

EMULSJA OLEJU NAPĘDOWEGO JAKO PALIWO ALTERNATYWNE

EMULSIFIED DIESEL AS AN ALTERNATIVE FUEL

Piotr Pacholski
Mariola Błaszczuk
Jerzy Sęk

Politechnika Łódzka
Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska
Katedra Inżynierii Chemicznej
ul. Wólczańska 213
90-924 Łódź
e-mail: piotr.pacholski@edu.p.lodz.pl
e-mail: mariola.blaszczuk@p.lodz.pl
e-mail: jerzy.sek@p.lodz.pl

Abstract: Emulsified water-in-Diesel fuel is a solution that helps to reduce emissions of nitrogen oxides and particulate matters in compression-ignition engines. The biggest advantage of this fuel is a possibility to introduce it to older generation units without any modifications. The presented solution allows the mixture to be burned more complete which results in less soot formation. However, the practical application of this fuel is limited mainly because its limited stability. In this article we review the following issues connected with water-in diesel fuel: its production, stability, influence on engine performance and environmental benefits. The main aspect of this paper is to review the advantages related to better combustion of such emulsion and reduction in emission of health hazardous substances.

Keywords: water-in-Diesel emulsion, alternative fuel, emulsion stability, microexplosion.

Wprowadzenie

Silniki o budowie typu Diesel dzięki swojej oszczędności dominują na rynku pojazdów środków komunikacji publicznej, rolnictwa oraz ciężkiego przemysłu. Równocześnie układy te podczas pracy charakteryzują się emisyjnością cząstek stałych (PM), tlenków azotu (NO_x), tlenków siarki (SO_x), węglowodorów (HC) oraz tlenku i dwutlenku węgla (CO i CO_2) [11]. Nowoczesne silniki wyposażane są obecnie w układy takie jak filtry cząstek stałych (DPF), wtryski wysokociśnieniowe (FIE) bądź piezowtryskiwacze które w pewnym stopniu redukują ilość powyższych zanieczyszczeń. Jednakże wspomniane technologie są drogie w zastosowaniu, a ponadto nie mogą być zaimplementowane do istniejących już silników. Z tego względu istnieje realna potrzeba na wdrożenie technologii, która mogłaby zostać wprowadzona dla silników obecnie pracujących i której celem byłoby ograniczenie wyżej wymienionych form emisji. Jednym z rozwiązań jest zastosowanie specjalnego paliwa, które pozwalałoby na zmniejszenie ilości powstających szkodliwych gazów oraz cząstek stałych. Badania, które do tej pory przeprowadzono wskazują na fakt, że emulsje paliwa typu woda w oleju napędowym (z ang.

Water in Diesel Emulsion - w skrócie *WiDE*) stosowane w silnikach o zapłonie samoczynnym mogą prowadzić do zmniejszenia adiabatycznej temperatury płomienia, a tym samym do redukcji powstających tlenków azotu (NO_x). Ponadto istnieją również inne zalety stosowania tego typu rozwiązania takie jak bardziej kompletny proces spalania, mniejsze zużycie paliwa oraz mniejsza produkcja sadzy [1].

Opis zagadnienia

Głównym mechanizmem odpowiedzialnym za redukcję ilości powstających tlenków azotu (NO_x) podczas pracy silnika Diesela zasilanego paliwem *WiDE* jest zmniejszenie temperatury spalania, które jest wynikiem przejścia wody zawartej w paliwie w stan pary wodnej, czyli waporyzacji. W konsekwencji powoduje to zwiększenie ilości fazy gazowej i zmniejszenie temperatury powstającego płomienia. Z drugiej strony redukcja ilości powstających cząstek stałych (z angielskiego *Particulate Matters* w skrócie *PM*) związana jest z obecnością wody w paliwie która pomaga w dopalaniu sadzy. Jest to związane z zwiększonym udziałem grup hydroksylowych (OH) w procesie spalania [11]. Z praktycznego punktu widzenia

istnieją różne techniki wprowadzania wody do komory spalania silnika o zapłonie samoczynnym, a główne z nich to:

- podawanie wody wraz z powietrzem dolotowym w postaci pary wodnej;
- wspólny wtrysk paliwa oraz wody;
- zastosowanie emulsyjnego paliwa typu woda w oleju napędowym (*WiDE*).

Każda z wymienionych metod ma swoje wady, jak i zalety. W szczególności dwa pierwsze sposoby prowadzić mogą do korozji jednostki napędowej. Wprowadzenie zemulsyfikowanego paliwa wydaje się być najbardziej prostą i skuteczną metodą, która skutkuje zmniejszeniem ilości powstających tlenków azotu (NO_x), jak również cząstek stałych (*PM*).

