

THE COMBUSTION CONTROLLING IN THE DUAL FUEL CI ENGINE BY PILOT DOSE DIVISION

The paper presents the results of dual fuel engine fuelled by compressed natural gas and diesel oil as the initial dosage. The primary objective of this study was to determine the possibility of activating the combustion gas-air mixtures by a division of initial dosage. First dose injected to the angle of ignition timing as with the diesel oil supply was required to initiate the combustion process. Second dose is injected with a variable delay, the assumption still during the combustion process, was charged with maintaining the combustion gas mixture. Controlling the combustion process is achieved by changing the angle of delay of an extra dose injection. Division of initiation dose lowers the maximum combustion pressure, rate of pressure increase and a significant reduction the heat release rate. As a result of controlled combustion showed an increase in thermal engine efficiency and reduce NOx emissions. At the same time slightly deteriorated, CO and TCH.

Key words: *dual fuel, pilot dose, thermal efficiency, combustion parameters, natural gas*

Sterowanie spalaniem w dwupaliwowym silniku ZS przez podział dawki inicjującej

W pracy przedstawiono wyniki badań dwupaliwowego silnika zasilanego gazem ziemnym sprężonym i olejem napędowym jako dawką inicjującą. Podstawowym celem badań było określenie możliwości aktywizacji spalania mieszaniny gaz-powietrze przez podział dawki inicjującej. Dawka pierwsza wtryskiwana z kątem wyprzedzenia zapłonu jak przy zasilaniu samym olejem napędowym miała za zadanie zainicjowanie procesu spalania. Druga dawka wtryskiwana ze zmiennym opóźnieniem, w założeniu już w czasie trwania procesu spalania, miała za zadanie podtrzymanie spalania mieszaniny gazowej. Sterowanie procesem spalania osiągnęto przez zmiany kąta opóźnienia wtrysku dawki dodatkowej. Podział dawki inicjującej powoduje obniżenie ciśnień maksymalnych spalania, szybkości przyrostu ciśnienia oraz istotne zmniejszenie szybkości wydzielania ciepła. W efekcie sterowanego spalania zaobserwowano wzrost sprawności ogólnej silnika oraz zmniejszenie stężenia NOx w spalinach. Równocześnie nieznacznie pogorszeniu uległa emisja CO i TCH.

Słowa kluczowe: *silnik dwupaliwowy, dawka inicjująca, sprawność cieplna, parametry spalania, gaz ziemny*

1. Wstęp

Jednym z zasadniczych problemów silników dwupaliwowych jest zmniejszająca się sprawność cieplna przy częściowych obciążeniach. Związane jest to ze zubożeniem mieszaniny palnej i pogarszającymi się warunkami jej spalania. Przy małych dawkach inicjujących, prawie całe paliwo ciekłe odparowuje w czasie opóźnienia samozapłonu. Czas spalania dawki inicjującej jest bardzo krótki i przebiega gwałtownie. Dobre warunki zapłonu i spalania ma warstwa mieszaniny gaz-powietrze przylegająca do palącej się strugi paliwa ciekłego. W miarę zaniku spalania paliwa ciekłego i oddalania się frontu płomienia od strugi, proces spalania przebiega coraz wolniej. Niekorzystny wpływ ma tutaj chłodzące oddziaływanie ścianek cylindra. Przy ubogich mieszaninach gaz-powietrze może dochodzić do zaniku płomienia, co wpływa na sprawność i parametry ekologiczne silnika.

Podstawowym celem prezentowanej pracy było zbadanie możliwości aktywizacji spalania mieszaniny gazowej przez podział dawki inicjującej. Możliwość taką dają nowoczesne systemy wtryskowe typu Common Rail, powszechnie stosowane we współczesnych silnikach o zapłonie samoczynnym.

W przeprowadzonych badaniach dawkę oleju napędowego podzielono na dwie równe części wtryskiwane w różnym czasie. Dawka pierwsza wtryskiwana z kątem wyprzedzenia zapłonu jak przy zasilaniu samym olejem napędowym miała za zadanie zainicjowanie procesu spalania. Druga dawka wtryskiwana ze zmiennym opóźnieniem, w założeniu już w czasie trwania procesu spalania, miała za zadanie podtrzymanie procesu spalania mieszaniny gazowej. Sterowanie procesem spalania osiągnęto przez zmiany kąta opóźnienia wtrysku dawki dodatkowej.

W pracy przedstawiono wpływ podziału dawki na sprawność ogólną silnika i wybrane parametry procesu spalania.

