

Marszałek Natalia

Wodór jako paliwo alternatywne dla transportu lotniczego

JEL: P42. DOI: 10.24136/atest.2019.225.

Data zgłoszenia: 27.01.2020. Data akceptacji: 28.02.2020.

W przedstawionym artykule scharakteryzowano wodór jako paliwo alternatywne, mogące znaleźć w przyszłości zastosowanie w transporcie lotniczym. Przedstawiono oraz omówiono wybrane właściwości wodoru oraz porównano z konwencjonalnym paliwem lotniczym, stosowanym w turbinowych silnikach odrzutowych. Przybliżono problematykę emisji szkodliwych substancji do atmosfery, powstałych w wyniku spalania paliw węglowodorowych. Omówiono metody otrzymywania oraz magazynowania wodoru.

Słowa kluczowe: transport lotniczy, paliwo alternatywne, wodór, turbinowy silnik odrzutowy.

Wstęp

Paliwa stosowane w lotnictwie są cieczami węglowodorowymi, których energia chemiczna, uwalniana podczas procesu spalania zachodzącego w turbinowym silniku lotniczym, przetwarzana jest na energię kinetyczną gazów wylotowych, wytwarzających siłę ciągu [15]. Paliwa dedykowane dla turbinowych silników odrzutowych, wytwarzane są w procesie rozdzielania ropy naftowej na podstawowe frakcje, stanowiące materiał wyjściowy do produkcji różnego rodzaju paliw [10]. Na chwilę obecną, ropa naftowa odgrywa decydującą rolę jako surowiec wykorzystywany do produkcji paliw płynnych, które stosowane są w zespołach napędowych szeroko rozumianych środków transportu [15]. Surowiec ten stanowi tzw. nieodnawialne źródło energii, a jego zasoby są ograniczone. Wzrastające zapotrzebowanie na to paliwo kopalne, pozwoliło na rozwój nowych metod oraz technologii wykorzystywanych w poszukiwaniach nowych zasobów oraz ich wydobyciu z pokładów, do których dostęp był utrudniony [21, 23]. Poruszając temat zasobów ropy naftowej, warto przytoczyć słowa Zaki Yamani, byłego ministra saudyjskiego Ministerstwa Ropy Naftowej i Surowców Mineralnych: „era kamienia łupanego nie skończyła się z powodu braku zasobów kamienia i era ropy naftowej skończy się długo wcześniej niż na świecie skończy się ropa” [23].

Nie tylko aspekty ekonomiczne przemawiają za tym aby poszukiwać paliw alternatywnych, które w przyszłości mogłyby zastąpić lub zmniejszyć zapotrzebowanie na ropę naftową. Uwagę należy zwrócić również na problem emisji toksycznych składników spalin, powstających podczas spalania paliwa węglowodorowego. W trakcie procesu spalania, paliwa węglowodorowe reagują z tlenem, powodując emisję szkodliwych związków takich jak dwutlenek węgla, tlenki azotu, tlenek węgla, niespalone węglowodory, tlenki siarki czy cząstki stałe. Związki te wywierają negatywny wpływ na środowisko naturalne. Zanieczyszczenia atmosfery odpowiedzialne są między innymi za: globalne ocieplenie się klimatu, występowanie kwaśnych deszczy, powstawanie smogu, czy zubożenie warstwy ozonowej.

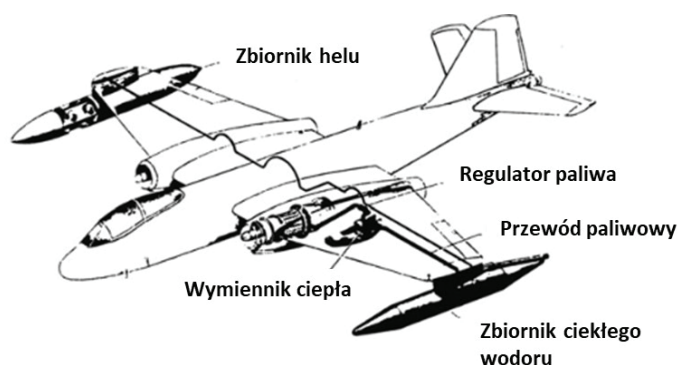
Od czasu uprzemysłowienia, które miało swój początek w XIX wieku, zawartość dwutlenku węgla w atmosferze stale wzrasta [8]. W kwestii transportu lotniczego, problem emisji toksycznych składników spalin regulują normy ustanawiane przez Organizację Międzynarodowego Lotnictwa Cywilnego (ICAO

- International Civil Aviation Organization) [6]. Organizacja ta opublikowała na swoich stronach dokument dotyczący Mechanizmu Kompensacji i Redukcji CO₂ dla Lotnictwa Międzynarodowego (CORSIA- Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation). Podjęte przez ICAO działania mają na celu utrzymanie od roku 2021 zerowego przyrostu emisji dwutlenku węgla (CO₂), w odniesieniu do poziomu emisji tego związku z lat 2019-2020. Ograniczenia te będą dotyczyły lotniczych przewozów międzynarodowych, wykonywanych statkami powietrznymi o maksymalnej masie startowej przekraczającej 5 700 kg, które emitują więcej niż 10 000 ton dwutlenku węgla rocznie. Restrykcjom tym nie będą podlegały loty humanitarne, medyczne czy przeciwpożarowe [28, 29].

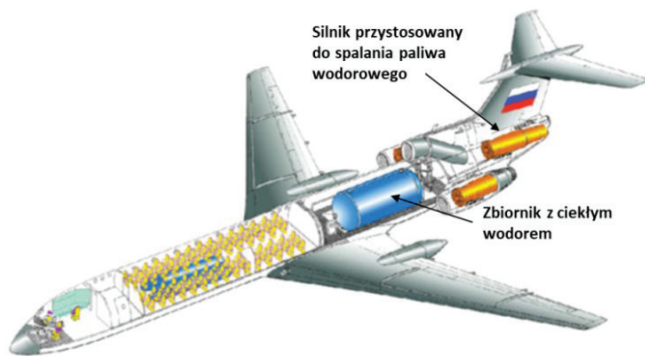
Mając na względzie dobro światowej gospodarki energetycznej oraz środowiska naturalnego, podejmowane są badania nad możliwością wdrożenia paliw alternatywnych. Interesująco, w porównaniu z innymi paliwami alternatywnymi takimi jak syntetyczne paliwo lotnicze czy metan, przedstawia się możliwość zastosowania wodoru [3]. Do niezaprzeczalnych zalet należy możliwość uzyskania znacznej ilości energii jaką można pozyskać w procesie spalania wodoru oraz równoczesna redukcja szkodliwych składników spalin dostających się do atmosfery [5].

