

# Tehnologija primjene vodika kao pogonskog goriva u zrakoplovstvu

---

**Martinović, Ivan**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:388433>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-11**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Transport and Traffic Sciences - Institutional Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**

Ivan Martinović

**TEHNOLOGIJA PRIMJENE VODIKA**  
**KAO POGONSKOG GORIVA U**  
**ZRAKOPLOVSTVU**

**ZAVRŠNI RAD**

**Zagreb, 2021.**

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**  
ODBOR ZA ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 8. rujna 2021.

Zavod: **Zavod za aeronautiku**  
Predmet: **Zrakoplovna prijevozna sredstva**

**ZAVRŠNI ZADATAK br. 6371**

Pristupnik: **Ivan Martinović (0135251357)**  
Studij: **Aeronautika**  
Smjer: **Kontrola leta**

Zadatak: **Tehnologija primjene vodika kao pogonskog goriva u zrakoplovstvu**

Opis zadatka:

U radu je potrebno objasniti povijesni razvoj i potencijal korištenja vodika u zrakoplovstvu. Zatim je potrebno objasniti prednosti i mane primjene vodika kao goriva u zrakoplovstvu. Obzirom na zahtjeve za performanse zrakoplova, potrebno je dati prijedlog izvedbe zrakoplovnog pogonskog sustava s primjenom vodika.

Zadatak uručen pristupniku: 20. travnja 2021.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:

---

izv. prof. dr. sc. Anita Domitrović

Sveučilište u Zagrebu

Fakultet prometnih znanosti

**ZAVRŠNI RAD**

**TEHNOLOGIJA PRIMJENE VODIKA KAO POGONSKOG  
GORIVA U ZRAKOPLOVSTVU**

**TECHNOLOGY OF APPLICATION OF HYDROGEN AS A  
POWER PROPELLANT IN AVIATION**

Mentor: izv. prof. Anita Domitrović

Student: Ivan Martinović

JMBAG: 0135251357

Zagreb, 2021.

## SAŽETAK

Zrakoplovstvo se suočava s izazovom značajnog reduciranja emisija stakleničkih plinova. Promjene će biti radikalne s obzirom da je nužno uvesti nova održiva pogonska goriva. Vodik, zbog svojih izvanrednih svojstava, a i činjenice da može biti proizveden bez stakleničkih emisija, smatra se da može biti rješenje za dekarbonizaciju u smislu potpunog eliminiranja ugljikovih oksida iz zrakoplovne industrije. Izazov održive proizvodnje zelenog vodika treba savladati u nadolazećim godinama. Također, vodik zahtijeva posebnu aerodromsku i transportnu infrastrukturu. Pogonski sustavi na vodik značajno su tiši od postojećih današnjih i emitiraju manje ostalih popratnih plinova. Postoje dva tipa pogonskih sustava na vodik, motori s unutarnjim izgaranjem i PEM gorivi članci. U radu su detaljnije opisana oba ova tipa pogonskih sustava te su navedeni segmenti zrakoplova u kojima bi ih bilo optimalno ugraditi s obzirom na njihove karakteristike.

**KLJUČNE RIJEČI:** zrakoplovstvo, dekarbonizacija, pogonsko gorivo – vodik, dobivanje vodika, vodikova infrastruktura, pogonski sustavi, PEM gorivi članci

## SUMMARY

Aviation is facing the challenge of significantly reducing greenhouse gas emissions. The changes will be radical as it is necessary to introduce new sustainable fuels. Hydrogen, due to its outstanding properties, and the fact that it can be produced without greenhouse gas emissions, is considered to be a solution for decarbonization in terms of the complete elimination of carbon oxides from the aviation industry. The challenge of sustainable green hydrogen production needs to be overcome in the coming years. Also, hydrogen requires special airport and transport infrastructure. Hydrogen power systems are significantly quieter than today's ones and emit less other associated gases. There are two types of hydrogen propulsion systems, internal combustion engines and PEM fuel cells. This thesis describes in more detail both of these types of propulsion systems and lists the segments of aircraft in which it would be optimal to install them due to their characteristics.

**KEY WORDS:** aviation, decarbonization, power propellant – hydrogen, production of hydrogen, hydrogen infrastructure, power system, PEM fuel cells

# Sadržaj

|  |    |
|--|----|
| 1 UVOD.....  | 1  |
| 2 PROIZVODNJA VODIKA .....   | 3  |
| 2.1 DOBIVANJE ZELENOG VODIKA .....                                   | 4  |
| 2.1.1 ELEKTROLIZA VODE .....   | 5  |
| 2.1.2 DOBIVANJE VODIKA IZ VODE PUTEM TERMOKEMIJSKIH CIKLUSA .....    | 5  |
| 2.1.3 FOTOELEKTROKEMIJSKO DOBIVANJE VODIKA .....                     | 6  |
| 2.2 DOBIVANJE PLAVOG, SIVOG I SMEĐEG VODIKA.....                     | 6  |
| 2.2.1 DOBIVANJE SIVOG VODIKA.....                                    | 7  |
| 2.2.2 DOBIVANJE SMEĐEG VODIKA.....                                   | 8  |
| 2.2.3 DOBIVANJE PLAVOG VODIKA.....                                   | 8  |
| 3 POVIJESNI RAZVOJ I POTENCIJAL TEHNOLOGIJE VODIKA U ZRAKOPLOVSTVU . | 10 |
| 3.1 PROTOTIPOVI ZRAKOPLOVA NA VODIK .....                            | 11 |
| 3.1.1 Martin B – 57 Canberra .....                                   | 12 |
| 3.1.2 Tupolev – Tu 155 .....   | 13 |
| 3.1.3 Diamond HK36 Super Dimona .....                                | 15 |
| 3.1.4 Antares DLR-H2.....  | 16 |
| 3.1.5 DLR HY4.....   | 18 |
| 3.2 POTENCIJAL TEHNOLOGIJE VODIKA U ZRAKOPLOVSTVU.....               | 19 |
| 3.2.1 ZRAKOPLOVA INDUSTRIJA DANAS.....                               | 20 |
| 3.2.2 VODIK KAO POGONSKO GORIVO BUDUĆNOSTI.....                      | 22 |
| 4 IZAZOVI PRIMJENE VODIKA KAO POGONSKOG GORIVA U ZRAKOPLOVSTVU ....  | 28 |
| 4.1 PROIZVODNJA KOJA ODGOVORA ZAHTJEVIMA POTRAŽNJE .....             | 28 |
| 4.2 AERODROMSKA INFRASTRUKTURA I TRANSPORT.....                      | 29 |
| 4.3 NUŽNE PROMJENE U KONSTRUKCIJI ZRAKOPLOVA .....                   | 33 |

|  |    |
|--|----|
| 4.4 SIGURNOSNA RAZMATRANJA .....                                   | 35 |
| 5. IZVEDBA ZRAKOPLOVNOG POGONSKOG SUSTAVA S PRIMJENOM VODIKA ..... | 36 |
| 5.1 POGONSKI SUSTAV S UNUTARNJIM IZGARANJEM POGONJEN VODIKOM ..... | 36 |
| 5.2 POGONSKI SUSTAV S PEM GORIVIM ČLANCIMA .....                   | 39 |
| 6 ZAKLJUČAK .....  | 45 |
| LITERATURA.....  | 46 |
| Popis slika .....  | 49 |
| Popis tablica .....  | 49 |

# 1 UVOD

U današnjem vremenu postaje sve izražajnije svijest o klimatskim promjenama i čimbenicima koji ubrzavaju ovaj negativan proces. Izazov za gospodarstva diljem svijeta postaje dekarbonizacija, odnosno proces smanjenja emisija štetnih plinova u Zemljinu atmosferu. Emitiranje stakleničkih plinova rezultira sve većom apsorpcijom toplinske energije sa Sunca, koja ostaje akumulirana u Zemljinom plinskom omotaču, umjesto da prirodnim putem bude reflektirana van Zemljine atmosfere u svemir. Posljedično, dolazi do pojave povećanja globalne prosječne temperature te izmjene nepravilnih klimatskih ciklusa što dovodi u pitanje opstojnost biodiverziteta i života na Zemlji kakav postoji danas.

Drugi razlog prelaska na održivije izvore energije je i kapacitiranost uporabe fosilnih goriva zbog činjenice da nije riječ o neograničenom resursu. Postoje najave zadnjih pola stoljeća da će uporaba fosilnih goriva doživjeti vrhunac, no to se do današnjih dana nije ostvarilo. Upravo zbog toga ovaj drugi razlog treba uzeti s rezervom jer svakodnevno se otkrivaju nova polja nafte, plina i ugljena te je istinski kapacitet ovih neobnovljivih izvora energije dosta teško odrediti.

Zrakoplovna industrija nije izuzeta iz ovih promjena, dapače zbog svoje konstantne ekspanzije uviđa potrebu za pronalaženjem rješenja koje će zamijeniti tradicionalna fosilna goriva novim pogonskim gorivima s ciljem što minimalnijeg utjecaja na okoliš. Tradicionalni pogonski sustavi koriste fosilna goriva kao gorivo za izgaranje te za produkte izgaranja imaju: ugljikov (IV) oksid (ugljkov dioksid) kemijske formule  $CO_2$ , dušikove okside -  $NO_x$ , vodenu paru -  $H_2O$  te čađu na većim nadmorskim visinama. Upravo zbog štetnog utjecaja dušikovih oksida na ozonski sloj, ugljikova dioksida i vodene pare na refleksiju toplinske energije te čađe koja smanjuje kvalitetu zraka, krenulo je se u potragu za potpuno novom tehnologijom koja je u skladu s globalnom inicijativom o tranziciji na održive energente, točnije na održivija zrakoplovna pogonska goriva i nove propulzivne tehnologije.

Upravo iz navedenog proizašao je vodik –  $H_2$  kao potencijalni energent budućnosti, a to duguje svojim izrazito dobrim kemijskim svojstvima. Vodik je okarakteriziran kao glavna pokretačka snaga u tranziciji na zelenu ekonomiju ponajviše zbog visoke energetske učinkovitosti i činjenice da je riječ o klimatski prihvatljivom gorivu bez štetnih emisija te pogonskih sustava na vodik koja ne generiraju buku.



Cilj ovog završnog rada je povezati klimatski cilj karbonske neovisnosti zrakoplovne industrije s tehnološkim rješenjima baziranim na uporabi vodika kao pogonskog goriva u zrakoplovstvu. Svrha rada je skrenuti pozornost na tehnologiju vodika, navesti prednosti i nedostatke u usporedbi s trenutnim pogonskim gorivom te opisati cjelokupan proces od proizvodnje vodika do njegove aplikacije u pogonskim sustavima.

Završni rad podijeljen je u šest cjelina:

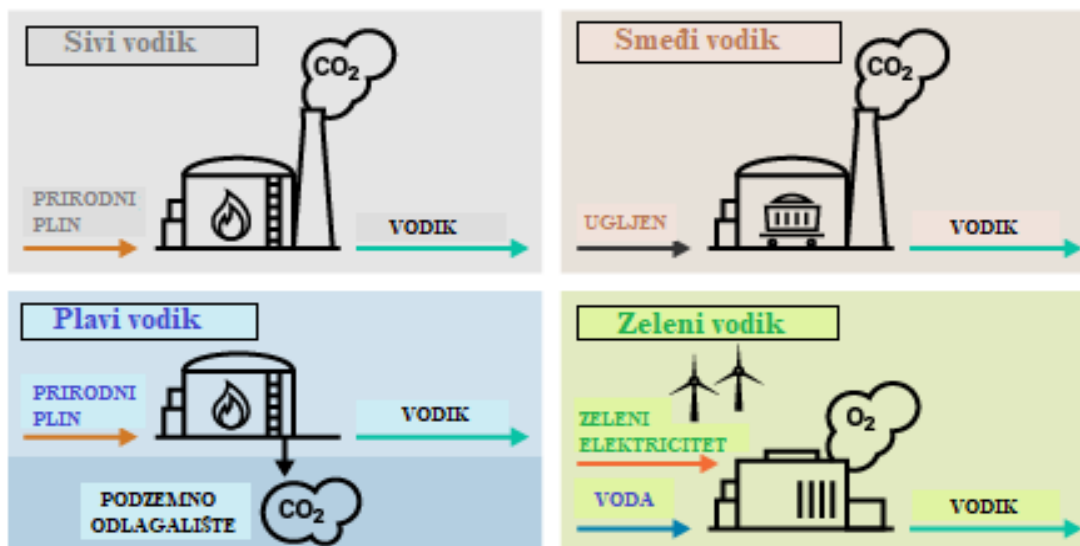
1. Uvod
2. Proizvodnja vodika
3. Povijesni razvoj i potencijal tehnologije vodika u zrakoplovstvu
4. Izazovi primjene vodika kao pogonskog goriva u zrakoplovstvu
5. Izvedba zrakoplovnog pogonskog sustava s primjenom vodika
6. Zaključak

U uvodnom dijelu objašnjena je potreba prelaska zrakoplovne industrije na novo gorivo i zašto se vodik vidi kao odlično novo gorivo budućih zrakoplova. U drugom poglavlju opisani su načini proizvodnje vodika i način na koji vodik može biti pogonsko gorivo s nultom emisijom  $CO_2$  od proizvodnje do potrošnje. U trećem poglavlju navedeni su neki značajni povijesni pokušaji razvijanja pogonskih sustava pokretanih vodikom i razvoj do kojeg su pojedini prototipovi uspjeli doći. Također, navode se statistički dekarbonizacijski učinci zamjene kerozina vodikom. Četvrto poglavlje govori o svim mogućim izazovima koja stoje pred zrakoplovnom industrijom pri implementaciji vodika kao novog pogonskog goriva. Najveći izazovi biti će proizvodnja koja odgovara zahtjevima potražnje te prilagodba aerodromske infrastrukture. U petom poglavlju detaljno su objašnjeni pogonski sustavi s unutarnjim izgaranjem i PEM gorivi članci koji koriste vodik kao pogonsko gorivo. Navedeni su elementi pogonskih sustava te svrha istih. U zaključnom poglavlju navode se zbirna završna razmatranja o temi.

## 2 PROIZVODNJA VODIKA

Vodik je kemijski element sa simbolom H i atomskim brojem 1. Vodik je najlakši element u periodnom sustavu elemenata. U standardnim uvjetima vodik je plin dvoatomski molekula formule  $H_2$ . Pri standardnom tlaku i temperaturi je bez boje, mirisa i okusa, netoksičan i vrlo zapaljiv te je 14.4 puta lakši od zraka. Vodik je najzastupljenija kemijska tvar u svemiru koja čini otprilike 75% sve normalne tvari i ishodišni je element iz kojeg su nuklearnom fuzijom nastali svi ostali elementi [1]. Zvijezde poput Sunca uglavnom se sastoje od vodika u stanju plazme. Većina vodika na Zemlji postoji u molekularnim oblicima poput vode i organskih spojeva. Na normalnim sobnim temperaturama vodik nije naročito reaktivan, dok je pri visokim temperaturama izrazito reaktivan element. Vodikovo gorivo je čisto gorivo koje izgara s kisikom bez ikakvih emisija spojeva s ugljikom. Razlikuje se takozvani *zeleni*, *plavi*, *sivi* i *smeđi* vodik s obzirom na način proizvodnje. U zrakoplovima vodik se može koristiti kao pogonsko gorivo u pogonskim sustavima s unutarnjim izgaranjem i u pogonskim sustavima s gorivnim člancima.

Zbog svojih kemijskih svojstava vodik je viđen kao pokretač energetske revolucije s krajnjim ciljem dekarbonizacije svih segmenata gospodarstva. Zrakoplovna industrija sudjeluje s oko 3% u ukupnom iznosu emitiranja  $CO_2$  te ukoliko želi ispuniti međunarodne sporazume o dekarbonizaciji do sredine 21. stoljeća, morati će tradicionalne pogonske sustave pogonjene fosilnim gorivima uskoro staviti u prošlost i zamijeniti ih novim tehnologijama [2]. Jedna od najvećih prednosti vodika kao goriva za buduće zrakoplovne pogonske sustave je da može biti dobiven na mnogo različitih načina koristeći bilo koji izvor energije. Vodik može biti dobiven korištenjem fosilnih goriva i prilikom tih procesa dolazi do otpuštanja neželjenog  $CO_2$  u atmosferu. Tako dobiveni vodik kolokvijalno se naziva smeđi i sivi vodik te na ovaj način proizvodnje vodika otpada više od 90% ukupno proizvedenog vodika. Plavi vodik proizlazi iz sivog, ali  $CO_2$  se hvata i ne otpušta u atmosferu. Vodik se naziva zelenim energentom budućnosti zato što postoji potpuno čist način dobivanja vodika bez štetnih emisija ugljikovih oksida u prirodu. Takav način dobivanja vodika kolokvijalno se naziva zeleni vodik i dobiva se elektrolizom vode uz korištenje električne energije dobivene iz obnovljivih izvora kao što su: energija vjetra, solarna energija, geotermalna energija, hidroenergija te trenutno zauzima nešto manje od 4% u ukupnoj proizvodnji vodika [3]. Načini dobivanja vodika shematski su prikazani slikom 1. U ovom poglavlju biti će objašnjeni načini dobivanja vodika, razlike među njima te njihova ekološka održivost.



*Slika 1 Shematski prikaz načina proizvodnje vodika*

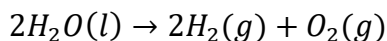
*Izvor: [4]*

## 2.1 DOBIVANJE ZELENOG VODIKA

Zeleni vodik je kolokvijalni naziv za vodik dobiven u procesu u kojem se nisu koristila fosilna goriva, samim time bez štetnih emisija plinova u atmosferu. Metode koje uključuju dobivanja vodika bez korištenja fosilnih goriva podrazumijevaju cijepanje molekule vode -  $H_2O$  na njene konstituente, vodik i kisik, korištenjem obnovljivog izvora energije. Razlikuje se nekoliko načina dobivanja zelenog vodika, a najzastupljeniji od njih su: dobivanje vodika elektrolizom vode, dobivanje vodika iz vode putem termokemijskih ciklusa i fotoelektrokemijsko dobivanje vodika. Također, postoje i drugi načini dobivanja zelenog vodika poput: fotobiološkog dobivanja vodika, dobivanje vodika radiolizom, dobivanje vodika termolizom, fotokatalitičko cijepanje vode itd., no ovi načini još nisu dovoljno komercijalni i istraženi te na njih otpada neznatna količina ukupne proizvodnje vodika. Ovo područje znanosti brzo napreduje i u posljednjim godinama velika novčana sredstva se ulažu u istraživanje i razvoj novih tehnologija i tehnika dobivanja zelenog vodika.

