

STELMASIAK Zdzisław¹
MATYJASIK Marcin²

Możliwości wykorzystania dwupaliwowego silnika ZS zasilanego głównie gazem ziemnym CNG w transporcie kołowym

Silnik dwupaliwowy, gaz ziemny sprężony, sprawność ogólna, podział dawki, wydzielanie ciepła, spalanie, toksyczność

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań dwupaliwowego silnika zasilanego gazem ziemnym sprężonym i olejem napędowym jako dawką inicjującą. Podstawowym celem badań było określenie możliwości poprawy parametrów pracy silnika 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 osiągnano przez zmiany kąta opóźnienia wtrysku dawki dodatkowej. Podział dawki inicjującej powoduje istotne zmniejszenie maksymalnej szybkości wydzielania ciepła w czasie spalania przy równoczesnym zwiększeniu średniej szybkości spalania mieszaniny gaz-powietrze. W efekcie zaobserwowano wzrost sprawności ogólnej silnika, zmniejszenie stężenia NO_x w spalinach i ciśnień maksymalnych spalania. Równocześnie nieznacznie pogorszeniu uległa emisja CO i TCH.

THE POSSIBILITIES OF USING DUAL FUEL CI ENGINE FUELLED PRIMARILY BY NATURAL GAS CNG IN VEHICLES

Abstract

The paper present a test results of dual fuel engine run on natural gas and diesel oil injected as a pilot dose. Determination of possibilities of engine's operational parameters improvement through division of the pilot dose was the main objective of the presented research. The first dose injected at ignition advance angle, the same as in case of operation on diesel oil only, has as its task to initiate process of combustion. The second dose, injected with changing delay when, as assumed, phase of combustion process is already in progress, has as its task to sustain combustion of gaseous mixture. Control of combustion process was attained through changes of injection delay angle of additional dose. Division of pilot dose effects in a considerable reduction of maximal heat release rate during combustion with simultaneous growth of average combustion rate of gas-air mixture. In result, it has been observed a growth of overall efficiency of the engine, reduction of NO_x concentration in exhaust gases, and reduction of maximal combustion pressures. Simultaneously, emission of the CO and TCH was slightly worsened.

1. WSTĘP

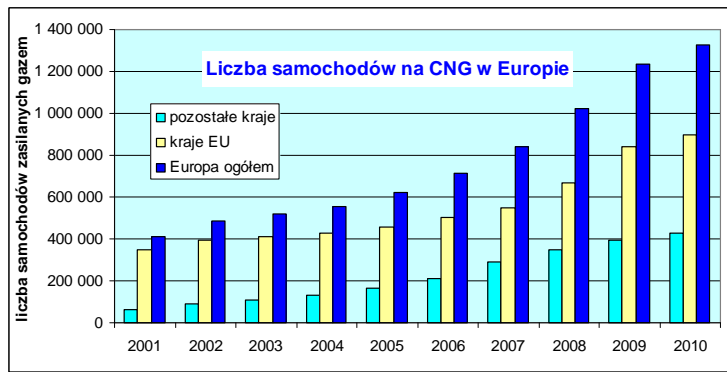
Gaz ziemny z uwagi na znaczne zasoby i niewielkie koszty przerobu stanie się w następnych dekadach drugim ważnym paliwem silnikowym po paliwach ropopochodnych. Decyduje o tym jego cena i przyjazne własności do zastosowań silnikowych [1, 3, 9, 10]. Historia zasilania gazowego jest tak długa jak historia silnika tłokowego, bowiem pierwsze silniki o zapłonie iskrowym były zasilane gazem. Korzystniejsze własności w zakresie magazynowania paliw ciekłych, odkrycie nowych złóż ropy naftowej oraz niskie ceny powodowały, że rozwój silników był dokonywany w zakresie zasilania paliwami ciekłymi. Obecny stan techniki silnikowej jest tym faktem obciążony. Powoduje to pewną niechęć zarówno u silnikowców jak i w eksploatacji do stosowania paliw gazowych. Obawy te są niczym nieuzasadnione, bowiem prawidłowo zaprojektowany współczesny silnik gazowy może mieć podobne własności do silników zasilanych paliwami tradycyjnymi. Dotyczy to w szczególności jego osiągow i trwałości. Równocześnie istotnej poprawie ulegają własności ekologiczne, które obecnie są istotną barierą w rozwoju silników zarówno ZI jak i ZS.

Rozwój zasilania gazowego w Europie będzie wymuszony przez przepisy Parlamentu Unii Europejskiej, które zakładają stopniowe wprowadzanie gazu ziemnego sprężonego CNG do zasilania silników. Przewiduje się, że udział energetyczny gazu ziemnego do 2020 roku przekroczy 12% całości paliw silnikowych. W zastosowaniach do silników trakcyjnych będzie stosowany gaz ziemny sprężony CNG co wynika z rozwiniętej sieci gazowej i tradycji historycznej stosowania postaci gazowej tego paliwa.

Liczba samochodów europejskich zasilanych CNG wyraźnie rośnie co pokazuje rys. 1. Obecnie w Europie ok. 1.400.000 samochodów jest zasilanych CNG. Równocześnie widoczna jest istotna przewaga samochodów w państwach UE gdzie istnieją korzystne przepisy fiskalne w tym zakresie.

