

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

**Lovro Šojić**

**ANALIZA PRIMJENE ALTERNATIVNIH  
IZVORA ENERGIJE U ZRAČNOM PROMETU**

**ZAVRŠNI RAD**

**Zagreb, 2019.**

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

Zagreb, 28. ožujka 2019.

Zavod: **Zavod za prometno planiranje**  
Predmet: **Ekologija u prometu**

## ZAVRŠNI ZADATAK br. 5135

Pristupnik: **Lovro Šojić (0135247256)**  
Studij: **Promet**  
Smjer: **Zračni promet**

Zadatak: **Analiza primjene alternativnih izvora energije u zračnom prometu**

### Opis zadatka:

U radu je potrebno prikazati utrošak energije u zračnom prometu i navesti kriterije za potencijalnu uporabu alternativnih izvora energije. Navesti zakonsku regulativu glede emisija štetnih i stakleničkih plinova. Analizirati ekološke prednosti i nedostatke održivih biogoriva i objasniti mogućnosti njihove primjene u komercijalnom zrakoplovstvu. Analizirati ostale alternativne izvore kao tekući vodik, solarni pogon, prirodni plin i prikazati komparativnu analizu istih.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:



prof. dr. sc. Jasna Golubić

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti

ZAVRŠNI RAD

**ANALIZA PRIMJENE ALTERNATIVNIH IZVORA  
ENERGIJE U ZRAČNOM PROMETU**

**ANALYSIS OF USING ALTERNATIVE ENERGY SOURCES  
IN AIR TRAFFIC**

Mentor: prof. dr. sc. Jasna Golubić

Student: Lovro Šojić, 0135247256

Zagreb, kolovoz 2019.

# ANALIZA PRIMJENE ALTERNATIVNIH IZVORA ENERGIJE U ZRAČNOM PROMETU

## SAŽETAK

U zračnom se prometu danas velikom većinom koriste fosilna goriva za pokretanje zrakoplova kao što je na primjer kerozin. Korištenje fosilnog goriva rezultira u golemim emisijama stakleničkih i otrovnih plinova u atmosferu za vrijeme leta zrakoplova. To posebice utječe na povećanje Zemljine temperature koje prouzrokuje globalno zatopljenje. Zbog tog problema počinju se detaljno proučavati različiti alternativni izvori energije u zračnom prometu koji bi ispušne plinove sveli na minimum. To uključuje različite mješavine biogoriva s kerozinom, ali i nove, inovativne tehnologije kao što su tekući dušik, električna, solarna i nuklearna energija. Implementacija biogoriva je već započela kod nekih zrakoplovnih prijevoznika tako da je njena budućnost svijetla. Također se provode brojna istraživanja vezana za električni pogon zrakoplova koji bi mogao svesti emisije plinova na nulu.

**KLJUČNE RIJEČI:** alternativni izvori energije; emisije u zračnom prometu; biogoriva; električna energija; tekući vodik

## SUMMARY

In air traffic today, fossil fuels are mostly used to fly planes, for example kerosene. The use of fossil fuels results in enormous emissions of greenhouse and toxic gases into the atmosphere during flight. This affects the increase in Earth's temperature, which causes global warming. Due to this problem, various alternative sources of energy in air traffic are being detailly researched, which would minimize the emissions of gases. These include various blends of kerosene biofuels, but also new and innovative technologies such as liquid nitrogen, electric, solar and nuclear energy. The implementation of biofuels was already made by some airlines, so the future is bright. Numerous studies have also been carried out regarding the electric propulsion of aircraft that could result in zero emissions.