Emulsyjne paliwo typu woda w oleju napędowym (*WiDE*) charakteryzuje się, podobnie jak każda emulsja, rozproszeniem jednej fazy w drugiej. W przypadku emulsji spotkać można układy typu olej w wodzie (O/W), woda w oleju (W/O) jak również emulsje wielokrotne np. woda w oleju w wodzie (W/O/W) bądź też olej w wodzie w oleju (O/W/O). Na rysunku nr 1 zaprezentowano schematyczny wygląd emulsji typu olej w wodzie (O/W), woda w oleju (W/O) oraz olej w wodzie w oleju (O/W/O) oraz woda w oleju w wodzie (W/O/W). Warto zaznaczyć, że w celu wytworzenia emulsji spełnione muszą zostać trzy poniższe warunki [18]:

- musi zaistnieć kontakt dwóch wzajemnie nierozpuszczalnych cieczy;
- wymagana jest obecność emulgatora;
- potrzeba wystarczającej ilości energii, aby rozproszyć jedną fazę w drugiej.

Obecnie najbardziej popularnym układem zemulsyfikowanego paliwa typu woda w oleju napędowym (*WiDE*) jest prosta emulsja typu woda w oleju (W/O), a czasem zapisywana również jako układ Woda/Diesel (W/D). Istnieją różne sposoby na wytworzenie tego typu emulsji a najpopularniejszym, oraz najprostszym jest mechaniczne wymieszanie dwóch faz w obecności emulgatora, bądź emulgatorów. Emulgator jest związkiem zapobiegającym degeneracji emulsji, czyli jej rozdzieleniu na fazę olejową i wodną. Zazwyczaj jest to cząstka posiadająca część hydrofilową oraz hydrofobową, którymi „przyczepia” się do odpowiednich faz układu, prowadząc tym do zwiększenia stabilności powstałej emulsji. Sama stabilność emulsji, szczególnie w przypadku zemulsyfikowanego paliwa, jest zagadnieniem kluczowym i zostanie omówiona w dalszej części niniejszego artykułu. Wspomnieć należy, że badane były również bardziej skomplikowane układy emulsyjne z użyciem oleju napędowego np. olej-woda-olej (O/W/O), jednak ich wytworzenie jest skomplikowane ze względu na konieczność zastosowania dwuetapowej emulsyfikacji. Podczas tego procesu konieczne jest zastosowanie specjalnych emulgatorów o

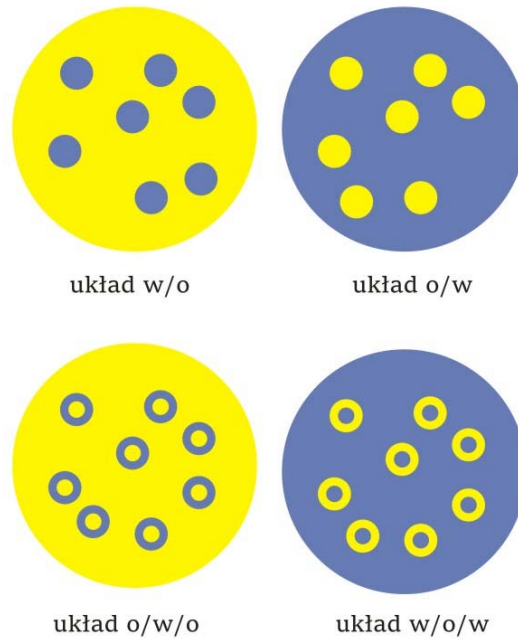
charakterze liofilowym oraz hydrofilowym, co podnosi koszty procesu, jak również potencjalnego paliwa [12].

Jak już wspomniano, jedną z najważniejszych cech emulsji, a w szczególności emulsji paliwowej, jest jej stabilność. Na czynnik ten wpływa w istotny sposób rodzaj techniki emulsyfikacji, czas trwania tego procesu, udział fazy zdyspergowanej, rodzaj i stężenie emulgatora, lepkość fazy ciągłej jak również prędkość mieszania, bądź częstotliwość fal w przypadku tworzenia emulsji za pomocą ultradźwięków. Generalnie w literaturze przedmiotu spotkać można się z wynikami badań, które sugerują następujące wnioski [7]:

- zmniejszenie udziału fazy zdyspergowanej - wodnej pozytywnie wpływa na stabilność układu;
 - najbardziej istotną kwestią jest dobór odpowiedniego emulgatora, oraz jego dawka;
 - należy zwrócić uwagę na temperaturę emulgacji, przy czym za optymalną przyjmuje się ok. 30°C.
- Wydaje się rzeczą oczywistą, że aby praca silnika wysokoprężnego przebiegała bez zakłóceń, kluczową kwestią jest aby emulsja woda w oleju napędowym (*WiDE*) posiadała wiele zbliżonych fizykochemicznych cech do paliwa pozbawionego wody. W szczególności ważną rolę przedstawiają tu warunki takie jak:
- posiadanie przez układ odpowiednio dużej liczby oktanowej w celu uniknięcia spalania stukowego;
 - odpowiednia lotność paliwa w temperaturach operacyjnych procesu;
 - łatwość zapłonu mieszanki;
 - ograniczony zapach i dymienie podczas spalania układu;
 - odpowiednia gęstość oraz lepkość emulsyjnego paliwa dla systemu paliwowego;
 - łatwość transportu.

Większość wymienionych wyżej czynników wpływa na charakterystykę pracy silnika z zapłonem samoczynnym jak również na jego zasadnicze cechy takie jak ograniczone zużycie paliwa oraz generowany hałas [23]. Właściwości pracy silnika związane są w szczególności mierze z właściwościami fizykochemicznymi paliwa.

W literaturze przedmiotu znaleźć można wiele prac, które odnoszą się do zachowania się zemulsyfikowanego paliwa podczas procesu spalania. Autorzy zwracają uwagę na takie właściwości mieszaniny jak gęstość [4, 21] oraz lepkość [4, 13]. Właśnie te dwa czynniki są szczególnie istotne, ponieważ bezpośrednio wpływają one na przebieg procesu wtrysku oraz późniejszego spalania mieszanki. Warto również wspomnieć o fakcie, że zemulsyfikowane paliwo wykonane standardową techniką mieszania mechanicznego posiada mniejszą klarowność, niż sam olej napędowy. Prawdopodobnie może mieć to znaczenie, jako cecha jakościowa dla potencjalnych użytkowników emulsji. Na rys. 2 zaprezentowano zdjęcie rzeczywiste sporządzonej emulsji oleju napędowego [14].



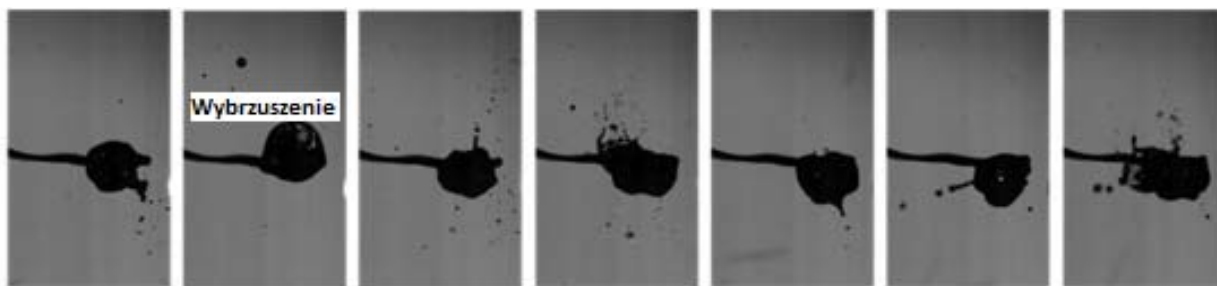
Rys. 1. Różne typy emulsji: olej w wodzie(O/W), woda w oleju (W/O) olej w wodzie w oleju (O/W/O) oraz woda w oleju w wodzie (W/O/W) [17].



Rys. 2. Zdjęcie rzeczywiste wytworzonego układu woda w oleju napędowym -WiDE [14].