Zastosowanie technologii wodorowych w lotnictwie

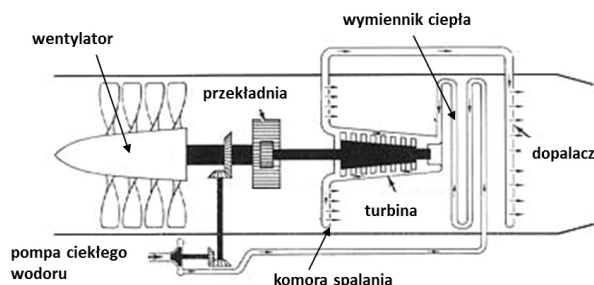
Zainteresowanie wodorem jako paliwem lotniczym sięga lat 50. XX wieku. Już wtedy prowadzone były prace badawcze nad możliwością wdrożenia wodoru jako paliwa, których efektem były podjęte próby w locie. Pierwszy lot samolotu zasilanego wodorem, miał miejsce w roku 1956. Był to dwusilnikowy bombowiec Martin B-57 Canberra (rys. 1). Jeden z dwóch silników samolotu, został przystosowany do spalania zarówno konwencjonalnego paliwa lotniczego jak i wodoru. Ciekły wodór przechowywano w zbiorniku paliwowym, podwieszonym pod lewym skrzydłem. Podczas startu oraz lądowania, w obu silnikach spalano naftę lotniczą, natomiast podczas lotu, zmodyfikowany silnik J-65, miał możliwość wykorzystywania paliwa wodorowego. Ilość wodoru przenoszona w zbiorniku paliwowym pozwalała na 21-minutową pracę zespołu napędowego. Testy w locie zakończyły się niezaprzeczalnym



Rys.1. Samolot bombowy Martin B-57 Canberra [35]



Rys. 2. Tupolev Tu-155 [36]



Rys. 3. Silnik „304” opracowany przez firmę P&W [27]

sukcesem, potwierdzając niezawodną i bezpieczną pracę silnika [2, 26].

Podobne badania, również zakończone testami w locie, prowadzone były przez Russian Tupolev Aircraft Company w 1988 roku. W ramach prowadzonych prac badawczych, modyfikacji poddano trzysilnikowy samolot Tu-154. Pierwszy lot prototypowej konstrukcji, oznaczonej Tu-155, miał miejsce 15 kwietnia 1988 roku. W przypadku tego statku powietrznego, dokonano modernizacji centralnego silnika umieszczonego w tylnej części kadłuba, pod usterzeniem (rys. 2). Kriogeniczny zbiornik paliwowy zainstalowano w tylnej części kadłuba, tuż przed zespołem napędowym. Zaadaptowany silnik był również przystosowany do spalania metanu [2, 25].

W połowie sierpnia 1956 roku, firma Pratt&Whitney zaprojektowała nowy rodzaj silnika turbinowego, oznaczony numerem „304”, spalającego wodór w charakterze paliwa. Schemat konstrukcji zaprojektowanej jednostki napędowej przedstawiono na rys. 3. Ciekły wodór pompowano pod wysokim ciśnieniem do wymiennika ciepła, umiejscowionego pomiędzy turbiną a tylną częścią silnika. Podgrzany wodór napędzał turbinę, która z kolei napędzała wentylator poprzez przekładnię redukcyjną. Pewna ilość wodoru upuszczana z turbiny, spalana była w strumieniu powietrza w głównej komorze spalania. Ilość spalanego paliwa była pod ścisłą kontrolą w celu redukcji temperatury gazów wylotowych, dostarczających ciepło do wymiennika ciepła. Pozostałą część wodoru spalano w dopalaczu, znajdującym się za wymiennikiem ciepła. Gorące gazy ulegały rozprężeniu w dyszy wylotowej, wytwarzając siłę ciągu. Maksymalna średnica silnika wynosiła 2,03 m, długość gondoli silnika 10,7 m, waga 2722 kg, ciąg na wysokości 30 500 m wynosił 21,4 kN, natomiast jednostkowe zużycie paliwa 0,082 kg/N·h. Największym wyzwaniem jakie napotkano podczas pracy nad konstrukcją silnika, była pompa wysokiego ciśnienia oraz wymiennik ciepła [27].

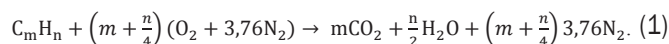
Warto również wspomnieć, że w 2000 roku rozpoczął się Europejski projekt „Cryoplane”, trwający dwa lata, koncentrujący się

na możliwości wprowadzenia ciekłego wodoru, jako paliwa lotniczego, dedykowanego dla turbinowych silników lotniczych.

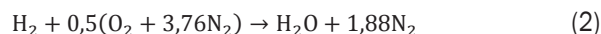
Wodór jako paliwo alternatywne dla nafty lotniczej

Wodór bada się nie tylko pod kątem samodzielnego zastosowania ale również jako dodatek do paliw konwencjonalnych [15]. Wśród często wymienianych korzyści, wynikających z zastosowania wodoru jako paliwa, jest potencjalne zmniejszenie emisji szkodliwych substancji do atmosfery. Głównym produktem spalania wodoru jest para wodna. Mimo, że dwutlenek węgla nie jest wydzielany, to tlenki azotu ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$) nadal powstają w procesie spalania. Dwutlenek azotu i tlenek azotu są związkami, które występują zazwyczaj razem. W produktach spalania przeważa tlenek azotu. Powstająca para wodna również stanowi gaz cieplarniany, jednak w odróżnieniu do dwutlenku węgla jej wpływ na atmosferę zależy od wysokości, ponadto czas jej przebywania jest znacznie krótszy (kilka dni do około jednego roku). Emisja pary wodnej do wyższych warstw troposfery i stratosfery przyczynia się do formowania smugi kondensacyjnej i chmur pierzastych (cirrus), wpływających na efekt cieplarniany [1][3]. Największym zagrożeniem dla stratosfery ze strony lotniczych silników turbinowych jest emisja pary wodnej, dwutlenku węgla oraz tlenków azotu [10].

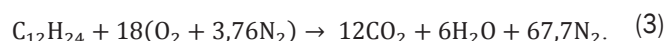
Reakcję spalania dowolnego paliwa węglowodorowego w powietrzu można wyrazić za pomocą równania [17]:



Przebieg reakcji spalania wodoru w powietrzu przedstawia się następująco:



Zgodnie z zależnością (1), równanie chemiczne reakcji spalania mieszaniny paliwa lotniczego o przybliżonym wzorze $\text{C}_{12}\text{H}_{24}$ [10] z powietrzem, można zapisać w następującej postaci:



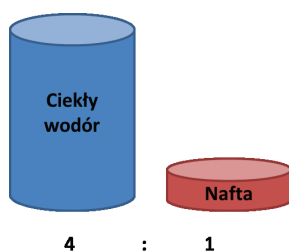
W przeciwieństwie do paliw węglowodorowych, w wyniku spalania wodoru z tlenem brak jest emisji dwutlenku węgla CO_2 , tlenku węgla CO , dwutlenku siarki SO_2 , niespalonych węglowodorów czy cząstek stałych. Niekorzystny wpływ tych substancji na organizmy żywe oraz środowisko naturalne, został przedstawiony w tabeli 1. Jedynym toksycznym gazem powstającym w wyniku spalania wodoru jest tlenek azotu, który powstaje w wyniku termicznej dysocjacji azotu z powietrza atmosferycznego [15].

