

Rail Vehicles/Pojazdy Szynowe

www.railvehicles.eu



Zasilanie wodorem układów napędowych pojazdów szynowych

Ireneusz Pielecha^{a,*}, Jan Czerwinski^b, Danilo Engelmann^b, Jerzy Merkisz^c

^a Faculty of Civil and Transport Engineering, Poznan University of Technology, Poznan, Poland

^b Laboratory for IC-Engines and Exhaust Emission Control, University of Applied Sciences Technik und Informatik, Switzerland

^c CJ Consulting (CJC), Switzerland

ARTICLE INFO

Received: 21 February 2022

Revised: 21 March 2022

Accepted: 26 March 2022

Available online: 27 March 2022

KEYWORDS

Wodór

Właściwości wodoru

Magazynowanie wodoru

Silniki spalinowe zasilane wodorem

Poszukiwanie substytutów współczesnych paliw kopalnych prowadzi do wykorzystania nowych systemów napędowych (hybrydowych, elektrycznych) oraz zastosowania nowych paliw (gazowych, głównie wodoru). W artykule przedstawiono podstawową problematykę dotyczącą tego paliwa: od jego wydobycia, przez omówienie właściwości do jego zastosowania. Przedstawiono analizy dotyczące energochłonności wydobycia klasyfikując kolorystykę wodoru. Duży nacisk położono na rozwiązania konstrukcyjne dotyczące stosowania wodoru w silnikach spalinowych wraz z omówieniem koncepcji jego spalania. Przedstawiono również możliwości przechowywania wodoru w postaci skroplonej oraz sprężonej, wskazując równocześnie na nowoczesne rozwiązania jakimi są układy mieszane – przechowywanie w postaci krio-sprężonej. Wykazano, że spalanie wodoru w silnikach spalinowych zwiększa ich sprawność, a jednocześnie w znaczący sposób ogranicza emisję składników toksycznych spalin – w tym również emisję tlenków azotu.

This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

1. Wprowadzenie

Konieczność ograniczenia zużycia paliw kopalnych wymusza poszukiwanie zastępczych źródeł energii do napędu środków transportu. Wśród paliw alternatywnych wyróżnia się obecnie głównie paliwa gazowe, które ze względu na swoje właściwości mogą być wykorzystane w nowych systemach spalania (np. Turbulent Jet Ignition (TJI) [6, 25], HCCI [34], RCCI [36]). Największe zastosowanie wśród tych paliw ma obecnie metan stanowiący składnik gazu ziemnego. Jego wykorzystanie w konwencjonalnych silnikach spalinowych jest dość powszechne (w pojazdach typu heavy-duty), szczególnie ze względu na możliwości jego magazynowania. Magazynowanie gazu ziemnego w postaci sprężonej jest technologią już dość dobrze opanowaną. Mimo dużej wartości ciśnienia sprężania (do 20 MPa) [11] wtrysk takiego paliwa do kolektora dolotowego następuje przy ciśnieniu do 0.9 MPa. Znacznie mniejszą popularnością cieszy się przechowywanie gazu ziemnego w postaci skroplonej (LNG, temp. -162°C , ciśnienie ok. 100 kPa) [37]. Mimo że jego potencjał energetyczny jest większy, to zbyt

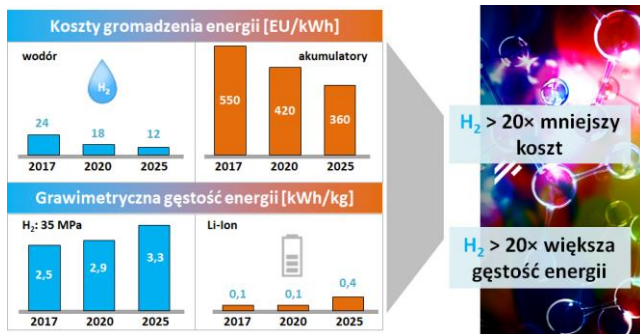
kosztowna technologia nie zyskała dotychczas należytego zainteresowania na rynku.

Obecnie znacznie korzystniejszą technologią jest zasilanie silników spalinowych wodorem, co powoduje, że produktami spalania są głównie para wodna oraz tlenki azotu [31]. Występują również niewielkie ilości innych składników spalin będących produktami spalania oleju silnikowego [27, 38]. Mimo tego silniki takie spełniają rygorystyczne normy emisji spalin.

Kolejnym przyszłościowym rozwiązaniem napędu środków transportu (w tym transportu szynowego) jest zastosowanie napędu elektrycznego. Gwałtowny rozwój akumulatorów litowo-jonowych (także do pojazdów szynowych) [23, 32] oraz zapowiedzi produkcji akumulatorów typu solid-state [24, 26] powodują ciągłe zainteresowanie takimi źródłami energii.

Analizę porównawczą kosztów gromadzenia energii przedstawiono na rys. 1. Potencjał energetyczny wodoru, a także paliw konwencjonalnych, jest nadal znacząco większy od oferowanego przez akumulatory. W roku 2020 koszty te w przypadku wodoru były ponad 20-krotnie mniejsze (w EU/kWh) niż dla akumulatorów Li-Ion. W kolejnych latach przewiduje się

dalsze ograniczenie tych kosztów (znacznie szybsze w przypadku wodoru niż akumulatorów). Może to doprowadzić do sytuacji, że w roku 2025, koszty te będą stanowiły około 30-krotną część kosztów dotychczasowych, przy znacznie większej przewodzie wodoru niż dotychczas. Wraz z ograniczeniem kosztów magazynowania wodoru można spodziewać się wzrostu grawimetrycznej gęstości energii wodoru (w kWh/kg) przy ciśnieniu 35 MPa (obecnie wodór przechowuje się już przy ciśnieniu 70 MPa). Akumulatory Li-Ion mają ten wskaźnik energetyczny około 20-krotnie mniejszy. Wynika z tego, że wodór jako paliwo może być korzystniejszą alternatywą dla elektrycznych napędów środków transportu.



Rys. 1. Wskaźniki energetyczne wodoru i akumulatorów Li-Ion [35]

Analiza sprawności współczesnych napędów pojazdów wskazuje jednakże na ponad 2-krotnie większą sprawność napędu elektrycznego (ponad 90%) niż spalinowego (ponad 40%). Jeśli uwzględnimy także ponad 20-krotnie większą wartość masowej gęstości energetycznej, to w rezultacie uzyskuje się około 10-krotny wzrost zasięgu pojazdu zasilanego wodorem (rys. 2). Takie rozważania prowadzą do wniosku, że wodór, będąc paliwem czystym i ekologicznym może stanowić bezpośrednią alternatywę wyboru sposobu zasilania silników spalinowych oraz ogniwo paliwowych w nowoczesnych środkach transportu.