**KEYWORDS:** alternative energy sources; aircraft emissions; biofuels; electric propulsion; liquid hydrogen

# Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Utjecaj zračnog prometa na okoliš .....	2
2.1. Utjecaj zračnog prometa na kvalitetu zraka .....	3
2.1.1. Emisije štetnih tvari na aerodromu .....	4
2.1.2. Regulacije i ograničenja emisija na aerodromu .....	5
2.2. Utjecaj zračnog prometa na klimatske promjene.....	8
2.2.1. Kondenzacijski tragovi (contrails) .....	9
2.2.2. Ledeni cirrus oblaci .....	11
2.3. Utrošak energije u zračnom prometu i prognoze rasta .....	12
3. Tehnološka i operativna rješenja smanjenja utjecaja zračnog prometa na lokalnu kvalitetu zraka i klimatske promjene .....	15
3.1. Tehnološka rješenja .....	15
3.2. Operativna rješenja .....	16
4. Alternativna goriva .....	18
4.1. Kriteriji za primjenu alternativnih goriva.....	18
4.2. Prednosti i nedostaci primjene alternativnih izvora energije u zračnom prometu.....	20
5. Održiva zrakoplovna biogoriva (SAF) .....	23
5.1. Certifikacija održivih zrakoplovnih goriva .....	24
5.2. Produkcija održivih zrakoplovnih biogoriva.....	25
5.3. Korištenje biogoriva u komercijalnom zračnom prometu .....	28
6. Mogućnost primjene tekućeg vodika, solarnog, nuklearnog goriva i električne energije ...	31
6.1. Tekući vodik .....	31
6.2. Električna energija.....	35
6.3. Solarna energija .....	38
6.4. Nuklearna energija .....	40
7. Zaključak.....	42
Literatura .....	43
Popis slika.....	45

# 1. Uvod

Zračni promet se danas masivno oslanja na fosilna goriva, kao što je kerozin koji ima negativan utjecaj na okoliš vezan za emisije stakleničkih i otrovnih plinova koji povećavaju prosječnu temperaturu Zemljine atmosfere, odnosno negativno utječu na zdravlje čovjeka. U zadnjih nekoliko godina, zračni promet se za razliku od ostalih prometnih grana kao što su cestovni i željeznički promet, nalazi u tranzicijskoj fazi prebačaja na obnovljive izvore energije. Zbog toga su pokrenuta brojna istraživanja koja za cilj imaju pronalazak najboljeg alternativnog izvora energije. Problemi se javljaju u potrebi za gorivom koje ima visok energetska sadržaj kako bi zrakoplovi mogli savladati velike sile koje se javljaju prilikom leta, u visokim sigurnosnim standardima vezanim za avijaciju, ali i velikim ekonomskim preprekama.

Rješenja i problemi vezani za alternativne izvore energije, ali i dosadašnji utjecaj fosilnih goriva u zračnom prometu tema su ovog završnog rada. Naslov završnog rada jest: Analiza primjene alternativnih izvora energije u zračnom prometu. Rad je podijeljen u sedam cjelina:

1. Uvod
2. Utjecaj zračnog prometa na okoliš
3. Tehnološka i operativna rješenja smanjenja utjecaja zračnog prometa na lokalnu kvalitetu zraka i klimatske promjene
4. Alternativna goriva
5. Održiva zrakoplovna biogoriva (SAF)
6. Mogućnost primjene tekućeg vodika, solarnog, nuklearnog goriva i električne energije
7. Zaključak.

U drugom poglavlju opisan je dosadašnji utjecaj emisija zračnog prometa na kvalitetu zraka i klimatske promjene te utrošak energije i prognoze njegovog rasta.

Treće poglavlje obuhvaća načine smanjenja emisija nevezanim s uporabom alternativnih izvora energije kao što su tehnološka rješenja koja se temelje na usavršavaju zrakoplovnih motora, poboljšanju aerodinamike i strukture zrakoplova, ali i operativna rješenja koja se sastoje od niza strategijskih postupaka u obavljanju operacija s najvećom mogućom efikasnošću.

U četvrtom poglavlju opisan je način smanjenja emisija uporabom alternativnih goriva, kao i kriteriji za njihovu primjenu. Na kraju poglavlja iznošene su prednosti i nedostaci njihove uporabe u usporedbi s tradicionalnim, fosilnim gorivima.