2. Stanowisko badawcze i metodyka badań

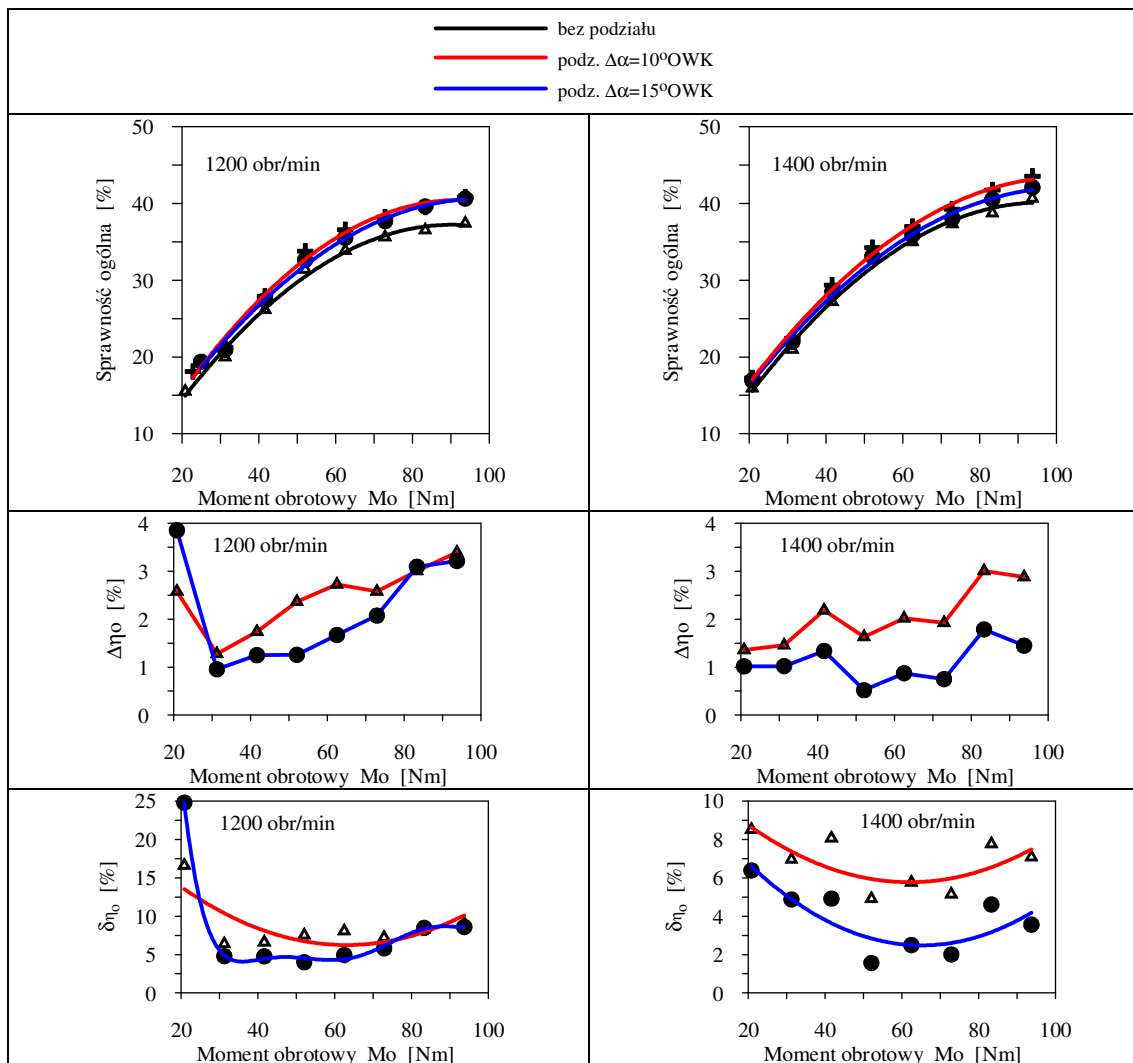
Badania przeprowadzono na jednocylindrowym silniku o zapłonie samoczynnym SB3.1. Dane techniczne silnika przedstawiono w tabeli 1. Dokładny opis stanowiska badawczego i zmiany dokonane w silniku można znaleźć we wcześniejszych publikacjach [4, 5, 6].

Tabela 1. Dane techniczne silnika SB3.1

Liczba cylindrów	1
Średnica cylindra	127 mm
Skok tłoka	146 mm
Objętość skokowa	1848 cm ³
Stopień sprężania	15,8
Moc znamionowa	22,8 kW
Prędkość obrotowa mocy znamionowej	2200 obr/min
Typ komory spalania	Wtrysk bezpośredni do toroidalnej komory w tłoku
Układ wtryskowy dawki inicjującej	Common Rail f-my Bosch
Wtryskiwacz ON firmy Bosch	0986435 004 090
Układ wtryskowy CNG	IC
Wtryskiwacz gazu Bosch	F465 151 72
Ciśnienie wtrysku gazu	1 MPa

W czasie prowadzonych badań stosowano stały kąt wyprzedzenia zapłonu 20°OWK przed GMP, taki jak przy zasilaniu samym olejem napędowym. Podział dawki realizowano przez podział czasu otwarcia wtryskiwacza układu Common Rail τ_{ow}

wg zasady: czas otwarcia wtryskiwacza dla dawki inicjującej $\tau_{ow1} = 0,5\tau_{ow}$, dla dawki dodatkowej $\tau_{ow2} = 0,5\tau_{ow}$. Wcześniejsze badania wykazały, że charakterystyka wydatku wtryskiwacza jest dokładnie liniowa, a wielkość wtryskiwanej dawki proporcjonalna do czasu otwarcia wtryskiwacza. Pozwoliło to przyjąć równość dawek inicjującej i dodatkowej $q_1 = q_2 = 0,5q_{on}$. Zastosowany sterownik umożliwia przeliczanie parametrów wtrysku na wartości kątowe w stosunku do GMP, co pozwala zachować wymagane wartości kąta wyprzedzenia wtrysku dawki inicjującej Θ_{ww} . Opóźnienie wtrysku dawki dodatkowej mierzono również w wartościach kątowych $\Delta\alpha$ liczonych od początku wtrysku dawki pierwszej. Należy zaznaczyć, że przy małych wartościach przerwy $\Delta\alpha$ wtryskiwacz elektromagnetyczny może się niecałkowicie zamykać, co powoduje, że zadawane opóźnienie dawki dodatkowej powoduje jedynie modulowanie natężenia wtryskiwanego paliwa, co potwierdziły badania na stanowisku bezsilnikowym. Modulacja ta wpływa jednak