Pozyskiwanie wodoru w znacznej części dotyczy nadal paliw kopalnych, a najtańszą metodą jest nadal



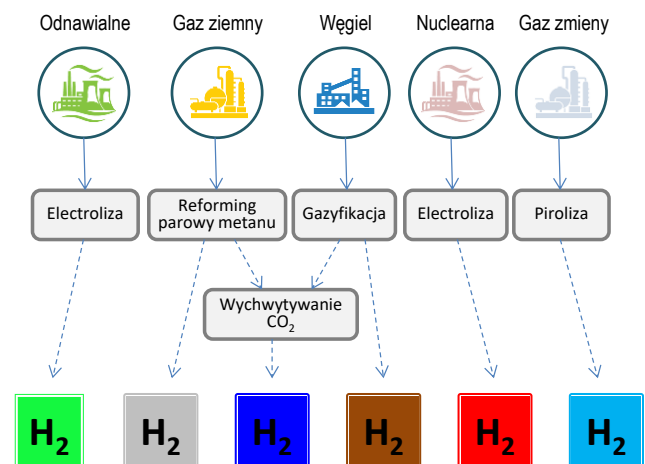
Rys. 2. Wskaźniki energetyczne dotyczące wodoru przy ciśnieniu 35 MPa oraz akumulatorów Li-Ion [35]

reforming parowy gazu ziemnego (tzw. wodór szary) – rys. 3. Obecnie 75% światowej produkcji wodoru pochodzi z gazu ziemnego. Przejściową metodą produkcji jest reforming parowy z wychwytywaniem emisji CO₂. Możliwe jest wykorzystanie technologii CCS (Carbon Capture Storage) lub CCU (Carbon Capture Utilization). Dzięki nim wytwarzany wodór może być prawie bezemisyjny (tzw. wodór niebieski). Wykorzystanie węgla kamiennego skutkuje tzw. wodorem czarnym, a brunatnego – wodorem brązowym (w obu przypadkach mamy do czynienia z emisją CO₂). Produkcja wodoru z metanu w procesie pirolizy (tzw. wodór turkusowy) skutkuje produkcją wodoru oraz węglem w postaci stałej.

Nowszym sposobem produkcji wodoru jest jego pozyskiwanie w procesie reakcji jądrowych. Wodór taki oznaczono kolorem czerwonym (zamiennie różowym lub purpurowym).

Najbardziej pożądanym kolorem wodoru jest zielony – wytwarzany w procesie elektrolizy do której energia elektryczna pochodzi wyłącznie ze źródeł odnawialnych.

Jeśli energia pochodzi z energii słonecznej, to produkowany jest tzw. wodór żółty, jeśli natomiast wodór pochodzi z geologicznych źródeł naturalnych, to jest to tzw. wodór biały.



Rys. 3. Produkcja wodoru i związane z tym jego „kolory” [15]

Charakterystykę rodzajów wodoru przedstawiono w tabeli 1. Obecnie 96% wodoru wytwarzane jest z paliw kopalnych [13]. Szacuje się, że około 25% globalnego ocieplenia netto, które wystąpiło w ostatnich dziesięcioleciach, jest spowodowane przez metan. Produkcja 1 kg wodoru (szarego) powoduje wytworzenie 13,3 kg dwutlenku węgla. Sprawność tego procesu nie przekracza 60%. Produkcja niebieskiego wodoru powoduje powstawanie jedynie 1,7 kg CO₂, przy sprawności procesu na poziomie 50%. Wodór z elektrolizy to jedynie 4% światowej produkcji. Produkcja zielonego wodoru powoduje tylko 0,5 kg CO₂.

Tablica 1. Charakterystyka kolorów wodoru [3]

Charakterystyka	Zielony	Niebieski	Szary	Czerwony	Turkusowy	Brązowy
Źródło energii	Odnawialne	Gaz ziemny, węgiel	Gaz ziemny, węgiel	Nuklearny	Gaz ziemny	Węgiel brunatny
Surowiec	Woda	Gaz ziemny, węgiel, ropa naftowa, biomasa	Gaz ziemny, węgiel	Woda	Gaz ziemny	Węgiel brunatny, biomasa
Technologia	Elektroliza	Reforming + CCS Gazyfikacja + CCS	Reforming Gazyfikacja	Elektroliza	Piroliza	Gazyfikacja
Produkt dodatkowy	Tlen	CO ₂	CO ₂	Tlen, odpady nuklearne	Węgiel (postać stała)	CO ₂
Ślad węglowy	Minimalny	Mały	Średni lub duży	Minimalny GHG, produkty jądrowe	Średni	duży

Sprawność procesu wynosi około 60–80%, jednakże do jego produkcji (1 kg) wymagane jest około 9 dm³ wody oraz nakładów energetycznych w wielkości 50 kWh. Produkcja niebieskiego wodoru powoduje emisję CO₂ o wielkości 1 kg (przy produkcji z gazu ziemnego), 2,4 kg (przy produkcji z węgla). Znacznie większe wartości emisji dwutlenku węgla uzyskuje się przy produkcji wodoru szarego (8,5 kg) lub czarnego (20 kg) [39].

Zużycie wodoru w Unii Europejskiej w roku 2018 wynosiło 8,3 mln ton [21]. Najwięcej zużywają rafinerie (44%), do produkcji amoniaku zużywa się około 34%, jako środki chemiczne – 12% oraz pozostałe gałęzie przemysłu – około 10%. Największymi producentami wodoru w Europie są Niemcy (2,5 mln ton rocznie) oraz Holandia (1,5 mln ton). Roczna produkcja wodoru w Europie w 2018 roku wyniosła 11,5 mln ton.

Polska Strategia Wodorowa do roku 2030 z perspektywą do roku 2040 r. jest dokumentem strategicznym, który określa główne cele rozwoju gospodarki wodorowej w Polsce i kierunki działań niezbędnych do ich osiągnięcia. Dokonano podziału wodoru na konwencjonalny, niskoemisyjny oraz odnawialny. Jego szczegółową charakterystykę przedstawiono na rys. 4.

