomass.eu/document/news/AEBIOM_Biogas_Roadmap.pdf>, dostęp: 10.03.2016.