

Marek IDZIOR
Maciej BAJERLEIN
Maciej BIELIŃSKI
Paweł DASZKIEWICZ
Paweł STOBNICKI

PTNSS–2013–SC–133

Study of the emissions effects of hydrogen to the intake manifold on the stationary combustion engine with direct injection

Abstract: The article discusses the results of the studies conducted at the Institute for Internal Combustion Engines and Transport, Poznan University of Technology on the effect of the addition of hydrogen to diesel fuel in terms of emissions of CO, HC and particulate stationary test engine ignition equipped with solenoid injectors from Bosch. Characterized hydrogen as a motor fuel, and shows the parameters for co-firing with conventional fuels. Discussed was the use of hydrogen in piston engines, the stoichiometric combustion of hydrogen and the possibility of using hydrogen in Poland. In some research studies have been done measuring the concentration of toxic compounds in the exhaust gas, the combustion of conventional fuel (diesel fuel) and through the combustion of hydrogen with diesel used in stationary combustion engine.

Key words: hydrogen, co-combustion, emissions, compression ignition engine

Badanie wpływu dodatku wodoru do kolektora dolotowego na emisję zanieczyszczeń stacjonarnego silnika spalinowego z bezpośrednim wtryskiem

Streszczenie: W artykule omówiono wyniki z przeprowadzonych badań, w Instytucie Silników Spalinowych i Transportu Politechniki Poznańskiej dotyczące wpływu dodatku wodoru do oleju napędowego w aspekcie emisji CO, HC i cząstek stałych stacjonarnego silnika badawczego o zapłonie samoczynnym wyposażonego w elektromagnetyczny wtryskiwacz firmy Bosch. Scharakteryzowano wodór, jako paliwo silnikowe, oraz przedstawiono parametry pozwalające na współspalanie z paliwami konwencjonalnymi. Omówiono zastosowanie wodoru w silnikach tłokowych, stechiometryczny proces spalania wodoru oraz możliwości wykorzystania wodoru w Polsce. W części badawczej wykonane zostały badania dotyczące pomiaru stężenia związków toksycznych w spalinach, przy spalaniu paliwa konwencjonalnego (olej napędowy) oraz przy współspalaniu wodoru z olejem napędowym stosowanym w stacjonarnym silniku spalinowym.

Słowa kluczowe: wodór, współspalanie, emisja, silnik z zapłonem samoczynnym

1. Wprowadzenie

W obecnej chwili produkcja paliwa wykorzystującego wodór jest droga, przez co nie jest jeszcze do końca opłacalna. Przy jego uzyskiwaniu metodą klasycznej elektrolizy (będącą najstarszą metodą produkcji wodoru) zużywa się więcej energii niż można uzyskać z wyprodukowanego wodoru. W celu pozyskania 1 m³ wodoru potrzeba 3 kWh prądu. Należy jednak zaznaczyć, że 100 mln m³ paliwa wodorowego odpowiada 25 tys. ton ropy naftowej. Istnieją jednak inne metody produkcji wodoru do których należą: reforming, fermentacja biomasy, foto-konwersja, oraz wymiana chemiczna [1, 3, 4].

Duże przyspieszenie oraz dojrzewanie cywilizacji w ostatnich kilku dziesięcioleciach, nieustanna i ciągle postępująca degradacja środowiska naturalnego, a także narastające niedobory surowców energetycznych, wymuszają poszukiwanie alternatywnych źródeł energii oraz związanych z nimi nowoczesnych technologii.

Wyniki dotyczące wykorzystania ogniw paliwowych są bardzo obiecujące i uznają prawidłowość obranych kierunków badań. Wysoka niezawodność, żywotność i bezawaryjność stanowią o poważnych możliwościach drzemących w rozwoju tych technologii.

Podjęmowane od kilku lat programy rządowe dotyczące badań nad zastosowaniem wodoru, jako paliwa samochodowego, potwierdzają już dzisiaj realność techniczną stworzenia czystych systemów transportu np. w dużych aglomeracjach miejskich w oparciu o autobusy napędzane ogniwami paliwowymi zasilanymi wodorem.

Wobec wyżej przedstawionych faktów zastosowanie wodoru, jako nośnika energii w połączeniu z ekologicznymi formami jego wytwarzania, daje perspektywę gruntownego zmniejszenia emisji CO₂.