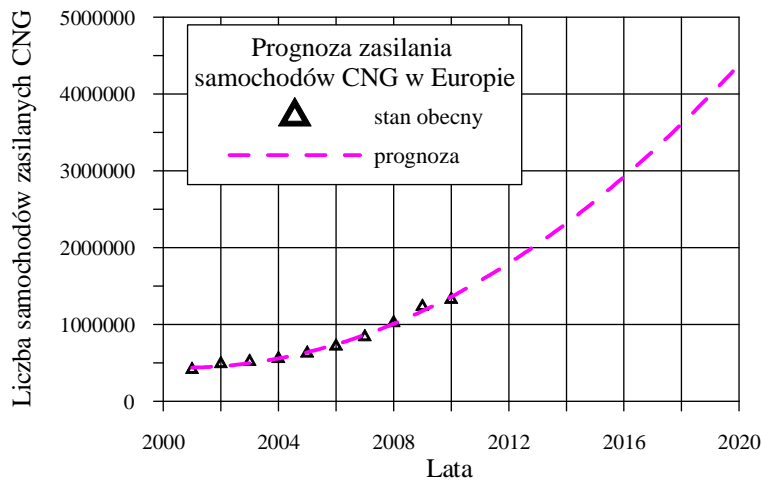
¹Akademia Techniczno Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, 43-309 Bielsko-Biała, ul. Willowa 2, Tel: +48 33 82-79-216, E-mail: zstelmasiak@ath.bielsko.pl

²Akademia Techniczno Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, 43-309 Bielsko-Biała, ul. Willowa 2, Tel: + 48 33 82-79-244, E-mail: marcin.matyjasiak@op.pl



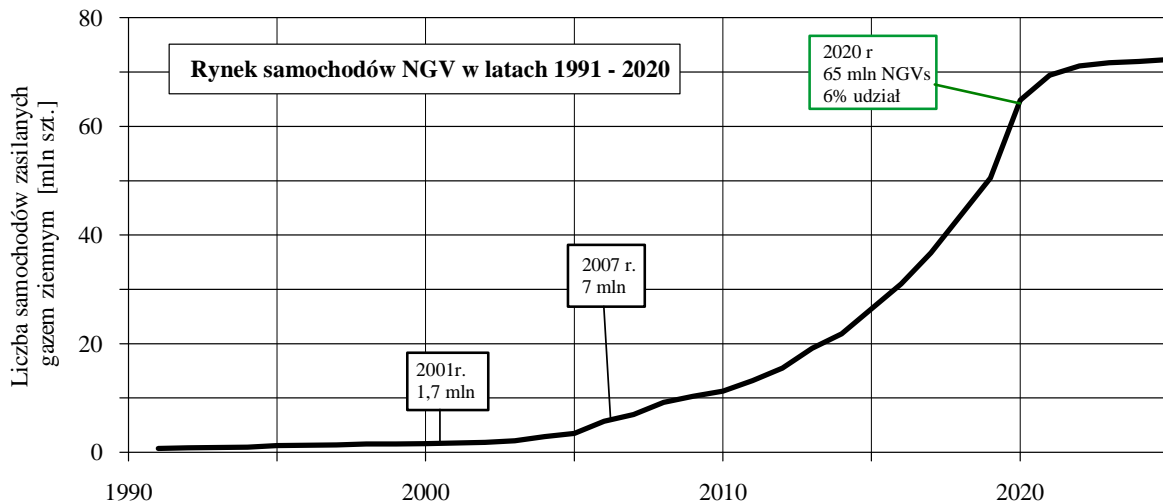
Rys. 1. Liczba samochodów zasilanych CNG w Europie z uwzględnieniem państw Unii Europejskiej [10]

Perspektywy rozwoju zasilania gazowego pokazane na rys. 2 przewidują, że w roku 2020 liczba samochodów w Europie zasilanych CNG przekroczy 4 mln. Tak znaczny postęp będzie możliwy jedynie przy równoczesnym rozwoju stacji zasilania CNG równomiernie rozproszonych po całym terytorium Europy. W niektórych państwach (RFN, Francja, Włochy, Hiszpania) już obecnie obserwuje się znaczną dynamikę w tym zakresie. Istotny wpływ na zasilanie CNG będą miały również przyjazne podatki akcyzowe, które powinny uwzględnić proekologiczne własności tego paliwa.



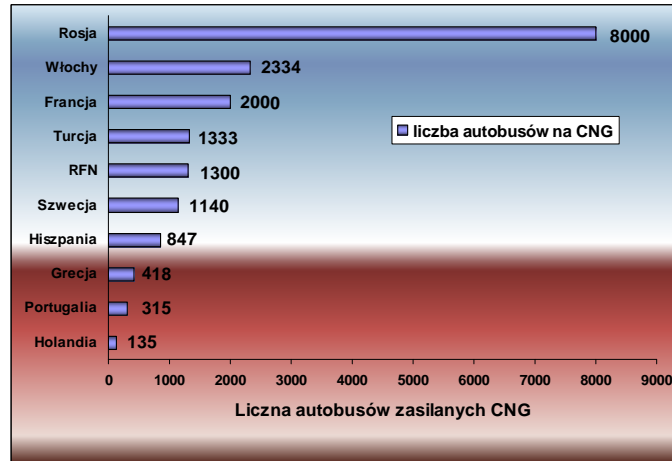
Rys. 2. Prognozy rozwoju zasilania pojazdów samochodowych CNG w Europie

Również na świecie obserwuje się dynamiczny rozwój zasilania gazowego co pokazuje rynek samochodów NGV (Natural Gas Vehicle) przedstawiony na rys. 3. Obecnie ok. 12,5 mln pojazdów jest zasilanych gazem ziemnym. W statystkach tych uwzględniono łącznie systemy o dużym ciśnieniu w zbiornikach (>20 MPa) CNG jak i o małym nadciśnieniu 0,05÷0,4 MPa. Przewiduje się, że do roku 2020 ponad 65 mln samochodów będzie zasilanych gazem ziemnym, co powinno stanowić ok. 6% ogółu. Oznacza to wzrost 5,2-krotny samochodów NGV w nadchodzącej dekadzie. Wzrost ten jest zgodny z światowym trendem poszukiwania paliw alternatywnych do paliw ropopochodnych.