Rys. 1. Porównanie sprawności silnika SB3.1 zasilanego dwupaliwowo z pojedynczą i dzieloną dawką inicjującą: $\Delta\eta_o$ – różnica bezwzględna sprawności, $\delta\eta_o$ – różnica względna sprawności

na przebieg pracy silnika, co potwierdziły badania hamowniane i analiza parametrów spalania.

Analizę parametrów spalania dokonano na podstawie obliczeń cieplnych w oparciu o rejestrowane wykresy indykatorowe. W obliczeniach wykorzystywano autorski program opracowany w Katedrze Tłokowych Silników Spalinowych ATH w Bielsku-Białej. Opis programu i metodykę obliczeń można znaleźć w pracach [7, 8].

3. Analiza wyników badań

Na rys. 1 przedstawiono porównanie sprawności, różnic bezwzględnych i różnic względnych sprawności silnika z niedzielną i dzieloną dawką inicjującą. Wartości różnic sprawności obliczono z wzorów:

$$\Delta\eta_o = \eta_{bp} - \eta_p \quad (1)$$

$$\delta\eta_o = \frac{\Delta\eta_o}{\eta_{bp}} \cdot 100\% \quad (2)$$

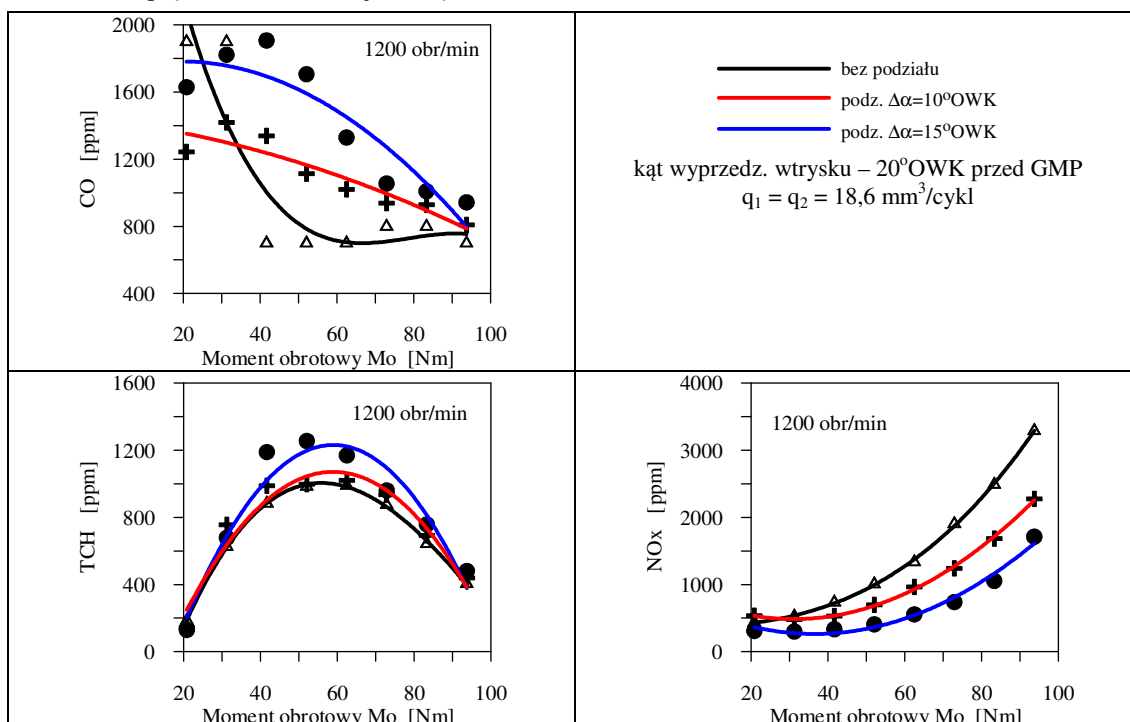
gdzie: $\Delta\eta_o$ – bezwzględna zmiana sprawności [%],
 $\delta\eta_o$ – względna zmiana sprawności [%],
 η_{bp} – sprawność silnika z niedzielną dawką inicjującą [%],
 η_p – sprawność silnika z dzieloną dawką inicjującą.

Podział dawki inicjującej powoduje zwiększenie sprawności silnika o 1÷3,5% jednostek bezwzględnych. Korzystniejsze wyniki uzyskano przy mniejszym kącie opóźnienia dawki dodatkowej. Różnice w analizowanych parametrach sprawności zależne są również od prędkości obrotowej. Zwiększanie

opóźnienia zapłonu wpływa niekorzystnie na sprawność silnika, zmniejszając różnice. Warto podkreślić jest jednak fakt, że dla obydwu badanych kątów opóźnienia 10 i 15°OWK silnik pracował z większymi sprawnościami od obserwowanych przy niedzielną dawkę inicjującą. Analiza rys. 1 wskazuje na znaczące różnice względne sprawności przy kącie opóźnienia drugiej dawki 10°OWK. Wynoszą one 10÷15% dla prędkości obrotowej 1200 obr/min i 8÷10% dla prędkości 1400 obr/min. Tak znaczący wzrost może świadczyć o istotnym zmniejszeniu zużycia energii przez silnik pracujący w zmiennych warunkach obciążenia.