Podczas procesu spalania w silniku Diesla zasilanego zemulsyfikowanym paliwem woda, która dostaje się do cylindra, ze względu na wysoką temperaturą procesu, przechodzi w stan gazowy, a właściwie w stan pary przegrzanej. W związku z tym badacze w [20, 22] zaobserwowali dwa ciekawe zjawiska podczas spalania zemulsyfikowanej mieszanki: mikroeksplozję oraz

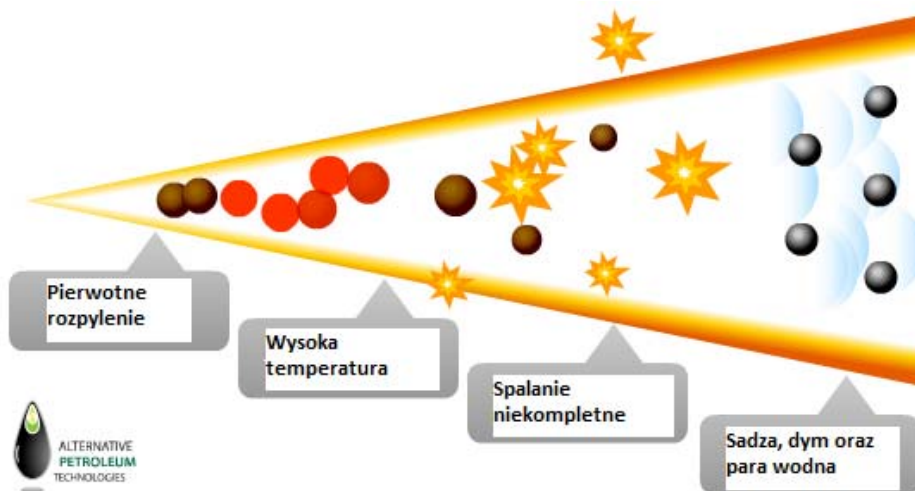
fukanie (z ang. *puffing*). Zjawisko mikroeksplozji polega na gwałtownym rozerwaniu kropli wody na mniejsze, podczas gdy fukanie polega na opuszczeniu przez wodę kropli oleju pod postacią bardzo rozdrobnionej mgiełki. Rys. 3 przedstawia efekt fukania, poprzedzony wyrzuceniem kropli emulsji [5].



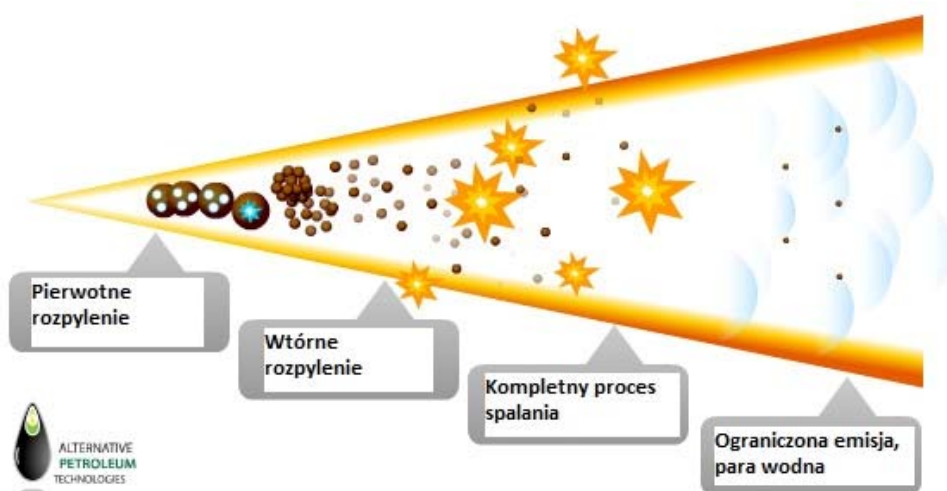
Rys. 3. Efekt fukania kropli emulsji [5].

W wyniku mikroeksplozji zaobserwować można wtórne rozpylenie par paliwa, które skutkują lepszym wymieszaniem powietrza z paliwem, tak jak zaprezentowano to na rys. 5, w porównaniu do spalania zwykłej mieszanki, jak na rys. 4. Zjawisko mikroeksplozji zależne jest od

czynników takich jak lotność mieszanki, typ emulsji oraz zawartość wody. Ponadto badacze w [8] stwierdzili, że również wielkość kropelek emulsji ma istotny wpływ na wystąpienie i przebieg procesu mikroeksplozji.



Rys. 4. Schemat procesu spalania mieszanki oleju napędowego [3].



Rys. 5. Schemat procesu spalania mieszanki paliwa typu emulsja woda w oleju napędowym -WiDE [3].