Emisja tlenków azotu, generowana przez transport lotniczy, wynosi mniej niż 3% ogólnej emisji tego związku, spowodowanej działalnością człowieka [9]. Zgodnie z literaturą [4], typowy dwusilnikowy samolot odrzutowy, podczas lotu trwającego 1h i przy liczbie pasażerów wynoszącej 150 osób, emituje do atmosfery następujące ilości szkodliwych substancji: 8500 kg dwutlenku węgla, 30 kg tlenku azotu, 2,5 kg dwutlenku siarki, 2 kg tlenku węgla, 0,4 kg niespalonych węglowodorów oraz 0,1 kg cząstek stałych i sadzy.

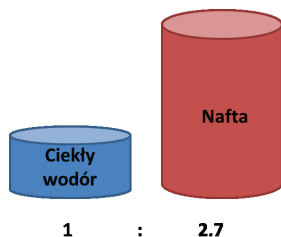
Wodór, w przeciwieństwie do paliw kopalnych, jest „nośnikiem energii”, co oznacza, że może ją magazynować i dostarczać. Obok znacznej redukcji toksycznych składników spalin, kolejną zaletą, wyróżniającą wodór spośród innych potencjalnych paliw alternatywnych, jest duża wartość opałowa paliwa (tzw. dolne ciepło

Tab. 1. Szkodliwe działanie składników spalin [9, 10]

Substancja zanieczyszczająca	Wpływ na środowisko i organizmy żywe
CO	Działanie toksyczne. Zmniejsza zdolność krwi do absorpcji tlenu. W dużym stężeniu może doprowadzić do śmierci.
niespalone węglowodory	Działanie toksyczne. W połączeniu z NOx przyczyniają się do formowania smogu fotochemicznego.
cząstki stałe	Powodują zanieczyszczenie atmosfery oraz ograniczają jej przejrzystość. Przyczyniają się do astmy i chorób układu oddechowego.
NO	Powstawanie smogu fotochemicznego, niszczenie warstwy ozonowej.
SOx	Działanie toksyczne oraz korozyjne. Przyczyniają się do powstawania kwaśnych deszczy.



Rys. 4. Zawartość energii w jednostce objętości [24]



Rys. 5. Zawartość energii w jednostce masy [24]

spalania). Wartość opałowa paliwa definiuje ilość ciepła, jakie zostanie wydzielone z paliwa podczas procesu całkowitego spalania, efektem którego będą produkty takie jak H_2O i CO_2 [10]. Wartość opałowa wodoru wynosi ok. 116 MJ/kg, podczas gdy dla konwencjonalnego paliwa lotniczego ok. 42,8 MJ/kg [9]. Stosując paliwo wodorowe w silnikach turbinowych, ilość ciepła doprowadzona do komory spalania wzrosłaby ok. 2,7 razy, w porównaniu z konwencjonalnym paliwem lotniczym typu Jet A-1 (rys. 5). Ciepło spalania paliwa jest istotnym parametrem, który wpływa w sposób bezpośredni na osiągi turbinowego silnika odrzutowego. Analizę wpływu paliwa wodorowego na osiągi dwuprzepływowego silnika turbinowego, przedstawiono w pracy [11]. Duża wartość ciepła spalania wodoru powoduje, że również siła eksplozji jest znacznie większa, niż popularnych paliw węglowodorowych [15]. Wodór jest gazem nietoksycznym, bezbarwnym i bezwonny, bardzo aktywnym w reakcjach spalania [17].

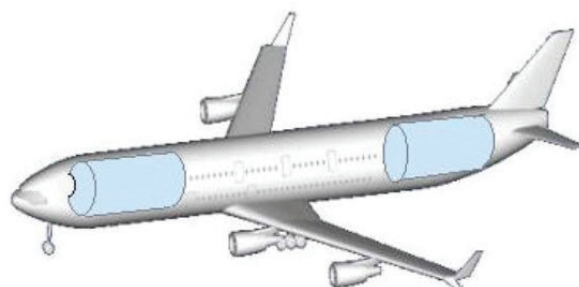
W porównaniu do ropy lotniczej, wodór posiada czterokrotnie mniejszą gęstość energii na jednostkę objętości (rys. 4), co oznacza, że do przechowywania paliwa wodorowego wymagane są zbiorniki o czterokrotnie większej objętości. We współczesnych samolotach pasażerskich, zbiorniki z paliwem usytuowane są w skrzydłach. W przypadku zastosowania paliwa wodorowego w transporcie lotniczym, wymagana będzie modyfikacja struktury płatowca. Ze względu na objętość i ciężar zbiorników do



Rys. 6. Małe regionalne samoloty [19]



Rys. 7. Samoloty krótkiego i średniego zasięgu [19]



Rys. 8. Samoloty dalekiego zasięgu [19]

przechowywania wodoru, konieczne staje się umiejscowienie ich w kadłubie [19]. W raporcie końcowym [19], podsumowującym dwuletni europejski projekt „Cryoplane”, rozpoczęty w 2000 roku, przedstawiono koncepcję rozmieszczenia zbiorników paliwowych w zależności od przeznaczenia statku powietrznego. Podczas prowadzonych badań, uwzględniono problem związany ze zmianą środka ciężkości statku powietrznego. Na drodze przeprowadzonych analiz, dla małych regionalnych samolotów, za optymalne rozmieszczenie zbiorników paliwowych przyjęto tylną część kadłuba (rys. 6). W przypadku tej konfiguracji, w celu redukcji wpływu zbiornika na zmianę środka ciężkości samolotu, poszerzono kadłub płatowca. Dla samolotów krótkiego i średniego zasięgu (rys. 7), wymagających przenoszenia większej ilości paliwa, zbiorniki paliwa usytuowano w górnej części kadłuba, nad przedziałem dla pasażerów. Konfiguracja ta pociąga za sobą zwiększenie przekroju poprzecznego kadłuba, co wpływa na wzrost siły oporu (a to z kolei przekłada się na zasięg samolotu). Najbardziej korzystnym rozwiązaniem jest umieszczenie dwóch zbiorników z ciekłym wodorem w kadłubie: w przedniej oraz tylnej jego części (rys. 8). Rozwiązanie takie zaproponowano dla samolotów dalekiego zasięgu.

Kolejnym problematycznym zagadnieniem w przypadku zastosowania wodoru w turbinowych silnikach odrzutowych, jest konieczność przechowywania go w temperaturach kriogenicznych [3]. Stawia to przed transportem lotniczym konieczność stosowania dobrze izolowanych i odpornych na wstrząsy zbiorników, bezpiecznie rozmieszczonych w płatowcu, jak również nowego systemu zasilania wraz z układem pompowym. System zasilania

wodorem wymaga zastosowania wymiennika ciepła, pozwalającego na podgrzewanie kriogenicznie przechowywanego wodoru, do temperatury pozwalającej na jego wtrysk do komory spalania [19]. Od poszczególnych podzespołów wymagana będzie niezawodności oraz długa żywotności [19]. Zarówno zbiorniki jak i elementy układu paliwowego, muszą być wykonane z materiałów odpornych na niskie temperatury. Istotne znaczenie wykazuje szczelność zbiornika wodorowego jak i całego układu zasilania [15]. Ponieważ w postaci gazowej wodór jest bezbarwny i bezwonny, konieczne będzie zastosowanie niezawodnego systemu bezpieczeństwa, pozwalającego na wykrycie ewentualnych nieszczelności oraz wycieków. Szacuje się, że wdrożenie w życie nowej koncepcji samolotu, przystosowanej do przenoszenia i spalania w silnikach paliwa wodorowego, może zająć ok. 30 lat [3].