Opóźnienie wtrysku oleju napędowego zwiększa nieznacznie stężenia tlenu węgla i sumarycznych węglowodorów TCH rys.2. Wynika to z pogorszenia warunków utleniania paliwa ciekłego w późniejszych fazach spalania. Potwierdzają to wyraźnie różnice w stężeniach CO i THC dla kątów opóźnienia 10 i 15°OWK.

Podział dawki korzystnie wpływa na stężenia NOx w spalinach, które wyraźnie maleją w miarę opóźnienia wtrysku dawki dodatkowej. Wynika to z dwóch podstawowych powodów, obniżenia maksymalnych temperatur w strefach utleniania paliwa ciekłego oraz zmniejszenia szybkości utleniania w strefach o zwiększonych stężeniach dwutlenku węgla (dawka dodatkowa jest utleniana w warunkach zwiększonego EGR). Dodatkowy wpływ może mieć również fakt zmniejszenia stężenia tlenu w strefach reakcji spowodowany częściowym wypaleniem paliwa. Sugeruje to, że na emisję tlenków azotu w silnikach dwupaliwowych znacząco wpły-

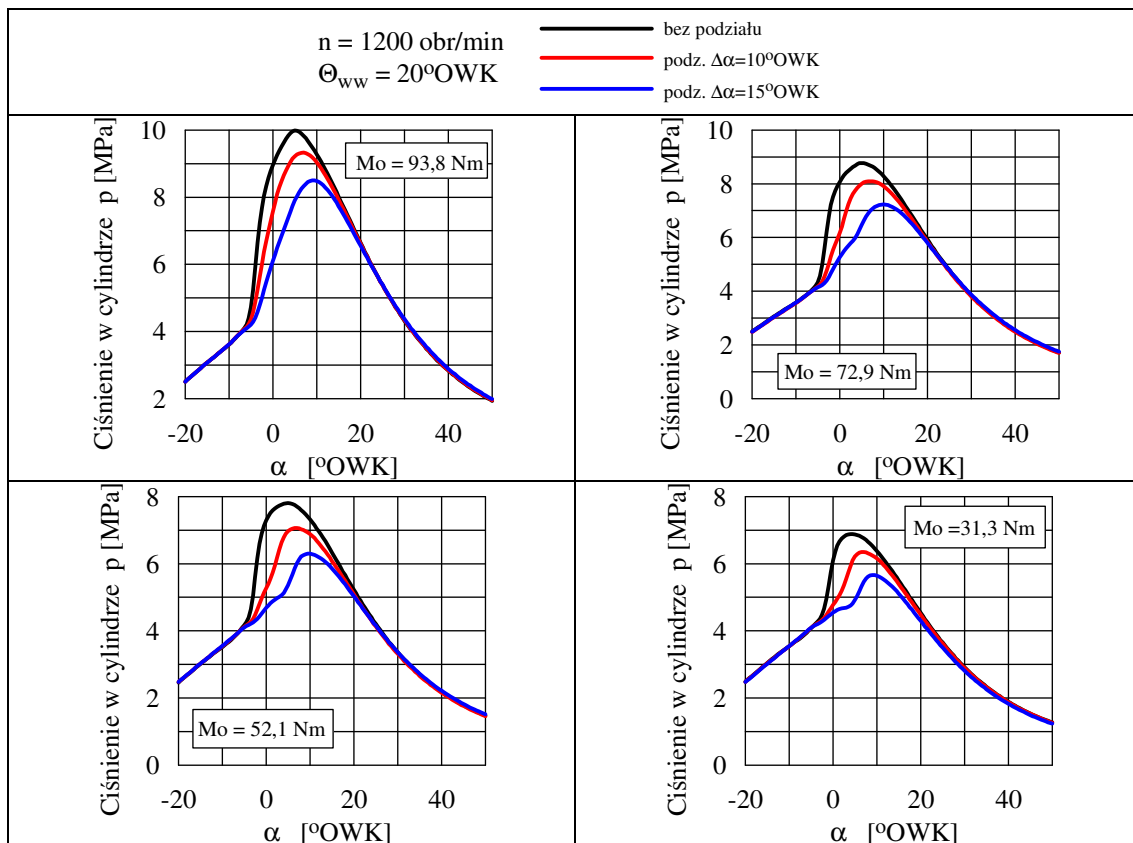


Rys. 2. Porównanie stężenia toksycznych składników spalin silnika SB3.1 zasilanego dwupaliwowo z pojedynczą i dzieloną dawką inicjującą