Wodór jest szczególnym surowcem w przemyśle. Atutowe dziedziny jego zastosowania to zwłaszcza przemysł rafineryjny, petrochemiczny, ponadto ma zastosowanie w syntezach wielu zna-

czących dla gospodarki produktów np.: do otrzymywania amoniaku, mocznika, wyższych alkoholi, kwasu solnego i innych materiałów [2, 5].

2. Właściwości wodoru

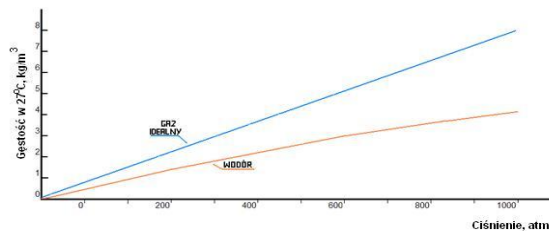
Ze względu na swoją małą masę cząsteczkową, a także dużą wartość ciepła spalania, wodór ma największy stosunek energii do masy, siła eksplozji wodoru jest 2,5 razy większa niż konwencjonalnych paliw węglowodorowych. Zdecydowaną zaletą wodoru jest również to, iż cechuje się on także niezłymi wartościami charakteryzującymi paliwa, którymi są :

- temperatura zapłonu $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ (porównując $-188\text{ }^{\circ}\text{C}$ metan, $-104\text{ }^{\circ}\text{C}$ propan, $-56\text{ }^{\circ}\text{C}$ olej napędowy, $-43\text{ }^{\circ}\text{C}$ benzyna, $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$ metanol),
- zakres palności jest szeroki i wynosi od 4 – 75 % V/V, a wybuchowości od 15 - 95 % V/V przy czym zakres palności rośnie razem z temperaturą (porównując 5,3 - 15 % dla metanu, 2,2 – 9,6 % dla propanu, 6 – 36,5 % dla metanolu, 1 – 7,6 % dla benzyny, oraz 0,6 – 5,5 % dla oleju napędowego) (% jest objętościowy),
- temperatura samozapłonu wodoru $585\text{ }^{\circ}\text{C}$ (porównując $540\text{ }^{\circ}\text{C}$ metan, $490\text{ }^{\circ}\text{C}$ propan, $385\text{ }^{\circ}\text{C}$ metanol, $230\text{--}480\text{ }^{\circ}\text{C}$ benzyna),
- energia zapłonu wodoru jest niewielka i wynosi ($0,02\text{ mJ}$) i jest o rząd wielkości mniejsza niż energia zapłonu wyżej wymienionych paliw, dlatego wystarczająca jest niewielka iskra, aby spowodować zapłon,
- szybkość spalania, czyli szybkość z jaką płomień przesuwa się przez mieszaninę palną gazów dla wodoru wynosi $2,65\text{ -- }3,25\text{ m/s}$ i jest ona o rząd większa od szybkości spalania metanu bądź benzyny.

Zasadniczą zaletą wodoru jest to, że produktem jego spalania jest czysta woda, co przy zastosowaniu go jako paliwa nie wpływa ujemnie na środowisko naturalne. Ma on również małą energię inicjacji zapłonu, przez co jego spalanie jest o 60% sprawniejsze niż innych paliw.

Użycie wodoru wiąże się z wieloma trudnościami technicznymi takimi, jak np. przede wszystkim silne oddziaływanie chemiczne na metale, oraz problemy z jego przechowywaniem. Wodór wykorzystywany jest najczęściej w ogniwach paliwowych, w których stosuje się go jako paliwo.

Wodór ma najmniejszą masę atomową, a więc tym samym najmniejszą gęstość zarówno cieczy, jak i gazu, 1 m^3 wodoru gazowego to 84 g , co stanowi jedynie 7% gęstości powietrza. Wraz ze wzrostem ciśnienia gęstość wodoru gazowego istotnie rośnie, ale zależność gęstości od ciśnienia w przypadku gazu rzeczywistego jest różna niż wynika to z równania stanu gazu idealnego, co ilustruje rysunek 1.



Rys. 1. Wykres zależności gęstości wodoru gazowego od ciśnienia (w $27\text{ }^{\circ}\text{C}$)

W czasie spalania wodoru uwalnia się energia, produktem zaś jest woda. Doświadczalnie energia ta mierzona i określana jest, jako górne ewentualnie dolne ciepło spalania. Różnicą pomiędzy tymi dwiema wartościami jest ciepło odparowania i określa ona ilość energii, która potrzebna jest do przeprowadzenia paliwa znajdującego się w stanie ciekłym w stan pary jak i przeprowadzenie wody ciekłej w stan pary.