Na drodze przeprowadzonych obliczeń i badań, zrealizowanych w ramach „Cryoplane project”, prognozuje się, że wzrost powierzchni przekroju poprzecznego kadłuba, spowodowany wymiarami zbiornika paliwowego, pociągnie za sobą wzrost zużycia energii od 9% do 14%. Spowodowane będzie to wzrostem siły oporu stawianej przez statek powietrzny. Szacuje się, że masa własna samolotu OWE (*Operating Weight Empty*), może wzrosnąć o 23%, co wywołane będzie przez dodatkową strukturę jaką jest zbiornik paliwowy, podczas gdy różnica maksymalnej masy startowej MTOW (*Maximum Take-Off Weight*) będzie wahać się w granicach od +4,4% do -14,8% w zależności od konfiguracji samolotu i misji [19].

Paliwa stosowane w różnych środkach transportu charakteryzują się pewnymi właściwościami do których można zaliczyć: temperaturę zapłonu, zakres palności, zakres wybuchowości, temperaturę samozapłonu, szybkość spalania czy energię zapłonu [15]. W tabeli 2, zestawiono i porównano wybrane właściwości wodoru oraz konwencjonalnego paliwa lotniczego stosowanego w lotniczych silnikach turbinowych.

Wodór pali się białym płomieniem, w szerokim zakresie stężeń w powietrzu [8]. Stężeniowe granice zapłonu wodoru wynoszą od 4% do 75% objętości gazu w powietrzu [15]. Szeroki zakres palności wodoru zaliczyć można do jego zalet, ponieważ pozwala na redukcję powstających w procesie spalania NOx [3].

Energia zapłonu paliwa, opisuje ilość energii zewnętrznej, którą należy dostarczyć do mieszaniny palnej aby nastąpił jej zapłon. W przypadku wodoru energia zapłonu jest bardzo niska i wynosi ok. 0,02 mJ. Oznacza to, że nawet niewielka iskra posiada wystarczająco dużo energii, aby doprowadzić do zapłonu wodoru. Dlatego też bardzo ważną kwestią, w przypadku zastosowania tego rodzaju paliwa, jest wyeliminowanie potencjalnych źródeł zapłonu [15]. Dla nafty lotniczej energia zapłonu jest ok. 12,5 razy wyższa i wynosi 0,25 mJ.

Wodór charakteryzuje się bardzo dobrą pojemnością cieplną, przez co może z powodzeniem znaleźć zastosowanie jako czynnik chłodzący, stosowany do chłodzenia elementów silnika turbinowego pracujących w wysokich temperaturach, np. takich jak zespół turbiny [3, 5].

Szybkość spalania wodoru jest o rząd wielkości wyższa od szybkości spalania nafty lotniczej i wynosi od 2,65 do 3,25 m/s. Atrybut ten informuje o szybkości z jaką przemieszcza się płomień przez palną mieszaninę gazów [15]. Ponieważ wodór spala się szybko, możliwe staje się skrócenie strefy spalania [3]. Im większa szybkość spalania mieszaniny palnej, tym większy wzrost ciśnienia i temperatury [15].

Tab. 2. Porównanie wybranych właściwości wodoru oraz nafty lotniczej [3, 9, 4, 15]

		Wodór	Nafta lotnicza
Ciepło spalania	MJ/kg	116	42,8
Gęstość energii	MJ/m ³	8,7	33,2-36
Gęstość	kg/m ³	70,8	775-840
Temperatura wrzenia	K	423-573	21
Zdolność odbierania ciepła	MJ/kg	20,20	0,38-0,85
Zakres palności	obj.%	4-75	0,8-6,0
Minimalna energia zapłonu	mJ	0,02	0,25
Szybkość spalania	m/s	2,65-3,25	0,39
Temperatura płomienia	K	2431,15	2295,15
Temperatura samozapłonu	K	858,15	713,15
Współczynnik dyfuzji w powietrzu	m ² /s	0,000061	0,000005

W przypadku mieszanek ubogich (współczynnik nadmiaru powietrza $\alpha > 1$), spalanie zachodzi w niższych temperaturach, dlatego możliwe staje się dobranie warunków spalania w taki sposób, aby emisja toksycznych składników spalin była jak najniższa [10, 15]. Efekt ten można uzyskać wyłącznie przy małym obciążeniu silnika [15].

Wodór jest około 14 razy lżejszy od powietrza i charakteryzuje się dużym współczynnikiem dyfuzji. Cecha ta powoduje, że w sytuacji przypadkowego uwolnienia, wodór szybko ulatnia się do atmosfery [8]. Pary paliwa lotniczego Jet-A1 są cięższe od powietrza, dlatego rozprzestrzeniają się przy powierzchni wykazując tendencję do gromadzenia się w dolnych partiach pomieszczeń. Pary mogą również tworzyć mieszaniny wybuchowe z powietrzem. Ze względów bezpieczeństwa należy unikać gromadzenia się par paliwa w przestrzeniach ograniczonych, kanałach itp. [20].

W odniesieniu do zakresu łatwopalności i wybuchowości, dolne limity na ogół są uważane za ważniejsze w razie wypadku. Pomimo faktu, że wodór posiada szeroki zakres palności, jego dolny limit palności jest znacznie wyższy niż w przypadku innych paliw, w tym również paliwa lotniczego (tabela 2). Temperatura samozapłonu wodoru jest wyższa niż dla nafty lotniczej.

W sytuacji zastosowania wodoru w formie ciekłej, ważnym zagadnieniem jest odpowiedni dobór materiałów na zbiorniki oraz instalację, ponieważ część z nich pod wpływem niskich temperatur staje się krucha, co może skutkować awarią instalacji paliwowej. Molekuły wodoru są nieporównywalnie mniejsze od cząstek innych substancji występujących na ziemi, stąd mają one zdolność do dyfundowania przez różnego rodzaju materiały (np. gumę, materiały porowate, stal oraz materiały kompozytowe) [15, 18]. Zjawisko to powoduje, że zbiorniki ciekłego wodoru powinny cechować się małym stosunkiem powierzchni do objętości, gdyż pozwala to na zmniejszenie strat ciekłego wodoru, w wyniku parowania. Z tego też powodu, stacjonarne zbiorniki wykorzystywane do przechowywania wodoru w stanie ciekłym, posiadają kształt kulisty [13].