Pojęcia:

- **Wodór konwencjonalny**
 - Paliwa kopalne, produkcja w PL: 1 mln ton (5 miejsce w EU)
 - Najtańszy, najbardziej emisyjny
- **Wodór niskoemisyjny**
 - Źródła odnawialne lub nieodnawialne z niskim śladem emisyjnym (<5,8 kg CO₂/kg H₂)
 - Wodór odpadowy – klasyfikowany jako niskoemisyjny (emisja wynika z innych procesów)
- **Wodór odnawialny**
 - Elektroliza wody z OZE (<1 kg CO₂/kg H₂)
 - Obecnie: brak instalacji + niski poziom komercjalizacji

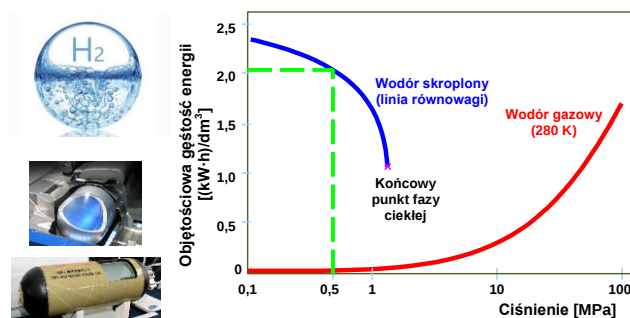


Rys. 4. Polska klasyfikacja wodoru [29]

2. Charakterystyka wodoru

Wodór jest gazem o najmniejszej gęstości (spośród wszystkich gazów) – około 14 razy lżejszym od powietrza. Pod względem energii masowej jest najbar-

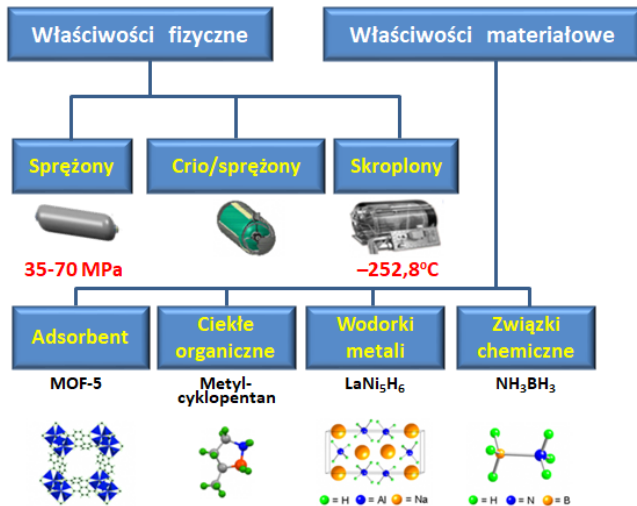
dziej wydajnym ze wszystkich obecnie eksploatowanych paliw. W przeciwieństwie do innych paliw, podczas jego spalania nie powstają inne szkodliwe produkty uboczne (łączy się jednak z azotem atmosferycznym tworząc tlenki azotu). Może być przechowywany w postaci skroplonej lub sprężonej (rys. 5). Wodór może być przechowywany w postaci sprężonej lub skroplonej (temp. –253°C). Krzywe dotyczące zmiany objętościowej gęstości energii wskazują na znacznie większe wartości dla wodoru przechowywanego w postaci skroplonej. Maksymalne wartości przechowywania wodoru w postaci sprężonej wynoszą 70 MPa (zbiorniki kompozytowe). Zbiorniki skroplonego wodoru zawierają 71 kg/m³ (temp. 20 K, ciśnienie – 0,4 MPa) która to wartość jest większa niż podczas przechowywania sprężonego wodoru (39,1 kg/m³ – 70 MPa oraz temperatura pokojowa).



Rys. 5. Parametry skroplonego i sprężonego wodoru [20]

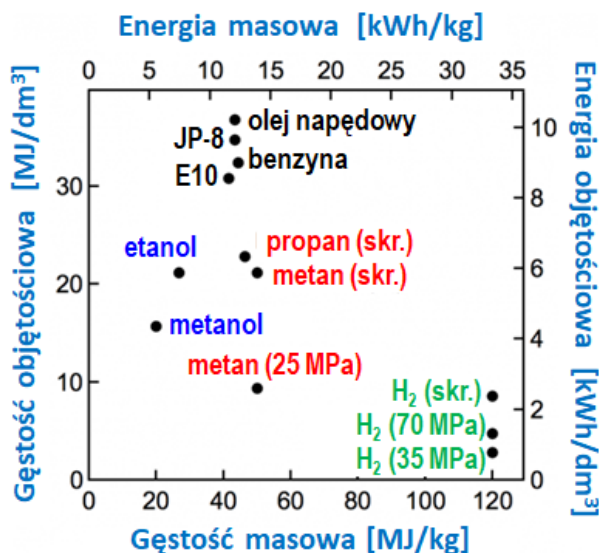
Nowoczesne rozwiązania przechowywania wodoru dotyczą także systemów mieszanych, które wykorzystują cechy systemów kriogenicznych (LH₂ – *liquefied hydrogen*) oraz systemów sprężonego wodoru (CH₂ – *compressed hydrogen*) – rys. 6. W takich warunkach wodór utrzymywany jest w temperaturze około –233°C. Dodatkowo możliwe jest wykorzystanie nowoczesnych materiałów absorbujących wodór. Ich zastosowanie zwiększa różnorodność magazynowania wodoru. Przy ciśnieniu otoczenia gęstość wodoru wynosi 0,3 g/dm³, przy 15 MPa – 10 g/dm³, przy 35 MPa – 28 g/dm³, natomiast przy 70 MPa – 40 g/dm³. Skroplony wodór ma gęstość około 71 g/dm³,

jednakże materiały absorbujące wodór mogą mieć te wartości na podobnym poziomie lub je przewyższać: adsorbenty (MOF-5 < 70 g/dm³), wodorki metali – *complex hydride* (70–150 g/dm³), chemicznie związane – *chemical storage* (70–150 g/dm³) oraz woda (111 g/dm³) [30].



Rys. 6. Warunki przechowywania wodoru [14]

Analiza porównawcza energii właściwych różnych paliw silnikowych wskazuje na duże wartości gęstości objętościowej paliw ciekłych (oleju napędowego, benzyny) – rys. 7.



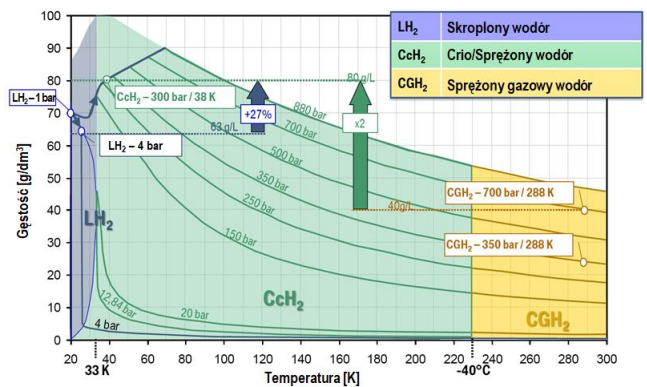
Rys. 7. Energetyczne uwarunkowania paliw ciekłych oraz gazowych (w tym wodoru) [14]

Metanol oraz etanol zawierające w swojej cząsteczce tlen mają te wartości znacząco mniejsze. Podobne wartości gęstości objętościowej uzyskują paliwa skroplone (propan, metan). Gęstość objętościowa gazowych paliw sprężonych jest najmniejsza (wodór).