Niezaprzeczalnie, jednym z kluczowych czynników, które może zadecydować o powodzeniu stosowania zemulsyfikowanego paliwa jest jego wpływ na osiągi silnika. Zagadnienie to było analizowane przez wielu badaczy [1, 15, 16]. Co ciekawe, wnioski które zaprezentowali są różne, dlatego też do tej pory nie ustalono najlepszego stosunku paliwo/woda do spalania w silniku o zapłonie samoczynnym. Warto również zwrócić uwagę na fakt, że badacze używali różnych rodzajów emulsji w innych typach silników, co może być przyczyną powyższego stwierdzenia. Przykładowo w swojej pracy [2] zauważył wzrost mocy silnika, w przypadku użycia emulsji o 5% zawartości wody, podczas gdy w [21] zaobserwowali spadek tego parametru. Również [6] podczas stosowania emulsji *WiDE* stwierdzili spadek mocy silnika. Jak już wspomniano badacze używali różnych układów emulsyjnych a ponadto testowali je w różnych silnikach. W związku z tym, jest sprawą skomplikowaną wyjaśnienie otrzymanych przez nich wyników.

W przypadku oceny wpływu emulsji *WiDE* na emisje z silników o zapłonie samoczynnym badacze są zgodni, że użycie tego typu układu wpływa korzystnie na ograniczenie emisji szkodliwych związków. W szczególności waporyzacja wody, poprzez zmniejszenie lokalnej temperatury spalania wpływa na ograniczenie emisji tlenków azotu (NO_x) [1, 9, 10]. Dla przykładu autorzy w [9] zaobserwowali redukcję powstających tlenków azotu (NO_x) aż do 37%, podczas spalania emulsji *WiDE*, natomiast [6] zauważyli spadek o 9%. Podobna sytuacja ma miejsce w przypadku cząstek stałych (*PM*). Wspomniana już grupa badaczy [6] zaobserwowała 20% spadek w ilości powstających cząstek stałych *PM*. Natomiast [19] w przypadku zastosowania emulsji *WiDE* o udziale fazy wodnej 25,6% przy niskim obciążeniu jednostki napędowej, zauważyli spadek o ponad 90%

ilości powstających cząstek stałych (*PM*). Podsumowując, zauważyć można znaczące zalety środowiskowe płynące z zastosowania zemulsyfikowanego paliwa *WiDE*.

Podsumowanie

Można stwierdzić, że emulsyjne paliwo *WiDE* jest obecnie jedną z najlepszych alternatyw dla ograniczenia szkodliwych emisji środowiskowych powstających podczas pracy silnika o zapłonie samoczynnym. Jak już wspomniano zastosowanie tego typu rozwiązania skutkuje zmniejszeniem ilości powstających tlenków azotu (NO_x) oraz cząstek stałych (*PM*). Rodzaj zastosowanego emulsyfikatora, jak również technika emulgacji ma znaczący wpływ na stabilność powstałego układu, a w związku z tym na użyteczność powstałej emulsji. Odnalezione przykłady literaturowe nie są spójne co do wpływu zemulsyfikowanego paliwa *WiDE* na osiąganą moc silnika oraz jego sprawność. Ponadto stosowana przez badaczy metodologia znacząco różni się, co również skutkuje trudnością w jednoznacznej ocenie wpływu zastosowanego układu na wymienione parametry. Z drugiej strony korzyści środowiskowe ze stosowania układu emulsyjnego do zasilania silnika wysokoprężnego są bardziej spójne. Emulsja *WiDE* jednocześnie redukuje ilość powstających tlenków azotu NO_x oraz cząstek stałych *PM*. Wydaje się jednak, że aby zemulsyfikowane paliwo *WiDE* zostało wdrożone na szeroką skalę nadal potrzeba większej liczby prac, zarówno eksperymentalnych jak i modelowych sprawdzających jego wpływ na szereg parametrów istotnych dla pracy układów wyposażonych w silnik o zapłonie samoczynnym.