Ze względu na niską temperaturę przechowywania, zbiorniki oraz instalacja muszą posiadać bardzo dobrą izolację termiczną w celu zmniejszenia odparowania ciekłego wodoru. Oprócz materiałów izolacyjnych, w ciśnieniowych zbiornikach kriogenicznych często stosuje się również płaszcze próżniowe. Gazy oraz ciecze mają zdolność krzepnięcia w ciekłym wodorze. Mieszanina ciekłego wodoru ze stałym tlenem lub powietrzem może być wybuchowa i stanowić poważne zagrożenie. Dlatego przed wprowadzeniem materiału napędowego, należy usunąć z przewodów

zasilających oraz ze zbiornika paliwowego powietrze oraz wilgoć [16].

Jedną z metod pozwalającą na zwiększenie gęstości wodoru (obok sprężania lub skraplania) jest tak zwany „slush hydrogen”, będący przechłodzoną mieszaniną ciekłego wodoru wraz z zawieszonymi cząstkami wodoru w stanie stałym. Problemy pojawiające się w przypadku tego rozwiązania to m.in. trudności z produkcją oraz utrzymaniem jednorodnej mieszaniny [16]. Badania nad zastosowaniem tego rodzaju paliwa prowadzone były przez NASA, w celu zastosowania w samolotach poruszających się z prędkościami hipersonicznymi. Mieszanina ciekłego wodoru z zawieszonymi cząstkami wodoru stałego, osiąga gęstość od 15 do 20% wyższą od ciekłego wodoru, co pozwala na zmniejszenie objętości magazynowanego paliwa oraz na zastosowanie zbiorników paliwowych o mniejszych rozmiarach [3].

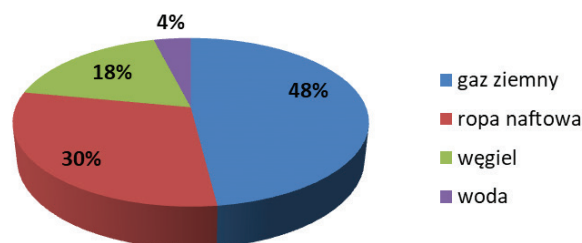
Wdrożenie paliwa wodorowego pociągnie za sobą nie tylko zmianę konfiguracji płatowca, dyktowaną przez zbiorniki paliwowe, ale również całego systemu paliwowego. Zmian wymagały będą rury wchodzące w skład instalacji paliwowej, zawory, pompy, zawory wentylacyjne. Modernizacji wymagał będzie również system kontroli paliwa (czujniki pomiarowe, układ sterowania przepływem paliwa) oraz system ochrony przeciwpożarowej (czujniki pomiarowe, system wentylacji). Modyfikacje obejmą również zespół napędowy (pompa wysokiego ciśnienia, wymiennik ciepła, zawór sterujący przepływem paliwa, chłodnica oleju, komora spalania) [24].

Metody pozyskiwania wodoru

Wodór w przeciwieństwie do paliw kopalnych, nie jest dostępny w stanie wolnym w przyrodzie, co oznacza, że musi on zostać wydzielony z dowolnego źródła energii i następnie może znaleźć zastosowanie w sposób bezpośredni jako paliwo [12]. W związku z tym problemem, pojawia się zapotrzebowanie na opracowanie niedrogiej i zarazem efektywnej metody produkcji wodoru, mającej jednocześnie niewielki wpływ na środowisko naturalne. Istnieje szeroki zakres procesów produkcyjnych, które z uwagi na rodzaj zastosowanego surowca podzielić można na dwie główne kategorie: technologie konwencjonalne i odnawialne. Obecnie w światowej produkcji wodoru nadrzędną rolę odgrywają paliwa kopalne, co jest ściśle powiązane z kosztami produkcji i cenami paliw, utrzymywanymi na akceptowalnym poziomie [12]. Procentowy udział poszczególnych surowców dominujących przy produkcji wodoru, przedstawiono na rys. 9.

Jak już wspomniano, na skalę przemysłową wodór pozyskuje się z naturalnych surowców energetycznych takich jak ropa naftowa, węgiel lub gaz ziemny [15]. Technologie stosowane w procesie wytwarzania wodoru obejmują m.in. reforming parowy, częściowe utlenianie pozostałości rafineryjnych, odzysk wodoru z gazowych produktów, powstających w wyniku przetwarzania ropy naftowej i węgla, zagazowanie węgla [15]. Wymienione metody są metodami najbardziej wydajnymi. Natomiast największą ich wadą jest emisja dużej ilości dwutlenku węgla, wzmagającego problem efektu cieplarnianego. Najpowszechniejszą i najbardziej rozwiniętą metodą produkcji wodoru na dużą skalę jest proces parowego reformingu metanu. Efektywność tej metody mieści się w przedziale od 74 do 85% [12]. Jest to również najtańsza opcja produkcji wodoru.

Prognozuje się, że w najbliższej przyszłości zainteresowanie udziałem technologii odnawialnych w produkcji wodoru znacznie wzrośnie, na co wpływ będą miały malejące zasoby paliw



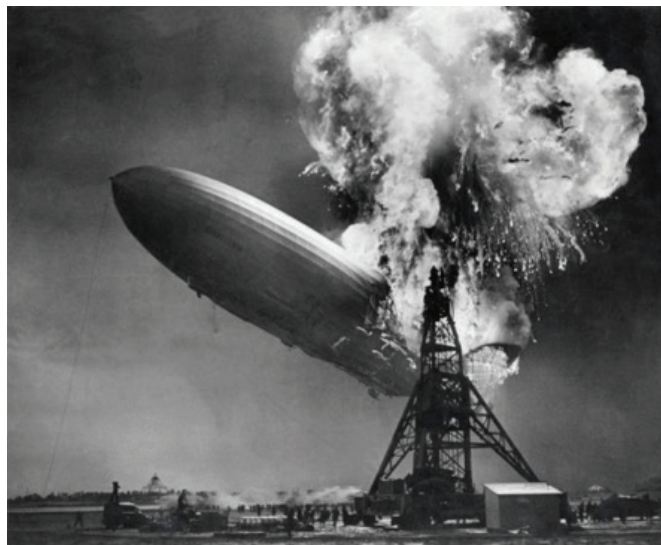
Rys. 9. Procentowy udział surowców wykorzystywanych do produkcji wodoru [12]

kopalnych oraz rosnąca potrzeba ograniczenia emisji CO₂ do atmosfery [12].

Do drugiej kategorii, uwzględniającej metody produkcji wodoru ze źródeł odnawialnych, zaliczyć można biomasę czy wodę. Wykorzystując biomasę jako surowiec, metody produkcji można podzielić dodatkowo na dwie podkategorie: procesy termochemiczne i biologiczne. Termochemiczna metoda obejmuje głównie pirolizę, zagazowanie, spalanie i przeprowadzanie w stan ciekły, podczas gdy głównymi procesami biologicznymi są bio-fotoliza bezpośrednia i pośrednia, fermentacja ciemna, foto-fermentacja oraz sekwencyjna fermentacja ciemna i foto-fermentacja [12].