Jednakże wskaźniki masowe są zupełnie odmienne: w przypadku skroplonego i sprężonego wodoru uzyskuje się wartości maksymalne. Wynika to częściowo z prawie trzykrotnie większej wartości opałowej wodoru niż innych paliw. Przechowywanie paliw o jednakowej masie wymaga małych pojemności zbiorników w przypadku paliw ciekłych, natomiast znacząco większych podczas przechowywania paliw gazowych (nawet poddanych sprężeniu lub skropleniu).

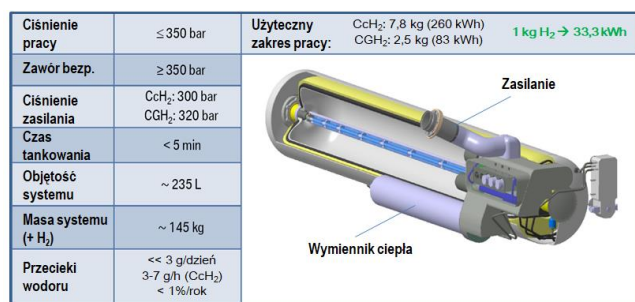
3. Magazynowanie wodoru w pojazdach

Wspomniane wcześniej magazynowanie wodoru w postaci skroplonej lub sprężonej może być uzupełnione o warunki pośrednie. Powodują one możliwości ograniczenia ciśnienia wodoru (sprężonego) przy jednoczesnym podwyższeniu jego temperatury (wodór w postaci skroplonej). Jest to tzw. crio/sprężony wodór. Wodór w postaci skroplonej może uzyskiwać gęstość 63 g/dm³ (rys. 8). Podczas jego sprężania do 70 MPa i przy $t = 15^{\circ}\text{C}$, wartość ta uzyskuje poziom 40 g/dm³. Ograniczenie ciśnienia do 30 MPa przy jednoczesnym utrzymywaniu temperatury o wartości 38 K (-235°C) umożliwia uzyskanie gęstości wodoru o wartości 80 g/dm³. Jest to wartość dwukrotnie większa niż podczas jego sprężania (70 MPa). Jest to również wartość większa od wskazanych wcześniej wartości gęstości podczas przechowywania w wodorkach metali.



Rys. 8. Warunki magazynowania wodoru [5]

Zbiorniki stalowe do przechowywania wodoru sprężonego do 35 MPa, umożliwiają także przechowywanie wodoru w postaci crio-sprężonej (rys. 9). Czas tankowania wodoru wynosi około 5 min, przy ciśnieniu zasilania: sprężonym gazem (CH₂: 320 bar), crio-sprężonym gazem (32 MPa). Przykładowo w zbiornikach samochodowych (rys. 9), w postaci crio-sprężonej przechowuje się 260 kWh energii (7,8 kg wodoru), w postaci sprężonej – tylko 83 kWh (2,5 kg H₂). Przecieki zbiornika wynoszą poniżej 3 g/dzień (co stanowi poniżej 1%/rok).



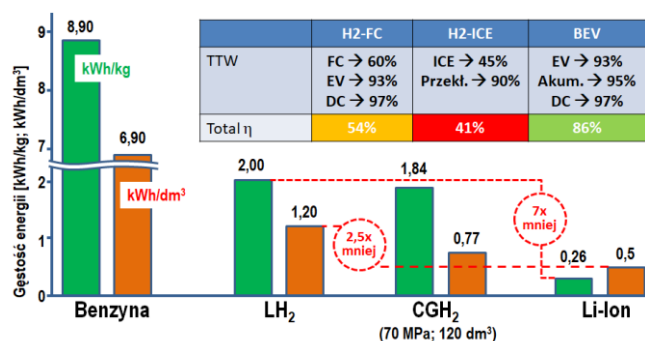
Rys. 9. Zbiorniki do przechowywania wodoru [22]

Wodór jest paliwem, którego wartość opałowa jest największa spośród paliw transportowych i wynosi 120 MJ/kg. (rys. 10) i jest ona niezależna od sposobu jego przechowywania. Wartości energii objętościowej wodoru skroplonego i crio-sprężonego są podobne (tego drugiego jest mniejsza o 4%). Gęstości wodoru crio-skroplonego są największe (80 kg/m³), około 15% większe od wodoru skroplonego i około 50% większe od wodoru sprężonego. Wartość opałowa metanu jest ponad 2-krotnie mniejsza od wodoru, a jego warunki przechowywania mogą być w postaci sprężonej lub skroplonej. Różnice energetyczne typowych paliw transportowych przedstawiono na rys. 10.

Paliwo	Skład	E [MJ/kg]	E [MJ/dm ³]	ρ [kg/m ³]	P [bar]	T [°C]
Olej napędowy	$\text{C}_9\text{-C}_{22}$	41	34	820-845	otoczenie	otoczenie
Benzyna	$\text{C}_4\text{-C}_{12}$	43	32	710-770	otoczenie	otoczenie
GTL	$\text{C}_9\text{-C}_{22}$	43	34	775	otoczenie	otoczenie
LPG	Propan, butan	46	25	540	2-8	otoczenie
CNG	Metan	50	9	160-190	200-250	otoczenie
LNG	Metan	50	21	400-500	8	-170/-130
CGH_2	Wodór	120	4,2	28-40	250-700	otoczenie
CCH_2	Wodór	120	9,6	80	280	-220
LH_2	Wodór	120	10	68	4	-240

Rys. 10. Paliwa jako źródła napędu środków transportu [2, 7]

Transportowe wskaźniki eksploatacyjne analizowanych paliw przedstawiono na rys. 11. Masowa energia jednostkowa wodoru w postaci skroplonej i sprężonej jest podobna, jednak jest ona 7-krotnie większa od tej energii przypadającej na akumulatory Li-Ion.

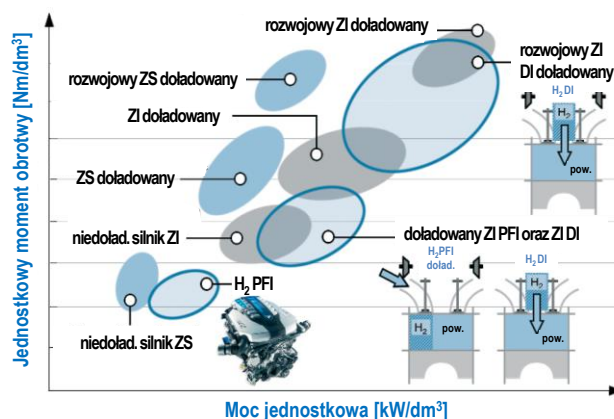


Rys. 11. Wodór vs. akumulatory w układach napędowych pojazdów [18]

Skalę dotychczasowego rozwoju technologicznego wyznacza jednak wskaźnik dla benzyny, wynoszący 8,9 kWh/kg. Wynika z tego, że paliwa ciekłe mają ponad 4-krotnie większą wartość energii masowej. Podobnie wypada porównanie wskaźników energii objętościowej. Pewna korzyść stosowania wodoru wynika z analizy jego wykorzystania w ogniach paliwowych oraz silnikach spalinowych. Uzyskuje się bezemisyjny napęd środków transportu przy dużej sprawności jego elementów składowych.