Literatura

1. Alahmer, A., Yamin, J., Sakhrieh, A., Hamdan, M.A., Engine performance using emulsified diesel fuel, *Energy Conversion and Management*, 2010, Vol. 51, Issue 8, pp. 1708-1713.
2. Abu-Zaid, M., An experimental study of the evaporation characteristics of emulsified liquid droplets, *Heat and Mass Transfer/Waerme und Stoffuebertagung*, 2004, Vol. 40, No. 9, pp. 737-741.
3. Altpetrol, Materiały konferencyjne, Sala dei Capitani, Palace of St. George, Genoa, Italy, Environmental Management Event Sponsored by the Port Authority of Genoa, 2011, Dec. 14.
4. Armas, O., Ballesteros, R., Martos, F.J., Agudelo, J.R., Characterization of light duty diesel engine pollutant emissions using water-emulsified fuel, *Fuel*, 2005, Vol. 84, No. 7-8, pp. 1011-1018.
5. Avulapati, M.M., Ganippa, L.H., Xia, J., Megaritis, A., Puffing and micro-explosion of diesel-biodiesel-ethanol blends, *Fuel*, Vol. 2016, 166, pp. 59-66.
6. Barnes, A., Duncan, D., Marshall, J., Psaila, A., Chadderton, J., Eastlake, A., Evaluation of water-blend fuels in a city bus and an assessment of performance with emission control devices, in: *Proceedings of the Better air Quality Motor Vehicle Control & Technology Workshop*, 2000.
7. Chen, G., Tao, D., An experimental study of stability of oil-water emulsion, *Fuel Processing Technology*, 2005, Vol. 86, No 5, pp. 499-508.
8. Fu, W.B., Hou, L.Y., Wang, L., Ma, F.H., A unified model for the micro-explosion of emulsified droplets of oil and water, *Fuel Processing Technology*, 2002, Vol. 79, No. 2, pp. 107-119.
9. Ghojel, J., Honnery, D., Al-Khaleefi, K., Performance, emissions and heat release characteristics of direct injection diesel engine operating on diesel oil emulsion, *Applied Thermal Engineering*, 2006, Vol. 26, No. 17-18, pp. 2132-2144.
10. Kannan, K., Udayakumar, M., 2009. NO_x and HC emission control using water emulsified diesel in single cylinder diesel engine, *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2009, Vol. 4, No. 8, pp. 59-62.

11. Lif, A., Holmberg, K., Water-in-diesel emulsions and related systems, *Advances in Colloid and Interface Science*, 2006, 123–126, pp. 231–239.
12. Lin, C.Y., Wang, K.H., Diesel engine performance and emission characteristics using three-phase emulsions as fuel, *Fuel*, 2004, Vol. 83, No. 4-5, pp. 537–545.
13. Park, J., Huh, K., Park, K., Experimental study on the combustion characteristics of emulsified diesel in a rcem, in: Proceedings of the Seoul FISITA World Automotive Congress, Seoul, Republic of Korea, June 2000.
14. Sane, H., Purandare, N., Barve, O., Todakar, A., Emission Reduction of IC engines by using water-in-diesel emulsion and catalytic converter, *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 2014, Vol. 03, Issue: 08, pp. 378-383.
15. Selim, M.Y. E., Elfeky, S.M.S., Effects of diesel/water emulsion on heat flow and thermal loading in a precombustion chamber diesel engine, *Applied Thermal Engineering*, 2001, Vol. 21, No. 15, pp. 1565–1582.
16. Samec, N., Dobovisek, Z., Hribernik, A., The Effect of Water emulsified in diesel fuel on diesel fuel on exhaust emission, *Goriva i Maziva*, 2000, Vol. 39, pp. 377–392.
17. Sierpniowska, O., Technologia postaci leku. Emulsje, *Aptekarz Polski, Manual Aptekarski*, 2015, nr 112/90, <http://www.aptekarzpolski.pl/2016/01/12-2015-technologie-postaci-leku-emulsje/> (dostęp 4.01.2016).
18. Schubert, H., Armbruster, H., Principles of formation and stability of emulsions, *International Journal of Chemical Engineering*, 1992, 32, pp. 14–28.
19. Maiboom, A., Tauzia, X., NO_x and PM emissions reduction on an automotive HSDI Diesel engine with water-in-diesel emulsion and EGR: an experimental study, *Fuel*, 2011, Vol. 90, No. 11, pp. 3179–3192.
20. Morozumi, Y., Saito, Y., Effect of physical properties on microexplosion occurrence in water-in-oil emulsion droplets, *Energy and Fuels*, 2010, Vol. 24, No. 3, pp. 1854–1859.
21. Nadeem, M., Rangkuti, C., Anuar, K., Haq, M.R.U., Tan, I.B., Shah, S.S., Diesel engine performance and emission evaluation using emulsified fuels stabilized by conventional and gemini surfactants, *Fuel*, 2006, Vol. 85, No. 14-15, pp. 2111–2119.
22. Watanabe, H., Suzuki, Y., Harada, T., Matsushita, Y., Aoki, H., Miura, T., An experimental investigation of the breakup characteristics of secondary atomization of emulsified fuel droplet, *Energy*, 2010, Vol. 35, No. 2, pp. 806–813.
23. Yahaya, K., Karim, A., Hagos, Y., Rashid, A., Tan, M., Current trends in Water-in Diesel Emulsion as a Fuel, *The Scientific World Journal*, Vol. 2014, Article ID 527472.