Biomasa pozyskiwana jest z materiału roślinnego i zwierzęcego, takiego jak płody rolne oraz ich pozostałości, drewno, trawa, pozostałości przemysłowe, odpady zwierzęce i komunalne [12].

Druga klasa technologii odnawialnych dotyczy metod, pozwalających na wytwarzanie wodoru w procesie rozszczepiania wody, takim jak elektroliza, termoliza i fotoelektroliza, wykorzystując wodę jako jedyny materiał wejściowy [12]. Metoda elektrolizy wody znana jest od 1800 roku. Technologia ta jest dość kosztowna z tego względu, że nakłady energii potrzebne na przeprowadzenie procesu elektrolizy są znacznie wyższe od energii, jaką można uzyskać z otrzymanego tą metodą wodoru [5]. Szacuje się, że do uzyskania 1 m³ wodoru, wymagane są 3 kWh prądu elektrycznego [5]. Efektywność tego procesu wynosi 40-60% [12]. Proces elektrolizy wody jest odpowiedzialny za produkcję dwutlenku węgla tylko wtedy, gdy w celu wytworzenia potrzebnej energii elektrycznej, zostaną wykorzystane paliwa kopalne. W procesie tym można zastąpić paliwa kopalne odnawialnymi



Rys. 10. Katastrofa sterowca Hindenburg [31]

źródłami produkcji energii takimi jak energia słoneczna czy energia wiatrowa [12].

Metody stosowane do produkcji wodoru powinny być konkurencyjne z metodami konwencjonalnymi. Wymaga się również aby emisja gazów cieplarnianych, powstałych w procesie otrzymywania wodoru, została ograniczona do minimum [15].

Przechowywanie wodoru oraz bezpieczeństwo użytkowania

Znaczne obawy odnośnie bezpieczeństwa użytkowania wodoru wywołuje katastrofa sterowca Hindenburg, która miała miejsce 6 maja 1937 roku (rys. 10). Przypuszczalnie przyczyną katastrofy było poszycie, pokryte środkiem mającym zdolność do gromadzenia ładunku elektrycznego (choć zdania w tym temacie są do dzisiaj podzielone). Prawdopodobnie w trakcie cumowania Hindenburga na lotnisku Lakehurst, w stanie New Jersey w USA, między segmentami poszycia przeskoczyła iskra elektryczna, zapoczątkowując tym samym pożar łatwopalnej powłoki. Pożar wodoru nastąpił w wyniku kontaktu z ogniem. Na pokładzie przebywało 97 osób, z czego 35 osób podróżujących sterowcem poniosło śmierć w wyniku wypadku [31].

Wiele właściwości fizycznych wodoru sprawia, że jest on bezpieczniejszy w użytkowaniu niż powszechnie używane paliwa. Wodór jest gazem nietoksycznym. Ponadto jest lżejszy od powietrza (charakteryzuje się dużą lotnością), co powoduje, że szybko rozprzyszcza się po uwolnieniu i nie tworzy chmur szkodliwych oparów. Umożliwia to szybkie rozproszenie paliwa w przypadku wycieku [22].

Obok licznych zalet wodoru posiada również wady. Największy problem dotyczy przechowywania wodoru. Ważne zagadnienie stanowi opracowanie optymalnych metod jego przechowywania. Szacuje się, że około 40% energii zawartej w wodorze, może zostać utracone w wyniku procesu magazynowania [7].

Główną niedogodnością związaną z przechowywaniem wodoru jest jego niezwykle niska gęstość w warunkach normalnych. Aby zmniejszyć objętość zajmowaną przez gazowy wodór, opracowano i przebadano różnorodne procesy technologiczne.

Jedną z opracowanych technologii jest sprężanie wodoru do wysokich ciśnień. Metoda ta jest stosunkowo prosta i ekonomiczna. Zbiorniki ciśnieniowe, o odpowiednich wymiarach, wymagają zastosowania materiałów, które wytrzymają wysokie ciśnienia oraz pozwolą na uniknięcie dyfuzji wodoru. W praktyce powoduje to znaczny przyrost masy zbiorników paliwowych, dlatego dąży się do zastępowania metali materiałami lżejszymi, ograniczającymi przenikanie wodoru [8].

Zbiorniki ciśnieniowe poddawane są szczegółowym testom, zarówno pod względem nadciśnienia panującego w zbiorniku jak również przypadkowych uderzeń.

Sprężanie pozwala na zwiększenie gęstości energii wodoru. Przykładowo dolne ciepło spalania wodoru, przechowywanego pod ciśnieniem 1 atm wynosi $10,05 \text{ GJ/m}^3$. Ciepło spalania wodoru sprężonego do ciśnienia wynoszącego 200 atm wynosi 1820 GJ/m^3 , natomiast zwiększając ciśnienie do 690 atm, ciepło spalania wzrasta do wartości 4500 GJ/m^3 [15].

Zbiorniki ciśnieniowe do magazynowania wodoru w stanie gazowym, zbudowane są z kilku warstw. Warstwa wewnętrzna wykonana jest z polimeru o dużej masie cząsteczkowej. Stanowi ona barierę dla wodoru, ograniczając jego ucieczkę ze zbiornika. Na warstwę zewnętrzną stosowane są materiały cechujące się dużą wytrzymałością na rozerwanie. Pomiędzy obiema skrajnymi warstwami, znajduje się warstwa z kompozytu węglowego.

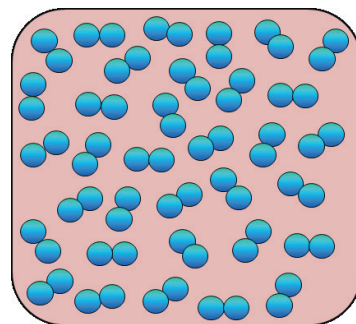
Wyposażenie zbiornika stanowi czujnik i regulator ciśnienia zamontowany wewnątrz zbiornika jak również czujnik temperatury [15].

W przypadku transportu lotniczego najlepszym sposobem przechowywania paliwa wodorowego, jest jego skroplenie. Proces skraplania wodoru oraz utrzymanie go w stanie ciekłym jest zabiegiem bardzo kosztownym. Ciekły wodór charakteryzuje się nie tylko większą gęstością energii ale jest też łatwiejszy w transporcie. Największą wadą ciekłego wodoru jest konieczność przechowywania w temperaturach kriogenicznych (-253°C). Ponadto z procesem skraplania wodoru związane są duże nakłady energii, wynoszące ok. 30-40% wartości energii wodoru sprężonego [15]. Dodatkowo na koszt magazynowania wodoru w stanie ciekłym składają się: objętość oraz masa zbiornika jak również rodzaj zastosowanych materiałów izolacyjnych. Zbiorniki wodorowe posiadają zazwyczaj kształt cylindryczny, charakteryzujący się dużym stosunkiem średnicy do długości. Różnicę pomiędzy sprężonym gazem a cieczą kriogeniczną przedstawiono w sposób obrazowy na rys. 11 oraz rys. 12.