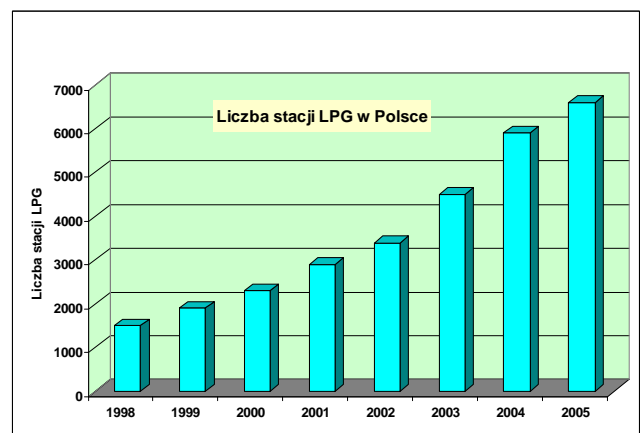
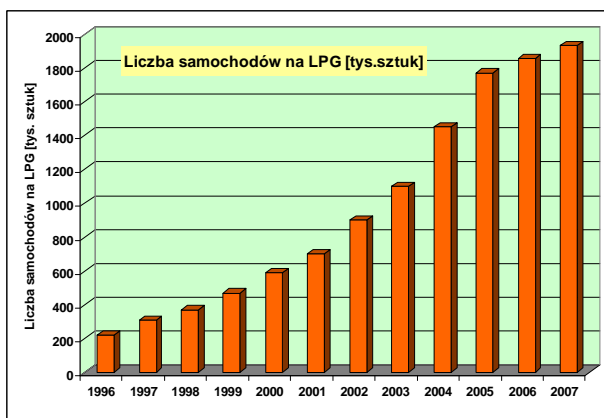
Rys. 3. Światowy rynek samochodów NGV (Natural Gas Vehicle) zasilanych gazem ziemnym: obejmuje zarówno zasilanie CNG (wysokie ciśnienia butli) jak i zasilanie niskoprężne [9]

Interesująca jest znaczna liczba autobusów zasilanych CNG w niektórych krajach europejskich przedstawiona na rys. 4. Z uwagi na znaczne przebiegi roczne autobusów, zastosowanie zasilania gazowego powoduje duże oszczędności paliw płynnych. Istotne znaczenie ma również fakt, że większość autobusów eksploatowanych jest w miastach co przyczynia się do zmniejszenia zanieczyszczeń środowiska, szczególnie cząstek stałych, bowiem autobusy są z reguły napędzane silnikami z zapłonem samoczynnym. Wprowadzenie zasilania CNG w tej flocie pojazdów jest równocześnie ułatwione z uwagi na duże bazy autobusowe i ustalone trasy przebiegów dziennych. Przodującym krajem w zakresie autobusów zasilanych CNG jest Rosja, w której eksploatowanych jest ok. 8000 autobusów. Daje to najwyższy wskaźnik zasilania gazowego środków transportu publicznego przypadający na liczbę mieszkańców, 5,6/100 tys.



Rys. 4 Liczba autobusów zasilanych CNG w niektórych krajach europejskich [9]

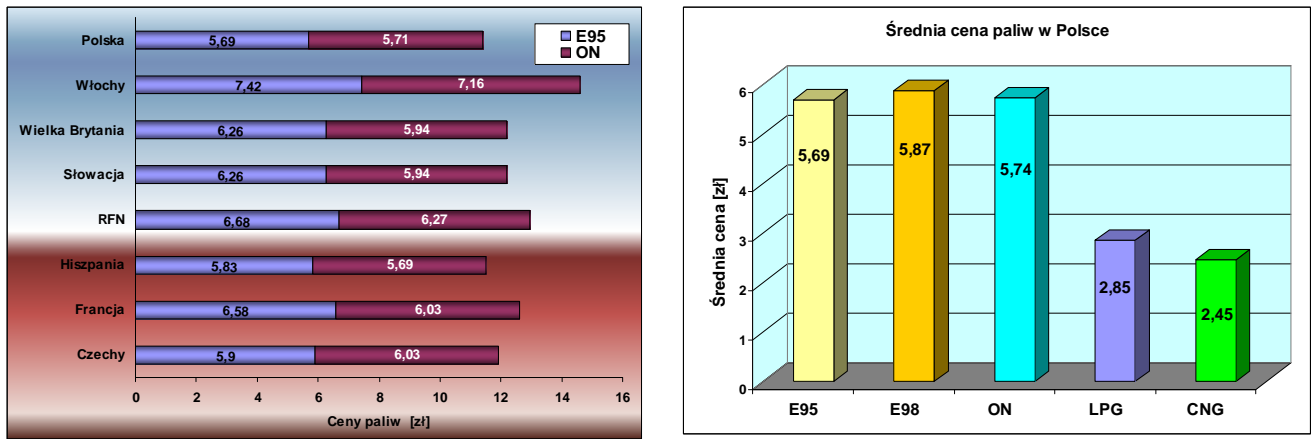
W Polsce zasilanie gazowe kojarzone jest najczęściej z pojazdami napędzanymi LPG, w którym jesteśmy europejskim liderem. Szacuje się, że obecnie eksploatowanych jest ponad 2 mln samochodów zasilanych LPG, głównie osobowych. Dynamikę rynku samochodów na LPG oraz stacji tankowania przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Zmiany liczby samochodów zasilanych LPG i stacji tankowania w Polsce