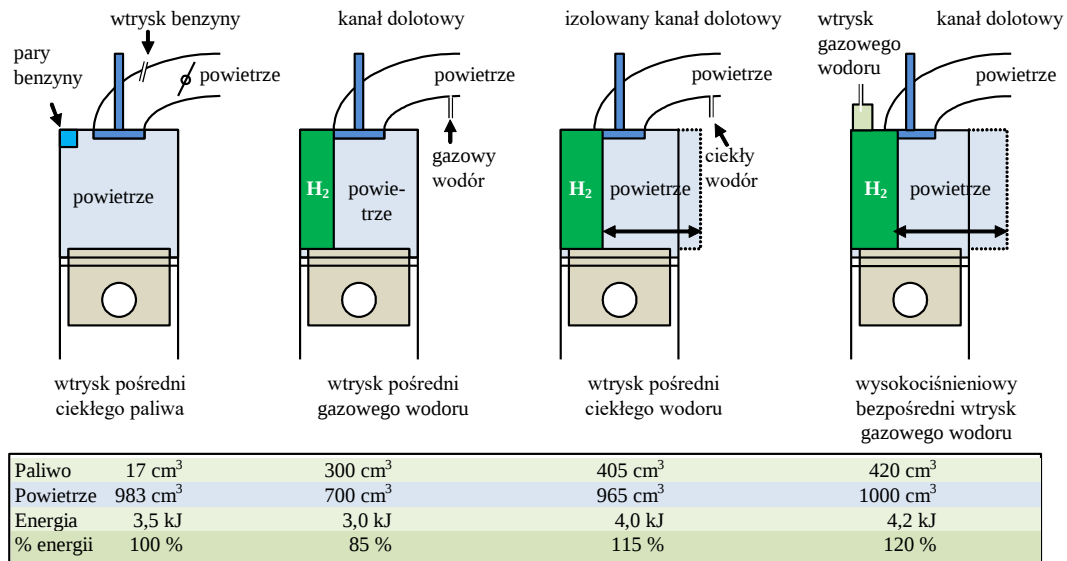
4. Wykorzystanie wodoru w silnikach spalinowych

Zasilanie silników spalinowych wodorem jest tematem znanym od lat 50-tych ubiegłego wieku. Obecnie, wraz z rozwojem systemów spalania, wodór może być dostarczany w postaci wtrysku pośredniego lub bezpośredniego (rys. 12). Współczesne konstrukcje silników zasilanych wodorem przewyższają jednostki konwencjonalne pod względem mocy jednostkowej, uzyskując moment obrotowy na podobnym poziomie. Wynika to z faktu, że wtrysk bezpośredni wodoru umożliwia zwiększenie gęstości ładunku dostarczanego do cylindra. Wtrysk pośredni wodoru powodował zastąpienie części dostarczanego powietrza paliwem (podawanego nawet w postaci skroplonej) – rys. 13. Wtrysk bezpośredni umożliwia pełny dołot powietrza przy dodatkowym wtrysku paliwa skroplonego. Umożliwia to dostarczenie ponad 20% energii więcej niż podczas konwencjonalnego wtrysku benzyny w układzie PFI (Port Fuel Injection)



Rys. 12. Koncepcje silników spalinowych [17, 19]

Rozwijane są koncepcje wysokociśnieniowego i kriogenicznego wtrysku wodoru do cylindra (rys. 14). Wysokociśnieniowy wtrysk wodoru jest realizowany przy ciśnieniu 150-300 bar przy temperaturze -40-120°C. Warunki takie umożliwiają zwiększenie gęstości energetycznej paliwa. Wtrysk kriogeniczny rozpatrywany jest jako wtrysk pośredni do kolektora dolotowego.



Rys. 13. Wtrysk wodoru do silnika spalinowego [2, 4, 17]

W takich warunkach wtrysk o ciśnieniu 3–6 bar (zbliżony do typowych układów PFI) realizowany jest w temperaturze -220 – 60°C . Eliminuje się w ten sposób straty ładunku spowodowane rozprężaniem wodoru (opisane poprzednio przy gazowym wtrysku pośrednim).

Współczesny wtrysk paliwa w silnikach o zapłonie iskrowym realizowany jest przez boczne lub centralne usytuowanie wtryskiwacza (rys. 15). Wtrysk boczny (*air-guided*) w ograniczonym stopniu umożliwia spalanie ładunków ubogich. Wtrysk centralny (*spray-guided*) umożliwia pełne spalanie ciekłych mieszanek ubogich i jest uważany za przyszłościowe rozwiązanie w silnikach spalinowych. Na rysunku 15 przedstawiono widok systemu spalania umożliwiającego realizację wtrysku gazowego oraz kriogenicznego (pośredniego). Przedstawione charakterystyki średniego ci-

śnienia indykowanego wskazują na znacznie większy potencjał zasilania kriogenicznego. Uzyskano o 30% większe wartości maksymalne p_e (średniego ciśnienia użytecznego, IMEP) przy zasilaniu kriogenicznym



Wysokociśnieniowy wtrysk wodoru DI

Ciśnienie: $150 \leq P \leq 300$ bar
Temperatura: $-40 \leq T \leq 120^{\circ}\text{C}$