### 2.1.1 ELEKTROLIZA VODE

Elektroliza je proces cijepanja vode na njene konstituente, vodik i kisik, koristeći pritom električnu energiju iz obnovljivih izvora energije poput solarne energije i energije vjetra. Smatra se da je elektroliza učinkovita između 70 i 80 % što označi da je očekivani gubitak prilikom konverzije između 20 i 30%. Ovaj proces se najviše koristi kako bi udovoljio zahtjevima za visoko čistim vodikom. Elektrolizom proizvedeni vodik je 99% čist i ne zahtjeva dodatna pročišćavanja [5]. Elektroliza se postiže propuštanjem toka struje između dvije elektrode uronjene u elektrolit. Na katodi nastaje vodikov plin, a na anodi kisik u plinovitom stanju. Uloga elektrolita ja da djeluje kao ionski izmjenjivački medij koji će propuštati vodikove ione kroz otopinu. Kao elektroliti koriste se alkalijski hidroksidi zbog svojih svojstava da povećavaju vodljivost. Ukupna kemijska jednadžba elektrolize je:



Broj proizvedenih molekula vodika dvostruko je veći od broja molekula kisika. Pretpostavljajući jednaku temperaturu i tlak za oba plina, proizvedeni plin vodik ima dvostruki volumen proizvedenog plina kisika. Broj elektrona proguranih kroz vodu dvostruko je veći od broja generiranih molekula vodika i četiri puta veći od broja generiranih molekula kisika.

### 2.1.2 DOBIVANJE VODIKA IZ VODE PUTEM TERMOKEMIJSKIH CIKLUSA

Termokemijski ciklusi kombiniraju isključivo, kao što im to ime kaže, izvore topline (termo) s kemijskim reakcijama s ciljem razdvajanja molekule vode na konstituente kisik i vodik. Pojam ciklus koristi se, jer se osim vode, vodika i kisika, kemijski spojevi koji se koriste u tim procesima kontinuirano recikliraju. Takvi ciklusi rade na temperaturama nižim od ciklusa izravne termolize vode ( $T > 2\,000\text{ °C}$ ) i, teoretski, bez doprinosa električne energije. Potrebna toplina može se opskrbiti iz solarnih ili nuklearnih izvora, a učinkovitost se procjenjuje na 40-50%, veću od elektrolize vode, ako se uzme u obzir učinkovitost proizvodnje električne energije. Ako se električna energija djelomično koristi kao ulaz, rezultirajući termokemijski ciklus definira se kao hibridni. Kritični problemi procesa su odvajanje proizvedenog vodika i problemi korozije povezani s kemikalijama uključenim u ciklus. Zbog svoje kompleksnosti, razmatra se uparivanje s

nuklearnim elektranama IV generacije ili s koncentracijskim solarnim sustavima. Očekuje se njihova masovnija uporaba od 2030. nadalje [3].

### **2.1.3 FOTOELEKTROKEMIJSKO DOBIVANJE VODIKA**

Fotoelektrokemijski sustav kombinira u istom uređaju proizvodnju električne energije iz sunčeve svjetlosti i njenu uporabu za proizvodnju vodika iz vode putem elektrolizera. Ovaj uređaj koristi poluvodič koji je uronjen u vodenu otopinu, a on izravno konvertira sunčevu svjetlost u kemijsku energiju. Stoga je to potencijalno vrlo obećavajući proces jer može doseći znatno niže troškove i veću učinkovitost od sustava za fotonaponsku elektrolizu. Na laboratorijskoj razini proučavaju se različiti koncepti sa zanimljivim rezultatima učinkovitost sunca/vodika do 16%, ali sa značajnim napretkom. Potrebni su napori u istraživanju i razvoju u području materijala i inženjeringa sustava te se tehnička i komercijalna zrelost može očekivati u sljedećim godinama [3].

### **2.2 DOBIVANJE PLAVOG, SIVOG I SMEĐEG VODIKA**

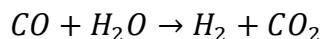
Nomenklatura bojama u proizvodnji vodika odgovara profilu emisije stakleničkih plinova iz izvora energije ili procesa koji se koriste za dobivanje vodika. Svjetlije boje (npr. zelena i plava) u osnovi imaju manje emisije, dok tmurnije boje (siva i smeđa) imaju veće emisije i mračniji izgled za globalno zatopljenje. Nastavno, da se zaključiti da proizvodnja sivog i smeđeg vodika ostavlja traga, odnosno dolazi do emisija stakleničkih plinova u Zemljinu atmosferu. Proizvodnja sivog vodika se odnosi na proces parnog reformiranja prirodnog plina, dok se proizvodnja smeđeg vodika odnosi na proces rasplinjavanja ugljena. Proces dobivanja plavog vodika proizlazi iz procesa dobivanja sivog vodika, ali razlikuje se po tome što se u procesu proizvodnje neželjeni proces kemijske reakcije -  $CO_2$  se zarobljava u zatvoreni prostor – spremište te se pohranjuje kako bi se spriječilo emitiranje u atmosferu, a time i zagrijavanje planeta. Postoji i definicija crnog vodika koji se proizvodi pomoću bitumenskog ugljena, tvari slične katranu i ta je proizvodnja apsolutno najnepovoljnija za okoliš. Trenutno proizvodnja vodika korištenjem fosilnih goriva zauzima više od 90% ukupne proizvodnje vodika sa znatnom intencijom znanstvenika, ali i aktivista, da se ovaj postotak znatno smanji u skoroj budućnosti [3].

## 2.2.1 DOBIVANJE SIVOG VODIKA

Reformiranje parom je proces proizvodnje vodika iz prirodnog plina. Ovaj se proces danas najčešće koristi za dobivanje vodika, ujedno je i najjeftinija metoda dobivanja industrijskog vodika. Proces počinje zagrijavanjem plina ili metana na između 700 – 1100 °C te tlakom od oko 17.2 bara u prisutnosti pare i katalizatora. Time nastaje sintetizirani plin, smjesa ugljikovog monoksida i vodika. Nedostatak ovog procesa je što su njegovi nusprodukti veliko atmosfersko ispuštanje  $CO_2$ ,  $CO$  i drugih stakleničkih plinova. Ovisno o kvaliteti sirovine (prirodni plin, bogati plinovi, nafta itd.), jedna tona proizvedenog vodika -  $H_2$  također će proizvesti 9 do 12 tona  $CO_2$ , stakleničkog plina koji se može uhvatiti i skladištiti te na taj način spriječiti emisiju u atmosferu. Prva faza reakcije se pojednostavljeno može prikazati kao:



U ovoj fazi vodena para -  $H_2O$  visoke temperature (700–1100°C) reagira s metanom -  $CH_4$  u endotermnoj reakciji dajući pritom sintetizirani plin. Nakon toga slijedi druga faza reakcije koja se može prikazati kao:



U drugoj fazi sintetizirani plin reagira s dodatnom vodenom parom na temperaturi oko 360°C uz prisustvo drugog katalizatora. Atom kisika se oduzima vodenoj pari kako bi oksidirao  $CO$  u  $CO_2$ . Ova oksidacije daje energiju za održavanje reakcije. Toplina potrebna za pokretanje reakcije dobiva se izgaranjem metana [6].

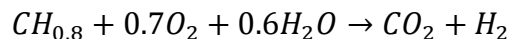
Dakle, polovica proizvedenog vodika generira se iz sirovine metana, a druga polovica iz vodene pare. Vodik kao produkt sadrži nečistoće poput ugljikovog monoksida, ugljikovog dioksida, metana i vodene pare pa je proces pročišćavanja nužan, a on podrazumijeva razne adsorpcijske i adsorpcijske procese. Neto toplinska učinkovitost reformiranja vodenom parom iznosi oko 70% [7]. Neto toplinska učinkovitost definirana se kao sadržaj energije vodika podijeljen s ukupnim udjelom energije u sirovini plus svi dodatni izvori energije koji su uključeni u proces.

## 2.2.2 DOBIVANJE SMEĐEG VODIKA

Smeđi vodik koristi lignitni ugljen, također poznat i kao mrki ugljen, koji je nastajao milijunima godina u stlačenim naslagama treseta. Vodik iz ugljena dobiva se tipičnim procesom parcijalne oksidacije koja uključuje nekoliko kemijskih reakcija:

1. Rasplinjavanje parom  $CH_{0.8} + H_2O \rightarrow CO + 1.4H_2$
2. Rasplinjavanje kisikom  $CH_{0.8} + 1.2O_2 \rightarrow CO_2 + 0.4H_2O + \text{energija}$
3. Smjena vodenog plina  $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$

Fino mljeveni ugljen reagira s parom i kisikom pri visokim temperaturama. Reakcijom pare s ugljenom nastaje vodik. Potrebna toplina za reakciju rasplinjavanja pare opskrbljuje se reakcijom rasplinjavanja kisikom koja izgara dio ugljena s kisikom. Veći prinos vodika ostvaruje se reakcijom smjene vodenog plina koja koristi  $CO$  dobiven iz prvog procesa rasplinjavanja parom. Ukupna jednadžba dobivanja vodika iz ugljena glasi:



Dobivanje vodika iz ugljena slično je procesu reformiranja parom, ali je mnogo zahtjevnije za izvesti zbog činjenica da je ugljen težak i vrlo nezgodan za manevriranje, nereaktivan je i odnos vodik/ugljik je manji od onog kod metana. Također, postoji mogućnost da vodik dobiven ovom metodom sadrži nečistoće u obliku ugljikovog dioksida -  $CO_2$  i vodikovog sulfida -  $H_2S$  koji moraju biti naknadno odstranjeni s ciljem dobivanja što čisteg vodika. Termalna efikasnost ovog procesa je između 61 i 66% [5].

## 2.2.3 DOBIVANJE PLAVOG VODIKA

Dobivanje plavog vodika proizlazi iz prethodno dva objašnjena procesa, dobivanja sivog i smeđeg vodika. Dobivanje plavog vodika podrazumijeva cijepanje prirodnog plina na vodik i ugljikov dioksid, a zatim hvatanje i skladištenje ugljikova dioksida. No, u ovom procesu se događa nenamjerno otpuštanje metana, izrazito snažnog stakleničkog plina. Također, znatna količina energije troši se na skladištenje ugljikovog dioksida. Iz tog proizlazi da vodik proizveden ovom metodom stvara čak 20% više stakleničkih plinova od ugljena, koji se smatra fosilnim gorivom koji najviše zagađuje okoliš prilikom izgaranja za dobivanje topline, a čak 60% više od plinova

koji nastaju izgaranjem dizela [8]. Za svaku jedinicu topline sadržanu u prirodnom plinu na početku procesa, otprilike između 70 i 75% te potencijalne topline ostaje sadržano u vodik u nosiocu energije. Drugim riječima, ako se vodik koristi za zagrijavanje nekog objekta, za proizvodnju plavog vodika treba koristiti 25% više prirodnog plina nego da se on koristi direktno za zagrijavanje. Metan je primarna komponenta prirodnog plina i nusprodukt je njegove uporabe u proizvodnji vodika i on je mnogo snažniji neprijatelj za globalno zagrijavanje od ugljikovog dioksida. Na osnovi 100 godina, metan ima potencijal globalnog zagrijavanja između 28 i 36 puta veći od ugljikovog dioksida, jer jedna molekula metana u atmosferi ima isti učinak kao i 30 molekula ugljikovog dioksida. Za dobivanje plavog vodika potrebno je eksploatirati više metana, a metan mora proći kroz reformatore, cjevovode, transport brodovima, pružajući više prilike za iscurivanje te, prema procjeni, korištenjem trenutne dostupne infrastrukture i načina dobivanja plavog vodika, on je štetniji za okoliš 20% više nego li korištenje fosilnih goriva [9]. Upravo dobivanje plavog vodika ima najveći industrijski potencijal s obzirom na dostupnost energenata iz kojih se dobiva, no nužan je znatan napor u istraživanju i razvoju metoda skladištenja neželjenih plinova u procesu proizvodnje plavog vodika te efikasniji način korištenja električne energije prilikom hvatanja i skladištenja neželjenih plinova.



### **3 POVIJESNI RAZVOJ I POTENCIJAL TEHNOLOGIJE VODIKA U ZRAKOPLOVSTVU**

Prvo korištenje vodika povezano je s ciljem čovjekove želje da ovlada zrakom i datira još na kraj 19. stoljeća. Prva generalna uporaba vodika bila je u balonima punjenim vodikom. U to vrijeme, to je predstavljalo vrh tehnologije jer je omogućilo čovjeku da se otisne u visine. Nešto kasnije, početkom 20. stoljeća krenula je komercijalna proizvodnja cepelina, također punjenih vodikom. Godine 1937. cepelini su doživjeli svog tragični kraj zbog potpunog zapaljenja i nekoliko desetaka žrtava najpoznatijeg cepelina toga vremena – Hindenburga. Danas se iz sigurnosnih razloga baloni i cepelini pune helijem te služe isključivo kao turistička atrakcija.

Prve uporabe vodika kao pogonskog goriva u zrakoplovima vežu se uz zrakoplove vojne namjene i to prenamjenom motora s unutarnjim izgaranjem. Prvotno vodik se zamišljao kao samo pokretačko gorivo u zrakoplovima, posebice u vojnoj industriji gdje su jedini faktor pri finalnom izboru aerodinamičkog dizajna letjelice, goriva i drugih infrastrukturnih pitanja, isključivo performanse zrakoplova. Nije bilo nikakvog naglaska na klimatski utjecaj. Nagla ekspanzija zrakoplovne industrije uslijedila je za vrijeme i nakon Drugog Svjetskog rata. Spoznaje o vodik, kao pokretačkom gorivu zrakoplova rasle su i razvijale se s vremenom. Tako su u drugoj polovici prošlog stoljeća isprobani različiti koncepti primjene vodika kao pogonskog goriva, uključujući i civilno zrakoplovstvo. Do danas niti jedan zrakoplovni pogonski sustav na vodik nije komercijaliziran. Ta praksa bi se uskoro trebala prekinuti s obzirom na intencije svih dionika zrakoplovne industrije, od proizvođača zrakoplova do avioprijevoznika, da se čim prije reducira štetni utjecaj na okoliš ulažući pritom napore u razvoj pogonskih sustava nove generacije.

U posljednjih nekoliko godina naglasak se stavlja na korištenje gorivih članaka kao pogonskih sustava na vodik. Sukladno progresiji u znanstveno – tehnološkim saznanjima, odnosno spoznajama o spomenutoj tehnologiji i njenom potencijalu da bude pokretač održive industrije u skladu s globalnim ciljevima dekarbonizacije, tvrtke proizvođači zrakoplova diljem svijeta ulažu znatna financijska sredstva i napore u istraživanje i razvoj cjelokupnog sustava avijacije na vodik kako bi se što prije mogli staviti u uporabu novi održivi zrakoplovni pogonski sustavi. Gorivi članci

s propusnom membranom (engl. *PEMFC*<sup>1</sup>) imaju mnogo unikatnih svojstava poput: visoke energetske efikasnosti, bez emisija, bez buke, modularnost i sve te karakteristike čine ih atraktivnim za primjenu u pogonskim sustavima.

Vodik se može koristiti kao pogonsko gorivo u dvama tipovima pogonskih sustava, onim klasičnim u motorima s unutarnjim izgaranjem te onih baziranim na gorivim člancima. I jedna i druga solucija ide k potpunoj dekarbonizaciji jer prilikom rada takvih motora ne dolazi do ispuštanja ugljikovih oksida u atmosferu. To otvara veliki potencijal u komparaciji s kerozinom, odnosno Jet A gorivom te sa avionskim i motornim benzinima. Procjene razvoja zrakoplovne industrije s korištenjem vodika uveliko ovise o cijenama energenta i efikasnosti cjelokupnog zaokruženog sustava. Vodik se može koristiti u pet različito – namjenskih zrakoplova s različitom učinkovitosti, što će biti prikazano u odjeljku 3.2.2.

### **3.1 PROTOTIPOVI ZRAKOPLOVA NA VODIK**

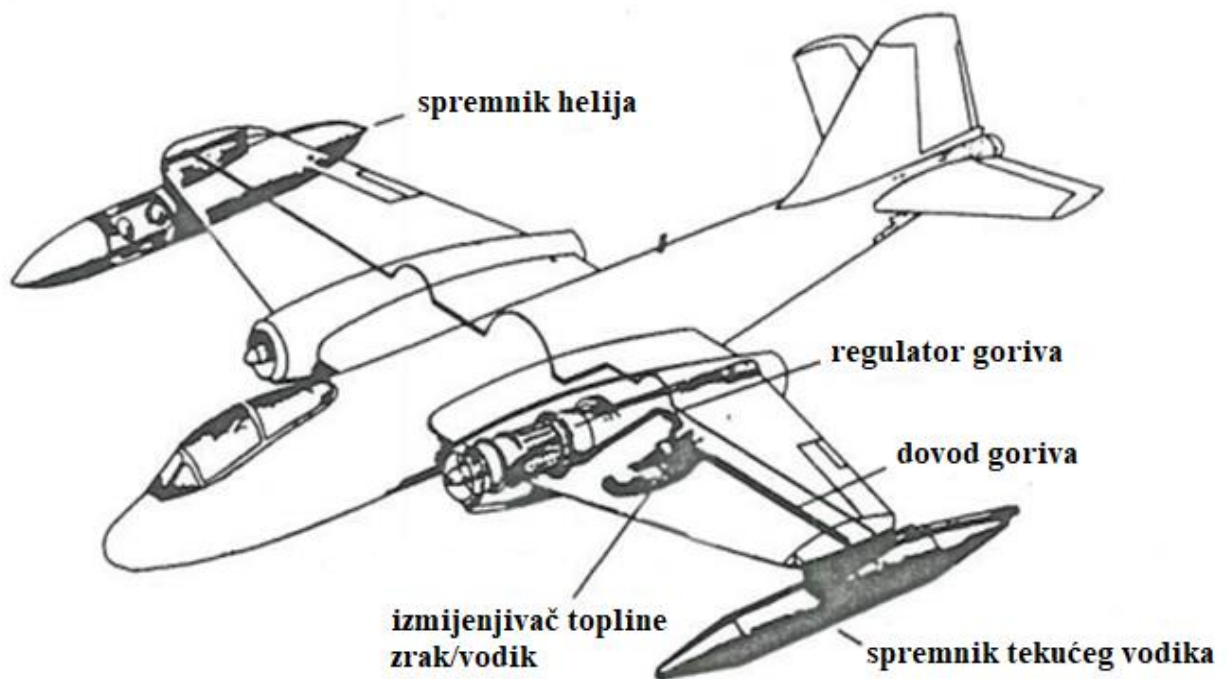
Kod gotovo svih prototipova i koncepata zrakoplova s pogonskim gorivom vodikom u 20. stoljeću vodik je korišten kao gorivo u tipovima motora s unutarnjim izgaranjem. Radilo je se o prenamjeni klasičnih motora, a ne potpuno novim dizajnom. Vodik je prvo razmatran kao potencijalno gorivo u vojnom zrakoplovstvu Sjedinjenih Američkih Država. Jedan od prvih koji je bio pogonjen vodikom je taktički bomber, ujedno i izviđački zrakoplov, Martin B – 57 Canberra. Prošla su dva desetljeća do prototipova civilnih zrakoplova s vodikom kao gorivom u motoru s unutarnjim izgaranjem, a najdalje je otišla tvrtka Tupolev sa zrakoplovom Tupolev Tu – 155 koji je prenamijenjeni model zrakoplova Tu – 154. Početkom 21. stoljeća diljem svijeta ideja o zrakoplovima s gorivim člancima postala je sve prihvatljivija. Prvi zrakoplov koji je poletio koristeći se gorivim člancima na vodik bio je Diamond HK36 Super Dimona za čiji je pogonski sustav zaslužna tvrtka Boeing. Nakon toga sve više tvrtki diljem svijeta pokušava dizajnirati optimalan pogonski sustav s gorivim člancima, a neki od njih su uspjeli i dovesti do faze testiranja. Neki od najznačajnijih prototipova su Antares DLR-H2 izrađenog u suradnji German aerospace centre i Lange Aviation ili kao i zrakoplov DLR HY4 koji je konstruirao njemački DLR Institut za inženjersku termodinamiku.