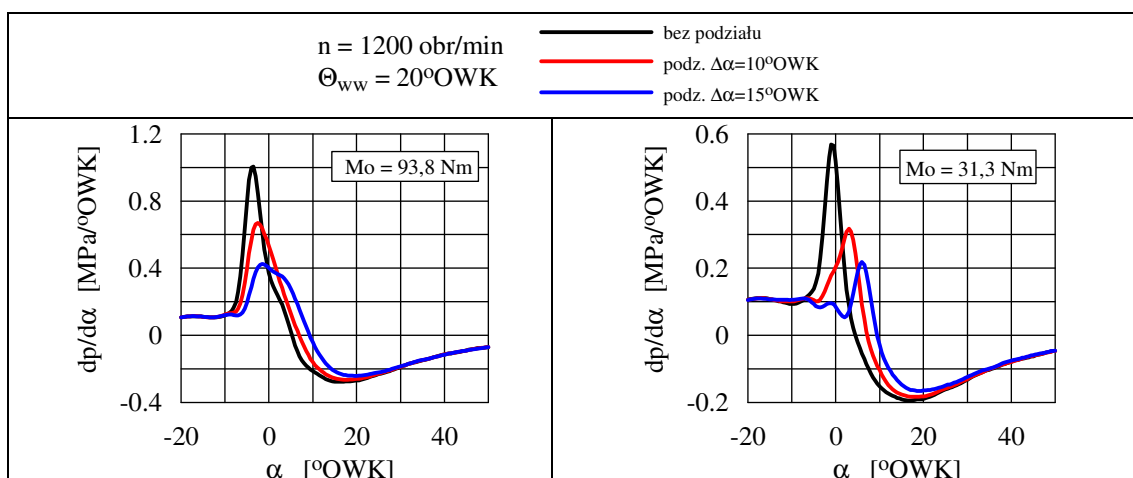
wają warunki utleniania paliwa ciekłego. Równocześnie uzyskane wyniki w zakresie stężeń NOx sugerują, że podział dawki inicjującej i właściwie dobrany kąt wtrysku dawki dodatkowej mogą być istotnymi narzędziami zmniejszenia emisji tlenków azotu przez doładowane silniki dwupaliwowe.

Zastosowanie dzielonej dawki inicjującej powoduje zmniejszenie maksymalnych ciśnień spalania wraz ze zwiększaniem opóźnienia wtrysku dawki inicjującej rys. 3. Równocześnie przebieg ciśnienia

w początkowej fazie spalania jest opóźniony w stosunku do przebiegu z dawką niedzieloną. W konsekwencji punkt występowania maksymalnego ciśnienia jest przesunięty w kierunku późniejszych kątów po GMP. Charakter opisywanych zmian ciśnienia występuje w całym zakresie zmian obciążenia silnika. Należy jednak podkreślić, że przy częściowych obciążeniach (moment obrotowy 52,1 i 31,3 Nm) wpływ podziału i kąta opóźnienia na początkową fazę spalania jest wyraźniejszy, co



Rys. 3. Zmiany ciśnienia w cylindrze w czasie spalania w silniku SB.1 zasilanym dwupaliwowo z pojedynczą i dzieloną dawką inicjującą: zmienne obciążenie silnika, kąty między dawkami 10 i 15°OWK



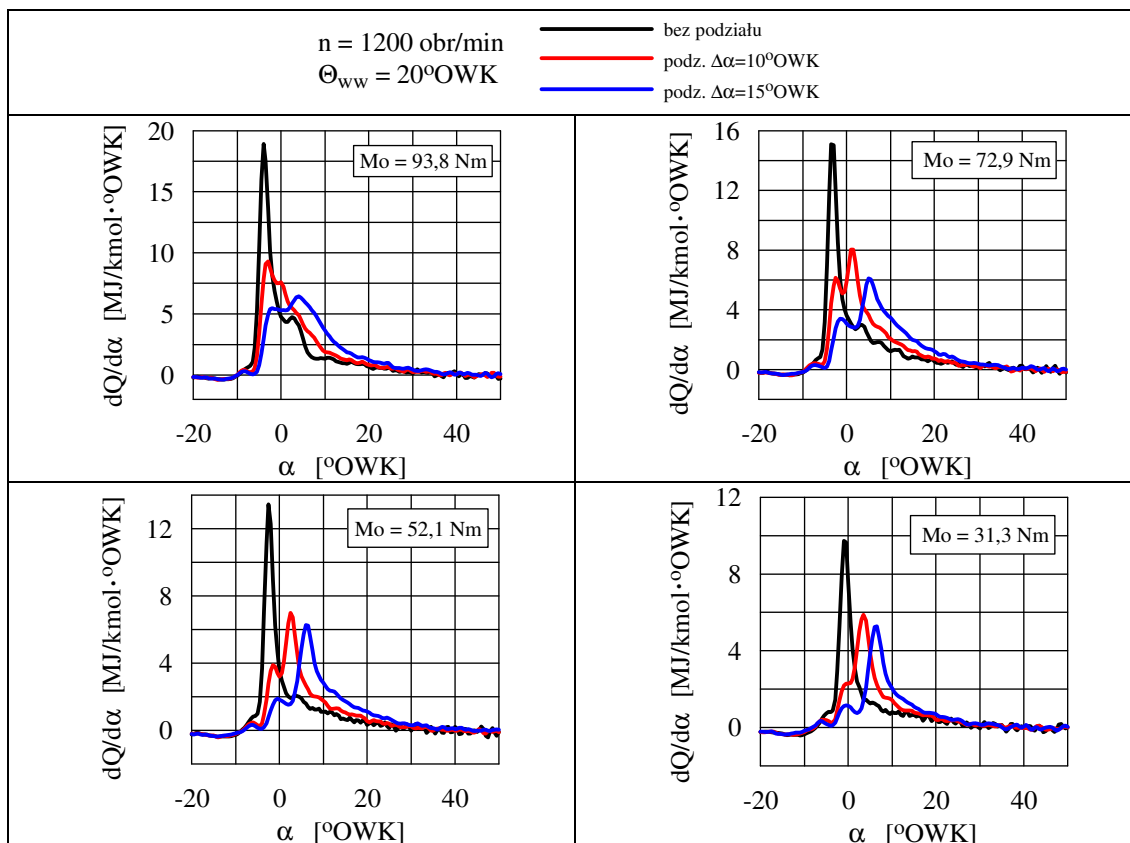
Rys. 4. Zmiany szybkości przyrostu ciśnienia w cylindrze w czasie spalania w silniku SB.1 zasilanym dwupaliwowo z pojedynczą i dzieloną dawką inicjującą: zmienne obciążenie silnika, kąty między dawkami 10 i 15°OWK