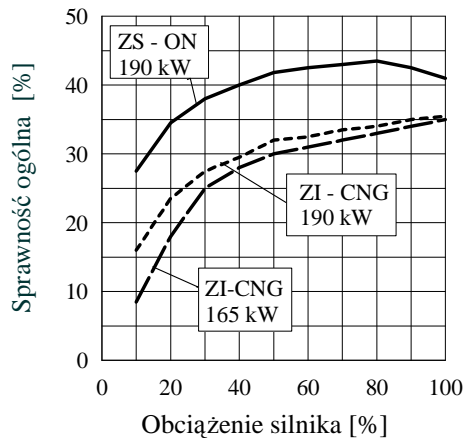
Rozwój zasilania LPG w Polsce wynika z niskich kosztów adaptacji samochodów oraz z relacji cen paliw w naszym kraju co pokazano na rys. 6. Uwzględniając nawet ok. 20% wzrost zużycia LPG w stosunku do benzyny i tak koszt eksploatacji samochodu na LPG jest o ok. 40% mniejszy w stosunku do benzyny. Uwzględniając relacje cen paliw do średnich zarobków w Polsce rzutuje to na decyzje przy przechodzeniu na zasilanie LPG. Warto równocześnie zwrócić uwagę, że ceny paliw w Polsce nie odbiegają od cen w innych krajach, a wręcz są od nich niższe. Należy zatem zakładać, że ceny paliw w kraju nie będą w nadchodzących latach malały, co prawdopodobnie wpłynie na dalszy rozwój zasilania gazowego.

Z danych pokazanych na rys. 6 wynika, że najtańszym paliwem na rynku jest gaz ziemny w postaci CNG. Cena 1 m³ zastępującego 1 dm³ benzyny lub oleju napędowego wynosi 2,45 zł. Wpływają na nią znacząco koszty sprężania gazu od ciśnienia otoczenia do >25 MPa. W przyszłości w stacjach CNG można wykorzystywać rurociągi średnioprężne gazu ziemnego o ciśnieniu ok. 8 MPa co powinno obniżyć koszt sprężania gazu. Różnica ceny obecnie oferowanego gazu CNG jest na tyle znaczna, że jest to obecnie najtańsze paliwo silnikowe, a zwrot dodatkowych kosztów adaptacji pojazdu następuje dość szybko.



Rys. 6. Ceny paliw w niektórych krajach europejskich i w Polsce

W ciężarowym i osobowym transporcie kołowym wykorzystywane są silniki średniej wielkości o zapłonie samoczynnym i mocy ok. 200 kW zasilane głównie olejem napędowym. Przystosowanie tych silników do zasilania CNG będzie zatem bazować na konstrukcji silników istniejących. Można przy tym wykorzystywać system z zapłonem iskrowym ZI (większość aplikacji) lub system dwupaliwowy o zapłonie samoczynnym ZS. Przystosowanie silnika do systemu ZI wymaga z reguły zmniejszenia stopnia sprężania do wartości $\epsilon = 11 \div 12$ z uwagi na zjawisko spalania stukowego. Wpływa to na zmniejszenie sprawności silnika w stosunku do sprawności silnika zasilanego tradycyjnie rys. 6.



Rys. 6. Porównanie sprawności silników średniej wielkości zasilanych gazem z zapłonem iskrowym i zasilanych tradycyjnie

Silniki ZS pracujące w systemie dwupaliwowym wykazują wiele istotnych zalet: w stosunku do silników zasilanych olejem napędowym mają mniejszą emisję cząstek stałych (również dla dużych udziałów oleju napędowego) [6, 7, 8], oraz w stosunku do gazowych silników o zapłonie iskrowym wykazują większą sprawność i mniejszą wrażliwość na skład mieszaniny gaz-powietrze, zależny również od jakości gazu ziemnego [3, 8, 9].

We współczesnych silnikach dwupaliwowych należy bezwzględnie stosować nowoczesne systemy zasilania w paliwo ciekłe i gazowe:

- układ Common Rail do wtrysku dawki inicjującej,
- wielopunktowy wtrysk gazu ziemnego w okolice zaworu dolotowego.

Zastosowanie tych systemów umożliwia elektroniczne sterowanie jakością ładunku oraz swobodną zmianę wielkości dawki inicjującej, kąta wyprzedzenia wtrysku oraz udziału paliw. Parametry te mogą być optymalizowane w dowolnym punkcie pracy silnika w oparciu o różnorodne kryteria optymalizacji.

W Katedrze Silników Spalinowych i Pojazdów Akademii Techniczno Humanistycznej w Bielsku-Białej od kilkunastu lat prowadzone są badania nad gazowym zasilaniem silników o zapłonie samoczynnym wyposażonych w nowoczesne systemy zasilania. W niniejszej publikacji przedstawiono niektóre wyniki badań silnika dwupaliwowego.

2. SILNIK BADAWCZY

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 autorów [1, 3].

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 początku 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 zakończenia 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. Przypuszczenie to potwierdziły badania na stanowisku bezsilnikowym. Modulacja ta wpływa jednak na przebieg pracy silnika co zaobserwowano w badaniach hamownianych i wynikach analizy numerycznej parametrów spalania.

Tab.1. Dane techniczne dwupaliwowego 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
Komora spalania	wtrysk bezpośredni do toroidalnej komory w tłoku
System wtrysku ON	Common Rail f-my Bosch
Wtryskiwacz oleju Bosch	0986435 004 090
System wtryskowy CNG	IC
Wtryskiwacz gazu Bosch	F465 151 72
Ciśnienie wtrysku gazu	1 MPa

Analizę parametrów spalania dokonano na podstawie obliczeń cieplnych w oparciu o rejestrowane wykresy indykatorem. 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

Jednym z niekorzystnych cech silnika dwupaliwowego jest malejąca sprawność przy zmniejszaniu obciążenia silnika. Powodem tego jest nadmierne zubożenie mieszaniny gazowej prowadzące do przewlekłego spalania a nawet zaniku płomienia w pobliżu ścianek. Zjawisko to starano się zmniejszyć przez podział dawki inicjującej oleju napędowego na dwie równe części. Pierwsza dawka inicjująca, wtryskiwana ze standardowym kątem wyprzedzenia wtrysku miała za zadanie inicjacje zapłonu gazu. Druga opóźniona o kąt $\Delta\alpha$, liczony między końcem wtrysku dawki pierwszej a początkiem drugiej, wtryskiwana w trakcie aktywnego spalania, miała za zadanie podtrzymać proces spalania mieszaniny gazowej. Zakładano, że powinno to przyczynić się do wzrostu efektywności spalania gazu.