---

<sup>1</sup> PEMFC (engl. *Proton – exchange membrane fuel cell or Polymer Electrolyte Membrane*) - gorivi članak s polimernom membranom kao elektrolitom

### 3.1.1 Martin B – 57 Canberra

Od 1956. do 1959. godine tekući vodik testiran je kao pogonsko gorivo na jednom od dva motora modificiranog mlažnjaka B-57 koji je prikazan na slici 2. Radi se o vojnom zrakoplovu, točnije bomberu srednjeg doleta s dva motora. Cilj je bio pokazati mogućnost izgaranja vodika u turbomlaznom motoru na velikoj nadmorskoj visini. Tekući vodik je bio smješten u spremniku ispod lijevog vrha krila. Plinoviti helij nošen je u spremniku slične veličine i oblika ispod desnog vrha krila i služio je kao tlačitelj. Tekući vodik je bio pod tlakom od 55 psi pod plinovitim helijem kako bi izazvao protok  $LH_2$ <sup>2</sup> prema izmjenjivaču topline gdje bi isparavao. Izmjenjivač topline je običnog zrak/vodik dizajna gdje zrak u određenim uvjetima leta služi kako bi pretvorio  $LH_2$  u  $GH_2$ <sup>3</sup> [5].



*Slika 2 Martin B - 57 Canberra*

*Izvor: [5]*

<sup>2</sup>  $LH_2$  (engl. liquid hydrogen) – vodik u tekućem agregatnom stanju

<sup>3</sup>  $GH_2$  (engl. gaseous hydrogen) – vodik u plinovitom agregatnom stanju

Regulator koji je kontrolirao stupanj protoka plinovitog vodika prema motoru nalazio se nizvodno od izmjenjivača topline. Bio je to regulator omjera koji je koristio mjereni protok goriva JP<sup>4</sup> iz konvencionalne kontrole broja okretaja motora za podešavanje protoka vodikovog plina iz izmjenjivača topline. Brzine protoka težine goriva prilagođene su svojstvima goriva, a one su obrnuto proporcionalne ogrjevnim vrijednostima dva goriva [5]:

$$\frac{LH_2(120 \frac{MJ}{kg})}{JP(42,8 \frac{MJ}{kg})} = 2.8$$

Dok je motor koristio vodik kao pogonsko gorivo, protok JP goriva se vraćao u spremnik. U kasnijim fazama programa, tekući vodik se nije više dovodio pod tlakom nego je direktno upumpavan iz spremnika s vrha krila koristeći posebno izrađenu pumpu koja je bila pogonjena hidrauličkim motorom.

Tijekom testiranja zrakoplov je letio na visinama do 50 000 ft brzinama do Mach 0.75. Zrakoplov, da bi postigao testne uvjete, prvo bi koristio ugljikovodikovo gorivo koje, kad se postignu željeni uvjeti, biva zaustavljeno, a plinoviti vodik usmjeren u istu komoru za izgaranje. Vodik je izgarao 21 minutu koliko ga je i bilo u spremnicima, a potom bi se motor vratio na rad na bazi izgaranja ugljikovodika.

Za vrijeme trajanja cijelog programa ispitivanja leta utvrđeno je da su performanse motora u datim uvjetima bile izuzetno glatke i pouzdane, a sa sustavom goriva s vodikom nije bilo nikakvih operativnih sigurnosnih problema. Među ostalim prednostima, uočeno je značajno poboljšanje maksimalnog doleta koje se teoretski može ostvariti uporabom vodika [5].

### 3.1.2 Tupolev – Tu 155

Potragu za alternativnim tehnologijama goriva pokrenula je sovjetska vlada krajem 70-ih godina prošlog stoljeća tijekom naftne krize. Razmatrana su dva potencijalna goriva tekući vodik - LH<sub>2</sub> i tekući prirodni plin – LNG<sup>5</sup>. Došli su na ideju da modificiraju zrakoplov Tupolev – Tu 154 i prenamjene ga u zrakoplov koji će biti pogonjen alternativnim gorivima. Modifikaciju zrakoplova

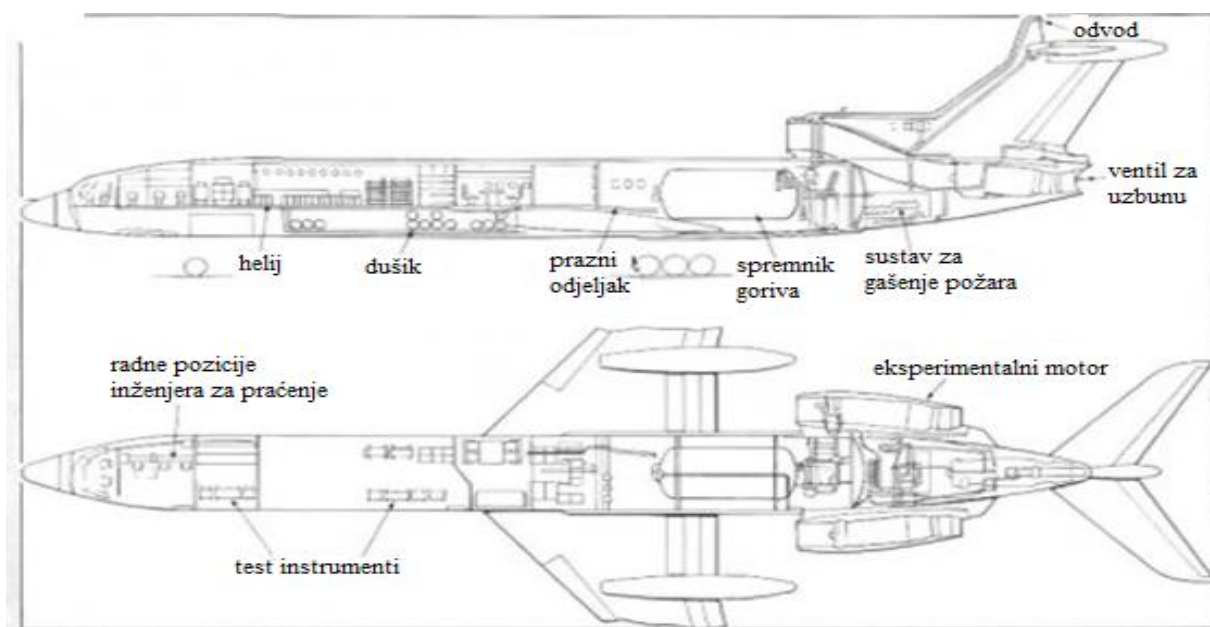
---

<sup>4</sup> JP (*engl. Jet Propellant 8*) – mlazno gorivo najčešće korišteno od strane vojske SAD-a

<sup>5</sup> LNG (*engl. liquid natural gas*) – tekući prirodni plin

nazvali su Tupolev – Tu 155. U planu je bila i modifikacija u Tu 156, ali ona nikada nije zaživjela zbog manjka infrastrukture prilagođene novim alternativnim gorivima.

Tu – 155 bio je osmišljen tako da bi jedan od njegova tri turbomlazna motora bio pogonjen tekućim vodikom. Tu – 155 je bio pogonjen s tri Kuznetsov NK-8-211 turboventilatorska motora, a svaki od njih generirao je potisak od 102.75 kN. Spremnik goriva volumena  $15\text{ m}^3$  smješten je u stražnjem dijelu trupa zrakoplova na mjestu gdje bi se inače nalazilo posljednjih osam redova sjedala. Ispred spremnika ugrađena je nepropusna pregrada. Ova pregrada dopušta korištenje većeg tlaka u putničkoj kabini, također služi za otklanjanje opasnosti da bi vodik u plinovitom stanju mogao ući u kabinu zbog ispuštanja iz spremnika. Pumpa za gorivo bila je pričvršćena uz modificirani motor i bila je pogonjena pneumatski. Izmjenjivač topline koristi ambijentalni zrak da podigne temperaturu tekućeg vodika na  $-100^{\circ}\text{C}$  prije nego li uđe u komoru izgaranja. Protok goriva bio je strogo kontroliran posebnim ventilima i prije ulaska i nakon izlaska iz izmjenjivača topline. Za potrebe ovog prototipa, inženjeri su prilagodili komoru izgaranja, mlaznicu za ubrizgavanje goriva te kontrole na NK-8-211 motoru, dok modifikaciju nisu zahtijevale turbina i kompresorska sekcija [5]. Ostao je limitiran na samo pet letova zbog manjka razvijenosti infrastrukture koja uključuje vodik [10]. Skice bočnog i tlocrtnog presjeka Tupoleva – Tu 155 na kojoj su vidljivi neki od bitnih dijelova eksperimentalnog pogonskog sustava prikazane su slikom 3.



**Slika 3 Bočni i tlocrtni prikaz Tupoleva Tu – 155**

Izvor: [10]

### 3.1.3 Diamond HK36 Super Dimona

Diamond HK36 Super Dimona je prvi upravljani zrakoplov na svijetu koji je poletio, a da je pogonjen gorivim člancima. U nastojanju da razvije ekološki napredne tehnologije za zrakoplovnu industriju, Boeing je, zajedno s partnerskim europskim institucijama i kompanijama, modificirao Dimonu koja je prvi testni let imala u travnju 2008. godine. Cilj je bio provesti eksperimentalna letačka ispitivanja zrakoplova s ljudskom posadom koji je pogonjen samo gorivnim člancima i lakom baterijom. Dakle, riječ je o hibridnom sustavu s PEM gorivim člancima i litij – ionskom baterijom namijenjenim za pogon elektromotora koji je spojen na konvencionalni propeler. Tijekom segmenata leta koji zahtijevaju najviše snage, polijetanja i penjanja, sustav koristi lagane litij – ionske baterije za generiranje snage u kombinaciji s gorivnim člancima. Gorivi članci daju svu snagu za fazu krstarenja. Motorna jedrilica Dimona izvršila je neke konstrukcijske izmjene poput: preinake kostura zrakoplova, ugrađen je novi sustav goriva i dio za punjenje, novi sustav za upravljanje i distribuciju energije. Raspon krila je prilagođen i iznosio je 16.3 metra. Dimona je prikazana na slici 4 kao i svi strukturni dijelovi pogonskog sustava.



*Slika 4 Dijelovi hibridnog pogonskog sustava zrakoplova Diamond HK36 Super Dimona  
Izvor: [11]*

Tijekom leta, pilot eksperimentalnog zrakoplova popeo se na visinu od 1 000 metara iznad razine mora koristeći energije baterija. Zatim, nakon što je dosegao visinu krstarenja i isključio baterije, pilot je letio istom visinom brzinom od 100 kilometara na sat otprilike 20 minuta na snazi koju su proizvodili isključivo gorivi članci. Zrakoplov je bio u mogućnosti letjeti dvostruko više od toga vremena, ali za potrebe testiranja nije bilo nužno koristiti maksimalnu istrajnost [11].

Ovim projektom uvidio je se potencijal PEMFC-a kao elektrokemijskog uređaja koji pretvara vodik izravno u električnu energiju i toplinu bez izrazito štetnih produkata izgaranja poput ugljikovih i dušikovih oksida. Osim topline, voda je jedini nusprodukt.

### **3.1.4 Antares DLR-H2**

Antares DLR-H2 prvi je pilotirani zrakoplov na svijetu kojeg pokreću isključivo gorivi članci osiguravajući da uzlijeće, leti i slijeće bez ispuštanja ugljičnog dioksida. Gorivo koje se koristi je vodik. Električna energija nastaje kao rezultat izravne elektrokemijske reakcije iz PEMFC-a bez ikakvih emisija u okoliš. Prvi službeni testni let Antaresa DLR-H2 održan je u Hamburgu u srpnju 2009. Model zrakoplova prikazan je slikom 5. Pogonski sustav razvijen je zajedno s tvrtkom partnerom Lange Aviation. Kao osnova u razvoju Antaresa DLR-H2 korišten je Antares 20E, motorna jedrilica koju je Lange Aviation proizvodila nekoliko godina, a namijenjena je samo za jednog putnika – pilota. U testu u studenom 2009. godine, na kojem je dosegnuta visina od 2558 metara, pokazana je funkcionalnost gorivih članaka pri smanjenom tlaku na nadmorskim visinama većim od 2000 metara. Sustav gorivih članaka i sustav za skladištenje vodika ugrađeni su u dva vanjska spremnika postavljena ispod krila koja su posebno ojačana u tu svrhu. Posebno razvijeni gorivi članci, koji rade s električnom učinkovitošću do 52%, zaokružili su Antaresov sustav električnog pogona u 2009. Pri toj učinkovitosti sustav crpi 10 kW snage, a maksimalno je sposoban isporučiti do 33 kW. Pri takvom radu može prijeći oko 830 km leteći brzinom od 170 km/h. Trenutna maksimalna brzina iznosi 176 km/h. Sustav je već bio testiran u širokom zrakoplovu Airbus A320 ATRA gdje je isporučivao pomoćnu energiju i to u vidu pogonjenog prednjeg kotača pri *taxiranju*.

Tijekom 2012. napravljen je redizajn pogonskog sustava s poboljšanim performansama. Ugrađeni su kompaktniji i napredniji gorivi članci. Poboljšani sustav ima manji volumen pa su inženjeri smjestili članke i usisnik zraka u gornjoj polovici spremnika, a kanal za rashladni zrak sada prolazi

ispod nosača tereta. Zbog specifičnih zahtjeva i ograničenog prostora za ugradnju, pri ugradnji komponenata sustava, uvijek je nužno uzeti u obzir posebne zrakoplovne zahtjeve koji se odnose na sigurnost, raspodjelu mase i da konstrukcija ostane što laganija. Ugrađen je i novi spremnik vodika koji sada ima kapacitet 5 kg održavanog pod tlakom od 350 bara, dok je stari spremnik imao kapacitet od svega 2 kg vodika. U zrakoplov su ugrađeni mnogobrojni senzori kako bi se što temeljitije pratili uvjeti rada te dobili potrebni podaci za daljnju analizu i razvoj.

Sustav gorivih članaka direktno je povezan s upravljanjem motora. Metoda koja se koristi za povezivanje sustava gorivih članaka s pogonom bila je podjednako inovativna. Širok raspon razina ulaznog napona znači da motor može raditi između 188 i 400 volti uz istodobnu učinkovitost od preko 92%. Time se eliminira korak stabilizacije napona. Sustav gorivih članaka stoga se može projektirati tako da je izravno povezan s upravljačkom jedinicom motora. Time se smanjuju komponente i troškovi, a povećava učinkovitost. Ukupna učinkovitost pogonskog sustava, od spremnika do pogonskog sklopa i propelera, otprilike je dvostruko veća od standardnih motora temeljenih na tehnologiji izgaranja, čak do 40% u optimalnim radnim uvjetima. Motori s unutarnjim izgaranjem isporučuju samo 18 do 25% energije iz petroleja ili dizela za pogon [12].



*Slika 5 Antares DLR-H2*  
*Izvor: [12]*



### 3.1.5 DLR HY4

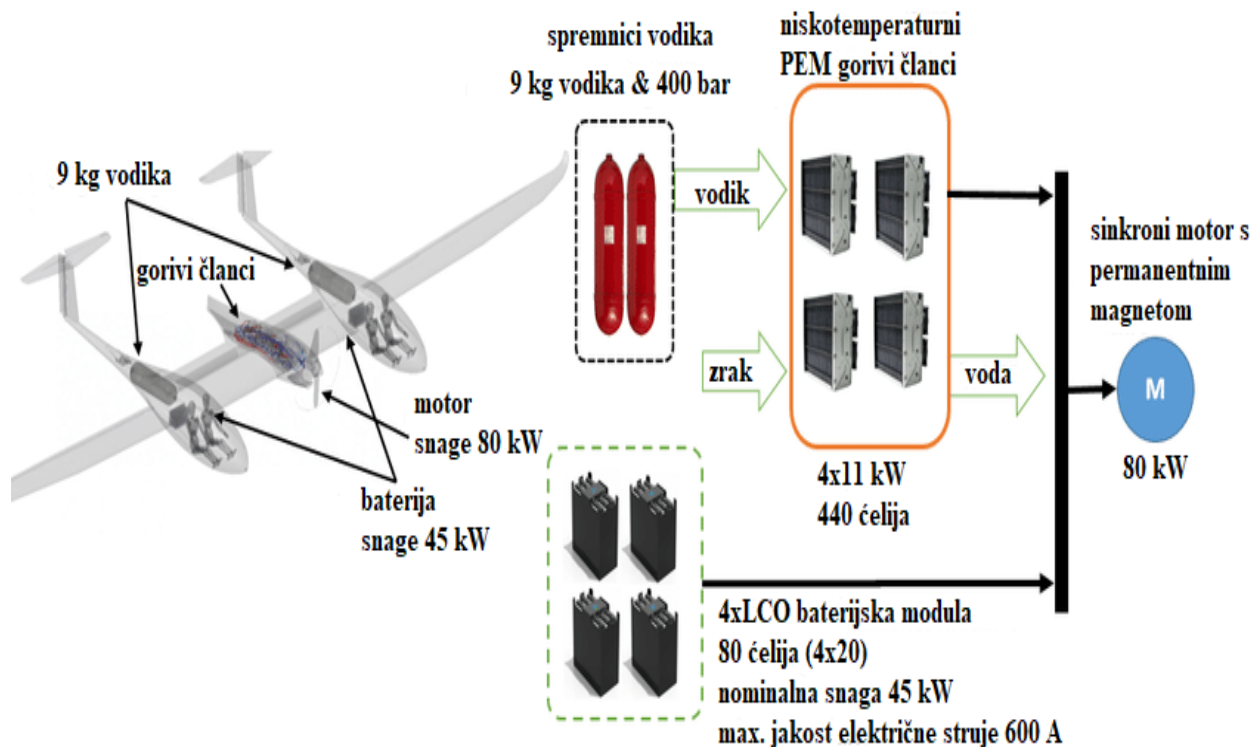
HY4 je prvi putnički zrakoplov četverosjed s pogonom na vodikove gorive članke. Razvijen je od DLR Instituta za Inženjersku termodinamiku (DLR), zrakoplovno – svemirskog istraživačkog centra sa sjedištem u Njemačkoj. Prvi let izvršio je u rujnu 2016. godine u zračnoj luci Stuttgart.