Tablica 1.

Ciepło spalania wodoru i paliw silnikowych

Paliwo	Górne ciepło spalania ($25\text{ }^{\circ}\text{C}, 1\text{ atm}$), kJ/g	Dolne ciepło spalania ($25\text{ }^{\circ}\text{C}, 1\text{ atm}$), kJ/g
Wodór	141,86	119,93
Metan	55,53	50,02
Propan	50,36	45,6
Benzyna	47,5	44,5
Olej napędowy	44,8	42,5
Metanol	19,96	18,06

Merytoryczną częścią oceny jakości paliw jest gęstość energii paliwa, która świadczy o gęstości skompresowania atomów wodoru w danym paliwie. Zauważyć możemy, iż im więcej atomów węgla posiada cząsteczka paliwa, tym gęstość energii jest mniejsza, im więcej atomów wodoru, tym większa.

Tablica 2.

Gęstość energii wybranych paliw

Paliwo	Stan fizyczny paliwa	Dolne ciepło spalania kJ/m ³
Wodór	gaz ($15\text{ }^{\circ}\text{C}, 1\text{ atm}$)	10 050
	gaz ($15\text{ }^{\circ}\text{C}, 200\text{ atm}$)	1 825 000
	gaz ($15\text{ }^{\circ}\text{C}, 690\text{ atm}$)	4 500 000
	Ciecz	8 491 000
Metan	gaz ($15\text{ }^{\circ}\text{C}, 1\text{ atm}$)	32 560
	gaz ($15\text{ }^{\circ}\text{C}, 200\text{ atm}$)	6 860 300
	Ciecz	20 920 400
Propan	gaz ($15\text{ }^{\circ}\text{C}, 1\text{ atm}$)	86 670
	Ciecz	23 488 800
Benzyna	Ciecz	31 150 000
Olej napędowy	Ciecz	powyżej 31 435 800
Metanol	Ciecz	15 800 100

Zakres palności wodoru jest dość szeroki tj. 4 – 75% V/V, natomiast wybuchowość 15 – 95% V/V, przy czym warto podkreślić, iż zakres palności rośnie wraz z temperaturą. Zakres palności typowych paliw wygląda następująco: wodór 4-75% V/V w powietrzu, benzyna 1-7,6% V/V, olej napędowy 0,6-5,5% V/V.

Tablica 3.

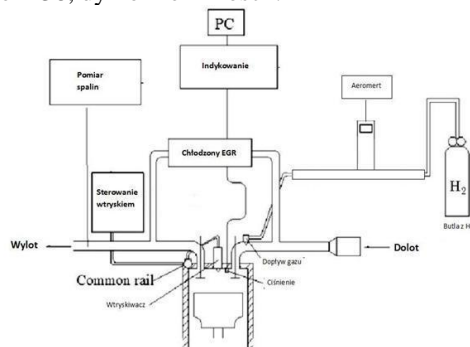
Charakterystyka badanych paliw

Właściwości	Paliwo diesla	Wodór
Gęstość, kg/m ³	840	82
Dolna wartość opałowa, MJ/kg	42,49	119,81
Szybkość płomienia, m/s	0,3	27
Liczba cetanowa	45 55	—
Temperatura samozapłonu, °C	280	585
Pozostałość po koksowaniu	0,1	0

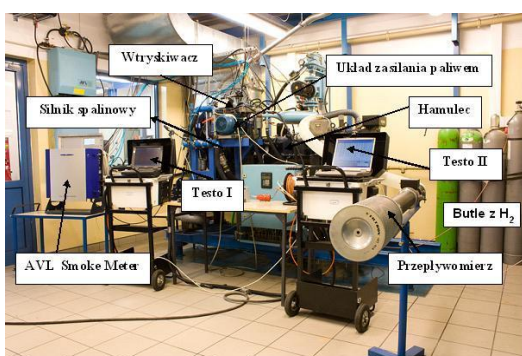
3. Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze składa się z pięciu głównych części:

- silnik badawczy AVL 5804 z hamulcem prądnicowym asynchronicznym AMK ASYN typ DW13-170-4-AOW,
- pompy wysokiego ciśnienia dla roztworu gazu i paliwa oraz pompy *common rail*,
- elektronicznego systemu sterowania pracą wtryskiwacza elektromagnetycznego,
- systemu AVL Iset 620 do rejestracji ciśnień szybkozmiennych,
- analizatorów spalin: Testo 360, AVL Opacimeter 438, dymomierz Bosch.



Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego



Rys. 3. Widok stanowiska badawczego

Stanowisko jest wyposażone w zewnętrzny układ stabilizacji temperatury cieczy chłodzącej silnika i oleju smarującego AVL 577. Parametry pracy silnika takie jak prędkość obrotowa i obciążenie zadawane są hamulcem elektrycznym AMK ASYN typ DW13-170-4-AOW.

Drugą część stanowiska stanowi laboratoryjny układ zasilania paliwem. W skład układu zasilania

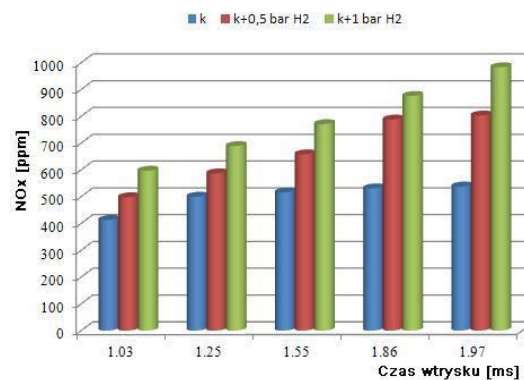
wchodzi zasobnik paliwa z czujnikiem ciśnienia i zaworem upustowym paliwa oraz wtryskiwacz BOSCH 0445 110 131. Wtryskiwacz zaadaptowano do silnika (rys. 4.), wykonując nową obsadę wtryskiwacza i umieszczono go w głowicy w miejscu wtryskiwacza standardowego.



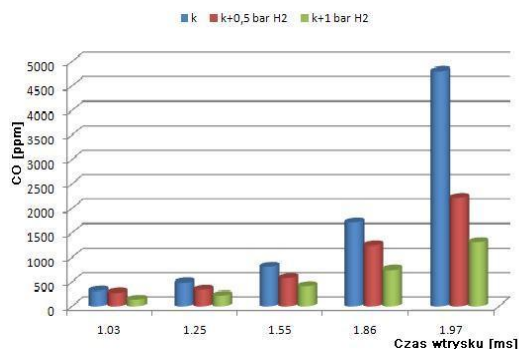
Rys. 4. Widok wtryskiwacza elektromagnetycznego zamontowanego w głowicy

4. Wyniki pomiarów

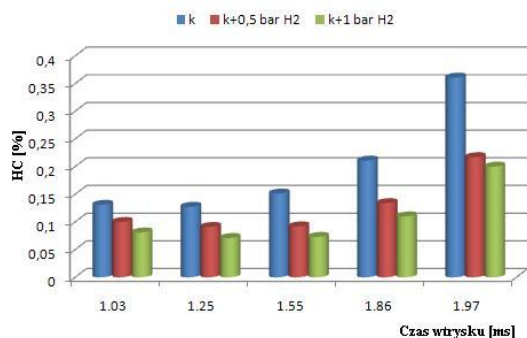
Przeprowadzone badania miały na celu ocenę wpływu dodatku wodoru do oleju napędowego oraz jego wpływ na zmiany stężenia związków toksycznych w spalinach (rys. 4-8). Badania przeprowadzone zostały na silniku o zapłonie samoczynnym AVL5804, przy stałej prędkości obrotowej ($n = 2500 \text{ obr/min}$). Założona częstość próbkowania odbywała się w czasie od 1,03 [ms] do 1,97 [ms] przy prędkości 2500 obr/min.



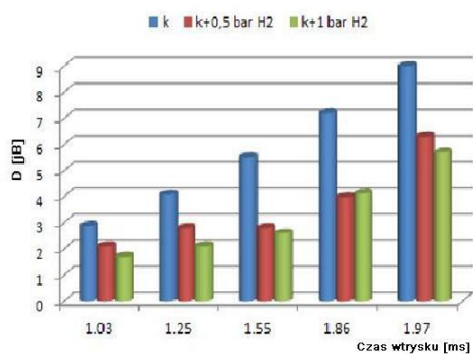
Rys. 5. Wykres stężenia NOx [ppm]



Rys. 6. Wykres stężenia CO [ppm]



Rys. 7. Wykres stężenia HC [%]