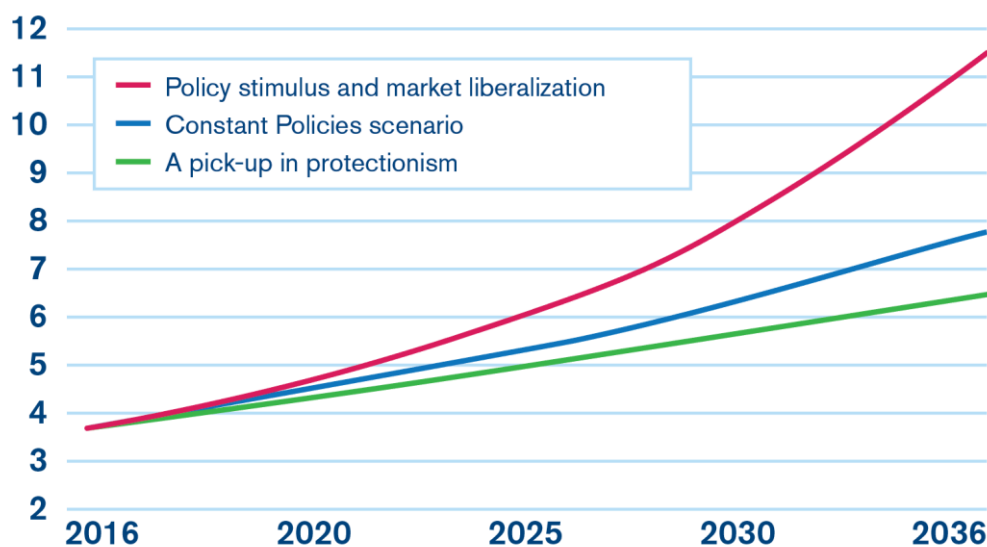
Šesto poglavlje opisuje certifikaciju, produkciju i korištenje održivih zrakoplovnih biogoriva (SAF) koja se u određenim omjerima sa zrakoplovnim gorivom mogu koristiti bez modifikacija na motoru zrakoplova, dok se u sedmom poglavlju iznose mogućnosti primjene tekućeg vodika te solarne, nuklearne i električne energije.

## 2. Utjecaj zračnog prometa na okoliš

Postoji nekoliko načina kojima zračni promet negativno utječe na okoliš. Najutjecajniji među njima su buka i emisije stakleničkih i otrovnih plinova te čestica. Zračni promet također može negativno utjecati na tlo i vodu u području zračne luke te prouzrokovati onečišćenja otpadom.

Svjetskim povećanjem broja letova, raste i količina plinova koje emitiraju zrakoplovi prilikom uzlijetanja, slijetanja, krstarenja te ostalih zemaljskih operacija. Zračni promet je od 2014. godine do danas u konstantnom rastu. Broj putnika 2017. se u odnosu na 2005. povećao za 50%, no povećao se i koeficijent popunjenosti sa 70.2% na 80.3% što je smanjilo potrošnju goriva po putničkom kilometru [1]. 2018. godine je prevezeno 4.3 milijarde putnika od strane aviokompanija, što je rast od 6.1% u usporedbi s 2017., kada je prevezeno 4.1 milijardi putnika [2]. Na slici 1. prikazan je dosadašnji rast putnika, ali i prognoze za budući rast ovisno o kretanju politike tržišta zračnog prometa.