Dizajn HY4 s dvostrukim trupom temelji se na zrakoplovu Taurus G4 proizvođača Pipistrela. Svaki trup, s prostorom za dva putnika, povezan je srednjim krilom u koje je integrirana pogonska jedinica. Propeler je postavljen ispred pogonske jedinice, dok je niskotemperaturni vodikov gorivi članak postavljen iza pogonske jedinice. Ovakav dizajn omogućio je optimalnu raspodjelu pogonskih komponenti i veću ukupnu nosivost. Pogonski sustav zrakoplova sastoji se od sustava za skladištenje vodika, niskotemperaturnog vodikova PEM gorivog članka i LCO<sup>6</sup> baterije, vrste litij – ionskih baterija. Vodikovo gorivo skladišti se pod tlakom između 4 300 psi i 5 800 psi (između 295 i 400 bara) u dva spremnika od ugljičnih vlakana, svaki smješten u zasebni trup. Gorivi članak pretvara vodik izravno u električnu energiju, a jedini nusprodukt koji izlazi iz ovog procesa je voda. Zrakoplov može letjeti bez emisija u slučaju da se vodik proizvede elektrolizom koristeći se pritom ulaznom energijom iz obnovljivih izvora.

Zrakoplov HY4 sadrži litijev – ionske baterije novije generacije koje daju snagu prilikom polijetanja i penjanja zrakoplova. Također, opremljen je elektromotorom koji se pokreće kombinacijom sustava gorivih članaka i baterije. Dakle, riječ je o zrakoplovu na hibridni pogon. Snaga motora je 80 kW. Baterija ima skladišni kapacitet od približno 21 kWh na 1°C te kontinuiranu izlaznu snagu od 45 kW. Zrakoplov je sposoban letjeti brzinom krstarenja od 145 km/h, a maksimalna teoretska brzina iznosi oko 200 km/h. Dolet varira između 750 km i 1 500 km i ovisi o: opterećenju, nadmorskoj visini i parametrima brzine. Masa zrakoplova bez gorivih članaka, baterije i sustava za skladištenje iznosi oko 630 kg, dok maksimalna nosiva masa iznosi oko 1 500 kg. Masa pogonskog modula zajedno sa spremnikom za gorivo iznosi oko 400 kg. Duljina zrakoplova iznosi 7.4 m, a raspon krila 21.36 m [13]. Shema modularnog pogonskog sustava zrakoplova HY4 prikazani su slikom 6.

---

<sup>6</sup> LCO baterija (*engl. Lithium cobalt battery*) – litij kobaltna baterija



*Slika 6 Modularni pogonski sustav zrakoplova HY4*

*Izvor: [14]*

### 3.2 POTENCIJAL TEHNOLOGIJE VODIKA U ZRAKOPLOVSTVU

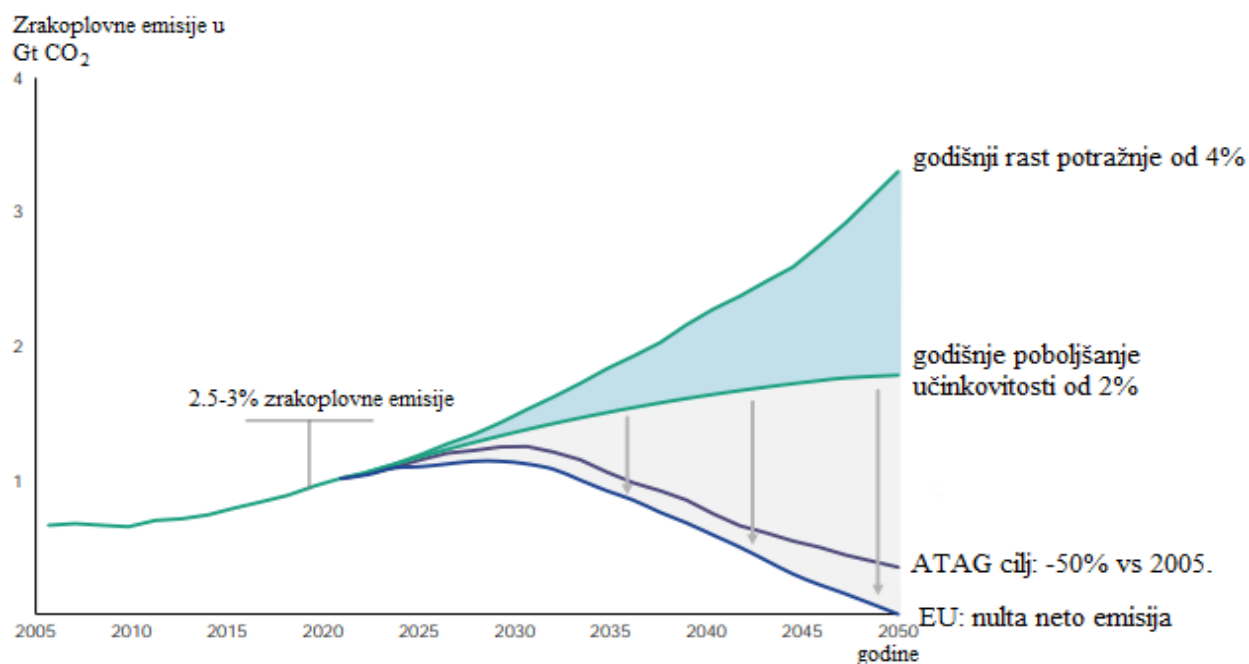
Glavni izazov s kojim se danas susreće zrakoplovna industrija je dekarbonizacija. To je izazov koji će zahtijevati uključenost svih aktera u industriji. Današnji zrakoplovi pogonjeni su kerozinom, gorivom dobivenim iz sirove nafte čije gorenje uzrokuje otpuštanje  $CO_2$  i  $NO_x$ . Obaveze zrakoplovne industrije o reduciranju utjecaja na okoliš proizlaze iz međunarodnih sporazuma, primjerice Europske Unije i ATAG-e<sup>7</sup>. Ukoliko se žele ispuniti strogi zahtjevi, promjene u industriji moraju biti momentalne s obzirom na činjenicu da je za razvoj potpuno novog zrakoplova iz temelja potrebno između 15 i 20 godina te barem isto toliko da se zamjene kompletne flote avioprijevoznika. Uvođenje penala avioprijevoznicima na emitiranu količinu  $CO_2$  jedna je od opcija koju razmatraju regulatori u nadolazećim godinama kada se na tržištu pojavi novi tip zrakoplova koji neće emitirati  $CO_2$  u atmosferu s ciljem ubrzanja zamjene flota.

<sup>7</sup> ATAG (engl. Air Transport Action Group) - Akcijska skupina za zračni promet

Vodik se smatra revolucionarnim pogonskim gorivom u zrakoplovstvu jer njegovim korištenjem ne dolazi do ispuštanja  $CO_2$ . Postoje dva moguća pogonska sustava u kojima pogonsko gorivo može biti vodik, motori s unutarnjim izgaranjem i PEMFC. Uvođenjem u službu novih namjenskih zrakoplova različitih segmenata pogonjenih vodikom, mogu se očekivati značajni rezultati u procesu dekarbonizacije zrakoplovne industrije.

### 3.2.1 ZRAKOPLOVA INDUSTRIJA DANAS

Procjenjuje se da zrakoplovna industrije godišnje emitira 900 milijuna tona ugljikovog dioksida što čini oko 3% ukupnog emitiranja  $CO_2$ . Pretpostavljajući ekspanziju industrije 3-4% na godišnjoj razini i poboljšanje efikasnosti od 2% godišnje, dolazi se do zaključka da će se emisije do 2050. godine udvostručiti. Cilj koji je postavila Europska Komisija je potpuno neutralan klimatski kontinent do 2050. godine što isključuje bilo kakvo korištenje fosilnih goriva nakon toga, a cilj postavljen od ATAG-a iznosi smanjenje emisija za 50% u odnosu na referentnu 2005. godinu. Jasno je da zrakoplovna industrija mora napraviti radikalni zaokret ukoliko želi reducirati utjecaj na okoliš i ispuniti date ciljeve [15]. Procjene zrakoplovnih emisija  $CO_2$  do 2050. prikazane su slikom 7 na osnovu procjena iz 2020. prije krize uzrokovane pandemijom virusa Covid – 19.

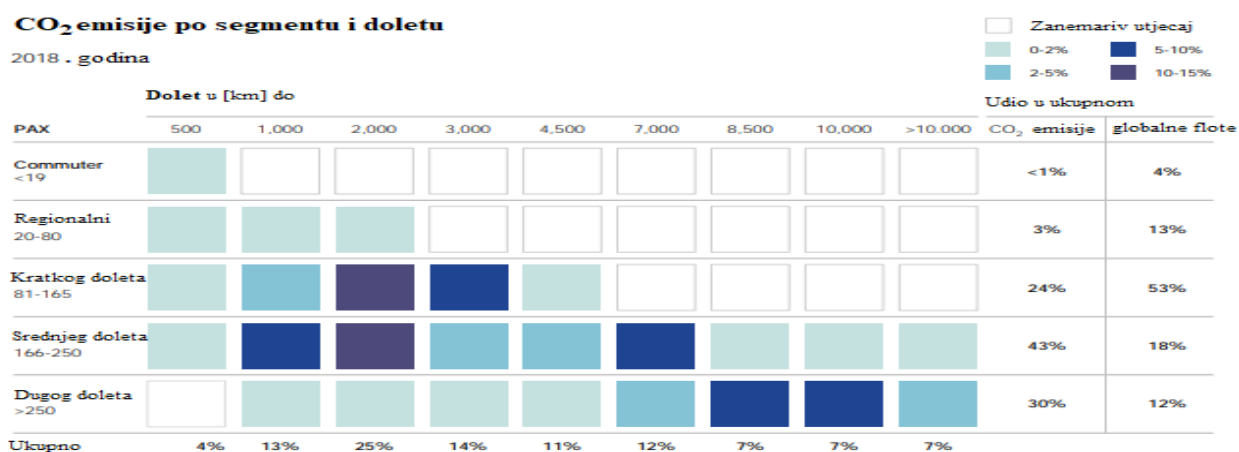


**Slika 7 Procjene zrakoplovnih emisija  $CO_2$  do 2050.**

Izvor: [15]

Iz slike 7 vidljivo je da tehnološki razvoj od optimističnih 2% neće biti ni približno dovoljan za redukciju u emisiji ugljikovim dioksidom. Nužno je shvatiti da trenutno stanje nije održivo te se mora krenuti u drugom smjeru razmišljajući o novim gorivima ili novom dizajnu zrakoplova. Pod poboljšanja učinkovitosti podrazumijevamo unaprjeđenja u poljima kao što su: aerodinamika, pogonski sustavi, goriva, upravljanje protocima zračnog prometa od strane kontrole leta i slično. Ukoliko se izuzme optimističnih 2% na godišnjoj razini, dolazi se do zaključka da će zrakoplovstvo emitirati oko 3.5 Gt ugljikovog dioksida godišnje pod uvjetom da nadvlada posljedice pandemije u kratkom vremenskom roku i nastavi ekspanziju baziranu na 2019. godini.

Na svaki kilogram izgorenog kerozina dolazi do emitiranja 3.15 kg CO<sub>2</sub>. Prema podacima iz 2018., približno dvije trećine današnje potrošnje kerozina proizlazi iz letova koji se izvode zrakoplovima kratkog i srednjeg doleta, tj. zrakoplovima koji imaju manje od 165 putničkih sjedala, odnosno manje od 250. Ovi zrakoplovi čine 70% svih zrakoplova u uporabi. Manje od 5% emisija uzrokovano je zajedno regionalnim zrakoplovima, onima do 80 putničkih sjedala i *commuter*<sup>8</sup> zrakoplovima, onima do 19 putničkih sjedala. Ovi zrakoplovi čine 20% svih zrakoplova danas u uporabi. Zrakoplovi dugog doleta, koji čine 12% ukupno svih zrakoplova, emitiraju oko 30% svih emisija [15]. Podaci o emisijama po segmentu i doletu prikazani su na slici 8.



**Slika 8 CO<sub>2</sub> emisije po segmentu zrakoplova i doletu**

Izvor: [15]

<sup>8</sup> Commuter – kategorija zrakoplova sukladna Federal Aviation Regulations (FAR) – zrakoplovnim propisima SAD-a; kategorija između transportnih zrakoplova i malih zrakoplova (generalne avijacije do 5 700 kg maksimalne težine u polijetanju). Commuter kategorija zrakoplova je namijenjena interurbanom povezivanju i letovima na kratke i srednje dolete i prevozi između 9 i 20 putnika. Sukladno FAR-u i Zakonu o zračnoj plovidbi Republike Hrvatske, zrakoplovi s 9 sjedala i manje, mogu operativno prevoziti putnike bez stjuarda/stjuardesa

### 3.2.2 VODIK KAO POGONSKO GORIVO BUDUĆNOSTI

Pored svojstva vodika kao pogonskog goriva, da je gorivo koje može dovesti do čiste nule neto vrijednosti ugljikovih dioksida, još su neka svojstva vrlo značajna što i određuje njegovu primjenjivost. Usporedba svojstava vodika s Jet A gorivom, koje se najčešće koristi u zrakoplovstvu danas, prikazana su tablicom 1.

**Tablica 1 Usporedba svojstava vodika s Jet A**

| Stavka                              | Vodik  | Jet A       |
|-------------------------------------|--------|-------------|
| Molekularna masa                    | 2.016  | 180         |
| Toplinska vrijednost [MJ/kg]        | 120    | 42.8        |
| Gustoća $LH_2$ , 1 bar, 300K [kg/L] | 0.071  | 0.775–0.840 |
| Specifična toplina [J/g*K]          | 9.69   | 1.98        |
| Točka ključanja na 1 bar [°C]       | -252.8 | 167-266     |
| Točka leđišta [°C]                  | -258.8 | -40         |
| Toplina isparavanja na 1 bar [J/g]  | 446    | 360         |
| Minimalna energija zapaljenja [mJ]  | 0.02   | 0.25        |
| Točka zapaljenja [°C]               | -231   | 60          |

Izvor: [5]

Visoka specifična toplina omogućava, u kombinaciji s niskom temperaturom, da vodik hladi motor prije ulaska u komoru izgaranja. Isto tako smanjuje SFC<sup>9</sup>. Specifična toplina, po svojoj definiciji, je količina topline koju je potrebno dovesti 1 gramu materije da se temperatura poveća za 1°C. Velika mana je ta što je vodik kriogeno gorivo i zahtjeva pažljivo rukovanje prilikom pohrane u spremnik zbog niskih temperatura i zahtijevanog tlaka. Minimalna energija zapaljenja je znatno manja kod vodika što mu daje znatnu prednost u usporedbi s drugim gorivima.

Da bi se tablica 1 razumjela u potpunosti, treba poznavati pojam gustoće energije. Razlikuju se dva važna parametra, gravimetrijska gustoća energije i volumetrijska gustoća energije. Gravimetrijska gustoća energije pokazuje koliko mnogo energije sadrži sustav u odnosu na njegovu masu. Najčešće mjerne jedinice za gravimetrijsku gustoću su [MJ/kg] i [kWh/kg]. Volumetrijska

<sup>9</sup> SFC (engl. *Specific Fuel Consumption*) – specifična potrošnja goriva

gustoća energije pokazuje koliko je ukupno energije sadržano u datom volumenu. Mjerna jedinica za volumetrijsku gustoću energije je  $[MJ/L]$ . Pogledom na tablicu može se iščitati podatak da je ogrjevna vrijednost vodika  $120 [MJ/kg]$ , dok je za JET A  $42,8 [MJ/kg]$ . Ogrjevna vrijednost definira se kao količinu topline koja se oslobodi u procesu izgaranja neke određene mase goriva. Taj pojam je ekvivalent pojmu gravimetrijske gustoće energije. Gustoća vodika iznosi  $0,07 [kg/L]$ , a JET A goriva  $0,84 [kg/L]$ . Volumetrijska gustoća energije dobiva se na sljedeći način:

$$\text{Volumetrijska gustoća energije} = \text{gravimetrijska gustoća energija} \times \text{gustoća}$$

Iz tog proizlazi za vodik:

$$\text{Volumetrijska gustoća energije (H}_2\text{)} = 120 \frac{MJ}{kg} \times 0,071 \frac{kg}{L} = 8,52 \frac{MJ}{L}$$

Za JET A:

$$\text{Volumetrijska gustoća energije (JET A)} = 42,8 \frac{MJ}{kg} \times 0,84 \frac{kg}{L} = 35,96 \frac{MJ}{L}$$

Ako se dobiveni rezultat za JET A podijeli s onim za vodik dobiva se:

$$35,96 \div 8,52 = 4,2$$

Eksplicitno se može zaključiti kako je za istu količinu energije za let potreban spremnik vodika 4,2 puta većeg volumena od onog za JET A gorivo. Također, vodik ima specifične zahtjeve jer spada u kriogena goriva, a to su goriva koja zahtijevaju skladištenje na ekstremno niskim temperaturama. Vodik se najčešće pohranjuje pod različitim tlakom, a tlak utječe na gustoću vodika, tako i na volumetrijsku gustoću energije pa u nekim uvjetima omjer volumetrijskih gustoća energije JET A goriva i vodika može iznositi i do 3,64. Cilj je postići što manji omjer.

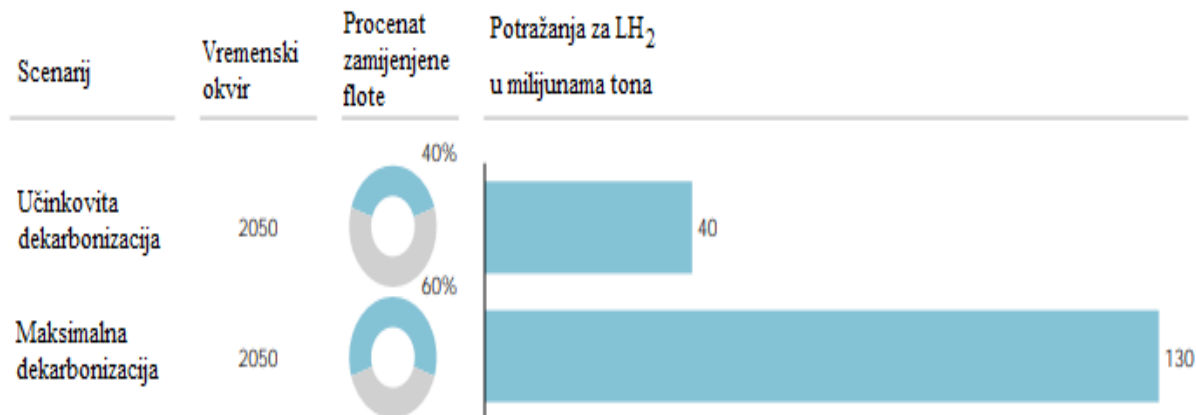
Iz ovih svojstava jasno je vidljivo da pored nekih svojih prednosti, vodik ima i nekoliko mana. No, glavno svojstvo vodika koje ga čini energentom budućnosti je činjenica da iza vodika nema nikakvih karbonskih emisija u okoliš. Štoviše, mogućnost dobivanja vodika iz obnovljivih izvora čine ovu priču još popularnijom. A to glavno svojstvo čini ga savršenim pogonskim gorivom budućih zrakoplova.