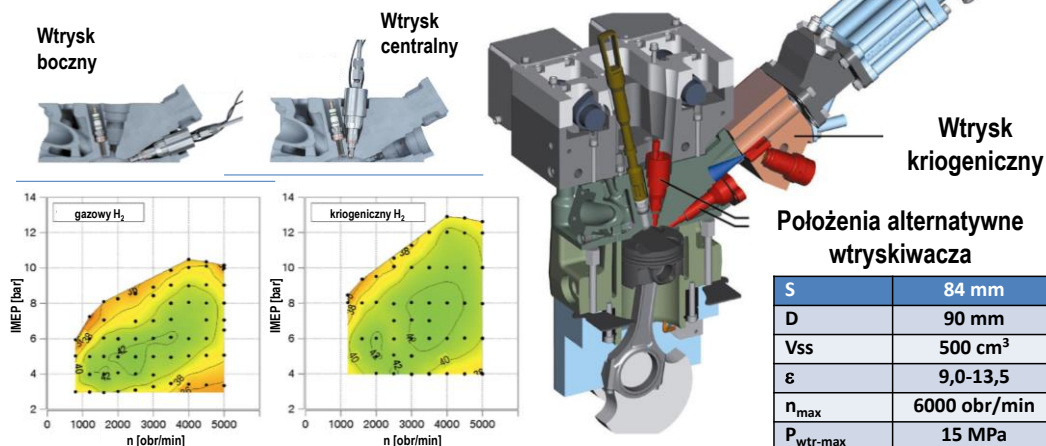


Kriogeniczny wtrysk wodoru PFI

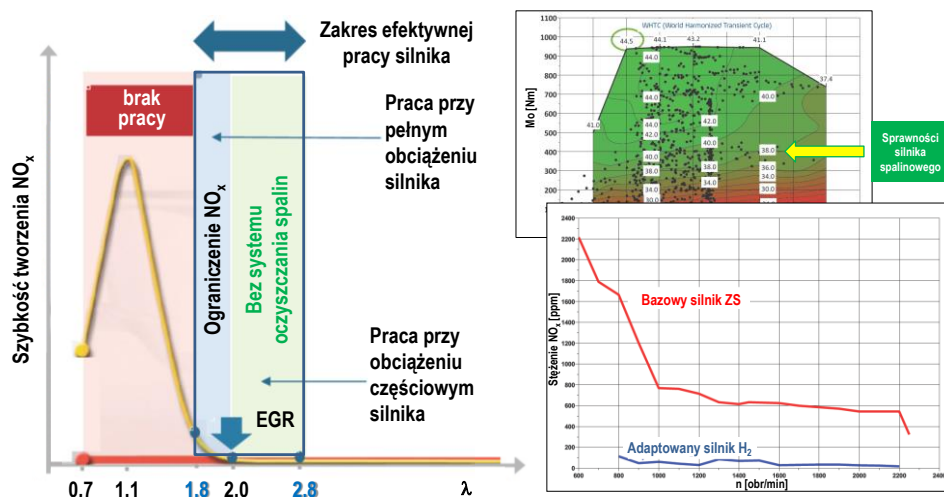
Ciśnienie: $3 \leq P \leq 6$ bar
Temperatura: $-220 \leq T \leq +60^{\circ}\text{C}$

Rys. 14. Zasilanie wodorem silnika spalinowego [10].

Rozwiązania systemu wtrysk bezpośredniego



Rys. 15. Rozwiązania bezpośredniego i pośredniego wtrysku wodoru w silniku spalinowym [16]



Rys. 16. Wtrysk i spalanie wodoru w silniku spalinowym [33]



Rys. 17. Spalanie wodoru w silniku spalinowym [33]

Współczesne silniki spalinowe zasilane wodorem pracują w systemie spalania mieszanek ubogich (rys. 16). Oznacza to, że charakterystyczne maksimum tworzenia tlenków azotu zostaje pominięte. Współczynnik nadmiaru powietrza ($\lambda = 2$) osiągany jest podczas spalania wodoru przy dużym nadmiarze powietrza (do spalania stechiometrycznego potrzeba 34 kg powietrza 1 kg paliwa). Warunki spalania wodoru przy $\lambda = 1,8\text{--}2,0$ wymagają stosowania układu recyrkulacji spalin w celu ograniczenia produkcji tlenków azotu. Przy większych wartościach współczynnika nadmiaru powietrza nie jest wymagany dodatkowy silnikowy lub pozasilnikowy układ oczyszczania spalin. Charakterystyczne obszary obciążenia (pośredniego i maksymalnego) przedstawiono dodatkowo na rys. 16. Zasilanie silnika wodorem powoduje, że uzyskiwane są duże wartości sprawności ogólnej silnika spalinowego – około 44% w zakresie charakterystyki zewnętrznej silnika. Porównując stężenie tlenku azotu silnika o zapłonie samoczynnym oraz silnika zasilanego wodorem można wskazać, znacząco mniejsze wartości NO przy zasilaniu wodorowym. Wraz ze zwiększeniem prędkości obrotowej zmniejsza się stę-

żenie NO w silniku ZS, natomiast pozostaje prawie stałe w silniku zasilanym wodorem, przy około 6-krotnie mniejszym poziomie stężenia.

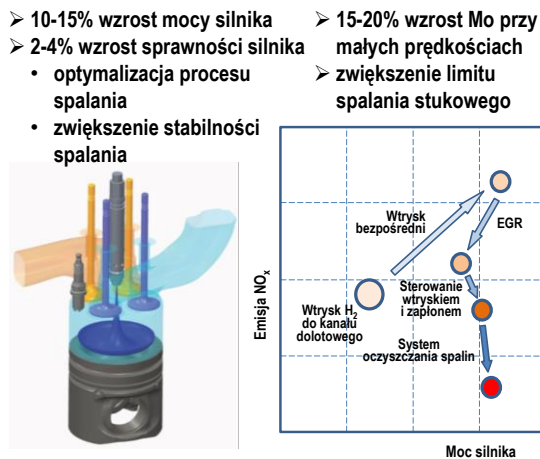
Systemy spalania silników tłokowych dostosowano do spalania wodoru. Jego zastosowanie powoduje szeroki zakres zapalności wodoru, dużą szybkość spalania, około 5 razy większą od spalania benzyny. Zapoczątkowanie zapłonu wymaga bardzo małych wartości energii, a jednocześnie uzyskuje się duży współczynnik dyfuzji, co sprzyja tworzeniu mieszanek homogenicznych. Małą emisję tlenków azotu oraz dużą odporność na spalanie stukowe uzyskano przez zastosowanie dużego udziału recyrkulowanych spalin w silniku. Umożliwiło to obniżenie maksymalnej temperatury spalania, w wyniku ograniczenia propagacji płomienia w cylindrze. Inne systemy prowadzące do optymalnego spalania wodoru przedstawiono na rys. 17.

Spalanie wodoru w silniku spalinowym wymaga jego dostarczenia w postaci wtrysku pośredniego lub bezpośredniego (rys. 18). Wtrysk bezpośredni zwiększa jakość spalania, co skutkuje lepszą charakterystyką momentu obrotowego. Zwiększeniu ulega średnia

wartość mocy jednostkowej o około 20% przy niezmienionej wartości stężenia tlenków azotu. Jeśli zwiększeniu ulega wartości mocy silnika, to emisja jednostkowa tlenków azotu odniesiona do mocy silnika będzie również mniejsza.

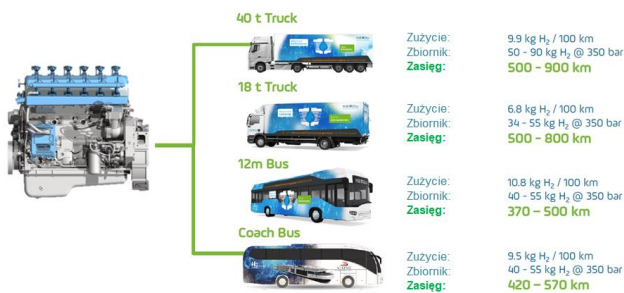
Zwiększenie mocy silnika przy wtrysku bezpośrednim wodoru powoduje zwiększenie stężenia tlenków azotu. Ich znaczne ograniczenie przy niewielkim ograniczeniu mocy silnika jest realizowane przez wy-

korzystanie systemu recyrkulacji spalin. Odpowiednie sterowanie wtryskiem paliwa oraz zapłonem (przeważnie jego opóźnieniem) powoduje dalsze ograniczenie NO. Kolejne ograniczenie NO może być realizowane przez zastosowanie układów oczyszczania spalin. W konsekwencji wtrysk bezpośredni wodoru będzie przyczyniał się do zwiększenia mocy i ograniczenia emisji tlenków azotu.