uwidacznia wyraźne przegięcie linii ciśnienia.

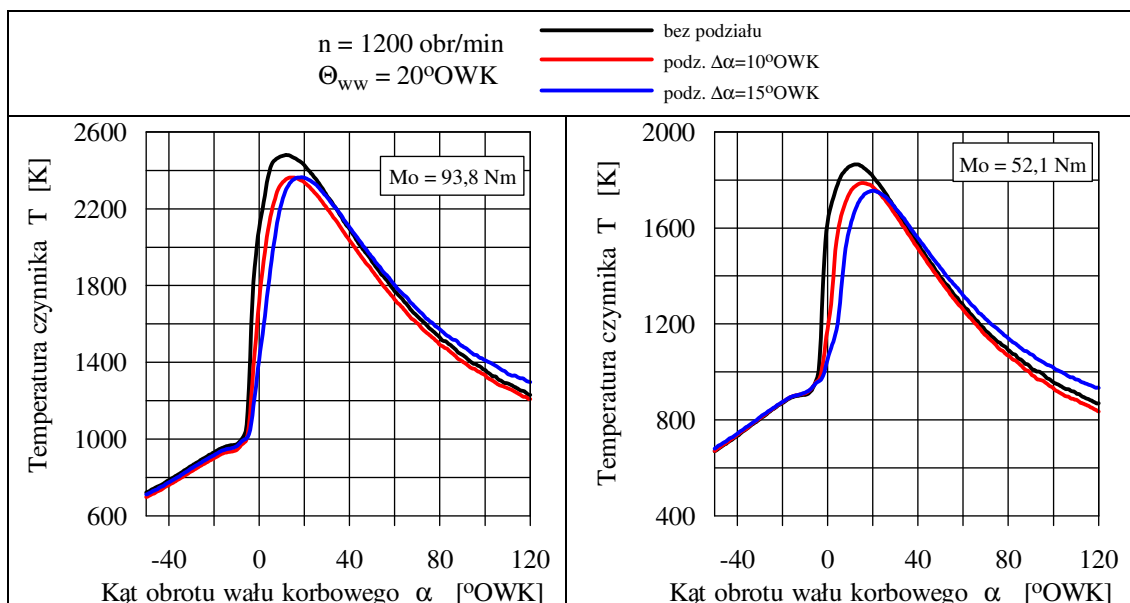
Podział dawki inicjującej powoduje cichszą pracę silnika dwupaliowego spowodowaną zmniejszeniem szybkości narastania ciśnienia w czasie spalania rys. 4. Szczególnie wyraźne jest to przy ubogich mieszaniach w zakresie częściowych

obciążeń silnika ($M_o=31,3$ Nm).

Omawiane wyżej zjawiska wynikają ze zmian dynamiki wydzielania ciepła przy dzielonej dawce inicjującej pokazanych na rys. 5. W przypadku zastosowania pojedynczej dawki występuje jedno maksimum. Wynika to z szybkiego spalania oleju