Evolucijski dizajn zrakoplova podrazumijeva redizajn trupa i krila sadašnjih zrakoplova, točnije njihovu prenamjenu kako bi mogli smjestiti spremnike s vodikom. Ovaj pristup nudio bi brži ulazak u uporabu zrakoplova pogonjenih vodikom i mogao bi upotrijebiti konvencionalne tehnike proizvodnje, ali i certificiranja. Iako je ovaj pristup manje učinkovit od revolucijskog dizajna zrakoplova, evolucijski zrakoplov ispunio bi dio zadanih ciljeva dekarbonizacije s obzirom na kratki vremenski okvir.

Revolucijski dizajn zrakoplova omogućio bi nove aerodinamičke koncepte i bolju integraciju spremnika vodika jer bi bio direktno prilagođen primjeni vodika kao pogonskog goriva. Nedostatak svih radikalno novih koncepata zrakoplova je to što imaju dug, nepredvidljiv proces komercijalizacije s proširenim razvojem kako bi se osigurala aerodinamička stabilnost zrakoplova u svim fazama leta i optimizirao dizajn kabine, proizvodnja zrakoplova i operacije.

Prema posljednjim analizama, smatra se da bi turbinski zrakoplovi s unutarnjim izgaranjem pogonjeni vodikom mogli reducirati negativan utjecaj na klimu za 50-75%, a oni pogonjeni gorivim člancima za 75-90%. U analizama su razmatrana dva scenarija uvođenja u uporabu vodika kao pogonskog goriva, scenarij učinkovite dekarbonizacije i scenarij maksimalne dekarbonizacije kao što je prikazano na slici 8. U scenariju učinkovite dekarbonizacije vodik bi svoju primjenu našao tamo gdje se smatra najisplativijim. U ovom scenariju zrakoplovi segmenta do srednjeg doleta početi će ulaziti u uporabu između 2035. i 2040. godine, što predstavlja najraniji mogući period. Nakon prilagodbe proizvodnih postrojenja i povećanja proizvodnih kapaciteta u trajanju tri do četiri godine, očekuje se da svi *commuter* zrakoplovi i oni srednjeg doleta kao i 50% zrakoplova srednjeg doleta budu pogonjeni vodikom. U ovom scenariju očekuje se da će 40% flote svih zrakoplova biti pogonjeno vodikom do 2050. godine, a ostatak zrakoplova bit će pogonjen novim naprednijim alternativnim gorivima [15].

U scenariju maksimalne dekarbonizacije, zrakoplovi na vodik bi trebali zamijeniti sve zrakoplove koji imaju dolet do 10 000 kilometara nakon perioda 2028.-2038. godine, što predstavlja prve zamislive planove uvođenja u uporabu s ambicioznim pretpostavkama. Iza tog perioda, u roku tri do četiri godine koliko je potrebno da se prilagode proizvodna postrojenja, sve bi nove zrakoplove s doletom do 10 000 kilometara pogonio vodik. U ovom scenariju 60% svih zrakoplova bilo bi pogonjeno vodikom, a ostatak bi bio pogonjen novim naprednijim alternativnim gorivima. Ovaj scenarijo je manje vjerojatan od scenarija učinkovite dekarbonizacije [15].



**Slika 9 Procjena zrakoplovne industrije na vodik u 2050. godini**

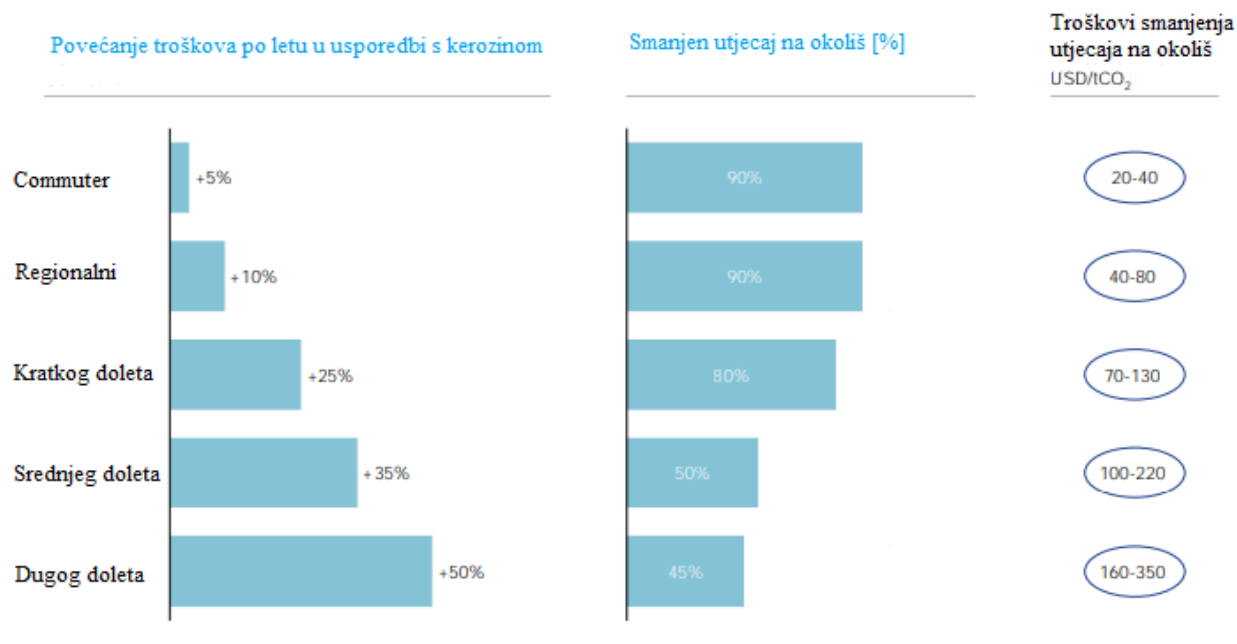
Izvor: [15]

Slika 9 ukazuje na to da će potražnja u zrakoplovstvu biti 130 milijuna tona LH<sub>2</sub> godišnje do 2050. za scenarij maksimalne dekarbonizacije što bi trebalo iznositi oko 25% ukupne globalne potražnje, odnosno oko 40 milijuna tona LH<sub>2</sub> za scenarij učinkovite dekarbonizacije što bi trebalo iznositi oko 10% ukupne globalne potražnje. Za 2040. godinu se procjenjuje da će zrakoplovstvo zahtijevati oko 10 milijuna tona LH<sub>2</sub> godišnje što bi tada trebalo činiti 5% ukupne svjetske potražnje [15].

Kako bi se bolje razumjela slika 8 koja opisuje utjecaj na okoliš koji zrakoplovi imaju danas, na slici 10 bit će prikazane procjene smanjenja utjecaja na okoliš kao i povećanje cijena po letu u usporedbi s kerozinom za sve segmente zrakoplova za 2040. uzimajući u obzir uprosječen razvoj zrakoplovne industrije na vodik. Na slici 10 prikazani su podaci koji uzimaju u obzir i ekonomske aspekte cijena koje se procjenjuju na tržištu u 2040. godini. Vidljivo je da se s povećanjem veličine segmenta zrakoplova povećavaju i operativni troškovi po letu zrakoplova u odnosu na zrakoplove pogonjene kerozinom. Utjecaj na okoliš se smanjuje sa segmentom zrakoplova, odnosno najveći benefiti će biti od zrakoplova koji lete manje udaljenosti za 90% do zrakoplova koji su namijenjeni dugim preookeanskim letovima gdje se procjenjuje smanjenje emisija za oko 45%. Vrlo je važno za naglasiti da troškovi smanjenja utjecaja na okoliš rastu povećanjem segmenta zrakoplova. Tako primjerice za *commuter* zrakoplove troškovi smanjenja utjecaja na okoliš iznose između 20 i 40 USD po toni CO<sub>2</sub>, a za zrakoplove dugog doleta između 160 i 350 USD po toni CO<sub>2</sub>. U troškove



smanjenja ulaze i cijena proizvodnje zrakoplova, ali i vodika te ostali operativni kumulativni troškovi i troškovi infrastrukture.



**Slika 10 Dodatni troškovi i reducirane emisije vodika u usporedbi s kerozinom**

Izvor: [15]

U ovoj procjeni se uzelo u obzir optimalno korištenje pogonskih sustava na vodik s obzirom na segment zrakoplova. Tako se za zrakoplove segmenta *commuter* i regionalne podrazumijeva ugradnja isključivo gorivih članaka kao pogonskih sustava. Za zrakoplove kratkog doleta podrazumijeva se izvedba hibridnog pogonskog sustava, a za zrakoplove srednjeg i dugog doleta pogonski sustav s turbinom s vodikom kao pogonskim gorivom [15].

Zrakoplovne emisije ne predstavljaju se isključivo ugljikovim dioksidom jer motori emitiraju također i vodenu paru, dušikove okside te čađu. Radom motora nastaju i kondenzacijski tragovi kondenzirane vodene pare koji se stvaraju iza ispuha motora zrakoplova. Utjecaj na okoliš pogonskih sustava na vodik biti će prikazan tablicom 2.

**Tablica 2 Emisije zrakoplova na vodik u usporedbi sa zrakoplovima na kerozin**

| Promjene u emisijama u letu i učinci povezani s emisijama |        |         |             |                                   |  |
|---|--------|---------|-------------|-----------------------------------|--|
|   | $CO_2$ | $NO_x$  | Vodena para | Kontrailsi <sup>10</sup> i Cirusi | $\Sigma$ Redukcijski potencijal utjecaja na okoliš |
| $H_2$ - turbina   | -100%  | -50-80% | +150%       | -30-50%                           | -50-75%  |
| $H_2$ - gorivi članak                                     | -100%  | -100%   | +150%       | -60-80%                           | -75-90%  |

Izvor: [15]

Pogonski sustavi s vodikom uzrokuju više vodene pare, ali je vrlo važno naglasiti da ne dolazi do emitiranja čađe kao kod kerozinskih zrakoplova. Molekule vodene pare koje stvaraju pogonski sustavi na vodik su znatno teže i kao takve imaju manji utjecaj na globalno zagrijavanje, točnije između 30 i 50% manje utjecaja nego vodene pare proizašle iz kerozinskih zrakoplova. Vodena para je staklenički plin, ali njen utjecaj na okoliš je deset puta manji od ugljikovog dioksida. Vodena para, koja se stvara u gorivim člancima kao nusprodukt, može biti kontrolirana, odnosno postoji mogućnost njenog skladištenja i neotpuštanja u okoliš. Kod turbinskih pogonskih sustava na vodik ipak dolazi do stvaranja dušikovih oksida jer u procesu izgaranja sudjeluje okolni zrak u kojem ima dušika. Valja napomenuti da je stvaranje dušikovih oksida reducirano između 50 i 80% za turbinske motore na vodik. Kompletni redukcijski potencijal utjecaja na okoliš je golem, posebice za zrakoplove pogonjene gorivim člancima jer može doći do redukcije ukupnih emisija do maksimalnih 90%, a za turbinske motore na vodik do maksimalnih 75%. Nadalje, pogonski sustavi na vodik su znatno tiši od konvencionalnih pogonskih sustava na kerozin što je od posebne važnosti za naseljena područja koja se nalaze u blizini zračnih luka [15].

<sup>10</sup> Kontrails (*engl. contrails*) – vidljivi tragovi kondenzirane vodene pare koji se stvaraju iza ispuha motora zrakoplova

## **4 IZAZOVI PRIMJENE VODIKA KAO POGONSKOG GORIVA U ZRAKOPLOVSTVU**

Vodik, kao i sva druga goriva po svojoj prirodi i namjeni, sa sobom nosi određene rizike, izazove te zahtjeva posebno složene procedure rukovanja kako bi postao dovoljno siguran za krajnje operatore. Postoji mnogo izazova koji se moraju nadvladati u nadolazećim godinama poput: održivog načina proizvodnje koji bi trebao moći odgovoriti zahtjevima potražnje, prilagodbe aerodromske i transportne infrastrukture kao i dizajna zrakoplova.

### **4.1 PROIZVODNJA KOJA ODGOVORA ZAHTJEVIMA POTRAŽNJE**

Do 2040. godine se pretpostavlja da će biti više modela različitih segmenata zrakoplova na tržištu koji će biti pogonjeni vodikom. Po scenariju učinkovite dekarbonizacije, potražnja u zrakoplovstvu do 2040. će iznositi 10 tona što bi trebalo činiti 5% globalne potražnje. Za ilustraciju, to bi značilo da bi se svi današnji regionalni aerodromi prebacili 10% na snabdijevanje zrakoplova vodikom kao pogonskim gorivom, a aerodromi koji služe kao glavna čvorišta nekim avioprijevoznicima za 5%. Za prosječan aerodrom namijenjen regionalnim letovima to bi podrazumijevalo potrebu u iznosu 5 000 t  $LH_2$  godišnje, ili 10 t dnevno. Na potrebe regionalnih aerodroma bilo bi dovoljno postrojenje snage otprilike 50 MW koje bi elektrolizom proizvodilo vodik. Za aerodrome koji služe kao čvorišta, zahtjev za  $LH_2$  iznosio bi oko 40 000 t  $LH_2$  godišnje, ili oko 100 t dnevno. Za takve aerodrome bilo bi adekvatno postrojenje snage 500 MW koje bi elektrolizom proizvodilo vodik [15].

Pretpostavlja se da će 2050., po scenariju učinkovite dekarbonizacije, zahtjevi zrakoplovstva za vodikom biti oko 40 milijuna tona, odnosno 130 milijuna tona po scenariju maksimalne dekarbonizacije. Ovisno o scenariju, to bi predstavljalo 10% ili 40% ukupno svih svjetskih potreba što bi sredinom stoljeća moglo učiniti zrakoplovnu industriju najvećim potrošačem vodika. Scenarij učinkovite dekarbonizacije predviđa ekvivalentnu potrošnju vodika onoj kada bi zajedno današnji regionalni aerodromi prešli 50% na snabdijevanje zrakoplova vodikom, a glavna čvorišta 25%. Prosječni regionalni aerodrom bi trošio godišnje oko 20 000 t  $LH_2$ , ili 60 t dnevno. Veća čvorišta bi zahtijevala znatno veću količinu, oko 200 000 t  $LH_2$  godišnje, ili dnevno oko 500 t  $LH_2$ . Za jedan značajniji aerodrom koji bi služio kao čvorište nekom

avioprijevozniku bilo bi potrebno postrojenje snage veće od 2 GW kako bi elektrolizom proizvodio potrebne količine vodika. Za ilustraciju, ako bi primjerice koristili elektranu na vjetar, bila bi potrebna četiri parka vjetroelektrana od 500 MW, a takve vjetroelektrane danas se ubrajaju među najveće na svijetu. Zadovoljile bi potrebu samo jednog aerodroma! Smatra se da bi globalna potražnja za tekućim vodikom u zrakoplovnoj industriji zahtijevala elektrane od 500 ili 1500 GW, ovisno o scenariju. To bi danas činilo 20 ili 60% ukupnog kapaciteta obnovljive energije [15].

Imajući to u vidu, proizvodnja koja bi generirala tolike iznose vodika trebala bi biti klimatski održiva i troškovno učinkovita. Trenutno najrazrađenija metoda dobivanja zelenog vodika, elektroliza vode, na tržištu je najskuplja, no s njenom razgranatijom primjenom i sve većom pojavnošću na tržištu trebala bi postati troškovno isplativija. Postoje i metode koje bi nametale penale na proizvodnju vodika iz neobnovljivih izvora kako bi potakli proizvodnju iz obnovljivih izvora energije.

## 4.2 AERODROMSKA INFRASTRUKTURA I TRANSPORT

Kako je riječ o novom pogonskom gorivu potpuno drugačijih svojstava od kerozina, aerodromska infrastruktura će morati biti prilagođena prihvatiti zrakoplove pogonjene vodikom bez obzira radilo se o zrakoplovima pogonjenim gorivim člancima ili onima s propulzijom. Pod infrastrukturom se podrazumijeva: transport od mjesta proizvodnje do aerodroma, pogon za ukapljivanje, spremnike i opremu za punjenje gorivom.

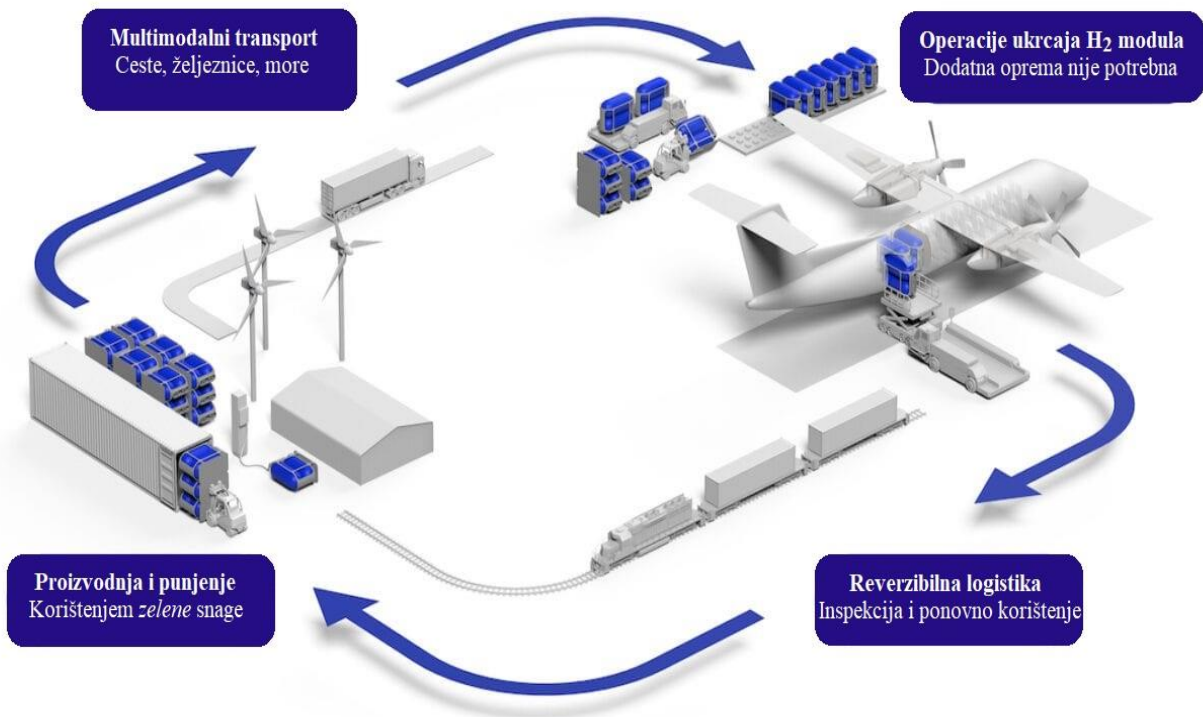
Postoje tri različita načina klasičnog transporta tekućeg vodika od postrojenja za ukapljivanje do spremnika za skladištenje na aerodromu: cjevovod s vakuumskim omotačem, kamion – prikolica i željeznički vagon – cisterna. Vodik u plinovitom stanju se može transportirati i postojećim cjevovodima kojima se transportira prirodni plin. Ako se pretpostavi da se proizvodni pogon  $GH_2$  nalazi na udaljenosti od 100 milja od aerodroma, ekonomika tekućeg vodika postaje funkcija udaljenosti postrojenja za ukapljivanje od aerodroma, a udaljenosti koje se uzimaju u obzir su: 100, 50, 10, 5, 1 i 0 milja. Primjerice, ako se postrojenje za ukapljivanje nalazi na 40 milja od aerodroma, tada se  $GH_2$  transportira 60 milja cjevovodima prirodnog plina. Transport  $GH_2$  biti će jeftiniji od transporta  $LH_2$  u slučajevima gdje se postrojenje za ukapljivanje nalazi u blizini aerodroma jer imati željezničku i cestovnu infrastrukturu zbog malih udaljenosti nije optimalno. Distanca, od postrojenja za ukapljivanje do aerodroma, u tim slučajevima najefikasnije opslužuje

transport putem cjevovoda s vakuumskim omotačem. No, kada se postrojenje za ukapljivanje nalazi na udaljenostima većim od 40 milja od aerodroma, najisplativija opcija transporta je putem željeznice korištenjem vagona – cisterni. Na sve većim udaljenostima transport željeznicom je sve isplativiji pa je tako najisplativija metoda da se postrojenje za ukapljivanje smjesti uz postrojenje za proizvodnju  $GH_2$  i da se cijelom duljinom puta transportira željeznicom. Ukoliko ne postoji željeznička, a postoji cestovna infrastruktura, cestovni transport biti će isplativiji od onog putem cjevovoda kada je postrojenje za ukapljivanje udaljeno 50 milja i više od aerodroma kojeg opslužuje. Treba razmotriti i izvedbu zasebnog cjevovoda za plinoviti vodik kako bi se smanjila ovisnost o cjevovodima prirodnog plina, a i kako bi se proces transporta optimizirao [5]. Postoji i modularni način transporta i punjenja zrakoplova. To podrazumijeva da u sustavu postoji onoliko mnogo modularnih spremnika koliko je potrebno da opsluže potrebe operatora. Modularni spremnici koji su ispražnjeni bi se izvadili van iz zrakoplova, nad njima mi se provela inspekcija i bili bi ponovno spremni za nadopunu gorivom. Nakon nadopune vodikom, bili bi transportirani natrag prema istom aerodromu željezničkim, morskim ili cestovnim putem i bili bi ponovno spremni za korištenje u nekom od zrakoplova. Takav jedan cjelokupni zatvoreni sustav sa svojim segmentima prikazan je slikom 11.