### Global Passengers (billion, segment basis)



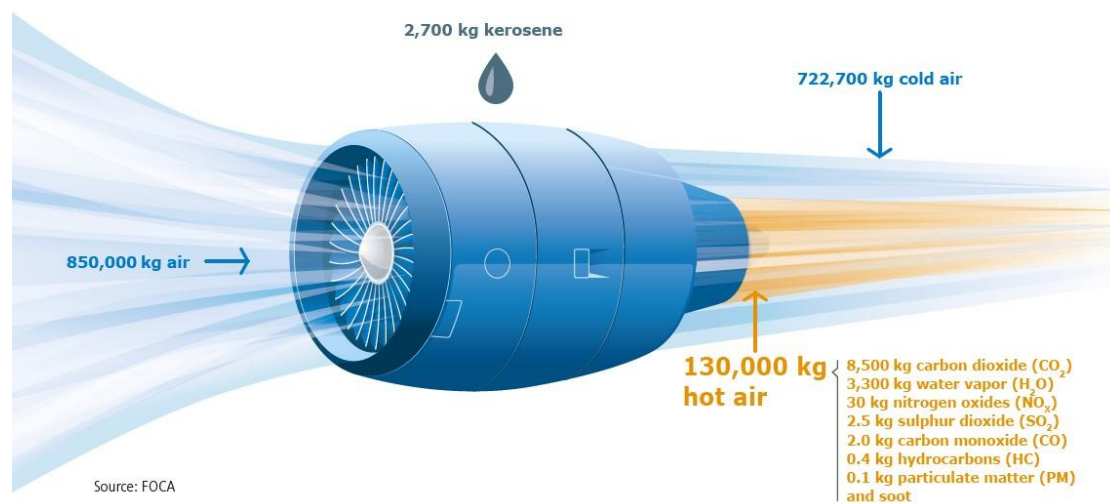
**Slika 1.** Prognozirani rast broja putnika do 2036. godine (ovisno o politici tržišta) u milijardama

Izvor: <https://www.iata.org/pressroom/pr/Pages/2017-10-24-01.aspx>

S druge strane, sveukupni teretni promet (uključujući isključivo teretne te putničke zrakoplove s teretom na donjoj palubi) obilježio je rast od 55% između 2005. i 2017. godine s time da je promet isključivo teretnim zrakoplovima obilježio pad od 2%. Nadalje, mali teretni zrakoplovi s maksimalnom masom polijetanja od 50 tona su drastično smanjili broj polazaka, prebacivši teret na veće zrakoplove [2].

Naglom povećanju broja letova uvelike su pridonijeli i niskotarifni zračni prijevoznici (Low Cost Carriers – LCC), koji su smanjenjem cijena i povećanjem cijele umreženosti svjetskih zračnih luka povećali potražnju za letenjem što je dalje utjecalo na proizvodnju emisija.

Glavni zagađivači u zračnom prometu su ugljični dioksid ( $\text{CO}_2$ ), dušikovi oksidi ( $\text{NO}_x$ ), sumporovi oksidi ( $\text{SO}_x$ ), djelomično izgorjeni ugljikovodici (HC), ugljični monoksid (CO), čestice (PM) i čađa. Na slici 2. je prikazano koliko prosječni dvomotorni mlazni zrakoplov koji preveze 150 putnika proizvede emisija po jednosatnom letu [3].



**Slika 2.** Količina emisija prosječnog dvomotornog mlaznog zrakoplova sa 150 putnika po jednosatnom letu

Izvor: <https://www.easa.europa.eu/eaer/topics/overview-aviation-sector/emissions>

2% cjelokupnih emisija  $\text{CO}_2$  u svijetu, proizvedenih od strane čovjeka, opada na zračni promet, što je 859 milijuna tona godišnje. U prometnom sektoru za 12% emisija  $\text{CO}_2$  zaslužan je zračni promet, u usporedbi s cestovnim prometom koji ima udio od 74%. Najzaslužniji za emisiju  $\text{CO}_2$  (80%) su letovi preko 1 500 kilometara, gdje je prijevoz zrakoplovom jedina opcija [4].

## 2.1. Utjecaj zračnog prometa na kvalitetu zraka

Operacije koje doprinose zagađenju zraka mogu se klasificirati na one proizvedene na aerodromu i na one prilikom leta zrakoplova. Zagađenje zraka na zemlji, točnije aerodromu, je rezultat taksiranja zrakoplova po voznim površinama, kretanja servisnih vozila po servisnim cestama i stajanci te prilazom cestovnih vozila aerodromu.