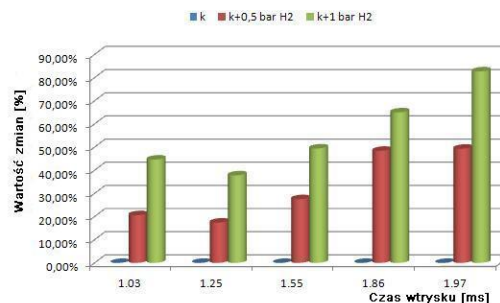
Rys. 8. Wykres zadymienia spalin D [ppm]

Dostarczanie wodoru do badanego silnika ZS powoduje ograniczenie stężenia: CO, HC, D w spalinach wylotowych silnika ZS co znajduje uzasadnienie w publikowanych wynikach badań. W następstwie dodania wodoru do zasilania silnika, występują zmiany stężenia węglowodorów, tlenków węgla, tlenków azotu, a także zmiany podstawowych wskaźników pracy silnika determinujących jego osiągi.

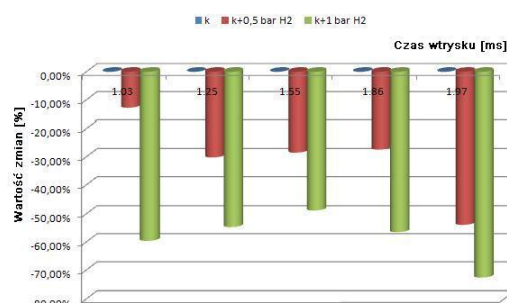
Można stwierdzić, że ze względu na osiągi i obciążenie podstawowych elementów konstrukcyjnych, dodawanie wodoru w ilości 5-7% m/m w czasie spalania paliwa węglowodorowego w silniku z zapłonem samoczynnym nie wywiera większego wpływu na efekty spalania mieszanki. Uzyskane wyniki zapewnią materiał do dalszych prac mających na celu optymalizację samego procesu otrzymywania, jak również sterowania składem mieszanki wodorowo-paliwowo-powietrznej w zależności od obciążenia silnika.

Wyniki badań świadczą o istotnym oddziaływaniu redukcyjnym dodatku wodoru na stężenie związków szkodliwych, co potwierdza prawidłowość przyjętej koncepcji przeprowadzonego testu. Jak można zaobserwować, dla emisji CO zanotowano blisko 50% redukcję stężenia tego związku toksycznego. Pozytywnym objawem jest także zmniejszenie zawartości HC w spalinach o około 30%-50%. W podobnych proporcjach procentowych przedstawia się redukcja zadymienia spalin. W przypadku NO_x zauważyć można wzrost emisji tego związku toksycznego, przy współspalaniu wodoru z paliwem konwencjonalnym, z 0,5 bar H₂

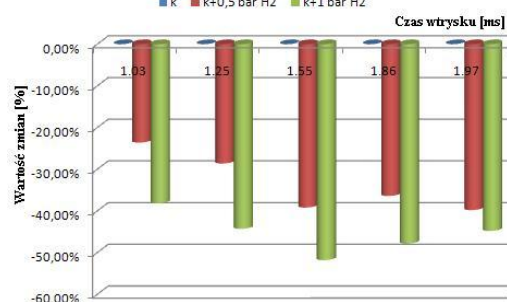
dotadku wodoru oraz 1 bar H₂. Przy czasie wtrysku równym 1,25 ms, i przy dodatku wodoru 0,5 bar wzrost emisji NO_x wynosi 17,4%, natomiast dla czasu wtrysku 1,97 ms, i przy dodatku wodoru 1 bar, zanotowano wzrost emisji tego związku na poziomie aż 82,7 %.



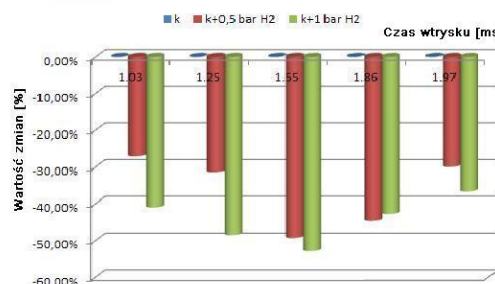
Rys.9. Procentowa względna zmiana stężenia NO_x [ppm]



Rys.10. Procentowa względna zmiana stężenia CO [ppm]



Rys.11. Procentowa względna zmiana stężenia HC [%]



Rys.12. Procentowa względna zmiana stężenia D [ppm]

5. Podsumowanie

Wzrastająca nieustannie ilość pojazdów z silnikami spalinowymi, prognozy dotyczące wyczerpywania się złóż ropy naftowej oraz dążenie do ochrony środowiska naturalnego sprawiły, iż nastąpił wzrost zainteresowania zastosowaniem innych

rodzajów paliw. Nowe paliwa, czy paliwa alternatywne powinny charakteryzować się następującymi cechami:

- napędzane nimi silniki nie powinny mieć gorszych charakterystyk funkcjonalnych niż zasilane paliwami konwencjonalnymi,
- silniki te powinny być bardziej przyjazne dla środowiska naturalnego,
- najlepszym rozwiązaniem byłoby, gdyby pochodziły ze źródeł odnawialnych.