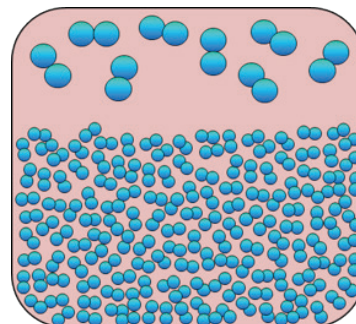
Przechowywanie wodoru w zbiornikach kriogenicznych w stanie ciekłym, posiada niezaprzeczalną zaletę, dominującą nad ciśnieniowymi zbiornikami przeznaczonymi do przechowywania wodoru gazowego, wynikającą z faktu, że straty wodoru w wyniku jego dyfuzji osiągają nawet 5-25-krotnie niższą wartość [5].

Zbiornik ciekłego wodoru wyposażony jest m.in. we wskaźnik poziomu cieczy, zawór wraz z linią bezpieczeństwa, zawór odcinający, podgrzewacz elektryczny, chłodnicę wodną, zawór zwrotny, zawór wraz z linią doprowadzającą wodór oraz linie wyprowadzania cieczy i wyprowadzania gazu [15]. Schemat przykładowego zbiornika wodorowego wraz z komponentami wchodzącymi w jego skład, przedstawiono na rys. 13.

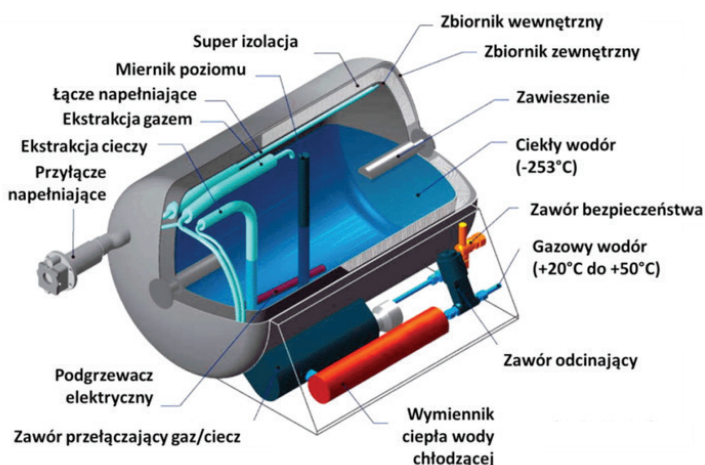
Do stacjonarnego przechowywania ciekłego wodoru wykorzystuje się zbiorniki o kształcie sferycznym (rys. 14). Największe zbiorniki posiada NASA na przylądku Cape Canaveral. Zbiorniki te charakteryzują się bardzo dobrą izolacją, dzięki której dzienne



Rys. 11. Wodór w postaci sprężonego gazu [34]



Rys. 12. Wodór jako ciecz kriogeniczna [34]

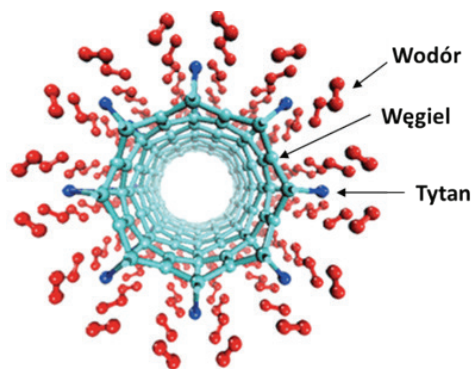


Rys. 13. Schemat zbiornika wodorowego [32]

odparowywanie wodoru nie przekracza 0,03% [15]. Pomimo stosowania w zbiornikach wodorowych bardzo dobrych izolacji, nie można zapobiec temu, że ciecz kriogeniczna ciągle wrze i odparowuje [15]. Obok magazynowania, kolejnym problemem jest napełnianie zbiorników ciekłego wodoru, któremu towarzyszą znaczne straty, spowodowane ucieczką wodoru do atmosfery. Szacuje się, że straty jakie odnotowała NASA podczas napełniania zbiorników rakiet kosmicznych 100 t ciekłego wodoru, wynosiły ok. 45 t [15].

Wśród innych metod magazynowania wymienić można, chemisorpcję w wodorkach metali oraz adsorpcję wodoru w metalo-organicznych strukturach i systemach opartych na węglu aktywnym [7]. W systemach tych cząsteczki wodoru magazynowane są w materiałach mezoporowatych poprzez adsorpcję fizyczną. W przypadku adsorpcji, pojemność materiału jest proporcjonalna do jego powierzchni właściwej. W przeciągu ostatnich dziesięcioleci opracowano oraz przebadano wiele rodzajów materiałów do magazynowania wodoru, w tym stopy metali, azotki metali oraz imidy czy amoniak borowodoru [7].

Uwalnianie wodoru magazynowanego w wodorkach metali odbywa się poprzez ogrzanie lub reakcję katalityczną. Wodorki magazynowane są w postaci ciała stałego lub zawiesiny wodnej. Można je podzielić na odwracalne oraz nieodwracalne. Wodorki odwracalne posiadają zdolność wielokrotnego pochłaniania oraz desorbowania pochłanianego materiału. Wodorkami odwracalnymi są stałe stopy lub połączenia metaloorganiczne, uwalniające wodór w określonej temperaturze i ciśnieniu. Wodorki nieodwracalne uwalniają wodór reagując zazwyczaj z wodą lub



Rys. 15. Przechowywanie wodoru w nanorurkach węglowych domieszkowanych metalami [30]

inną substancją. W przeciwieństwie do wodorków odwracalnych, pozbawiony w ten sposób wodoru adsorbent, nie może zostać zregenerowany w miejscu desorpcji. Zbiorniki z wodorkami mogą posiadać dowolny kształt, ale mają one znacznie większą masę niż zbiorniki przeznaczone do przechowywania gazowego wodoru [15].

Zainteresowaniem cieszą się również takie materiały porowate jak zeolity, MOF, nanorurki węglowe (CNT) (rys. 15) oraz grafen, ze względu na wysoką gęstość grawimetryczną tych materiałów [7].

Być może badane obecnie materiały do przechowywania wodoru, znajdą zastosowanie w przyszłości w transporcie lotniczym.

Wnioski

Ciekły wodór jest obiecującym kandydatem na paliwo alternatywne przyszłości, należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że na dzień dzisiejszy paliwa na bazie ropy są znacznie tańsze. Na chwilę obecną poważnym utrudnieniem jest brak odpowiedniej infrastruktury lotniskowej, która w przypadku paliwa wodorowego znacznie różni się od infrastruktury wymaganej przez węglowodory lotnicze. Infrastruktura lotniskowa wymagałaby instalacji wodorowej z jednostkami takimi jak elektrolizer, system oczyszczania czy skraplacz. Dodatkowo wdrożenie wodoru jako paliwa lotniczego, wymagałoby opracowania przepisów oraz standardów bezpieczeństwa, regulujących takie aspekty jak bezpieczna eksploatacja oraz magazynowanie wodoru, w zastosowaniu do różnych środków transportu.