### 2.1.1. Emisije štetnih tvari na aerodromu

Štetne tvari koji se javljaju prilikom zemaljskih operacija na aerodromu su: policiklički aromatski ugljikovodici (engl. polycyclic aromatic hydrocarbons – PAH), hlapljivi organski spojevi (engl. volatile organic compounds – VOC), anorganski plinovi ( $\text{SO}_2$  i  $\text{NO}_x$ ) i čestice (PM).

Policiklički aromatski ugljikovodici su organski spojevi koji se sastoje od aromatskih prstena. Nekolicina PAH-a je mutageno i/ili karcinogeno. Benzo [a] piren je posebno opasan jer je u malim količinama karcinogen te se često koristi prilikom detekcije PAH-a u zraku. Benzo [a] piren se veže za čestice i ispušne plinove, nastajući nepotpunim izgaranjem u zrakoplovnim i dizel motorima.

Hlapljivi organski spojevi se najčešće javljaju u plinovitom stanju te mogu biti karcinogeni (benzen) ili uzrokovati iritaciju dišnih puteva i očiju (aldehidi). Oni se javljaju isparavanjem prilikom punjenja zrakoplova gorivom i neuspjelim ili djelomičnim izgaranjem u ispuhu vežući se za čestice (PM) [5].

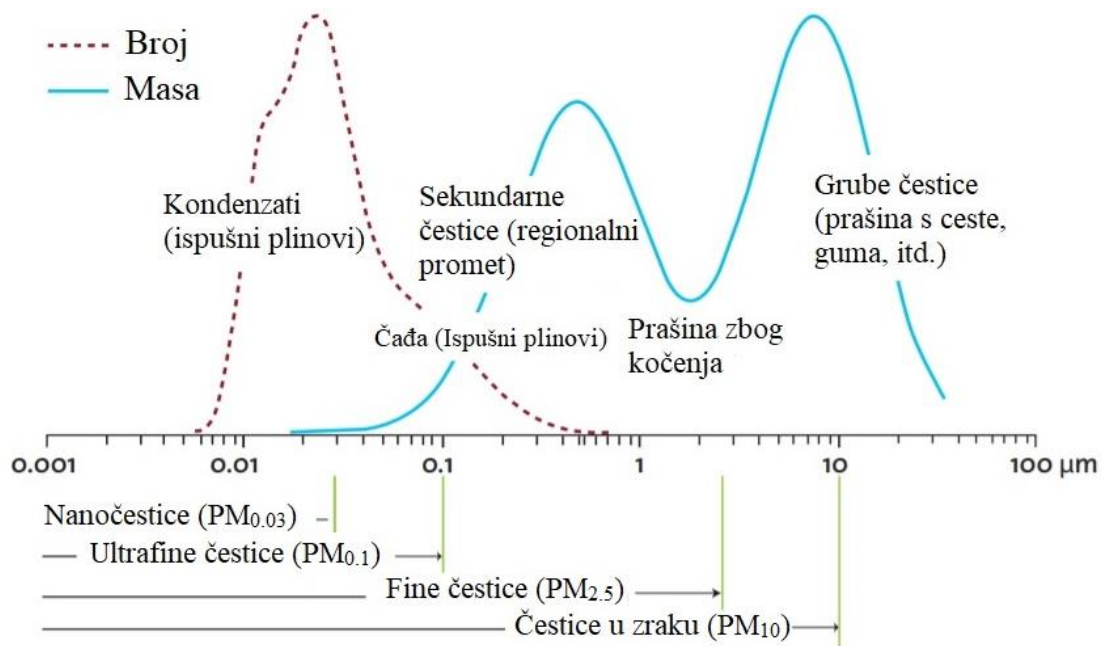
Jedan od utjecajnijih produkata motora zrakoplova i servisnih vozila su dušikovi oksidi ( $\text{NO}_x$ ). U to spadaju dušikov oksid (NO), koji je bezopasan u manjim količinama i dušikov dioksid ( $\text{NO}_2$ ) koji je otrovan za čovjeka te stvara smog. Glavna posljedica udisanja zraka s većom količinom dušikovog dioksida je razvitak respiratornih bolesti. On nepovoljno utječe na sluznicu pluća te smanjuje njen imunitet od infekcije. Posebno je opasan kod ljudi dijagnosticiranih s astmom (pogotovo djece) jer povećava intenzitet i vjerojatnost napadaja [6].