Paliwa takie można nazwać niekonwencjonalnymi, zastępczymi lub alternatywnymi. Powszechnie przyjmowana definicja traktuje je jako substancje, które nie są produktami przerobu ropy naftowej, a ich właściwości są zbliżone do właściwości powszechnie stosowanych benzyn silnikowych i olejów napędowych. Obecnie najbardziej ekologicznym paliwem gazowym jest wodór, gdyż produktem jego spalania jest para wodna. Ponadto w spalinach występują niewielkie ilości tlenków azotu oraz węglowodorów i CO (produkty spalania oleju silnikowego). Zmniejszenie emisji tlenków azotu można uzyskać przez zubożenie mieszanki, co jednak prowadzi do spadku mocy silnika.

Na podstawie przeprowadzonych badań na silniku AVL 5804, można ocenić jak dodatek wodoru do oleju napędowego wpływa na emisję poszczególnych związków toksycznych spalin. Dostarcze-

nie dodatku wodoru do oleju napędowego spowodowało wzrost emisji NO_x, oraz spadek emisji CO, HC i zadymienia spalin. Badania zostały przeprowadzone na trzech różnych mieszankach paliwowych: pierwsze pomiary dotyczyły emisji związków toksycznych spalin w przypadku spalania oleju napędowego (k), kolejne pomiary dotyczyły emisji ze spalania oleju napędowego z 0,5 bar dodatku wodoru (k+ 0,5 bar H₂), natomiast ostatnie pomiary dotyczyły emisji ze spalania oleju napędowego z 1 bar dodatku wodoru (k+ 1 bar H₂). Zaobserwowano następujące zmiany emisji związków toksycznych:

- wzrost emisji NO_x nawet o 82,7% w przypadku spalania oleju napędowego z 1 bar dodatku H₂ przy czasie wtrysku t=1.97 ms,
- ogólny spadek emisji CO w granicach od 12,8% dla spalania oleju napędowego z 0,5 bar wodoru przy czasie wtrysku t=1.03 ms, aż do obniżenia emisji CO o ok. 72,7% dla spalania oleju napędowego z dodatkiem wodoru 1 bar, i przy czasie wtrysku t=1.97 ms,
- obniżenie emisji HC w granicach nawet 50% w przypadku spalania oleju napędowego z dodatkiem wodoru 1 bar,
- obniżenie stopnia zadymienia spalin w granicach nawet 30-50%.

Bibliography/Literatura

- [1] Surygała J.: Wodór jako paliwo. WNT Warszawa 2008.
- [2] Surygała J., Śliwka. E.: Emisje komunikacyjne w świetle unormowań prawnych. Nafta Gaz 2001.57 (5).282.
- [3] Lewandowski W.M.: Proekologiczne odnawialne źródła energii. WNT Warszawa 2007.
- [4] Kurzepa K., Grabowska A., Prokop J., Lipkowski A, W.: Perspektywy zastosowania biologicznych metod produkcji wodoru. Przemysł Chemiczny. 2005.84 (11),833.
- [5] Rybak W.: Spalanie i współpraca paliw stałych. Wrocław. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej 2003,s.6.

Mr Marek Idzior, DSc, DEng. – professor in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology
Prof. dr hab. inż. Marek Idzior – profesor na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej



Mr Maciej Bajerlein, Ph.D., Mech. Eng. – doctor in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology

Dr inż. Maciej Bajerlein – adiunkt na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej



Mr Maciej Bieliński, MEng. – postgraduate in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology

Mgr inż. Maciej Bieliński – doktorant na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej



Mr Paweł Daszkiewicz, MEng. – postgraduate in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology

Mgr inż. Paweł Daszkiewicz – doktorant na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej



Mr Paweł Stobnicki –, MEng. – postgraduate in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology

Mgr inż. Paweł Stobnicki – doktorant na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej

