

KRZYSZTOF ŚLIWIŃSKI*

**PERSPEKTYWY ZASILANIA SILNIKA ZI
MIESZANKĄ WZBOGACONĄ W TLEN**

**PROSPECTS OF SUPPLYING AN SI ENGINE
WITH THE OXYGEN RICH MIXTURE**

Streszczenie

Artykuł zawiera przegląd literatury wraz z analizą danych mający na celu zaprezentowanie stanu techniki związanego z zasilaniem silników spalinowych mieszanką z powietrzem wzbogaconym w tlen. W artykule omówiono zagadnienia związane zarówno z metodami pozyskiwania tlenu możliwymi do zastosowania w pojazdach, jak i wyniki badań symulacyjnych i doświadczalnych prowadzonych w różnych jednostkach badawczych.

Słowa kluczowe: mieszanka wzbogacona w tlen

Abstract

The analysis of possibilities of use of the fuel and oxygen enriched air mixture for combustion engine feeding has been presented in the article. Literature recognition, as well as the analysis of the results of simulation and test works led in different scientific laboratories have been presented. The article discusses also questions connected with oxygen gaining methods possible to apply in vehicles.

Keywords: oxygen enriched air

*Dr inż. Krzysztof Śliwiński, Instytut Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

1. Aktualny stan wiedzy

Za początek badań nad zasilaniem silników mieszanką paliwowo-powietrzną z powietrzem wzbogaconym w tlen można uznać 1956 r., kiedy to A.V. Kuznetsov badał skutki użycia tlenu w procesach silnikowych i wykazał, że wzbogacenie tlenem mieszanki paliwowo-powietrznej w jednocylindrowym doładowanym silniku wysokoprężnym zmniejsza prędkość przyrostu ciśnienia [1]. W kolejnych latach prace prowadzone nad zagadnieniem spalania paliwa w powietrzu zawierającym stężenie większe niż 21% objętościowych tlenu dotyczyły głównie problemów związanych z redukcją toksycznych składników spalin w fazie rozruchowej i różnych stanach obciążenia silnika oraz stosowania alternatywnych paliw. Część prac związanych z poprawą zdolności rozruchowych silnika w niskiej temperaturze [7] oraz okresu zimnego rozruchu silnika [8] przy zasilaniu paliwami ciekłymi i LPG [9] prowadzono zarówno na silnikach z zapłonem iskrowym, jak i wysokoprężnych. Badania te udowodniły możliwość redukcji emisji HC bez wzrostu NO_x w czasie pierwszych cykli pracy silnika [3] oraz poprawę możliwości rozruchowych w przypadku spadku temperatury do 5°C , przez skrócenie liczby cykli rozruchowych.

Kolejne badania miały na celu wykazanie możliwości używania do zasilania silnika alternatywnych paliw z zastosowaniem wzbogacenia powietrza tlenem. W przypadku silników wysokoprężnych zastosowano paliwa złożone z cięższych frakcji procesu destylacji ropy z dodatkiem wody [4, 5], a dla silników z zapłonem iskrowym jako paliwo stosowany był LPG [10]. Badania prowadzone na silniku Caterpillar 3406B wykazały zmniejszenie emisji cząstek stałych. Opracowany model teoretyczny oparty na obiegu Diesla z uwzględnieniem kinematyki spalania oraz testy hamowniane prowadzone na silniku wykazały większe korzyści wynikające ze spadku emisji cząstek stałych, przy pełnych obciążeniach w stosunku do częściowych [6]. Przy zasilaniu silnika z zapłonem iskrowym paliwem LPG z zastosowaniem wzbogacenia tlenem zanotowano spadek emisji CO.

Wszechstronne badania prowadzone w Argonne National Laboratory [11, 12] kierowane przez University of Chicago potwierdziły spadek emisji CO, CO_2 i HC w spalinach silnika dzięki stosowaniu wzbogacenia powietrza w tlen w różnych warunkach obciążenia. Te korzystne wyniki potwierdzają celowość stosowania wzbogacenia powietrza dostarczanego do silnika w tlen. Jest to szczególnie ważne ze względu na zmniejszenie stężenia toksycznych składników spalin, co jest zgodne z obecnymi tendencjami rozwojowymi silników spalinowych.

Kolejnym zagadnieniem skłaniającym do pracy nad tym zagadnieniem jest tzw. *downsizing* polegający na zwiększeniu mocy jednostkowej silnika i zmniejszeniu zużycia paliwa. Zastosowanie do zasilania silnika mieszanki paliwowo-powietrznej z powietrzem wzbogaconym w tlen może być uzasadnione jedynie w przypadku możliwości aplikowania jej do pojazdu bez ograniczenia jego własności trakcyjnych. Zmusza to do stosowania technologii pozwalającej na ciągłą dostawę tlenu do silnika.

Istnieje wiele metod pozyskiwania tlenu. Można go otrzymać przez skroplenie powietrza w temperaturze 90,15 K i rozdzielenie na poszczególne frakcje ciekłych gazów za pomocą filtrów koalescencyjnych lub destylacji. Inna metoda polega na elektrolizie wody. Można również wytwarzać tlen przez termiczny rozkład związków chemicznych, takich jak np. KMnO_3 (nadmanganian potasu), metod ta służy jednak do uzyskiwania małych ilości tlenu o wysokiej czystości w warunkach laboratoryjnych. Żadna z tych metod nie jest

możliwa do zastosowania w pojazdach ze względu na zbyt małą ilość pozyskiwanego tlenu lub zbyt dużą energochłonność.

Obecnie istnieją jeszcze dwie ciągle rozwijane technologie związane z pozyskiwaniem tlenu z powietrza z zastosowaniem metody separacji za pomocą sit molekularnych i metody membranowej. Obydwie charakteryzują się raczej niewielkimi wymiarami aparatury w stosunku do ilości separowanego tlenu oraz małym jednostkowym zapotrzebowaniem energetycznym.

2. Metoda pozyskiwania tlenu za pomocą sit molekularnych

Cykliczny, zmiennociśnieniowy proces adsorpcyjno-desorpcyjny nazywany jest w skrócie adsorpcją zmiennociśnieniową (ang. *Pressure Swing Adsorption* – PSA). Wszystkie procesy rozdzielania adsorpcyjnego składają się z dwóch zasadniczych etapów:

1. Adsorpcja, podczas której łatwiej adsorbowany składnik jest pochłaniany przez adsorbent.
2. Desorpcja (regeneracja), podczas której składnik jest usuwany z adsorbentu tak, aby zregenerowany adsorbent mógł być ponownie użyty.

Użyteczny produkt może powstawać albo w etapie adsorpcji (jeżeli jest nim składnik trudniej adsorbujący się), albo w etapie desorpcji (składnik łatwiej adsorbujący się). Strumień rafinatu otrzymywany w trakcie adsorpcji jest wzbogacony w składnik trudniej adsorbujący się, a strumień wylotowy w etapie desorpcji jest wzbogacony w składnik łatwiej adsorbujący się (względem stężenia zasilania) i jest nazywany ekstraktem. Zasadniczą cechą procesu adsorpcji zmiennociśnieniowej jest to, że podczas etapu regeneracji łatwiej adsorbowany składnik jest usuwany poprzez obniżenie ciśnienia ogólnego w układzie [13]. Pełny cykl pracy kolumny separacyjnej składa się z czterech etapów: sprężania, adsorpcji, wydmuchu i płukania.

Głównymi zaletami metody PSA są:

- małe zużycie energii w stosunku do innych metod,
- krótki czas trwania pojedynczego cyklu,
- otrzymywanie produktów o dużej czystości,
- duża wydajność procesu,
- długi okres pracy adsorbentu,
- brak odpadów zagrażających środowisku.

Czas trwania poszczególnych etapów wynosi od kilkudziesięciu sekund do kilku minut w zależności od: składu mieszaniny gazowej, stosowanych ciśnień i rodzaju adsorbentu. Najczęściej stosowanymi adsorbentami do sit molekularnych są różnego rodzaju zeolity, węgiel aktywowany, tlenek glinu lub żel kwasu krzemowego.

Pewną modyfikacją procesu PSA mającą na celu zwiększenie wydajności procesu separacji są metody RPSA (*Rapid Pressure Swing Adsorption*) i VPSA (*Variable Pressure Swing Adsorption*). W urządzeniach VPSA stosuje się dmuchawę do wprowadzenia do adsorbentów powietrza pod lekkim nadciśnieniem, natomiast w fazie regeneracji stosuje się podciśnienie. Metoda ta pozwala na obniżenie zapotrzebowania energii przy produkcji tlenu.

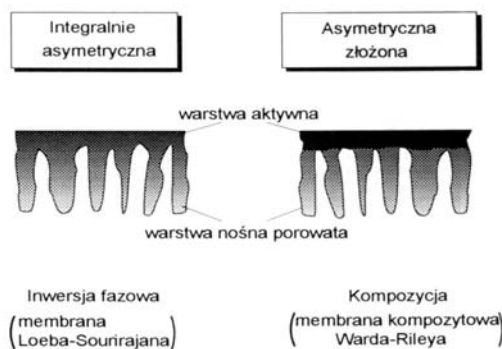
3. Metoda pozyskiwania tlenu za pomocą procesów membranowych

Ogólnie procesy membranowe polegają na użyciu membran do prowadzenia technicznych procesów separacji. Każda membrana jest filtrem i tak jak w normalnej filtracji co najmniej jeden ze składników rozdzielanej mieszaniny może bez przeszkód przechodzić przez membranę, podczas gdy inne są w mniejszym lub większym stopniu przez nią zatrzymywane. Dla wszystkich procesów membranowych typowe są dwie właściwości:

- 1) rozdzielanie przebiega w sposób czysto fizyczny, tzn. rozdzielane składniki nie ulegają przemianom termicznym, chemicznym ani biologicznym,
- 2) istnieje możliwość dostosowania rozdzielania membranowego do każdej skali produkcyjnej ze względu na budowę modułową procesu.

Znana od dawna metoda permeacji gazów (transportu masy w membranie) nie znajdowała przez długi czas zastosowania w technice z powodu braku wystarczająco wydajnych membran. W celu uzyskania dużego strumienia permeatu (substancji oddzielonej w procesie rozdzielania membranowego) wymagana jest możliwie najcieńsza selektywna warstwa membrany, ponieważ strumień składnika jest odwrotnie proporcjonalny do grubości membrany. Dopiero po opracowaniu membran asymetrycznych, których działanie separacyjne polega na mechanizmie rozpuszczalnościowo-dyfuzyjnym, permeacja gazów zyskała znaczenie techniczno-gospodarcze.

Membrany niesymetryczne składają się z cienkiej warstwy aktywnej i znajdującej się pod nią porowatej warstwy nośnej. Warstwa aktywna jest selektywną barierą dla transportu masy, warstwa nośna służy natomiast jedynie do zwiększenia wytrzymałości mechanicznej membrany i nie wpływa na własności separacyjne (rys. 1).

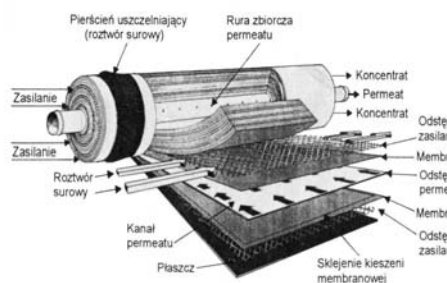


Rys. 1. Budowa membrany niesymetrycznej [14]

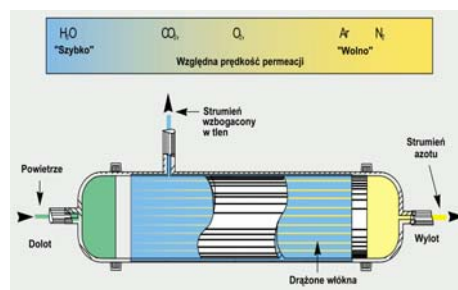
Fig. 1. Structure of asymmetric membrane [14]

Do rozdzielania gazów stosuje się membrany nieporowate, mikroporowate i porowate, które pozwalają zwiększyć ok. 100-krotnie strumień permeatu przy zachowaniu tej samej w przybliżeniu selektywności w stosunku do membran symetrycznych.

Do rozdzielania gazów trwałych, jak O_2 i N_2 stosowane m.in. są membrany pokryte warstwą silikonu z selektywnego materiału polisulfonu. Poszczególne membrany łączone są w moduły. W permeacji gazów podstawą konstrukcji modułów jest osiągnięcie możliwie największej gęstości upakowania (stosunku zainstalowanej powierzchni membrany do objętości modułu) oraz małych kosztów ich produkcji. W związku z tym stosowane są membrany o płaskim kształcie, z których budowane są moduły typu spiralnego lub poduszkowe-



Rys. 2. Budowa modułu typu spiralnego [14]
Fig. 2. Structure of spiral type module [14]



Rys. 3. Budowa modułu typu rurowego [20]
Fig. 3. Structure of pipe type of module [20]

go oraz w postaci cienkich włókien do budowy separatorów rurowych. Separator membranowy typu rurowego zawiera tysiące włókien, które są powiązane i umocowane w żywicy epoksydowej. Końcówki wiązek są ucięte, co powoduje, że włókna te są otwarte na obu końcach, a więc gaz przepływa z jednego końca na drugi. Wiązki włókien są umieszczone w odpowiedniej obudowie. Na rysunkach 2 i 3 zaprezentowano schemat budowy modułu typu spiralnego oraz rurowego.

4. Metody pozyskiwania tlenu przydatne do zastosowania w pojazdach

Kryteriami ograniczającymi możliwość stosowania technologii separacji w pojazdach samochodowych jest wielkość urządzeń separacyjnych oraz zapotrzebowanie na moc w czasie procesu separacji. W przypadku separacji za pomocą sit molekularnych w zastosowaniu do pojazdów samochodowych najbardziej właściwe wydaje się urządzenie o nazwie ATF (*Advanced Technology Fractionators*) firmy SeQual Technologies. Na rysunku 4 przedstawiono jeden z możliwych do zastosowania zastawów separacyjnych Quad-100 tej firmy.

Moduły separacyjne stosowane w tych urządzeniach są oparte na metodach separacji VPSA i RPSA. Każdy z modułów zawiera po 12 pojemników z adsorbentem. Wymiary modułu wynoszą 510 mm wysokości i 210 mm średnicy. Sterowanie wszystkimi procesami przepływu gazów odbywa się za pomocą obrotowego zaworu rozdzielczego, poruszanego przez mikrosilnik elektryczny sterowany mikroprocesorem. Dzięki zastosowanej technologii mikroprocesorowego sterowania zaworem zmniejszono pulsacje ciśnienia w stosunku do klasycznych układów, co wpłynęło na ograniczenie zużycia energii [16]. Stosując metody PSA, zapotrzebowanie energetyczne do wyprodukowania 1 m³ czystego technicznie tlenu wynosi ok. 0,5 kWh [17, 18]. W przypadku modułów ATF zużycie energii zostało jeszcze zmniejszone.

Stosując separację membranową, wymiary modułu separacyjnego zależą w przypadku modułów rurkowych od grubości ścianek pojedynczych włókien, konstrukcji wkładu, gęstości upakowania włókien, geometrii. Dla modułów typu spiralnego wymiary są związane z grubością membrany i budową odstępników, czyli elementów rozdzielających membrany. Należy również zwrócić uwagę na cechy użytkowe membran, czyli przepustowość i zdolność separacji, która jest określona przez selektywność, przenikalność, warunki pracy, czyli temperaturę i różnicę ciśnienia oraz stopień uzysku permeatu. Nowe

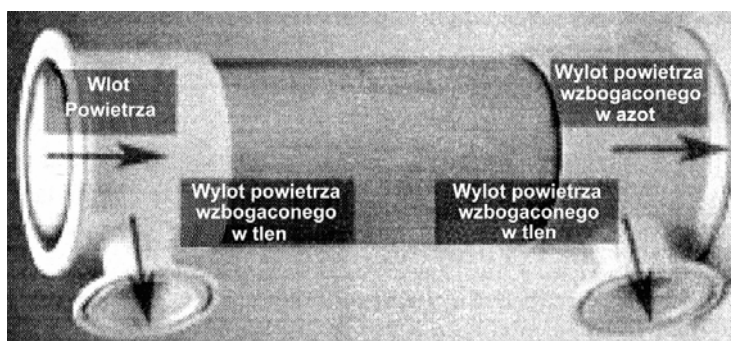


Rys. 4. Przykładowy zestaw filtracyjny
Quad-100 [19]

Fig. 4. Filtration Modules Quad-100
[19]

technologii stosowane w budowie membran do zastosowań w pojazdach samochodowych wykorzystują polimery szkliste, etylowo-celulozowe i polisulfony.

Uproszczone obliczenia pokazują, że zapotrzebowanie na moc potrzebną do separacji wynosi ok. 1,8 kW w celu uzyskania 2832 l/min tlenu, przy wymiarach separatora 0,508 m długości i 0,483 m średnicy [12].



Rys. 5. Budowa modułu separacyjnego typu rurowego do zastosowania
w pojazdach samochodowych [15]

Fig. 5. Structure of pipe type of module for car vehicle applications [15]

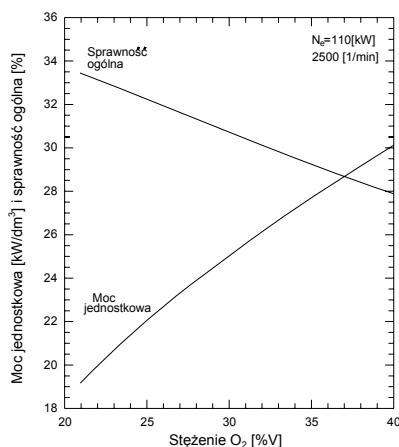
Na rysunku 5 przedstawiono widok modułu separacyjnego specjalnie opracowanego w Argon National Laboratory do zastosowania w pojazdach samochodowych [15] o wymiarach zbliżonych do klasycznego filtra powietrza.

Porównując obydwie metody wzbogacania powietrza w tlen, czyli metodę sit molekularnych i metodę membranową, można stwierdzić, że aktualnie bardziej korzystna do aplikacji w pojazdach samochodowych jest metoda membranowa. Membranowe moduły separacyjne mają obecnie bardziej zwartą budowę i mniejszą masę w stosunku sit molekularnych o tych samych parametrach separacyjnych.

5. Wyniki badań symulacyjnych i hamownianych

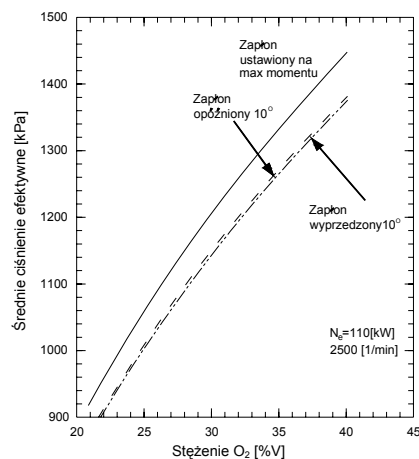
Jak dotąd istnieją w literaturze rozbieżności dotyczące wskaźników pracy silnika zasilanego mieszanką z powietrzem wzbogaconym w tlen. Zgodnie z przeprowadzonymi badaniami symulacyjnymi i zamieszczonymi wykresami [21] przedstawiającymi zależności mocy jednostkowej, sprawności ogólnej i średniego ciśnienia efektywnego w funkcji stężenia O_2 można wnioskować, że wraz ze wzrostem stężenia tlenu w powietrzu dostarczanym do silnika rosną moc jednostkowa i średnie ciśnienie efektywne, maleje natomiast sprawność ogólna. Wzrost mocy jednostkowej i średniego ciśnienia efektywnego jest spowodowany doprowadzeniem większego strumienia energii, możliwym dzięki zwiększeniu stężenia utleniacza w ładunku. Spadek sprawności ogólnej jest tłumaczony wzrostem temperatury spalania i zwiększeniem strumienia ciepła unoszonego ze spalinami. Przez wzrost gradientu temperatury wewnątrz cylindra i otaczającego go płaszcza wodnego wzrasta również ilość ciepła odprowadzanego do układu chłodzenia.