Sumporov dioksid ( $\text{SO}_2$ ) je štetan plin koji iritira dišne puteve i oči. Avionsko gorivo u sebi sadrži velike koncentracije sumpora (oko 1 000 ppm<sup>1</sup>) [5], što je sto puta više od dizelskog motora koji sadrži 10 ppm sumpora. U zrakoplovnim motorima sumpor se oksidira, formirajući sumporov dioksid koji zatim izlazi iz motora.

Najutjecajnije emisije na aerodromu koje stvaraju veliku opasnost za zdravlje, a najviše kod transportnih radnika su čestice (Particle Matters – PM). Te se čestice mogu podijeliti na: nanočestice ( $\text{PM}_{0.03}$ ), ultrafine ( $\text{PM}_{0.1}$ ), fine ( $\text{PM}_{2.5}$ ) i čestice u zraku ( $\text{PM}_{10}$ ). U njihovim imenima brojčani iznos pokazuje veličinu njihovog promjera u mikrometrima. Na slici 3. su prikazani broj i masa čestica u zraku na stajanci aerodroma, gdje se broj koristi za označavanje nano i ultrafina čestica zato što je njihova masa zanemariva u odnosu na zrak.

---

<sup>1</sup> Ppm- dijelova po milijun (engl. Parts per million) je mjerna jedinica koja označava nenormirani znak na milijuntinku ( $1\text{ppm} = 1/1\,000\,000 = 10^{-6}$ )



**Slika 3.** Broj i masa čestica u zraku na stajanci

Izvor: [5]

Posebno su opasne ultrafine čestice zato što imaju veću površinu za apsorpciju toksičnih spojeva kao što su policiklički aromatski ugljikovodici i hlapljivi organski spojevi (PAH i VOC). Njih također karakterizira visoka brzina taloženja na najosjetljivijim i najkritičnijim dijelovima dišnog sustava – alveolama. Preko alveola otrovni spojevi mogu lakše ući u krvotok i tako se rasporediti po cijelom tijelu. U novijim znanstvenim istraživanjima je otkriveno i da nanočestice preko sluznice nosa mogu lako dospjeti do mozga. Opasnost ultrafinih čestica opažena je u zadnjih nekoliko godina. U prošlosti je fokus bio koncentriran na veće i fine čestice zbog lakoće mjerenja, no razvitkom tehnologije je otkriveno da ultrafine čestice imaju veći utjecaj na zdravlje čovjeka [5].

Bez obzira na opasnost ultrafinih čestica, fine čestice koje emitira zrakoplov oznake  $PM_{2.5}$  također stvaraju velike probleme kod čovjeka.  $PM_{2.5}$  su malene čestice promjera manjeg od 2.5 mikrometara koje zbog svoje veličine dugo ostaju u zraku i lako mogu proći kroz nos i grlo te doći duboko u pluća, gdje stvaraju ozbiljne zdravstvene probleme vezane za krvotok i dišne puteve. Prema znanstvenim studijama  $PM_{2.5}$  čestice povećavaju rizik za ranu smrt vezanu uz srčane i plućne bolesti. One također potiču i pogoršavaju kronične bolesti poput srčanog udara, astme, bronhitisa te ostalih respiratornih bolesti [7].