Rys. 18. Rozwiązania bezpośredniego i pośredniego wtrysku wodoru do silnika spalinowego [8, 28]

Silniki spalinowe wykorzystujące wodór stosuje firma Keoyu. Zastosowano zmodernizowane silniki formy Deutz. Zero-emisyjne silniki spalinowe heavy-duty to takie, których emisja wynosi poniżej 1 g CO₂/kWh (propozycja zawarta w regulaminie EC No 595/2009). Przedstawione na rys. 19 pojazdy wyposażone są w silniki spalinowe o pojemności 7,8 lub 13,5 dm³ (wyposażone w układy PFI) lub 15 dm³ (wyposażony w układ DI – 40 t truck).



Rys. 19. Wodór w zastosowaniach transportowych [33]

Pojazdy te zużywają około 10 kg H₂ na 100 km. Minimalny zasięg pojazdów wynosi ponad 350 km ze zbiornikami wodoru o ciśnieniu 35 MPa. Doskonalenie konstrukcji silników zasilanych wodorem powoduje zwiększenie ich wskaźników operacyjnych. Zmiana sposobu wtrysku paliwa (wtrysk pośredni zastąpiony bezpośrednim) wpływa nie tylko na zwiększenie jego mocy, ale także na zwiększenie momentu

obrotowego. Zmiana sposobu zasilania zwiększa nie tylko wskaźniki operacyjne silnika, a le równocześnie powoduje zmniejszenie zużycia paliwa, co skutkuje ostatecznie zwiększeniem sprawności jednostki napędowej (rys. 20).

Silnik	MAN H2676 UH01 (2006)	DEUTZ TCG7.8 PFI	DEUTZ TCG7.8 DI
Liczba cyl.	6	6	6
Vss	12,8 dm ³	7,8 dm ³	7,8 dm ³
Zasilanie	Wolnossący	Turbodoładowany	Turbodoładowany
Ne	150 kW	180 kW	210 kW (+130% mocy)
Mo	760 Nm	950 Nm	1100 Nm
Mieszanki	Stechiometryczne	Ubogie	Ubogie
System NO _x	Reaktor trójfunkcyjny	EGR + H ₂ SCR	EGR + H ₂ SCR (-60%)
Zużycie H ₂	21,6 kg H ₂ /100 km	10,7 kg H ₂ /100 km	9,7 kg H ₂ /100 km

Rys. 20. Rozwój silników zasilanych wodorem [33]

Silnik z wtryskiem bezpośrednim może pracować przeważnie przy współczynniku nadmiaru powietrza $\lambda > 2$. Emisja składników spalin jest na bardzo niskim poziomie. Porównanie z silnikiem o zapłonie samoczynnym (pierwsza wartość przy zasilaniu olejem napędowym, druga – wodorem) wskazuje na znacznie mniejsze wartości emisji (w g/kWh): CO₂ – 1,0:0,08; NO_x – 0,46:0,04; PM: 0,01:0,002; HC: 0,16:0,01 oraz CO: 4:0,01. Takie wartości wskazują około 10-krotnie mniejsze wartości emisji z silnika zasilanego wodorem niż zasilanego olejem napędowym.

5. Zakończenie

Zastosowanie wodoru w silnikach spalinowych jest alternatywą dla spalania typowych paliw kopalnych (benzyny, oleju napędowego). Alternatywa ta umożliwia znaczące ograniczenie emisji nie tylko dwutlenku węgla, ale również pozostałych składników spalin. Wykorzystanie wodoru w napędach środków transportu w postaci ogniw paliwowych umożliwia dalszą propagację wodoru w układach napędu środków

transportu. Należy zaznaczyć, że z 1 kg wodoru uzyskuje się 33 kWh energii, natomiast z paliw kopalnych wartość ta jest 2,4-krotnie mniejsza. Ten iloraz wskazuje na celowość wykorzystania układów napędowych wykorzystujących wodór jako paliwo w napędach środków transportu. Współczesne projekty dotyczące zasilania paliwami alternatywnymi wskazują na zwiększone zainteresowanie napędami wykorzystującymi ogniwa paliwowe oraz silniki spalinowe zasilane wodorem.

Nomenclature

CcH ₂	crio/compressed hydrogen	Li-Ion	lithium-ion battery
CCS	carbon capture storage	LNG	liquefied natural gas
CCU	carbon capture utilization	LPG	liquified petroleum gas
CH ₂	compressed hydrogen (CGH ₂)	Mo	engine torque
CI	compression ignition	Ne	engine power
CNG	compressed natural gas	NO	nitrogen oxide
DI	direct injection	PFI	port fuel injection
EGR	exhaust gas recirculation	PM	particulate matter
GHG	greenhouse gas	RCCI	reactivity controlled compression ignition
GLT	gas-to-liquid	SCR	selective catalysts reduction
HC	hydrocarbons	SI	spark ignition
HCCI	homogeneous charge compression ignition	TJI	turbulent jet ignition
IMEP	indicated mean effective pressure	V _{ss}	displacement
LH ₂	liquified hydrogen	λ	air excess ratio