Wykonane badania potwierdziły założenia, że podział dawki inicjującej zwiększa sprawność ogólną silnika rys. 7. Dla obydwu kątów opóźnienia zaobserwowano wzrost sprawności w stosunku do dawki pojedynczej, przy czym lepsze efekty uzyskano dla opóźnienia 10°OWK . Dla porównania na rys. 7 pokazano przebieg sprawności silnika przy zasilaniu samym olejem napędowym. Z porównania linii sprawności silnika zasilanego tradycyjnie i dwupaliwowego z dawką pojedynczą wynika, że silnik dwupaliwowy ma znacząco wyższą sprawność w zakresie średnich i maksymalnych obciążeń, natomiast mniejszą w zakresie małych. Silnik z dzieloną dawką inicjującą ma sprawność podobną do zasilanego tradycyjnie w zakresie małych obciążeń i znacznie wyższą w zakresie średnich i maksymalnych obciążeń. Badania wykonane dla innych prędkości obrotowych potwierdziły tę prawidłowość. Można zatem uznać, że podział dawki oleju napędowego jest narzędziem sterowania procesem spalania w silniku dwupaliwowym, który może poprawić sprawność spalania ubogich mieszanin w zakresie małych obciążeń.

Ilościowe zmiany sprawności określają: bezwzględna zmiana $\Delta\eta_o$ oraz zmiana względna $\delta\eta_o$. Wielkości te obliczono z wzorów:

$$\Delta\eta_o = \eta_d - \eta_p \quad (1)$$

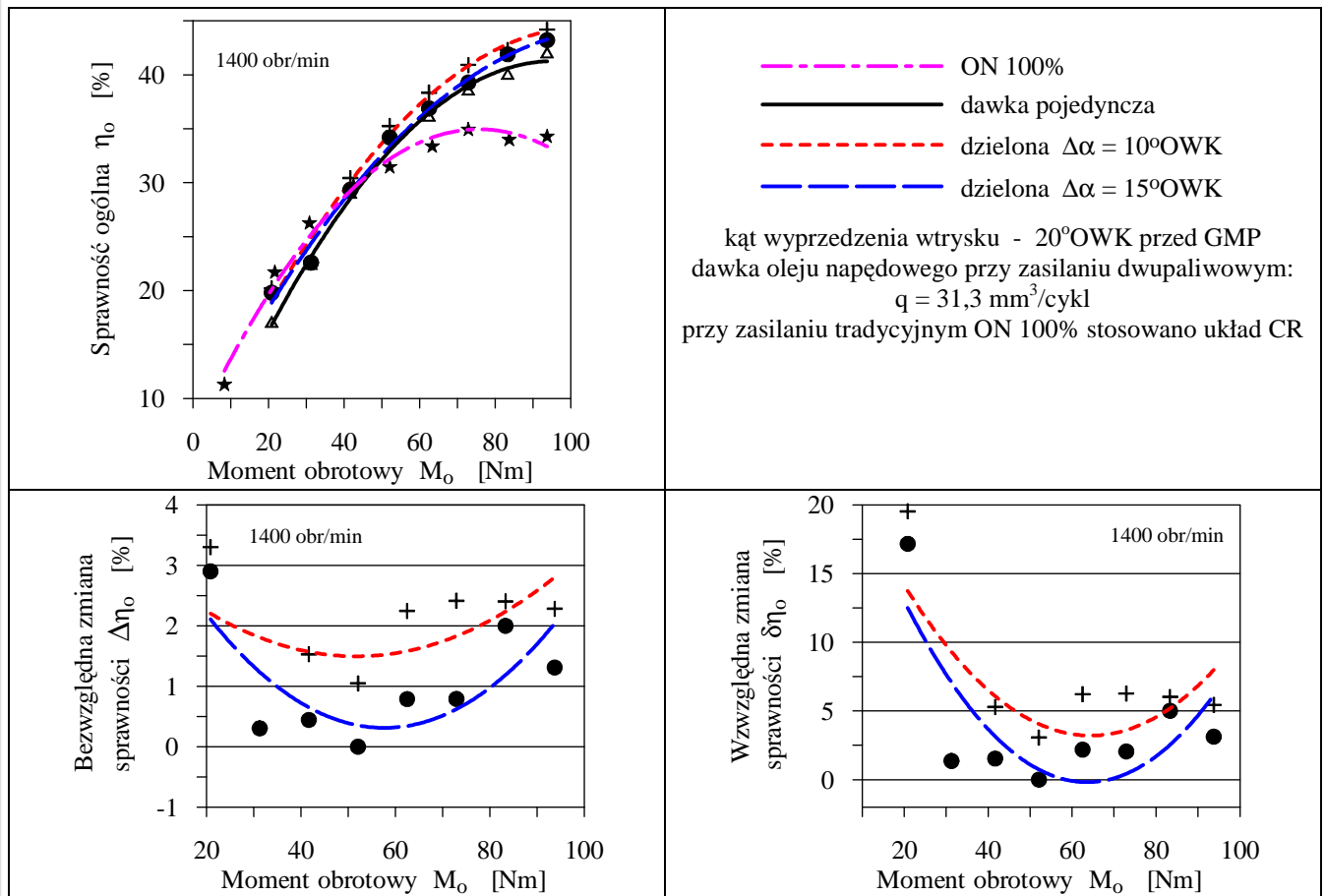
$$\delta\eta_o = \frac{\eta_d - \eta_p}{\eta_p} \cdot 100\% \quad (2)$$

gdzie: $\Delta\eta_o$ – bezwzględna zmiana sprawności ogólnej silnika z dzieloną dawką inicjującą [%],

$\delta\eta_o$ – względna zmiana sprawności [%],

η_d – sprawność silnika z dzieloną dawką inicjującą,

η_p – sprawność silnika z pojedynczą dawką inicjującą.