### 2.1.2. Regulacije i ograničenja emisija na aerodromu

Emisije štetnih tvari na prostoru aerodroma najutjecajnije su na zdravlje radnika (najviše na zračnoj strani), a ne toliko na putnike. Razlog tomu je to što putnici samo određeno vrijeme provode na aerodromu, od čega većina vremena opada na čekanje u putničkom terminalu gdje je utjecaj emisija minimalan ili nepostojeći. Većina putnika danas niti ne izlazi na stajanku, tamo gdje su emisije zrakoplova i servisnih vozila najutjecajnije, nego ulaze direktno u

zrakoplov pomoću aviomostova. Radnici s druge strane provode većinu svog radnog vremena izloženi toksičnim i opasnim produktima zrakoplovnih i dizel motora što stvara veliki problem za njihovo zdravlje.

Izlaganje radnika zagađenom zraku u Europskoj Uniji je reguliran posebnim Zakonom o zaštiti na radu (engl. Health and Safety at Work Act), koji ciljano ne štiti radnike od opasnih emisija, nego je kompromis s tehničkog, ekonomskog i zdravstvenog gledišta. Limit štetnih produkata na javnim mjestima se uvelike razlikuje od onog na radnim mjestima zato što je dnevni vremenski period radnika na radnom mjestu manji nego gledajući 24-satni dan koji se uzima u obzir prilikom limitiranja emisija na javnim mjestima. Zakon o zaštiti na radu također ne štiti senzitivne osobe koje se uzimaju u obzir na javnim površinama.

Prosječni transportni radnik na zračnoj strani udahne od 25 do 50 puta više ultrafinih čestica nego prosječan zaposlenik u uredu [5]. Jedno od rješenja za smanjenje štetnog utjecaja na radnike je smanjenje vremena provedenog na zračnoj strani aerodroma. Radnicima se može odrediti maksimalan broj sati tjedno na poslovima koji se nalaze na mjestima zračne luke s najvećom koncentracijom ispušnih plinova, ovisno o količini emisija pojedine zračne luke. Radnike se također može zaštititi uporabom respiratora ili gas maski. Problem kod korištenja respiratora i gas maski je u povećanoj vjerojatnosti ozljede na radu. Razlog tomu su smanjenje vidljivosti prilikom korištenja, neučinkovit, nesiguran i nekvalitetan rad. To rješenje također ne rješava problem emitiranja ispušnih plinova u atmosferu.

Nadalje, oznake za polijetanje mogu biti pomaknute na udaljenija mjesta koja ograničavaju izlaganje zaposlenika ispušnim plinovima zrakoplova. Također je važno da pomicanjem oznaka za polijetanje ne poveća vrijeme s uključenim motorima i pomoćnim uređajem za napajanje električnom energijom (engl. auxiliary power unit – APU). Korištenjem zemaljskog uređaja za napajanje električnom energijom (engl. Ground power unit – GPU) ili povećanjem vremena kada APU nije uključen, izloženost zaposlenika može se smanjiti.

Najbolji način na koji se mogu smanjiti emisije štetnih plinova na aerodromu je implementacija nove opreme za prihvat i otpremu zrakoplova kao što su traktori za vuču zrakoplova, vozila za prijevoz prtljage, tereta i pošte, mobilne tekuće trake, transporter, itd. Staru i dizelsku opremu trebalo bi zamijeniti novom koja koristi obnovljive izvore energije za pokretanje kao što su električna energija, biogoriva ili plin.



**Slika 4.** Vozilo za prijevoz prtljage na električnu energiju na zračnoj luci Seattle-Tacoma

Izvor: [https://afdc.energy.gov/files/u/publication/egse\\_airports.pdf](https://afdc.energy.gov/files/u/publication/egse_airports.pdf)

Oprema za prihvat i otpremu zrakoplova na eklektični pogon (prikazana na slikama 4. i 5.) također ekonomski pozitivno djeluje na zračnu luku ili prijevoznika jer ne ovisi o cijenama goriva, koja su i viša nego za električnu energiju. Oprema mnogo dobiva na korištenju električne energije zato što ne zahtijeva veliku brzinu, snagu i udaljenost. Prednost je i u punjenju električne opreme jer se utičnice za punjenje mogu jednostavno i sigurno postaviti na više mjesta na aerodromu za razliku od spremnika za gorivo.