Bibliography

- [1] Ahluwalia R.K., Hua T.Q., Peng J.-K. et al. Technical assessment of cryocompressed hydrogen storage tank systems for automotive applications. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2010, **35**(9), 4171-4184. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.02.074>
- [2] Akal D., Öztuna S., Büyükkakın M.K. A review of hydrogen usage in internal combustion engines (gasoline-LPG-diesel) from combustion performance aspect. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020, **45**(60), 35257-35268. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.02.001>
- [3] Broadleaf Capital International Pty Ltd. The colour of hydrogen. <https://broadleaf.com.au/resource-material/the-colour-of-hydrogen/>
- [4] Bureika G., Matijošius J., Rimkus A. Alternative carbonless fuels for internal combustion engines of vehicles. Ecology in Transport: Problems and Solutions. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2020, **124**. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42323-0_1
- [5] Burke A., Zhao H.. Fuel cells and hydrogen in long-haul trucks. *Sustainable Transportation Energy Pathways*. University of California, Davis, California, May 2017.
- [6] Distaso E., Amirante R., Cassone E. et al. Analysis of the combustion process in a lean-burning turbulent jet ignition engine fueled with methane. *Energy Conversion and Management*. 2020, **223**, 113257. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113257>
- [7] Durzyński Z. Hydrogen-powered drives of the rail vehicles (part 1). *Rail Vehicles/Pojazdy Szynowe*. 2021, **2**, 29-40. <https://doi.org/10.53502/RAIL-139980>
- [8] Eichlseder H., Grabner P., Schaffer K. Internal combustion Engine – An alternative energy converter for hydrogen. *Graz University of Technology*, 06/16/2020.
- [9] Electrolyser market outlook. Decarbonate Co-Innovation project. https://www.decarbonate.fi/wp-content/uploads/2020/09/Decarbonate_hydrogen_webinar_10062020.pdf
- [10] Ellgas S. Simulation of a hydrogen internal combustion engine with cryogenic mixture formation. *Cuvillier Verlag*, Goettingen 2008.
- [11] Farzaneh-Gord M., Saadat-Targhi M., Khadem J. Selecting optimal volume ratio of reservoir tanks in CNG refueling station with multi-line storage system. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016, **41**(48), 23109-23119. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.10.050>
- [12] Hirscher M. (Ed.). Handbook of Hydrogen Storage: New Materials for Future Energy Storage. *John Wiley & Sons*, Weinheim, March 2010.
- [13] Howarth R.W., Jacobson M.Z. How green is blue hydrogen? *Energy Science & Engineering*. 2021, **9**, 1676-1687. <https://doi.org/10.1002/ese3.956>

- [14] Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage> (27.01.2022).
- [15] Hydrogen as an Energy Carrier. Clean, safe solution for global decarbonisation. 2022 Schlumberger. <https://newenergy.slb.com/new-energy-sectors/hydrogen-as-an-energy-carrier> (27.01.2022).
- [16] HyICE – Optimization of the Hydrogen Internal Combustion Engine. Summary of an Integrated Project in the 6th Framework Programme of the European Commission. February 2007.
- [17] Kiesgen G., Berger E., Rottengruber H. Hydrogen internal combustion engines for vehicle generations of the future. *AutoTechnology*, 2006, **6**, 40-43. <https://doi.org/10.1007/BF03246951>
- [18] Kircher O., Greim G., Burtscher J. et al. Validation of cryo-compressed hydrogen storage (CCH₂) – a probabilistic approach. *International Conference on Hydrogen Safety*. San Francisco, September 12-14, 2011.
- [19] Korn T. The new highly efficient hydrogen internal combustion engine as ideal powertrain for the heavy-duty sector. *Internationaler Motorenkongress 2019*. Proceedings. Springer Vieweg, Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-26528-1_23
- [20] Krainz G., Bartlok G., Bodner P. et al. Development of automotive liquid hydrogen storage systems. *AIP Conference Proceedings*. 2004, **710**(35). <https://doi.org/10.1063/1.1774664>
- [21] Kto zarobi na polskim wodorze? 4.11.2020. <https://wysokienapiecie.pl/32899-kto-zarobi-na-polskim-wodorze/>
- [22] Kunze K., Kircher O. Cryo-Compressed Hydrogen Storage Cryogenic Cluster Day, *BMW EfficientDynamics*. Oxford, September 28, 2012.
- [23] Lee P.-Y., Park S., Cho I. et al. Vibration-based degradation effect in rechargeable lithium ion batteries having different cathode materials for railway vehicle application. *Engineering Failure Analysis*. 2021, **124**, 105334. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105334>
- [24] Li C., Wang Z., He Z. et al. An advance review of solid-state battery: Challenges, progress and prospects. *Sustainable Materials and Technologies*. 2021, **29**, e00297. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00297>
- [25] Liu P., Zhong L., Zhou L. et al. The ignition characteristics of the pre-chamber turbulent jet ignition of the hydrogen and methane based on different orifices, *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021, **74** (46), 37083-37097. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.08.201>
- [26] Murali A., Sakar M., Priya S. Insights into the emerging alternative polymer-based electrolytes for all solid-state lithium-ion batteries: A review. *Materials Letters*. 2022, **313**, 131764. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.131764>
- [27] Oikawa M., Kojiya Y., Sato R. et al. Effect of supercharging on improving thermal efficiency and modifying combustion characteristics in lean-burn direct-injection near-zero-emission hydrogen engines. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022, **47**(2), 1319-1327. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.061>
- [28] Pauer T., Weller H., Schünemann E. et al. H₂ ICE for Future Passenger Cars and Light Commercial Vehicles. *41th International Vienna Motor Symposium, Fortschrittberichte VDI*. Vienna 2020, 12.
- [29] Polska Strategia Wodorowa do roku 2030 z perspektywą do roku 2040. Ministerstwo Klimatu i Środowiska. Warszawa 2021. <https://www.gov.pl/web/klimat/polska-strategia-wodorowa-do-roku-2030>
- [30] Ren J., North B.C. Shaping Porous Materials for Hydrogen Storage Applications: A Review. *Journal of Technology Innovations in Renewable Energy*. 2014, **3**, 12-20. <https://doi.org/10.6000/1929-6002.2014.03.01.3>
- [31] Shinde B.J., Karunamurthy K. Recent progress in hydrogen fuelled internal combustion engine (H₂ICE) – A comprehensive outlook. *Materials Today: Proceedings*. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.378>
- [32] Slattery M., Dunn J., Kendall A. Transportation of electric vehicle lithium-ion batteries at end-of-life: A literature review. *Resources, Conservation and Recycling*. 2021, **174**, 105755. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105755>
- [33] Sousa A. The Hydrogen Combustion Engine as the Most Effective CO₂-Reduction Technology Today. Keyou. TU-Berlin, 21.11.2019.
- [34] Srinivasan J., Swamy A.K., Madanagopalan P. et al. Performance and emission characteristics of a methane fuelled HCCI engine at various injection location and operating speed. *Materials Today: Proceedings*. 2021, **46**(2), 1022-1027. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.216>
- [35] The Most Effective Technology to Comply with CO₂-Legislation: The New Generation of Hydrogen Internal Combustion Engines. Keyou, wrzesień.2020.
- [36] Wang L., Liu J., Ji Q. et al. Experimental study on the high load extension of PODE/methanol RCCI combustion mode with optimized injection strategy. *Fuel*. 2021, **122726**. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122726>
- [37] Xu J., Lin W. Research on systems for producing liquid hydrogen and LNG from hydrogen-methane mixtures with hydrogen expansion refrigeration. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021, **46**(57), 29243-29260. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.10.251>
- [38] Yilmaz I.T. The effect of hydrogen on the thermal efficiency and combustion process of the low compression ratio CI engine. *Applied Thermal Engineering*. 2021, **197**, 117381. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117381>
- [39] Yu M., Wang K., Vredenburg H. Insights into low-carbon hydrogen production methods: Green, blue and aqua hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021, **46**(41), 21261-21273, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.016>