Rys. 7. Porównanie sprawności silnika SB3. 1 zasilanego pojedynczą i dzieloną dawką inicjującą

Wartości zmiany bezwzględnej i względnej sprawności ogólnej przy podziale dawki inicjującej pokazano na rys. 7. Dla obydwu kątów opóźnienia wtrysku dawki dodatkowej dla wszystkich punktów pomiarowych uzyskano przyrosty sprawności. Zastosowanie opóźnienia 10°OWK może spowodować zmniejszenie zużycia energii przez silniki trakcyjne w zakresie 5÷12% co należy uznać za bardzo pozytywny efekt zastosowania podziału.

Drugim bardzo korzystnym skutkiem podziału jest zmniejszenie stężenia NOx w spalinach, mierzonego za zaworem wylotowym, przed katalizatorem rys.8. Dla obydwu kątów opóźnienia dawki dodatkowej obserwowano zmniejszenie stężenia NOx. Względna zmianę stężenia NOx obliczono z wzoru:

$$\delta NO_x = \frac{(NO_x)_d - (NO_x)_p}{(NO_x)_p} \cdot 100\% \quad (3)$$

gdzie: δNO_x – względna zmiana stężenia NOx [%],

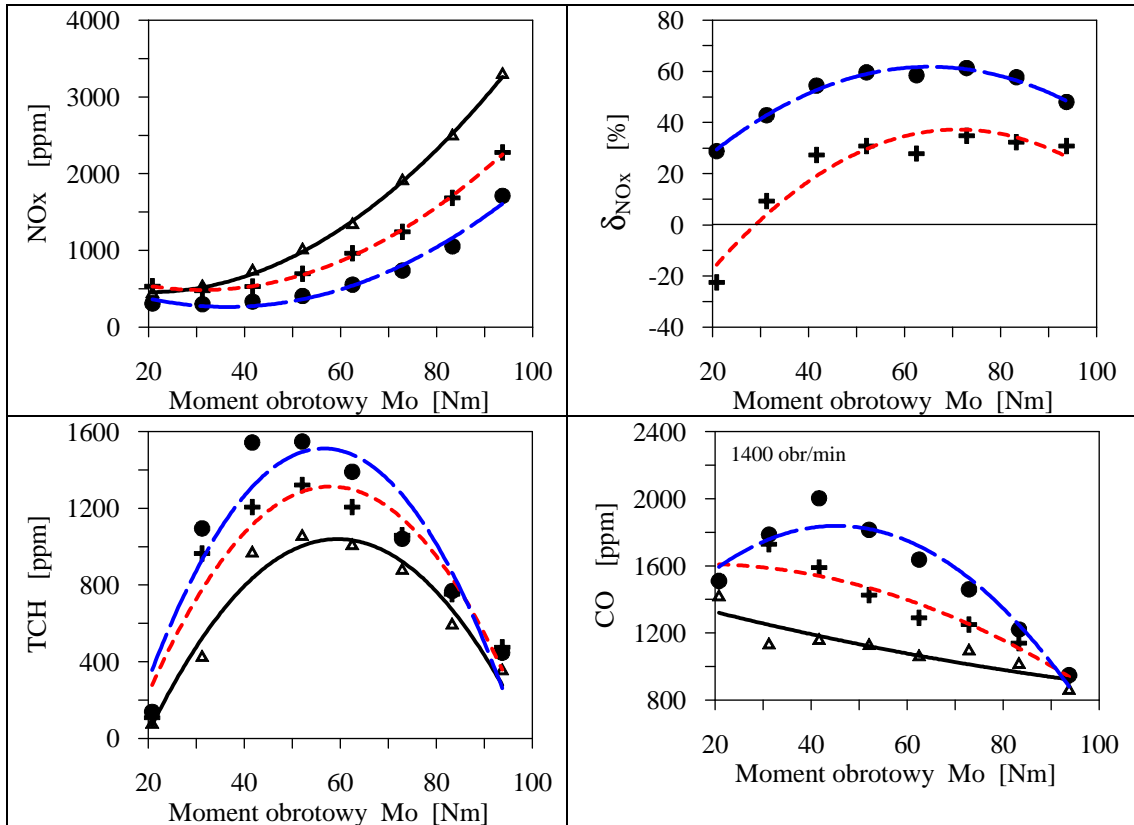
$(NO_x)_d$ – stężenie NOx w spalinach silnika z dzieloną dawką inicjującą,

$(NO_x)_p$ – stężenie NOx w spalinach silnika z pojedynczą dawką inicjującą.