Przedstawione wyniki badań hamownianych relacjonowanych w publikacji [22] przeczą tezie o zmniejszeniu sprawności ogólnej silnika zasilanego mieszanką wzbogaconą w tlen. W miarę wzrostu stężenia O_2 w ładunku zmniejsza się wartość jednostkowego zużycia paliwa, czyli rośnie sprawność ogólna silnika. Zakładając niewielką zmianę sprawności mechanicznej, można wnioskować o wzroście sprawności cieplnej obiegu roboczego. Zwiększenie stężenia tlenu w ładunku powoduje wzrost maksymalnego ciśnienia obiegu (rys. 9 i 10) oraz wzrost wartości momentu obrotowego. Analiza prędkości procesu spalania (rys. 13 i 14) wskazuje na wzrost prędkości wydzielania ciepła i większy stopień wydzielania energii w czasie spalania w przypadku stosowania ładunku wzbogaconego w tlen.



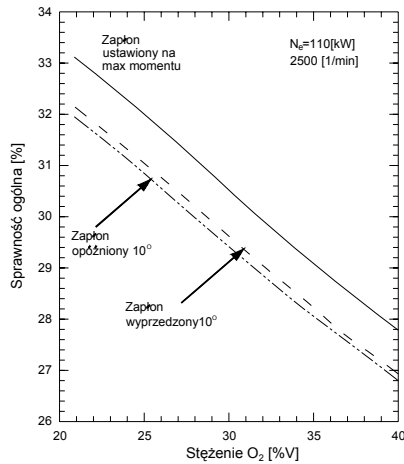
Rys. 6. Moc jednostkowa i sprawność ogólna w funkcji stężenia O_2 (dla kąta wyprzedzenia zapłonu ustawionego na max momentu) [21]

Fig. 6. Specific brake power and brake thermal efficiency as functions of oxygen concentration in combustion air for "MBT" spark timing for the base case [21]



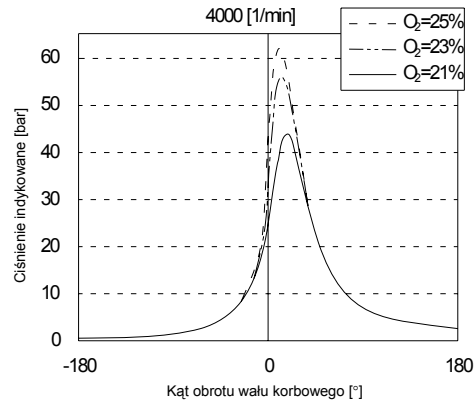
Rys. 7. Średnie ciśnienie efektywne w funkcji stężenia O_2 dla różnych ustawień kąta wyprzedzenia zapłonu [21]

Fig. 7. Brake mean effective pressure as function of oxygen concentration in the combustion air for three spark timings [21]



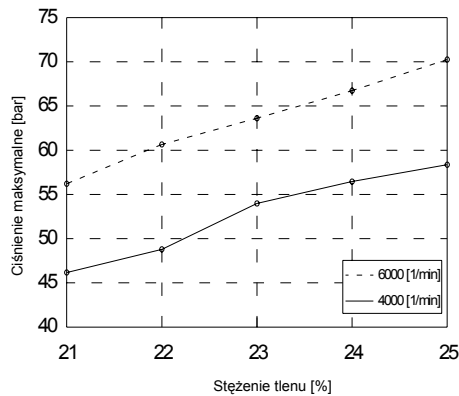
Rys. 8. Sprawność ogólna w funkcji stężenia O₂ dla różnych wartości kąta wyprzedzenia zapłonu [21]

Fig. 8. Brake thermal efficiency as functions of oxygen concentration in the combustion air for three spark timings [21]



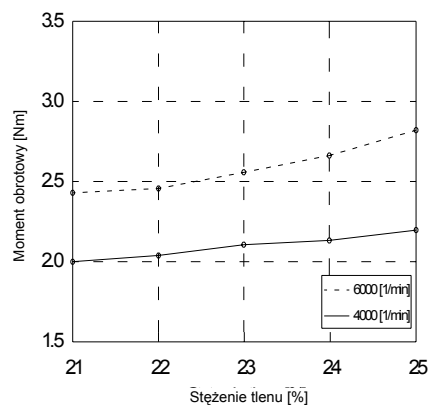
Rys. 9. Ciśnienie w funkcji obrotu wału korbowego dla różnych stężeń O₂ dla 4000 obr./min [22]

Fig. 9. Cylinder pressure at 4000 rpm with various oxygen concentrations [22]



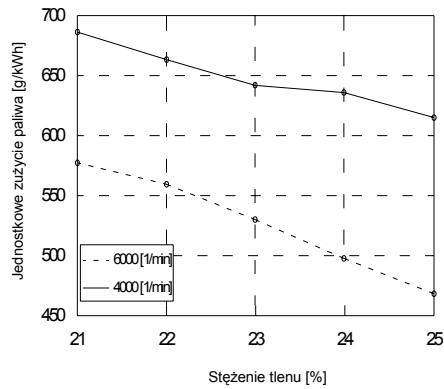
Rys. 10. Maksymalne ciśnienie w funkcji stężenia O₂ dla 4000 i 6000 obr./min [22]

Fig. 10. Effect of oxygen concentration on cylinder peak pressure operated at 4000 and 6000 rpm WOT



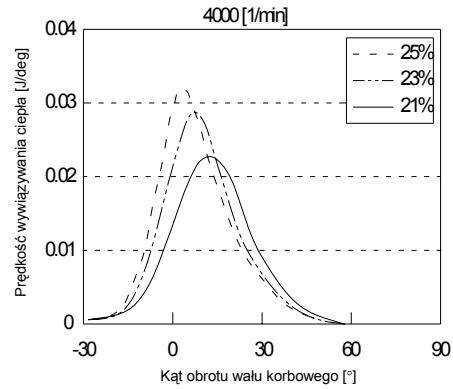
Rys. 11. Moment obrotowy w funkcji stężenia O₂ dla 4000 i 6000 obr./min [22]

Fig. 11. Effect of oxygen concentration on engine torque operated at 4000 and 6000 rpm WOT [22]



Rys. 12. Jednostkowe zużycie paliwa w funkcji stężenia O_2 dla 4000 i 6000 obr./min [22]

Fig. 12. Effect of oxygen concentration on engine bsfc operated at 4000 and 6000 rpm WOT [22]

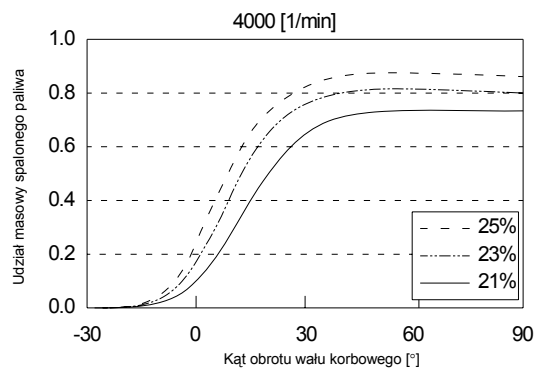


Rys. 13. Prędkość wywiązywania ciepła w funkcji obrotu wału korbowego przy różnym stężeniu O_2 dla 4000 obr./min [22]

Fig. 13. Heat release rate for engine operated at 4000 rpm WOT with various oxygen concentrations [22]

Rys. 14. Udział masowy spalonego paliwa w funkcji obrotu wału korbowego dla 4000 [obr./min] przy różnym stężeniu O_2 [22]

Fig. 14. Mass fraction burned for engine operated at 4000 rpm WOT with various oxygen concentrations [22]



6. Wnioski

Na podstawie przeanalizowanych materiałów można wnioskować o zasadności stosowania mieszanki wzbogaconej w tlen. Przy obecnym stanie techniki dotyczącym wzbogacania powietrza w tlen z użyciem metod membranowej lub sit molekularnych istnieje możliwość adaptacji tych układów do zasilania silnika w pojazdach samochodowych. Metody te wymagają małego zapotrzebowania energii, zapewniając dodatni bilans energetyczny wynikający ze wzrostu energii uzyskanej z silnika. Poprawa parametrów roboczych silnika oraz jego sprawności jest zgodna z tendencjami rozwojowymi silników spalinyowych. Wzrost mocy jednostkowej spełnia wymagania kierunku rozwoju silników, jakim jest *downsizing*. Bardzo ważnym parametrem przemawiającym również za dalszym rozwijaniem tego sposobu zasilania jest zmniejszenie emisji toksycznych składników spalin.