Postrojenja za ukapljivanje na današnjem tržištu su izuzetno skupa. Primjerice, postrojenje kapaciteta ukapljivanja 6 000 kg dnevno koštalo bi oko 50 milijuna američkih dolara. Konvencionalni proces ukapljivanja ranije proizvedenog plinovitog vodika sastoji se od tri koraka: kompresije, hlađenja i ekspanzije [16].

Postoji nekoliko načina rukovanja vodikom na aerodromu. Ako postoji postrojenje za ukapljivanje smješteno na aerodromu, onda sustav postaje efikasniji jer se zrakoplovi snabdijevaju vodikom direktno iz postrojenja i vodik se ne gubi zbog isparavanja. Ako se pak vodik doprema kamion – cisternama kao oblikom transporta, postoji mogućnost, ukoliko je njihov dolazak dovoljno frekventan da odgovori potražnji, da se direktno iz cisterni snabdijevaju zrakoplovi bez posebnog pohranjivanja u spremnicima na aerodromu. Pri tom se podrazumijeva da je kamion – cisterna opremljena opremom za dolijevanje vodika u zrakoplove. Aerodrom bi svakako trebao imati skladišta za određenu količinu vodika koja je dovoljna da zadovolji potrebe operatora. Razmatraju se dvije izvedbe, podzemna i nadzemna skladišta. Postoje dva tipa podzemnog skladištenja, tip smrznute okolne zemlje i tip s dvostrukom pregradom izoliran vakuumom. Tip

smrznute okoline funkcionira na principu da se u tlo unese kriogena tekućina što bi predstavljalo solidnu izolaciju, ali ipak zbog vrlo velike razlike u temperaturi može doći do isparavanja vodika, čak i zapaljenja, pa se ova metoda ne preporuča. Drugi način s dvostrukom pregradom je mnogo učinkovitiji te pouzdaniji. Spremnik je obložen vulkanskim prahom ili ima više slojeva radijacijski otpornih štitova koji okružuju unutarnju posudu. Izvedbe ovog tipa koriste se u nadzemnom skladištenju, a prednost skladištenja ovog tipa podzemno je ta što se ne moraju izdavati posebna odobrenja od strane kontrole leta, jer se pod zemljom ne vode kao prepreka [5].

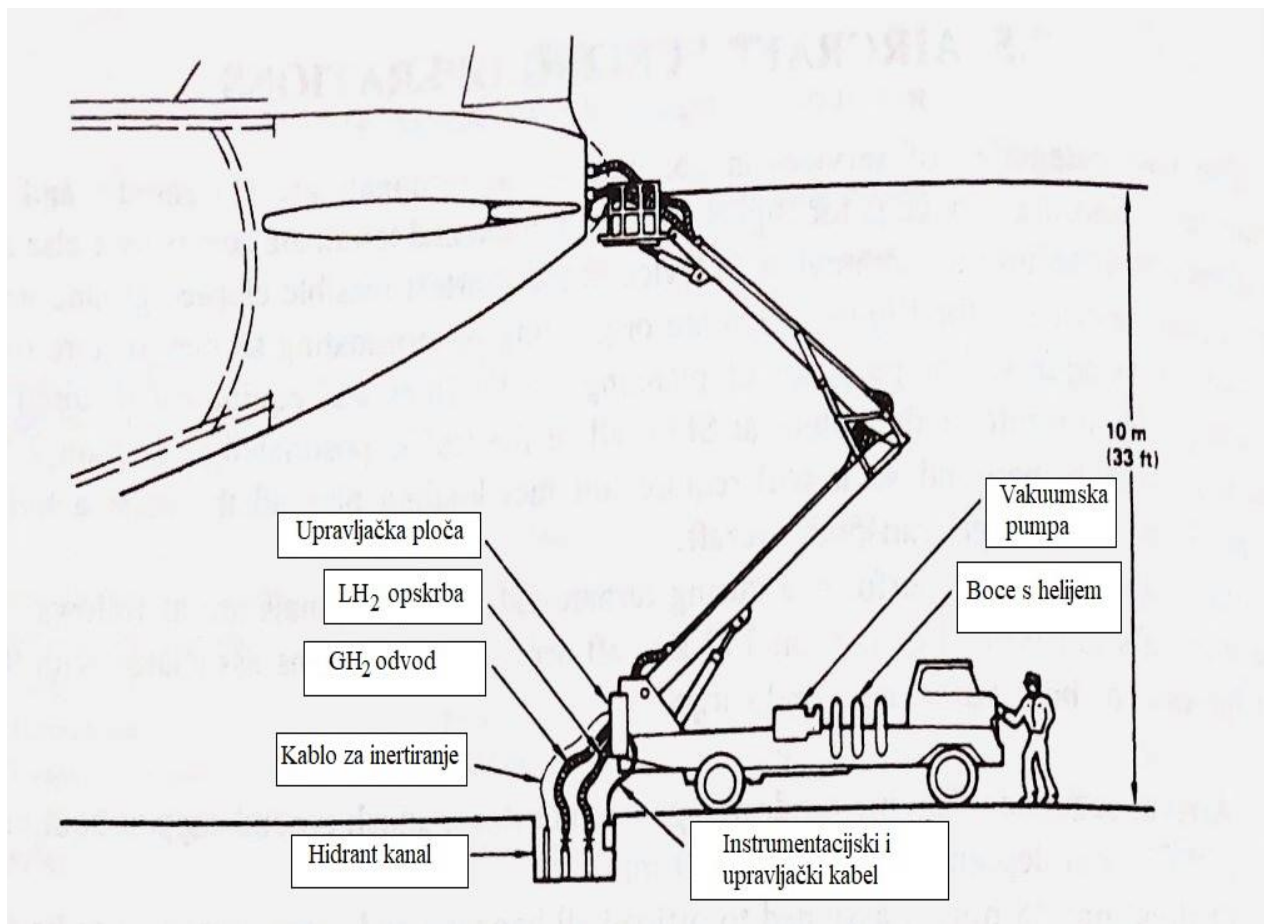


**Slika 11** Zatvoreni modularni sustav aerodromske i transportne infrastrukture

Izvor: [17]

Postoje dva načina nadopune zrakoplova vodikom, onaj modularnog tipa gdje se kompletni spremnici zamjenjuju novima i onaj integralni u zrakoplovu koji se nakon svakog leta mora nadopunjavati. Punjenje integralnog spremnika vodika u zrakoplovu prikazano je slikom 12. Vozilo za punjenje gorivom dođe na poziciju stajanke. Nakon toga se otvori pristup podzemnim

spremnikima vodika, spoje se crijeva i pomičnom dizalicom crijeva se spajaju na trup zrakoplova gdje se odvija punjenje gorivom. Dva crijeva se spajaju na zrakoplov, jedan za opskrbu  $LH_2$ , a drugim crijevom se hvata plinoviti vodik izbačen iz spremnika dok ulazna tekućina istiskuje hladni vodikov plin koji održava ciljani tlak u spremniku. Helij se koristi za pročišćavanje dva cjevovoda pod tlakom od 50 psi, onog za tekući vodik i onog za odvod. Proces se ponovi tri do četiri puta sve dok nečistoće budu zastupljene jedan naprema milijun. Veliki udio helija može se reciklirati u postrojenju za ukapljivanje gdje se odvađa od zaostalog vodika. Sve radnje kontroliraju se s instrumentata na upravljačkoj ploči. Također, postoje i senzori koji ukazuju na curenje vodika kako ne bi došlo do zapaljenja [5].

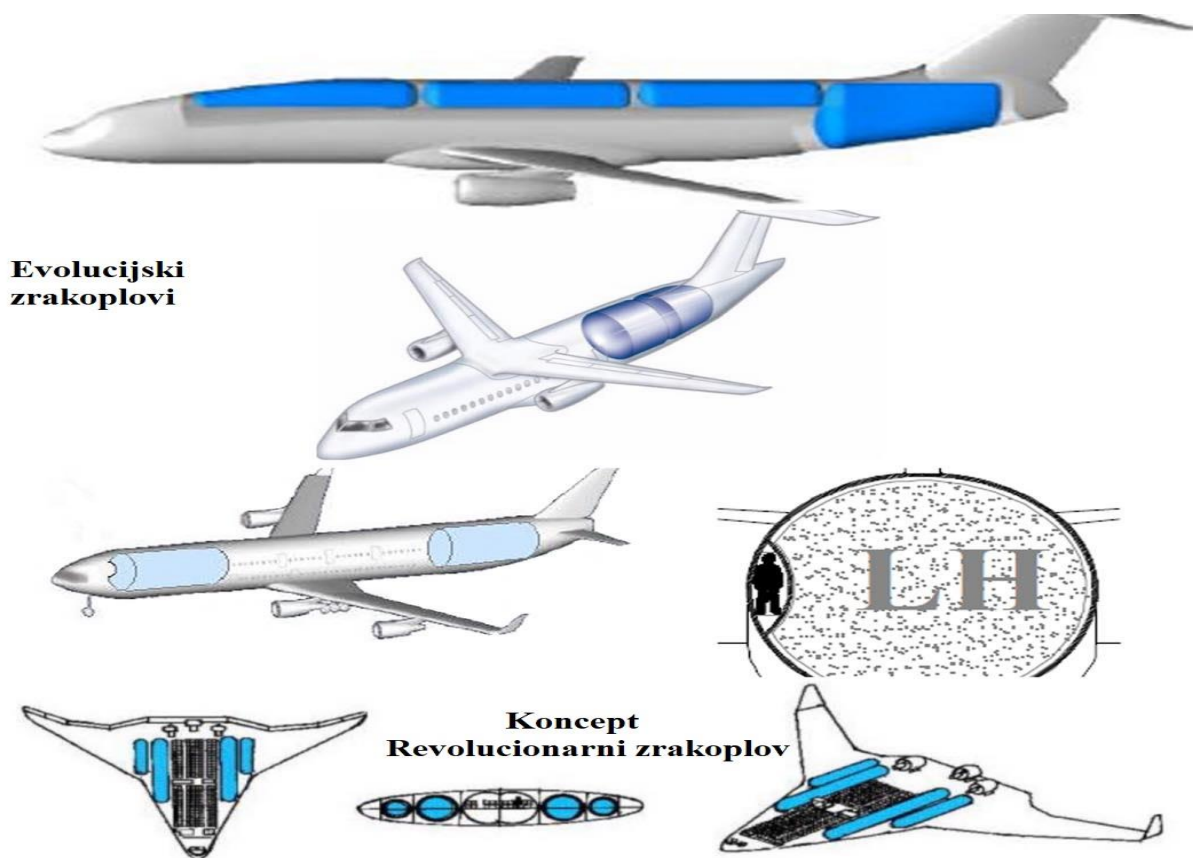


**Slika 12 Proces nadopune goriva hidrant vozilom**

Izvor: [5]

### 4.3 NUŽNE PROMJENE U KONSTRUKCIJI ZRAKOPLOVA

Najveći izazov je smjestiti spremnik goriva u zrakoplov. Obzirom na karakteristike vodika, on ne može biti smješten u krila zrakoplova kao što je to slučaj s kerozinom. Evolucijski gledano, optimalno bi bilo spremnik goriva smjestiti u trup zrakoplova – glavni konstrukcijski sklop. Revolucijski zrakoplov podrazumijevao bi izradu glavnih sklopova zrakoplova s pripadajućim elementima koji bi bili u potpunosti prilagođeni novom pogonskom gorivu. Na dosadašnjim prototipovima zrakoplova srednjeg i većeg doleta, spremnici su se nalazili u stražnjem dijelu zrakoplova bliže njegovu repu. Spremnici su bili cilindričnog oblika kako bi odgovarali položaju u zrakoplovu. Dobra izolacija spremnika je nužna kako ne bi došlo do negativnih utjecaja izvana poput promjena u tlaku, radijaciji, temperaturi, vlažnosti i slično. Preporučuju se spremnici s tekućim vodikom pod tlakom jer se na taj na uštedi na volumenu u odnosu na plinoviti vodik.



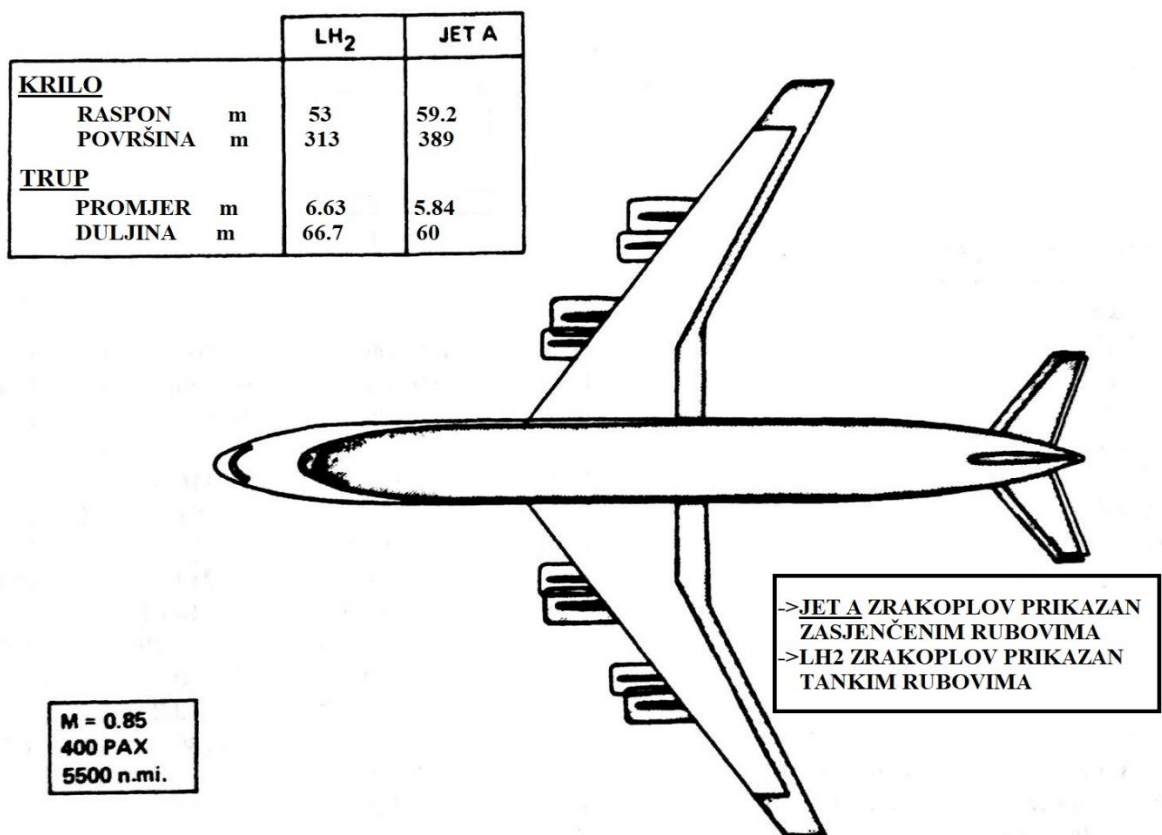
*Slika 13 Položaj spremnika vodika kod evolucijskog i revolucionarnog zrakoplova*

*Izvor: [18] [19]*



Dakle, položaj i veličina spremnika vodika ovise o segmentu zrakoplova i njegovoj namjeni koja može biti za putnički prijevoz ili prijevoz robe. Predlagani položaji zrakoplova prikazani su slikom 13 na kojoj je na dnu vidljiv i koncept dizajna revolucijskog zrakoplova prilagođenog zahtjevima vodika. Plavom bojom prikazani su spremnici vodika.

Rađene su studije uspoređivanja parametara veličina zrakoplova na kerozin s turbinskim motorom na vodik. Za pretpostavku se uzima da je riječ o istom modelu. Došlo je se do zaključka da bi zrakoplov na vodik imao duži trup i trup većeg promjera, a kraća krila što rezultira i manjom površinom krila. Zaključak proizlazi iz smještaja spremnika vodika u trupu zrakoplova, dok se kerozin sprema u krilo zrakoplova. Razlike u parametrima pokazane su na modelu zrakoplova namijenjenom prijevozu 400 putnika, projektirane brzine 0.85 Mach i doletu od 5 500 nautičkih milja prikazanom na slici 14.



*Slika 14 Usporedba veličine zrakoplova pogonjenog vodikom i s JET A*

*Izvor: [5]*

## 4.4 SIGURNOSNA RAZMATRANJA

Vodik, kao i sva druga pogonska goriva, treba shvatiti trezveno, s njim rukovati oprezno sukladno propisanim procedurama koje su u skladu s prirodnim osobinama vodika. Riječ je o gorivu koje je bez boje i mirisa i svako njegovo iscurivanje nemoguće je detektirati ljudskim osjetilima vida i njuha.

Minimalno izlaganje vodikom na kriogenim temperaturama može biti fatalno jer bi izazvalo oštećenja na kuži u razini spaljivanja kože, čak i za kratke periode vremena.

Potencijalnu opasnost predstavlja i njegova visoka reaktivnost, detonacija i zapaljivost. Samo je mala iskrica dovoljna da uzrokuje eksploziju, posebice u zatvorenim prostorijama s većom koncentracijom vodika. U nesrećama i sudarima koji bi izazvali iscurenje vodika, a s druge strane i pojavu iskrice, završilo bi kobno za putnike zrakoplova ostavljajući ih gotovo bez izgleda za preživljavanje. U slučaju da se puknuće strukture dogodi u dijelu u kojem je smješten spremnik vodika i on ispari u atmosferu, to neće imati nikakav utjecaj na putnike pa čak i ako dođe do zapaljenja jer se procjenjuje da takav vodik može podržavati vatru oko 15 sekundi s pretpostavkom da se ne proširi na druge elemente. Zbog toga je nužno razviti tehnologiju koja će omogućiti zaštitu protiv iscurjenja vodika iz spremnika čak i u ekstremnim slučajevima te dobru izolaciju od ostalih komponenti zrakoplova. Utjecaj vodika na sigurnost treba još dodatno istražiti te sagledati sve aspekte u sustavu koji uključuju rukovanje vodikom [5].

## **5. IZVEDBA ZRAKOPLOVNOG POGONSKOG SUSTAVA S PRIMJENOM VODIKA**

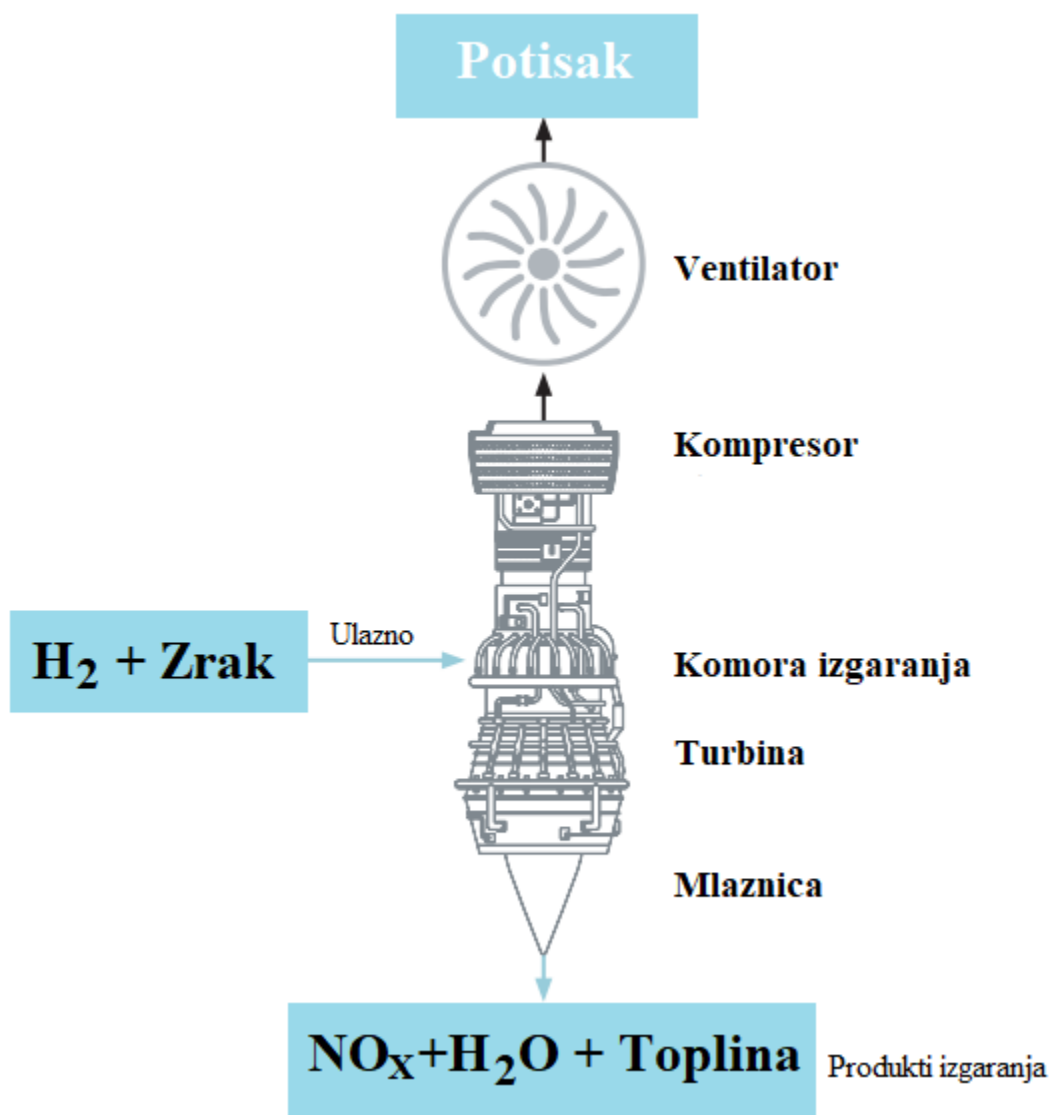
Dvije su različite arhitekture pogonskih sustava na vodik u zrakoplovima. Razlikuju se po svojim konceptijskim sastavnim elementima i načinu rada. Riječ je o dva tipa, motorima s unutarnjim izgaranjem i sustavom s gorivim člancima, a oba tipa pogoni vodik u službi pogonskog goriva. Oba tipa pogonskih sustava dovode do potpunog eliminiranja karbonskih emisija u zrakoplovstvu što im je glavna značajka rada. Također, dušikovi oksidi su znatno reducirani kod motora s unutarnjim izgaranjem, a uopće ne postoje kod gorivih članaka. Trenutno se smatra da će zbog svojih karakteristika pogonski sustav s gorivim člancima biti implementiran u zrakoplove do segmenta srednjeg doleta, a za zrakoplove srednjeg i dugog doleta će se koristiti pogonski sustav s unutarnjim izgaranjem. Motori s unutarnjim izgaranjem ne zahtijevaju toliko radikalne promjene u dizajnu zrakoplova i cjelokupnog pogonskog sustava kao gorivi članci. Zbog osobina gorivih članaka s polimernom membranom (PEMFC), smatra ih se najadekvatnijim u primjeni kod pogonskih zrakoplovnih sustava.

### **5.1 POGONSKI SUSTAV S UNUTARNJIM IZGARANJEM POGONJEN VODIKOM**

Gotovo nakon četiri desetljeća, u zrakoplovstvu se ponovno počela razmatrati opcija pogonskih sustava s motorima s unutarnjim izgaranjem na vodik. Ovoga puta glavni pokretač takve inicijative su klimatske promjene i procjenjuje se da će ovaj tip pogonskog sustava biti razvijen do 2040. godine. Potisak zrakoplova bio bi generiran iz modificiranih pogonskih sustava. Primjena u ovom pogonskom sustavu eliminira emisiju  $CO_x$ , a emisije  $NO_x$  su značajno reducirane u odnosu na motore na kerozin. Također, čađa koja se emitira uporabom kerozina, kod motora pogonjenim vodikom ne postoji i posljedično značajno umanjuje stvaranje kondenzacijskih tragova iza zrakoplova, jer se čestice vodene pare uglavnom vežu za čestice čađe i time tvore kondenzacijske tragove (engl. *contrails*).

Osnovni dijelovi današnjih mlaznih motora: uvodnik, kompresor, komora izgaranja, turbina i mlaznica bili bi identični dizajnom i funkcijom i u motorima pogonjenim vodikom. Modifikacije koje se trebaju tehnološki razviti samo bi pospješile efikasnost pogonskog sustava. Dakle, glavna

razlika bi bila pogonsko gorivo s pripadajućim sustavom za napajanje. Shema pogonskog sustava s motorom na unutarnje izgaranje na vodik prikazana je slikom 15.



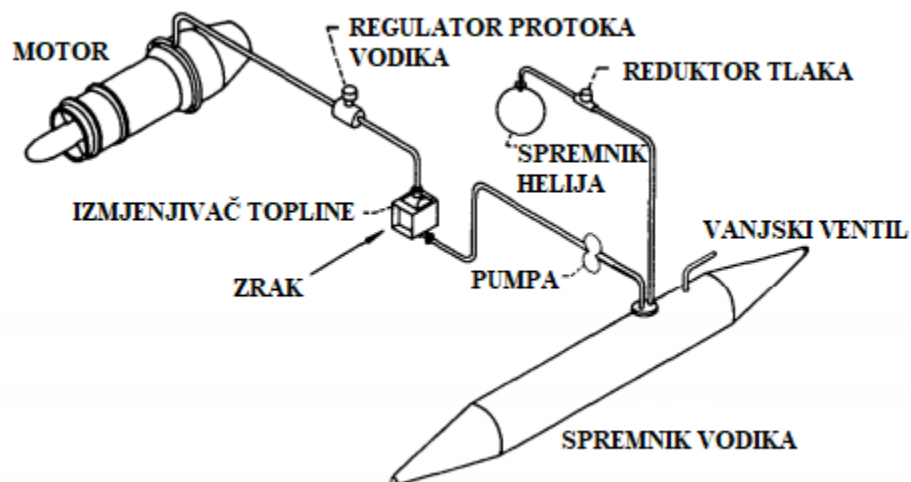
*Slika 15 Shema pogonskog sustava s motorom na unutarnje izgaranje s vodikom kao pogonskim gorivom*

*Izvor: [20]*

Činjenica da je vodik kriogeno gorivo je velika prednost kad se gleda samo rad motora zrakoplova. Vodik zbog svojih vrlo niskih temperatura sposoban je hladiti motor i održavati ga bez pregrijavanja bez da motor ima potrebu za bilo kakvim drugim sustavom za hlađenje. Širok raspon zapaljivosti omogućava veći raspon kombinacije zrak – vodik. Rad pri siromašnoj smjesi goriva rezultira uštedom goriva i konačnom temperaturom izgaranja koja je općenito niža, što smanjuje

količinu onečišćujućih tvari. Nadalje, visoka temperatura samozapaljenja vodika omogućuje veće omjere kompresije u vodikovom motoru u odnosu na motor s ugljikovodikom. Veći omjer kompresije rezultira većom toplinskom učinkovitošću ili manjim gubitkom energije tijekom izgaranja.

Tipični  $LH_2$  sustav za napajanje gorivom prikazan je shematski slikom 16. Sustav bi se sastojao od toplinski izoliranih spremnika, pumpe za gorivo, izmjenjivača topline i regulatora protoka. Helij bi bio zaslužan za rad pneumatskih ventila i za osiguravanje tlaka za protok vodika u slučaju kvara pumpe ili za ispuštanje goriva u slučaju nužde. Helij se također može koristiti za punjenje spremnika goriva. Može poslužiti i kao čistač vanjskih nečistoća. Na spremniku goriva nalaze se ventili za vanjsku uporabu prilikom zemaljskih operacija.



**Slika 16 Shema sustava za napajanje gorivom**

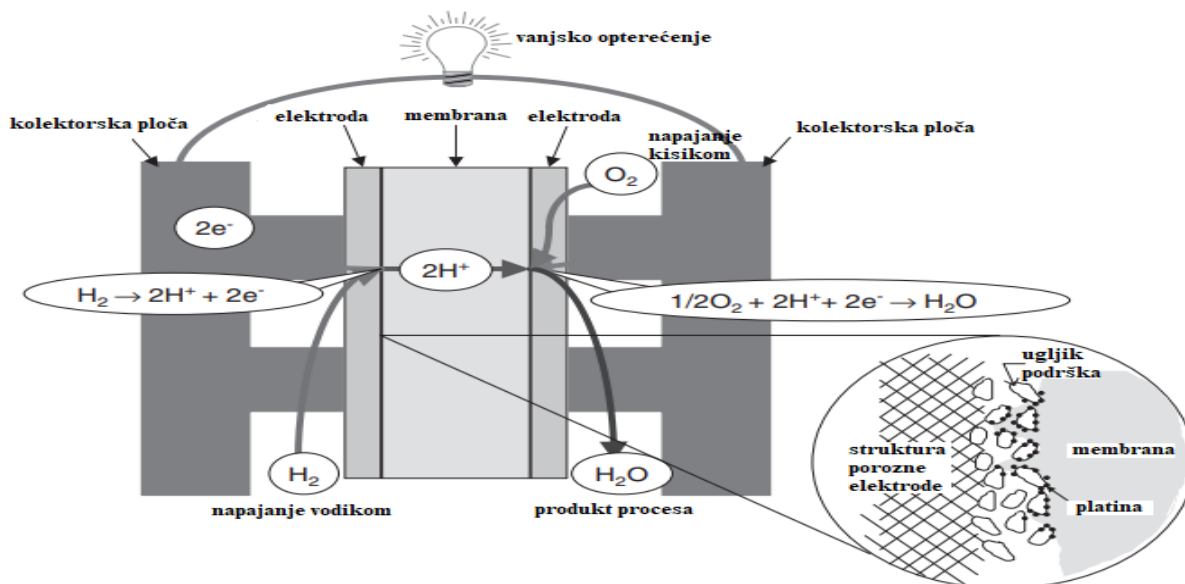
*Izvor: [21]*

Izmjenjivač topline služi kako bi tekući vodik bio pretvoren u plinoviti prije ulaska u motor. Može biti korišten i vanjski zrak s obzirom da mu je temperatura pogodna za to. Pretvaranje tekućeg u plinoviti vodik može biti učinjeno i pomoću komprimiranog zraka iz kompresora motora. Regulator protoka odaziva se pilotovim namjerama s obzirom na željeni režim leta. Svi elementi sustava za napajanje gorivom spojeni su na centralnu upravljačku jedinicu za gorivo koja prima

naredbe od centralne upravljačke jedinice motora koja pak prima podatke od pilota, atmosferskih senzora i senzora motora [21].

## 5.2 POGONSKI SUSTAV S PEM GORIVIM ČLANCIMA

Gorivi članak je elektrokemijski pretvarač energije koji pretvara kemijsku energiju goriva u istosmjernu električnu struju (DC). Zašto baš PEM (engl. *Proton Exchange Membrane*) gorivi članci? PEM gorivi članak, kao što mu i samo ime kaže, ima polimernu membranu s elektrolitom koja ima unikatne mogućnosti. Nepropusna je za vanjske plinove, ali vodi protone kroz sebe (od tud i ime). Membrana koja djeluje kao elektrolit je spljoštena između dvije porozne i električno vodljive elektrode. Elektrode su najčešće izrađene od karbonskih tkanina ili papira od karbonskih vlakana. U prostoru između porozne elektrode i polimerne membrane nalazi se sloj s česticama katalizatora. Elektrokemijska reakcija događa se na površini katalizatora na sučelju između elektrolita i membrane. Vodik, koji se nalazi s jedne strane membrane, cijepa se na primarne konstituente – protone i elektrone. Svaki atom vodika sastoji se od po jednog protona i elektrona. Protoni putuju kroz membranu, dok elektroni putuju kroz električno vodljive elektrode, preko kolektora struje te kroz vanjski krug gdje obavljaju korisnu radnju i vraćaju se na drugu stranu membrane. Na mjestima katalizatora između membrane i druge elektrode susreću se s protonima koji su prošli kroz membranu i kisikom koji se nalazi s druge strane membrane. Elektrokemijskom reakcijom nastaje voda koja je potisnuta van članka zajedno s viškom kisika. Neto rezultat ove spontane kemijske reakcije je tok struje koju stvaraju elektroni i pritom obavljaju koristan posao pokrećući potrošač. Vodikova strana je negativna i naziva se anoda, a strana na kojoj je kisik je pozitivna i naziva se katoda [3]. Osnovni princip rada PEM gorivih članaka bit će prikazan shemom na slici 17.

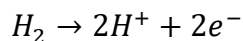


**Slika 17 Shematski prikaz PEM gorivog članka**

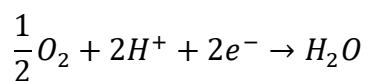
Izvor: [3]

Spontana kemijska reakcija događa se istovremeno i na anodi i na katodi. Pojednostavljene reakcije u gorivim člancima možemo prikazati na sljedeći način:

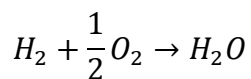
Na anodi:



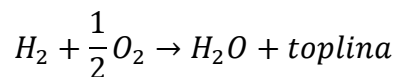
Na katodi:



Što se ukupno može zapisati kao:



Ukupna reakcija je jednaka reakciji izgaranja vodika. Izgaranje je egzotermni proces, a to znači da dolazi do otpuštanja energije u procesu što možemo zapisati na sljedeći način:

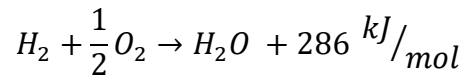


Toplina (entalpija -  $\Delta H$ ) nastala kemijskom reakcijom je razlika između topline formacije produkata i reaktanata i može se zapisati na sljedeći način:

$$\Delta H = (h_f)_{H_2O} - (h_f)_{H_2} - \frac{1}{2}(h_f)_{O_2} = -286 \text{ kJ/mol} - 0 - 0 = -286 \text{ kJ/mol}$$

Negativan znak entalpije znači da je toplina otpuštena u ovoj kemijskoj reakciji.

Pretpostavljajući temperaturu od 25°C i pri atmosferskom tlaku od 1 bara, zaključno može se prikazati ukupna jednačina na sljedeći način:



Entalpija izgaranja vodika naziva se još i ogrjevnom vrijednosti, a razlikujemo gornju i donju. To je količina topline koja se generira izgaranjem jednog mola vodika. Ogrjevna vrijednost prikazuje maksimalnu količinu termalne energije koja može biti izvedena iz vodika. U svakoj kemijskoj reakciji dolazi do entropije, tako i u ovoj. Vrijednost koja se može pretvoriti u elektricitet naziva se Gibbsovom slobodnom energijom i može se zapisati kao:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

Drugim riječima, postoje neki nepovratni gubici u pretvorbi energije zbog stvaranja entropije -  $\Delta S$ .  $\Delta H$  označava razliku između toplina formacije produkata i reaktanata, a  $\Delta S$  označava razliku između entropije produkata i reaktanata:

$$\Delta S = (s_f)_{H_2O} - (s_f)_{H_2} - \frac{1}{2}(s_f)_{O_2}$$

Podaci za entalpije i entropije stvaranja reaktanata i produkata gorivih članaka na 25°C i 1 bar prikazani su tablicom 3.

**Tablica 3 Entalpije i entropije stvaranja reaktanata i produkata gorivih članaka; 25°C, 1 bar**

| Kemijski spoj            | $h_f [kJ mol^{-1}]$ | $s_f [kJ mol^{-1}K^{-1}]$ |
|--------------------------|---------------------|---------------------------|
| Vodik - $H_2$            | 0                   | 0,13066                   |
| Kisik - $O_2$            | 0                   | 0,20517                   |
| Voda (tekućina) - $H_2O$ | -286,02             | 0,06996                   |
| Voda (plin) - $H_2O$     | -241,98             | 0,18884                   |

Izvor: [3]



Uvrštavanjem u prethodnu jednadžbu, za navedene uvjete, dobije se da od ukupne dostupne energije od 286.02 kJ/mol, može biti pretvoreno u električnu energiju 237,34 kJ/mol, a ostatak 48,68 kJ/mol pretvori se u toplinu.

Rad struje je produkt naboja i potencijala:

$$W_{el} = qE,$$

gdje  $W_{el}$  predstavlja rad struje izražen u J/mol,  $q$  predstavlja naboj predstavljen s C/mol, a  $E$  potencijal izražen voltima – V.

Totalni naboj u reakciji u galvanskim člancima i po molu vodika utrošenog predstavlja se sa:

$$q = n N_{Avg} q_{el}$$

gdje je:

$n$  = broju elektrona po molekuli vodika (2 elektrona po molekuli),

$N_{Avg}$  = broj molekula po molu, (Avogardov broj =  $6.022 \times 10^{23}$  molekula/mol)

$q_{el}$  = naboj jednog elektrona =  $1,602 \times 10^{-19}$  C/e<sup>-</sup>

Produkt Avogardova broja i naboja jednog elektrona naziva se Faradayeva konstanta – F i iznosi 96,485 C/elektron x mol.

Rad struje se može prikazati kao:

$$W_{el} = nFE = -\Delta G$$

Iz tog proizlazi:

$$E = \frac{-\Delta G}{nF} = \frac{-237,340 \text{ J/mol}}{2 \times 96,485 \text{ As/mol}} = 1,23 \text{ V}$$

Na temperaturi od 25°C i tlaku od 1 bar, teoretski napon PEMFC iznosi 1,23 V. U praksi je on manji i iznosi oko 1 V.

Teoretska efikasnost svakog uređaja koji pretvara energiju izražava se kao odnos izlazne energije i ulazne energije. U ovom slučaju, korisna izlazna energija je proizvedena električna energija, a

ulazna je entalpija vodika (vodikova gornja ogrjevna vrijednost). Pretpostavljajući da je se sva Gibbsova slobodna energija pretvorila u električnu, maksimalna moguća efikasnost iznosi:

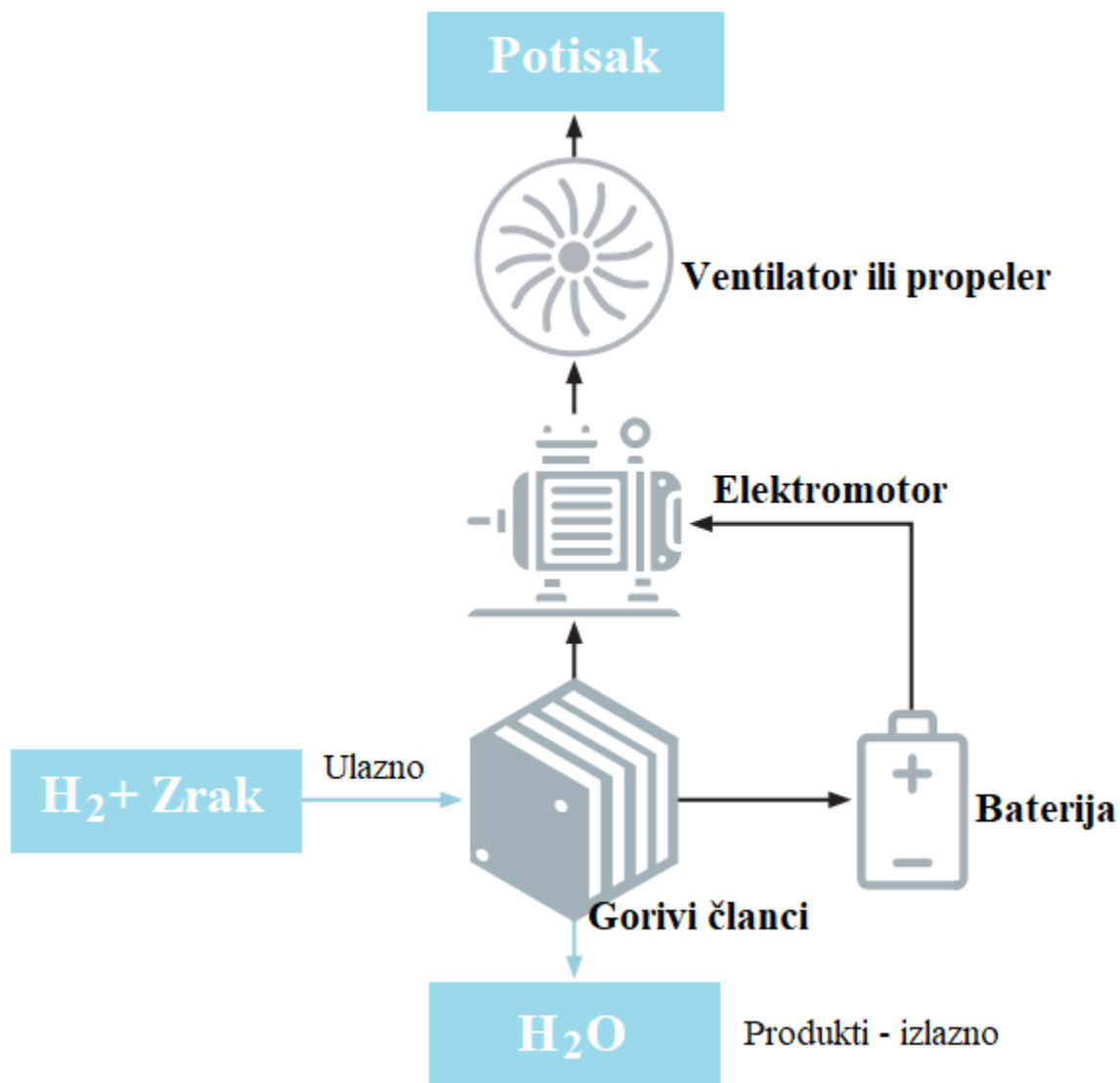
$$\eta = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{237,34}{286,02} = 0,83 = 83\%$$

Katkada se koristi vodikova donja ogrjevna vrijednost (*engl. LHV – low heating value*) kako bi se izrazila učinkovitost gorivih članaka jer se i efikasnost motora s unutarnjim izgaranjem prikazuje donjom ogrjevnom vrijednosti. Tada maksimalna teoretska učinkovitost PEMFC iznosi:

$$\eta = \frac{\Delta G}{\Delta H_{LHV}} = \frac{228,74}{241,98} = 94,5\%$$

Zbog svog maksimalnog potencijala od 1,23 V, optimalno korištenje gorivih članaka je povezivanjem više gorivih članaka serijski kako bi se smanjila potrebna površina za smještaj gorivih članaka u pogonskom sustavu [3].

Glavni dio zrakoplovnog pogonskog sustava na vodik su PEM gorivi članci koji su prethodno objašnjeni. Za cjelokupan pogonski sustav potreban je: spremnik vodika, pretvarač istosmjerne struje u izmjeničnu struju, elektromotor koji pretvara električnu energiju u mehanički rad, baterija, regulator rada – inverter, radiator koji hladi sustav, diode koje sprječavaju povratni tok struje prema gorivim člancima i propeler/ventilator zrakoplova kojim se ostvaruje potisak zrakoplova. Gorivi članci u pogonskom sustavu za zrakoplove gotovo u svim prototipovima dolaze s litij – ionskom baterijom koja potpomaže generiranje snage u određenim fazama leta kada zahtjevi premaše kapacitete gorivih članaka. Navedeni elementi ovakvog tipa pogonskog sustava mogu se jasno vidjeti na slici 4, a kratka shema pogonskog sustava s primjenom gorivih članaka objašnjena je slikom 18.



*Slika 18 Shema PEMFC pogonskog sustava s baterijom*  
 Izvor: [20]

## 6 ZAKLJUČAK

Posljednjih nekoliko desetljeća uviđaju se devastacijske klimatske promjene što je potaknulo sve grane industrije na proces dekarbonizacije.

Zrakoplovna industrija svoj budući razvoj mogla bi temeljiti na vodik, pogonskom gorivom s nula karbonskih emisija. Održivost je jedino moguća proizvodnjom vodika na zeleni i plavi način, jer je cilj potpuno eliminirati karbonske emisije i značajno reducirati utjecaj popratnih emisija.

Potpuna implementacija vodika kao pogonskog goriva sa sobom nosi ogromne izazove kako u dizajnu zrakoplova, tako i u svojoj potrebnoj aerodromskoj i transportnoj infrastrukturi koju će biti nužno izgraditi na svim aerodromima diljem svijeta. S velikim planovima o implementaciji dolaze i veliki zahtjevi za potražnjom koji će morati biti ispunjeni u godinama koje dolaze. Također, bit će potrebno optimizirati cijeli proces proizvodnje i učiniti ga što je moguće više troškovno isplativijim. Nova aerodromska infrastruktura namijenjena vodik tražit će drugačije posebno dizajnirane aerodromske spremnike, cjevovode, vozila za transport, ali povrh svega potpuno nove propisane procedure rukovođenja vodikom kako bi se udovoljilo svim sigurnosnim aspektima.

Postoje dva načina primjene vodika u zrakoplovnim pogonskim sustavima. S obzirom na svoje karakteristike, pogonski sustav s unutarnjim izgaranjem s vodikom kao gorivom primjenu bi mogao pronaći kod zrakoplova segmenta srednjeg doleta i onih dugog doleta, dok se pretpostavlja da će PEM gorivi članci pogoniti zrakoplove nižih segmenata. Primjena kod pogonskih sustava s unutarnjim izgaranjem i onih s gorivim člancima tražit će novi tip i način spremnika goriva u zrakoplovu. Kratkoročan odgovor mogu pružiti evolucijski zrakoplovi, odnosno prenamjena postojećih zrakoplova, dok dugoročno najbolje rješenje bili bi revolucijski zrakoplovi potpuno namijenjeni i prilagođeni potrebama vodika kao pogonskog goriva.

Cjelokupni sustav zrakoplovstva na vodik istraživat će se i razvijati u nadolazećim godinama. Gotovo je sigurno da će zrakoplovi pogonjeni vodikom ući u službu do sredine ovog stoljeća. Proces tranzicije i zamjena flota neće se dogoditi preko noći, već će morati proći nekoliko godina, ako ne i desetljeća do potpune zamjene svih aktivnih komercijalnih zrakoplova.

## LITERATURA

- [1] NASA. *Ask an astrophysicist*. Preuzeto s: [https://imagine.gsfc.nasa.gov/ask\\_astro/stars.html#961112a](https://imagine.gsfc.nasa.gov/ask_astro/stars.html#961112a) [Pristupljeno: 13. kolovoz 2021.]
- [2] Aviation Benefits Beyond Borders. *Aviation's impact on the environment*. Preuzeto s: <https://aviationbenefits.org/environmental-efficiency/aviations-impact-on-the-environment/> [Pristupljeno: 13. kolovoz 2021.]
- [3] Barbir F. *PEM Fuel Cells - THEORY AND PRACTICE*. Split: ELSEVIER; 2012.
- [4] DiChristofer T. *Mitsubishi, Bakken Energy aim to develop blue hydrogen hub in North Dakota*. Preuzeto s: <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/latest-news-headlines/mitsubishi-bakken-energy-aim-to-develop-blue-hydrogen-hub-in-north-dakota-64829304> [Pristupljeno: 14. kolovoz 2021.]
- [5] Brewer D. *Hydrogen Aircraft Technology*. USA: CRC Press, 1990.
- [6] Guido C. *CISAP4 4th International Conference on Safety and Environment in the Process Industry: Hydrogen Production via Steam Reforming with CO2 Capture*. Milano; 2010. Preuzeto s: <https://www.aidic.it/CISAP4/webpapers/7Collodi.pdf> [Pristupljeno: 15. kolovoza 2021.]
- [7] Corneil HG, Heinzelmann FJ, Nicholson EWS. *Production Economics for Hydrogen, Ammonia, and Methanol during the 1980-2000 Period*. New Jersey: Linden; 1977. Preuzeto s: <https://www.osti.gov/servlets/purl/5231550/> [Pristupljeno: 19. kolovoza 2021.]
- [8] Energy Science and Engineering. *How green is blue hydrogen?*. Preuzeto s: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ese3.956> [Pristupljeno: 19. kolovoza 2021.]

- [9] The Conversation. *Blue hydrogen – what is it, and should it replace natural gas?*. Preuzeto s: <https://theconversation.com/blue-hydrogen-what-is-it-and-should-it-replace-natural-gas-166053> [Pristupljeno: 19. kolovoza 2021.]
- [10] TheAeroEngineer. *How Hydrogen-Powered Aircraft Work*. Preuzeto s: <https://www.theaeroengineer.com/post/hydrogen-powered-aircraft> [Pristupljeno: 23. kolovoza 2021.]
- [11] Boeing. *Boeing Successfully Flies Fuel Cell-Powered Airplane*. Preuzeto s: [https://web.archive.org/web/20080406204719if\\_/http://www.boeing.com:80/news/releases/2008/q2/080403a\\_nr.html](https://web.archive.org/web/20080406204719if_/http://www.boeing.com:80/news/releases/2008/q2/080403a_nr.html) [Pristupljeno: 23 kolovoza 2021.]
- [12] German Aerospace Center DLR - Deutsches Zentrum für Luft - und Raumfahrt. *Antares DLR-H2 - out of operation*. Preuzeto s: <https://www.dlr.de/content/en/articles/aeronautics/research-fleet-infrastructure/dlr-research-aircraft/antares-dlr-h2-out-of-operation.html> [Pristupljeno: 24. kolovoz 2021.]
- [13] Aerospace Technology. *HY4 Aircraft*. Preuzeto s: <https://www.aerospace-technology.com/projects/hy4-aircraft/>. [Pristupljeno: 24. kolovoz 2021.]
- [14] Soltani AS, Kandidayeni M, Boulon L, Lupien St-Pierre D. *Modular Energy Systems in Vehicular Applications*. Quebec: ELSEVIER; 2019. Preuzeto s: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610219313621> [Pristupljeno: 24. kolovoz 2021.]
- [15] FCH, EU, Clean Sky. *Hydrogen-powered aviation*. Preuzeto s: <https://www.fch.europa.eu/publications/hydrogen-powered-aviation> [Pristupljeno: 24. kolovoz 2021.]
- [16] USA Department of energy. *Current Status of Hydrogen Liquefaction Costs*. Preuzeto s: [https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/19001\\_hydrogen\\_liquefaction\\_costs.pdf](https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/19001_hydrogen_liquefaction_costs.pdf) [Pristupljeno: 30. kolovoz 2021.]

- [17] Universal Hydrogen. *Fueling Carbon-Free Flight*. Preuzeto s:  
<https://www.hydrogen.aero/about> [Pristupljeno 31. kolovoza 2021.]
- [18] Leeham News. *The challenges of Hydrogen - Tank placement*. Preuzeto s:  
<https://leehamnews.com/2020/08/28/bjorns-corner-the-challenges-of-hydrogen-part-6-tank-placement/> [Pristupljeno: 1. rujan 2021.]
- [19] Westenberger A. *LH2 as Alternative Fuel for Aeronautics - Study on Aircraft Concepts*. Hamburg: NATO; 2007. Preuzeto s: <file:///C:/Users/Ivan/Downloads/EN-AVT-150-14.pdf>  
[Pristupljeno: 1. rujan 2021.]
- [20] Thompson R, Weichenhain U, Sachdeva N, Kaufmann M. *Hydrogen / A future fuel for aviation?*. Munich: Roland Berger GMBH; 2020. Preuzeto s:  
<https://www.rolandberger.com/en/Insights/Publications/Hydrogen-A-future-fuel-for-aviation.html> [Pristupljeno 2. rujan 2021.]
- [21] Weiss S. *The use of hydrogen for aircraft propulsion in view of the fuel crisis*. Cleveland: NASA; 1973. Preuzeto s:  
<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19730016050/downloads/19730016050.pdf> [Pristupano 3. rujan 2021.]

## Popis slika

|  |    |
|--|----|
| Slika 1 Shematski prikaz načina proizvodnje vodika.....  | 4  |
| Slika 2 Martin B - 57 Canberra .....   | 12 |
| Slika 3 Bočni i tlocrtni prikaz Tupoleva Tu – 155 .....  | 14 |
| Slika 4 Dijelovi hibridnog pogonskog sustava zrakoplova Diamond HK36 Super Dimona .....                | 15 |
| Slika 5 Antares DLR-H2.....  | 17 |
| Slika 6 Modularni pogonski sustav zrakoplova HY4.....  | 19 |
| Slika 7 Procjene zrakoplovnih emisija $CO_2$ do 2050. ....   | 20 |
| Slika 8 $CO_2$ emisije po segmentu zrakoplova i doletu .....   | 21 |
| Slika 9 Procjena zrakoplovne industrije na vodik u 2050. godini.....                                   | 25 |
| Slika 10 Dodatni troškovi i reducirane emisije vodika u usporedbi s kerozinom.....                     | 26 |
| Slika 11 Zatvoreni modularni sustav aerodromske i transportne infrastrukture .....                     | 31 |
| Slika 12 Proces nadopune goriva hidrant vozilom.....   | 32 |
| Slika 13 Položaj spremnika vodika kod evolucijskog i revolucijskog zrakoplova .....                    | 33 |
| Slika 14 Usporedba veličine zrakoplova pogonjenog vodikom i s JET A .....                              | 34 |
| Slika 15 Shema pogonskog sustava s motorom na unutarnje izgaranje s vodikom kao pogonskim gorivom..... | 37 |
| Slika 16 Shema sustava za napajanje gorivom .....  | 38 |
| Slika 17 Shematski prikaz PEM gorivog članka .....   | 40 |
| Slika 18 Shema PEMFC pogonskog sustava s baterijom.....  | 44 |

## Popis tablica

|   |    |
|---|----|
| Tablica 1 Usporedba svojstava vodika s Jet A.....   | 22 |
| Tablica 2 Emisije zrakoplova na vodik u usporedbi sa zrakoplovima na kerozin .....                  | 27 |
| Tablica 3 Entalpije i entropije stvaranja reaktanata i produkata gorivih članaka; 25°C, 1 bar ..... | 41 |





Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti  
10000 Zagreb  
Vukelićeva 4

### IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj \_\_\_\_\_ završni rad

isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.

Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, niti je prepisan iz necitiranog rada, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem također, kako nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu \_\_\_\_\_ završnog rada

pod naslovom **Tehnologija primjene vodika kao pogonskog goriva u zrakoplovstvu**

na internetskim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

U Zagrebu, 06.09.2021 \_\_\_\_\_

Student/ica:

*Ivan Prošćinović*  
\_\_\_\_\_  
(potpis)