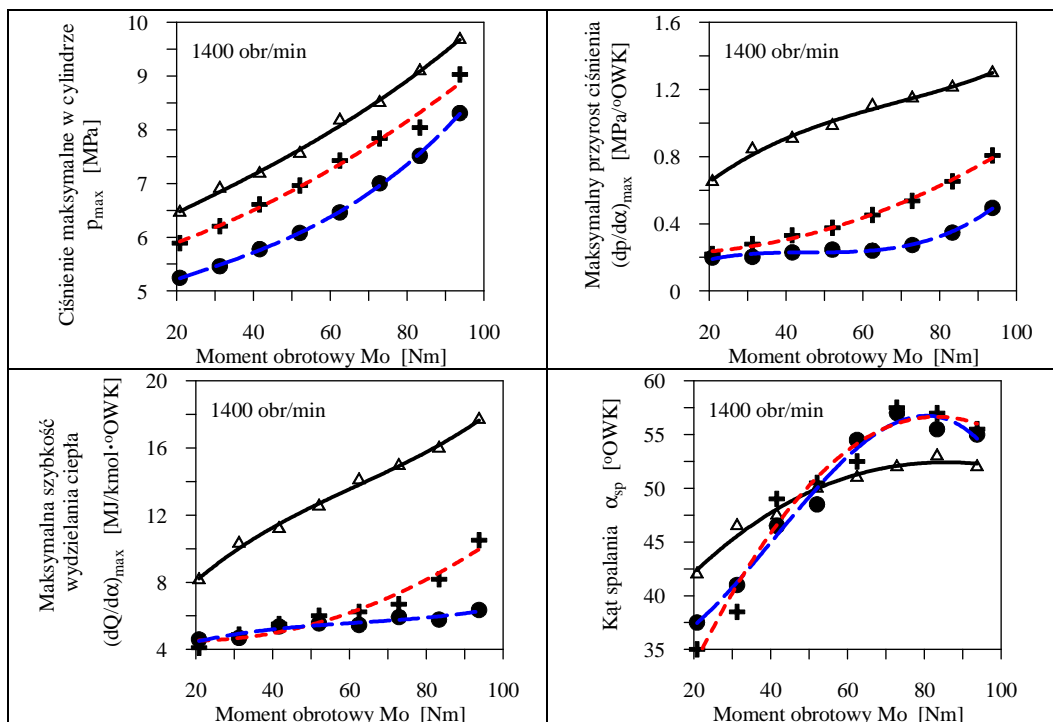
Przebiegi zmian parametru δNO_x pokazane na rys. 8 wskazują, że możliwe jest zmniejszenie stężenia NOx w granicach 50÷60% przez podział dawki inicjującej oleju napędowego w całym zakresie zmian obciążenia silnika. Należy zaznaczyć, że zmniejszenie to uzyskano dla kąta opóźnienia dawki dodatkowej 15°OWK bez pogorszenia sprawności silnika, a nawet w większości badanych punktów pomiarowych (inne prędkości obrotowe) ze wzrostem sprawności. Fakt zmniejszenia stężenia NOx należy uznać za największą korzyść zastosowania podziału dawki bowiem emisja NOx i cząstek stałych jest podstawowym problemem współczesnych silników z zapłonem, samoczynnym. Szczególnie kłopotliwa jest redukcja NOx wymagająca dotrysku paliwa do katalizatora (katalizatory redukujące węglowodorami, zmniejszenie sprawności silnika) lub amoniaku w postaci płynu „Ad-Blue”.

Podział dawki inicjującej wpłynął niekorzystnie na stężenia CO i TCH w spalinach rys. 8. Należy jednak zaznaczyć, że stężenia CO w silniku dwupaliwowym są bardzo małe i ich zmiany nie mają praktycznie dużego znaczenia. Poziom stężen CO pokazany na rys. 8 jest kilkakrotnie mniejszy od rejestrowanych w silnikach gazowych z zapłonem iskrowym. Zmiany TCH w całym zakresie badanych obciążeń i prędkości obrotowych były niewielkie na niekorzyść działek dzielonych. Dodatkowo warto podkreślić, że głównym składnikiem TCH w silnikach gazowych zasilanych CNG jest nietoksyczny metan podstawowy składnik palny gazu ziemnego.

Wzrost stężenia CO i TCH nie powinien stanowić problemu we współczesnych silnikach wobec powszechnego stosowania katalizatorów utleniających o dużych sprawnościach konwersji w szerokim zakresie temperatur.



Rys. 8. Porównanie stężenia NO_x , CO i TCH w spalinach silnika dwupaliwowego z pojedynczą i dzieloną dawką inicjującą: linia czarna ciągła – dawka pojedyncza, przerywana czerwona – dawka dzielona kąt opóźnienia 10° OWK, przerywana niebieska – dzielona kąt 15° OWK



Rys. 9. Porównanie parametrów spalania silnika dwupaliwowego z pojedynczą i dzieloną dawką inicjującą: linia czarna ciągła – dawka pojedyncza, przerywana czerwona – dawka dzielona kąt opóźnienia 10° OWK, przerywana niebieska – dzielona kąt 15° OWK

Silnik z dzieloną dawką inicjującą pracuje spokojniej (mniejsze wahania prędkości obrotowej) i z wyraźnie odczuwalną mniejszą hałaśliwością. Powodem tego są mniejsze ciśnienia maksymalne cylindra p_{\max} oraz prawie dwukrotnie mniejsza maksymalna szybkość przyrostu ciśnienia $(dp/d\alpha)_{\max}$ rys. 9. Wartości $(dp/d\alpha)_{\max}$ były zbliżone do występujących w silnikach o zapłonie iskrowym. Zmniejszenie hałaśliwości silnika ma istotne znaczenie w zastosowaniach w transporcie publicznym bowiem podnosi komfort pasażerów. Może również przyczynić się do zmniejszenia hałasu zewnętrznego pojazdów. Mniejsze ciśnienia maksymalne powodują zmniejszenie obciążenia układu korbowego, a szczególnie łożysk co może przyczynić się do zwiększenia trwałości silników.

Na rys. 9 widoczne jest również radykalne zmniejszenie szybkości wydzielania ciepła w czasie spalania (ponad dwukrotnie) w silniku z dzieloną dawką inicjującą. Jest to jeden z powodów omawianego wcześniej zmniejszenia stężenia tlenków azotu NO_x , które tworzone są w strefach reakcji, a temperatura reagentów wykładniczo wpływa na ilość tworzonego NO , głównego składnika NO_x .