Za wprowadzeniem wodoru w transporcie lotniczym przemawia jego znaczna ilość energii na jednostkę masy, wynosząca 120 MJ/kg, przy równoczesnym tzw. „czystym spalaniu”, wolnym od wielu szkodliwych substancji, w tym dwutlenku węgla. Warto zwrócić uwagę na fakt, że potencjalne paliwo alternatywne musi być kompatybilne z wymaganiami dotyczącymi statku powietrznego oraz materiałami stosowanymi w silnikach turbinowych.

Zbiorniki paliwowe powinny być wykonane z lekkich materiałów, zapewniających bezpieczne przechowywanie, oraz posiadać odpowiednie gabaryty pozwalające na przenoszenie odpowiednich ilości paliwa, w zależności od długości trasy jaką samolot ma do pokonania. Zastosowane w turbinowych silnikach paliwo alternatywne powinno nie tylko wpływać na zwiększenie osiągnięć silnika, ale również gwarantować jego niezawodną pracę oraz wykazywać kompatybilność z materiałami wchodzącymi w skład systemu paliwowego.

Rosnący popyt na paliwa pochodzenia kopalnego, zwiększa emisję CO₂ oraz innych gazów cieplarnianych do atmosfery. Dlatego też, rozwiązaniem tego problemu byłoby paliwo alternatywne,



Rys. 14. Zbiornik do przechowywania ciekłego wodoru [33]

charakteryzujące się brakiem emisji CO₂, tym bardziej, że zmiany klimatu stają się coraz bardziej odczuwalne.

Bibliografia:

1. Brand J., Sampath S., Shum F., Bayt R. L., Cohen J., *Potential use of Hydrogen In Air Propulsion*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA 2003-2879, July 2003.
2. Brewer G.D., *Hydrogen Aircraft Technology*, CRC Press, 1991.
3. Contreras A., Yigit S., Ozay K., Veziroglu T.N., *Hydrogen as aviation fuel: a comparison with hydrocarbon fuels*, Vol. 22, No. 10/11, pp. 1053-1060, 1997.
4. El-Sayed, A. F., *Aircraft propulsion and gas turbine engines*, CRC Press, 2017
5. Folentarska A., Kulawik D., Ciesielski W., Pavlyuk V., *Nowoczesne materiały do przechowywania wodoru jako paliwa przyszłości*, Chemistry Environment Biotechnology, 2016
6. Gieras M., *Miniaturowe silniki odrzutowe*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2016.
7. Krishna R. i inni, *Hydrogen Storage for Energy Application*, ResearchGate, 2012, DOI: 10.5772/51238
8. Kunowsky M., Linares-Solano A., Marco-Lozar J.P., *Material Demands for Storage Technologies in a Hydrogen Economy*, Journal of Renewable Energy, Volume 2013
9. Lefebvre A. H., Ballal D. R., *Gas Turbine Combustion. Alternative Fuels and Emissions*, April 26, 2010 by CRC Press
10. Łapucha R., *Komory spalania silników turbinowo-odrzutowych. Procesy, obliczenia, badania*, Biblioteka Naukowa Instytutu Lotnictwa, Warszawa 2004.
11. Marszałek N., *Preliminary analysis of thermodynamic cycle of turbofan engine fueled by hydrogen*, Journal of KONES Powertrain and Transport, Warsaw 2018, No. 3, Vol. 25.
12. Nikolaidis P., Poullikkas A., *A comparative overview of hydrogen production processes*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, Volume 67, Pages 597-611.
13. Nowacki J. P., *Wodór jako nowy nośnik energii*, Wydawnictwo Polskiej Akademii Nauk, Wrocław 1983.
14. Pagowski Z., *Lotnicze paliwa i oleje*, Prace Instytutu Lotnictwa Nr. 199, s. 117-127, Kwartalnik naukowy 4/2009 (199).
15. Surygała J., *Wodór jako paliwo*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2008.
16. Sutton G.P., Biblarz O., *Rocket Propulsion Elements*, A Wiley-Interscience Publication, 2001.
17. Szkarowski A., *Spalanie gazów. Teoria, praktyka, ekologia*, WNT, Warszawa 2014.
18. Wiącek D., *Wodór jako paliwo przyszłości*, Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe, 10/2011.
19. *Final technical report: Liquid Hydrogen Fueled Aircraft – System Analysis*: http://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/dglr/hh/text_2004_02_26_Cryoplane.pdf
20. *Paliwo Jet-A1*, Karta charakterystyki, PKN ORLEN.
21. *Ropa naftowa – terażniejszość i przyszłość*: http://www.ak-net.biz.pl/pn/01_06_pl.pdf
22. *Safe use of hydrogen*: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/safe-use-hydrogen>
23. *Światowe zasoby ropy rosną szybciej niż wydobywanie*, dr A. Czyżewski, Energetyka 24, 2017: <https://www.energetyka24.com/swiatowe-zasoby-ropy-rosta-szybciej-niz-wydobycie>
24. *Cryoplane*, dr R. Faaß, Hamburg 2001: https://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/dglr/hh/text_2001_12_06_Cryoplane.pdf
25. Tu-155/Tu-156: <https://www.globalsecurity.org/military/world/russia/tu-155.htm>
26. NACA Research on Hydrogen for High-Altitude Aircraft: <https://history.nasa.gov/SP-4404/ch6-4.htm>
27. *The model 304 engine*: <https://history.nasa.gov/SP-4404/ch8-9.htm>
28. *Informacja na temat Mechanizmu Kompensacji i Redukcji CO₂ dla Lotnictwa Międzynarodowego (CORSIA)*: <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/default.aspx>
29. <http://www.ulc.gov.pl/pl/lotniska/zakladanie-lotnisk/uregulowania-prawne?task=view&id=80>
30. *Filling up with hydrogen*, M. Jacoby, 2005: <https://cen.acs.org/content/cen/articles/83/i34/FILLING-HYDROGEN.html>
31. *Hindenburg disaster*: https://en.wikipedia.org/wiki/Hindenburg_disaster
32. *Aufbau eines LH2 – Tanks*: <http://www.seilnacht.com/Lexikon/lih201.html>
33. *Space application for hydrogen and fuel cells*: <https://www.nasa.gov/content/space-applications-of-hydrogen-and-fuel-cells>
34. *Hydrogen storage basis*: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage-basics-0>
35. *Liquid hydrogen as fuel*: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-7091-9126-2_6
36. *How will global warming affect aircraft materials and construction?*: www.quora.com/How-will-global-warming-affect-aircraft-materials-and-construction

Hydrogen as an alternative fuel for aircraft transport

The presented article describes hydrogen as an alternative fuel, which may be used in the future in aircraft transport. Selected properties of hydrogen were presented and discussed and compared to conventional aviation fuel used in turbine jet engines. The issue of emission of harmful substances to the atmosphere arising from the combustion of hydrocarbon fuels, has been presented. Methods of obtaining and hydrogen storage has been discussed.

Keywords: aircraft transport, alternative fuel, hydrogen, turbine jet engine.

Autorka:

mgr inż. **Natalia Marszałek** – Politechnika Rzeszowska im. I. Łukasiewicza, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Zakład Mechaniki Płynów i Aerodynamiki