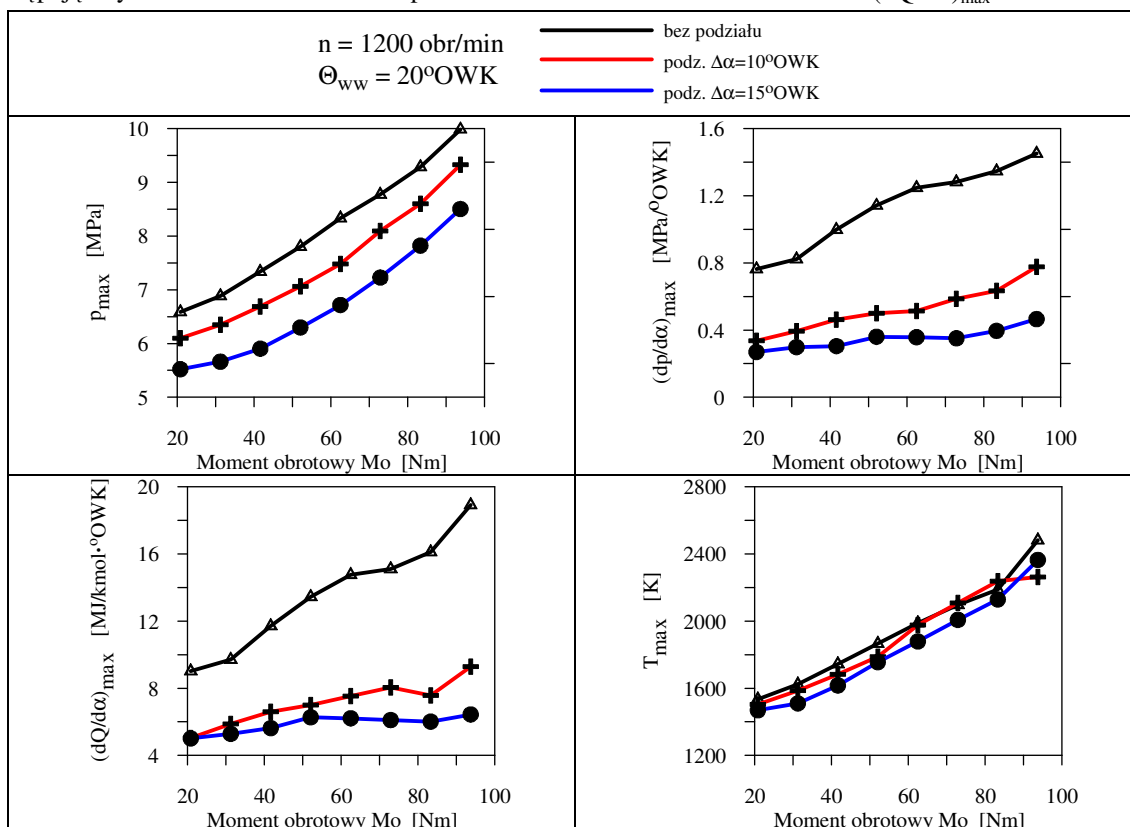
Rys. 5. Zmiany szybkości wydzielania ciepła w czasie spalania w silniku SB.1 zasilanym dwupaliowo z pojedynczą i dzieloną dawką inicjującą: zmienne obciążenie silnika, kąty między dawkami 10 i 15° OWK



Rys. 6. Zmiany średniej temperatury czynnika w czasie spalania w silniku SB.1 zasilanym dwupaliowo z pojedynczą i dzieloną dawką inicjującą: zmienne obciążenie silnika, kąty między dawkami 10 i 15° OWK

napędowego w kinetycznej fazie spalania, odparowanego w czasie opóźnienia samozapłonu. Po zastosowaniu dawki dzielonej maksymalna wartość szybkości wydzielania ciepła jest prawie dwukrotnie mniejsza, a dodatkowo przesunięta w kierunku późniejszych faz spalania. Na krzywej $dQ/d\alpha$ występują wyraźne dwa maksima co potwierdza

Przebiegi maksymalnych wartości analizowanych parametrów spalania w funkcji obciążenia silnika przedstawiono na rys. 7 a położenie maksimum względem GMP na rys. 8. Szczególnie zwraca uwagę istotne zmniejszenie wartości maksymalnej szybkości wydzielania ciepła $(dQ/d\alpha)_{\max}$ i szybkości narastania ciśnienia $(dp/d\alpha)_{\max}$.



Rys. 7. Zmiany maksymalnych wartości parametrów spalania w silniku SB.1 zasilanym dwupaliwowo z pojedynczą i dzieloną dawką inicjującą w funkcji obciążenia silnika

założone w badaniach spalanie dawek w różnym czasie.

Mimo jednakowych wartości wtryskiwanych dawek maksymalna dynamika wydzielania ciepła wyraźnie maleje wraz ze zwiększaniem kąta opóźnienia wtrysku dawki dodatkowej. Opisane zmiany dynamiki spalania są przyczyną opisywanego wcześniej zmniejszenia stężenia tlenków azotu.

Podział dawki inicjującej powoduje zmniejszenie maksymalnych temperatur czynnika w komorze spalania rys. 6. Równocześnie analiza krzywych wskazuje, że przy prawidłowo dobranym kącie opóźnienia wtrysku dawki dodatkowej, podział i opóźnienie dynamiki spalania nie wpływa na poziom temperatur w późniejszych fazach spalania (częściowe obciążenia $Mo=52,1$ NM) – w zakresie kątów $60\div 120^{\circ}OWK$ przebiegi temperatur linia czarna i czerwona są prawie identyczne. Zbyt duże opóźnienie dynamiki spalania (linia niebieska) może jednak prowadzić do wzrostu temperatur czynnika w okresie dopalania i obciążenia cieplnego elementów silnika.