Literatura

- [1] Kuznetsov A.V., *Effect of O₂ Concentration on the Engine Process*, paper in series on internal combustion engines Academy of Sciences of the U.S.S.R., 1956.
- [2] Wartinbee W.J., *Effect of Oxygen Enriched Air on Exhaust Emission*, SAE papers 710606.
- [3] Kajitani S., *Partial-Load Operations of Spark-Ignition Engine With Oxygen Enriched Air*, SAE papers 932802.
- [4] Sekar R.R., Marr W.W., *Diesel Engine Experiments With Oxygen Enrichment, Water Addition And Lower-Grade Fuel*, Energy Conversion Engineering Conference, IECEC-90, 12–17 Aug. 1990.
- [5] Sekar R.R., Marr W.W., *Experimental evaluation of oxygen-enriched air and emulsified fuels in a six-cylinder diesel engine*, Auto Research Laboratory, January 1993.
- [6] Zvirin Y., Tarkovski L., *Improvement of Internal Combustion Engine Performance by Oxygen Enriched Air-Supply*, Israel Institute of Technology, 2002.
- [7] Xiao G.F., Qiao X.Q., Huang Z., Chen Z.P., *Improvement of startability of direct-injection diesel engine by oxygen-enriched intake air*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Journal of Automobile Engineering, November 2007.
- [8] Xiao G.F., Qiao X.Q., Li G., *Reducing Cold Start Emissions of an Spark-Ignition Engine Using Membrane-Based Oxygen Enriched Intake Air*, Journal of Shanghai Jiaotong, Vol. 40, 2006.
- [9] Li G., Li L., Qiao X., *Oxygen-Enriched Combustion of the First Cycle During Cold Start in a LiQuefied Petroleum Gas Spark-Ignition Engine*, Journal of Automobile Engineering, Vol. 220, 2006.
- [10] Maxwell T.T., Jones J.C., Setty V., *The Effect of Oxygen-Enriched Air on the Performance and Emissions of An Internal Combustion Engine*, SAE papers 932804.
- [11] Poola R.B., Sekar R.R., Ng H.K., *Evaluation of Oxygen-Enrichment System for Alternative Fuel Vehicles*, United State Department of Energy, December 1995.
- [12] Poola R.B., Sekar R.R., Ng H.K., *Utlizing Intake-Air Oxygen-Enrichment Technology to Reduce Cold-Phase Emissions*, SAE paper 952420, 1995.
- [13] Kupiec K., Rakoczy J., Mirek R., *Cykliczny proces adsorpcyjno-desorpcyjny stosowany przy otrzymywaniu etanolu paliwowego*, Biuletyn ITN, XVII (Nr 4) 2005.

- [14] Rautenbach R., *Procesy membranowe*, WNT, Warszawa 1996.
- [15] Poola R.B., *New Technology Promises Cleaner Diesels*, Trans Forum research review, Vol. 1, No. 4, Winter 1999.
- [16] United State Patent No. 6, 691, 702 B2.
- [17] Budner Z., Duła J., Podstawa W., Gawdzik A., *Blachownia*, Institute of Heavy Organic Synthesis, Kędzierzyn-Koźle, Poland.
- [18] Czaplinski A., Mrozek A., *Rozdzielanie gazów trudno skraplających się adsorpcyjno-desorpcyjną metodą zmiennego ciśnienia (PSA)*, Wiadomości Chemiczne, z. 12 (402), Rocznik XXXIV, 1980.
- [19] www.sequal.com.
- [20] *Offshore and Petrochemical Industries*, Air Products AS, www.airproducts.no.
- [21] Caton J.A., *Use of a Cycle Simulation Incorporating the Second Law of Thermodynamics: Results for Spark-Ignition Engines Using Oxygen Enriched Combustion Air*, SAE Word Congress Detroit, Michigan, April 11–14 2005 (SP-1969), 2005.
- [22] Yuh-Yih Wu, Huang K.D., *Improving the Performance of a Small Spark-Ignition Engine by Using Oxygen-Enriched Intake Air*, National Taipei University of Technology Society of Automotive Engineers of Japan (JSAE) 20076504, 2007.