O polepszeniu spalania ubogich mieszanin gazowych w zakresie małych obciążeń silnika może świadczyć skrócenie całkowitego czasu spalania ładunku, wyrażonego przez kąt α_{sp} rys. 9. Kąt ten dla obciążenia poniżej 50% jest mniejszy od kąta dla dawki pojedynczej, a różnice między kątami zwiększają się w miarę zmniejszania obciążenia. Ponieważ warunki spalania oleju napędowego wtryskiwanego w postaci dawki dodatkowej, są gorsze od spalania oleju wtryskiwanego w całości przy dawce pojedynczej, można zakładać, że przy małych obciążeniach silnika o czasie spalania decyduje zakończenie spalania mieszaniny gazowej. Poprawa procesu spalania mieszaniny gazowej skutkuje skróceniem kąta α_{sp} co zaobserwowano w prowadzonych badaniach. Efektem tego jest omawiany wzrost sprawności ogólnej silnika w tym zakresie obciążeń. Dla większych obciążeń silnika, kiedy mieszanina gazowa jest wzbogacona, o całkowitym kącie spalania w przypadku dawki dzielonej może decydować czas zakończenia spalania oleju napędowego. Opóźnienie wtrysku dawki dodatkowej skutkuje wtedy zwiększeniem kąta α_{sp} co widoczne jest na rys. 9.

4. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych analiz i badań można wyciągnąć następujące wnioski o charakterze ogólnym:

- W nadchodzącej dekadzie będzie następował dynamiczny rozwój zasilania silników gazem ziemnym, głównie sprężonym do wysokich ciśnień powyżej 20 MPa. W rozwoju tym uczestniczyć będą kraje europejskie, w tym głównie kraje Unii Europejskiej, w których zasilaniu gazem CNG nadano wysokie priorytety. Rozwój zasilania CNG związany będzie z preferencyjnym systemem podatkowym i wspieraniem budowy sieci stacji CNG.
- W warunkach krajowych zasilanie gazowe ograniczone jest głównie do zasilania LPG (w przeważającej większości dotyczy samochodów osobowych) a jego rozwój ma charakter spontaniczny. W Polsce brak jest długofalowej polityki wprowadzania CNG do zasilania silników.
- W silnikach trakcyjnych średniej wielkości, stosowanych w transporcie towarowym i osobowym zasilanie CNG może odbywać się według dwóch systemów – z zapłonem iskrowym lub z systemem dwupaliwowym. System dwupaliwowy pozwala zachować większość pozytywnych cech silnika ZS zasilanego tradycyjnie. Najważniejszym z nich jest wysoka sprawność w stosunku do silnika z zapłonem iskrowym przyczyniająca się do poszanowania energii i zgodna z obecną polityką ustawodawczą wielu krajów. Nie bez znaczenia jest również fakt, że silnik dwupaliwowy przy awarii systemu gazowego lub braku gazu może pracować na samym oleju napędowym. Może to mieć istotne znaczenie w przejściowym okresie wprowadzania CNG.
- Wobec powszechnie stosowanych we współczesnych silnikach, systemów zasilania Common Rail dla oleju napędowego i wtrysku gazu do kolektora dolotowego, istnieje możliwość elektronicznego sterowania jakością ładunku w silniku dwupaliwowym pracującym w zmiennych warunkach obciążenia i prędkości obrotowej. Warunki takie występują w trakcyjnych zastosowaniach silników, co w przeszłości ograniczało stosowanie układów dwupaliwowych o sterowaniu mechanicznym.
- Przeprowadzone badania silnika dwupaliwowego z dzieloną dawką inicjującą pokazały dalsze możliwości poprawy parametrów silnika. Do korzystnych cech podziału dawki należy zaliczyć:
 - Wzrost sprawności ogólnej silnika w całym zakresie obciążeń i prędkości obrotowych. Względny wzrost sprawności dla opóźnienia dawki dodatkowej $10^\circ OWK$ wynosił $5 \div 12\%$ co może przyczynić się do istotnego zmniejszenia zużycia energii w eksploatacji silnika trakcyjnego. Różnice w zakresie większych obciążeń między sprawnością silnika zasilanego tradycyjnie i dwupaliwowo z dzieloną dawką są jeszcze większe co skłania do stosowania systemu dwupaliwowego.
 - Zmniejszenie stężenia NO_x w spalinach, tym większe im większy jest kąt opóźnienia wtrysku dawki dodatkowej. Dla kąta opóźnienia $15^\circ OWK$ względne zmniejszenie stężenia NO_x wynosiło $50 \div 60\%$. Tak duże efekty uzyskano z zachowaniem, a nawet wzrostem, sprawności ogólnej silnika.
 - Zmniejszenie hałaśliwości pracy silnika i poprawa jego równomierności pracy.
 - Zmniejszenie ciśnień maksymalnych w cylindrze co może przyczynić się do zwiększenia trwałości silnika.
- Do niekorzystnych zjawisk związanych z dawką dzieloną należy zaliczyć nieznaczny wzrost stężenia CO i TCH w spalinach. Nie powinno to jednak stanowić dużego problemu wobec powszechnego stosowania katalizatorów utleniających w silnikach.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] 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.
- [2] Stelmasiak Z., Larisch J., Gilowski T.: *Możliwości sterowania dawką inicjującą oleju napędowego w dwupaliwowych silnikach ZS wyposażonych w system Common Rail*, PTNSS Kongres – 2005, Szczyrk 25-28.09.2005, Paper No. PTNSS P05-C004, 2005.
- [3] Stelmasiak Z.: *Analiza wpływu składu mieszaniny gaz-powietrze na parametry dwupaliwowego silnika o wtrysku bezpośrednim*, Silniki Spalinowe nr 3/2005.
- [4] Friedeman Z.: *Gasmotoren*, Vogel Buchverlag, Würzburg, 2001.
- [5] Zua CH., Zhao J.: *Development of Diesel Engines Fuelled with Natural Gas*, SAE Paper No. 2001-01-3505, 2001.
- [6] 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.
- [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*, Wydawnictwo ATH, nr 5/2003.
- [9] Lage M.: *Market potential for the use of LNG & L-CNG i Road transport*, UN ECE Round Table of Use of gas i Transport 21st Annual Session, Geneva, 18-19 January 2011.
- [10] Maedge M.: *Natural Gas and Biomethane- The Existent Real Alternative to Oil Derived Fuels*, Automotive Summit, Brussels, 9th November 2010.