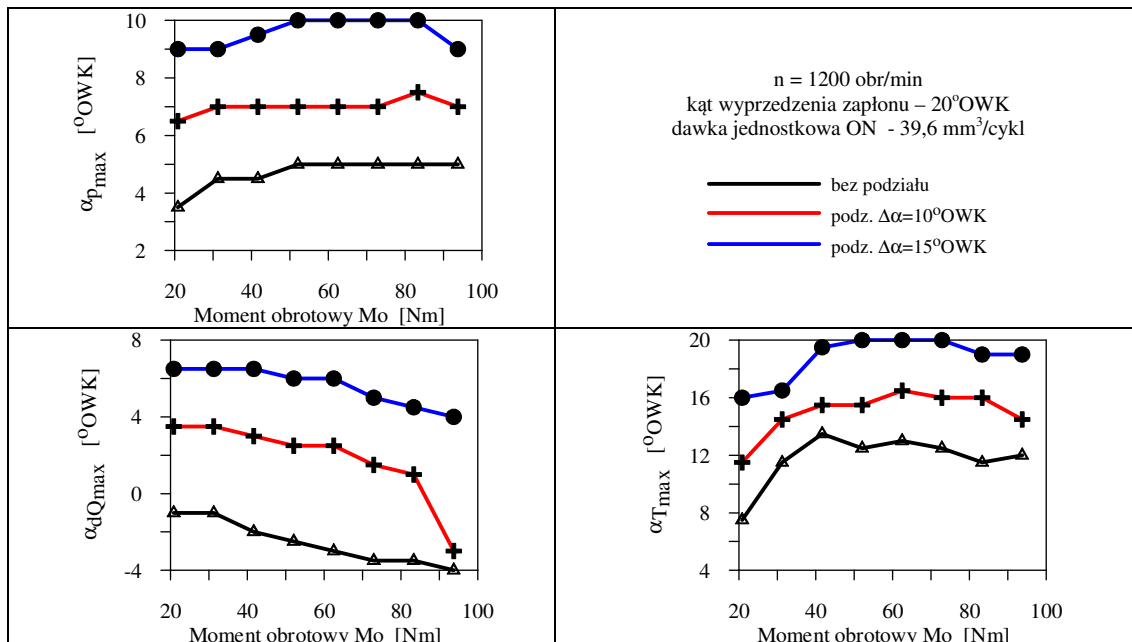
4. Wnioski

Przeprowadzone badania i zaprezentowane wyniki pozwalają sformułować następujące wnioski o charakterze ogólnym:

- Podział dawki oleju napędowego, inicjującej spalanie gazu w silnikach dwupaliwowych jest dobrym narzędziem sterowania procesem spalania w tych silnikach. Poprzez zmiany proporcji dawek inicjującej spalanie i dodatkowej podtrzymującej spalanie gazu oraz kąta opóźnienia wtrysku dawki dodatkowej możemy optymalizować parametry silnika wg różnych kryteriów jak sprawność ogólna czy minimalna emisja NOx.
- Do korzystnych zjawisk związanych z podziałem dawki należą: wzrost sprawności ogólnej silnika, zmniejszenie emisji NOx w spalinach oraz spokojniejsza i mniej hałaśliwa praca silnika. Do niekorzystnych należy zaliczyć nieznaczny wzrost emisji CO i TCH oraz przy niewłaściwym doborze parametrów wtrysku dawki dodatkowej możliwość wzrostu obciążenia cieplnego silnika.

- Uzyskane wyniki zachęcają do aplikacji systemu w nowoczesnych silnikach dwupaliwowych. Jego zastosowanie powinno być poprzedzone optymalizacją parametrów dawki dodatkowej w całym polu pracy silnika.

- Przedstawione badania będą kontynuowane a ich wyniki publikowane w przyszłości.



Rys. 8. Zmiany położenia maksymalnych parametrów spalania względem GMP w silniku SB3.1 zasilanym dwupaliwowo

Bibliography/Literatura

- [1]. Zua CH., Zhao J.: Development of Diesel Engines Fuelled with Natural Gas, SAE Paper No. 2001-01-3505, 2001.
- [2]. Clark N.N., Atkinson Chr.M., Atkinson R.J., McDaniel T.I., ParkT.: Optimized Emission Reduction Strategies for Dual Fuel Compression Ignition Engines Running on natural Gas and Diesel. www.cemr.wvuedu/englab/project/navistar.html, 2002.
- [3]. Friedemann Z.: Gasmotoren, Vogel Buchverlag Würzburg, 2001.
- [4]. Stelmasiak Z., Larisch J., Gilowski T., Matyjasik M.: Możliwości poprawy składu mieszaniny gazowej przez dławienie powietrza przy częściowych obciążeniach silnika dwupaliwowego, *Archiwum Motoryzacji* 1/2007, str. 43-57, 2007.
- [5]. Stelmasiak Z., Larisch J., Gilowski T.: Możliwości sterowania dawką inicjującą oleju napędowego w dwupaliwowych silnikach ZS wyposażonych w system Common Rail. International Congress on Combustion Engines PTNSS KONGRES-2005 „THE DEVELOPMENT OF COMBUSTION ENGINES”, Szczyrk 25-28.09.2005, Paper No. PTNSS P05-C004, 2005.
- [6]. Stelmasiak Z.: Analiza wpływu składu mieszaniny gaz-powietrze na wybrane parametry dwupaliwowego silnika o wtrysku bezpośrednim. *Silniki Spalinowe* nr 3/2005.
- [7]. Stelmasiak Z.: Analysis Of Combustion Phenomena In Dual Fuel Engine Fed With Natural Gas (CNG). *Fisita 2002 World Automotive Congress*, Paper No. F02 V030, 2002.
- [8]. Stelmasiak Z.: Studium spalania gazu w dwupaliwowym silniku o zapłonie samoczynnym zasilanym gazem ziemnym i olejem napędowym., 2004.

Mr Zdzisław Stelmasiak, DSc., DEng. – Professor in the Faculty of Mechanical Engineering at University of Bielsko-Biała

Dr hab. inż. Zdzisław Stelmasiak prof. nzw. – profesor na Wydziale Budowy Maszyn i Informatyki Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej.