Vozila koja najviše koriste od korištenja električne energije su autobusi za prijevoz putnika, traktori za izguravanje, mobilne tekuće trake, utovarivači, traktori za prijevoz prtljage, cisterne za opskrbu zrakoplova pitkom vodom i uređaj za fekalije koja su danas već rasprostranjena diljem zračnih luka u svijetu [8].



**Slika 5.** Vozilo za vuču zrakoplova koje koristi United Airlines pokretano na električnu energiju

[https://afdc.energy.gov/files/u/publication/egse\\_airports.pdf](https://afdc.energy.gov/files/u/publication/egse_airports.pdf)

Operativno rješenje vezano za smanjenje utjecaja ispušnih plinova su korištenje jednog motora prilikom vožnje zrakoplova po voznim stazama i stajanci (engl. Single-engine taxi).

Single-engine taxi koriste zrakoplovi s dva motora, a moguć je i za četvero motorne zrakoplove koji koriste dva motora prilikom taksiranja. Nakon slijetanja i izlaska s uzletne staze zrakoplov gasi jedan od motora kako bi smanjio potrošnju goriva prilikom taksiranja. Primjenom ovog načina kretanja zrakoplova na zemlji emisije ugljika se mogu smanjiti za 20 do 40 posto te dušikovih oksida od 10 do 30 posto [9]. Ovu proceduru je prva uvela španjolska zračna kompanija Iberia, a koristi ju i Air Qatar.

Korištenjem jednog motora javljaju se i razne komplikacije što se tiče sigurnosti. Kada se koristi samo jedan motor za zemaljsku vožnju zrakoplova zahtjeva veći potisak kako bi se pokrenuo zrakoplov što ga može izbaciti iz ravnoteže, zato Air Qatar ne koristi tu proceduru u vrijeme kada na aerodromu vlada smanjena vidljivost [9].

## **2.2. Utjecaj zračnog prometa na klimatske promjene**

2% svih emisija CO<sub>2</sub> u svijetu odnosi se na zračni prijevoz. Zajedno s kontinuiranim rastom zračnog prometa nastaje problem povećanja emisija stakleničkih plinova koji nastaju sagorijevanjem goriva i utječu na globalno zatopljenje, stvarajući efekt staklenika. Ugljični dioksid (CO<sub>2</sub>), vodena para (H<sub>2</sub>O), dušikovi oksidi (NO<sub>x</sub>) i čestice stvaraju omotač oko Zemlje, ne dozvoljavajući da Sunčeva energija koja ulazi atmosferu izađe u svemir, nego ostaje u njoj povećavajući temperaturu Zemljine površine. Pojedine molekule ispušnih plinova apsorbiraju infracrveno zračenje Sunca te zaustavljaju njegovo emitiranje u svemir [10].

Zračni promet se razlikuje od ostalih izvora štetnih i stakleničkih plinova kao što su: industrija, proizvodnja i cestovni promet, u tome što se većina emisija proizvodi na većim visinama. To su visine od 8 do 12 kilometara na kojima krstare zrakoplovi. Na tim visinama emisije imaju povećanu kemijsku učinkovitost i raspršenje čestica, utjecaji koji su relevantni za klimatske promjene (npr. stvaranje oblaka i proizvodnja ozona). 1999. godine Međuvladin panel o klimatskim promjenama (engl. Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) objavio je značajan izvještaj "Zrakoplovstvo i globalna atmosfera", koji je predstavio prvu sveobuhvatnu procjenu utjecaja zrakoplovstva na klimu koristeći klimatsku definiciju snage zračenja (engl. radiative forcing – RF).

Snaga zračenja (RF) mjeri je energetskeg poremećaja u Zemljinj atmosferi koji je posljedica promjena u količine plinova i čestica u atmosferi te drugih učinaka i mjeri se u Wattima po kvadratnom metru ( $W/m^2$ ) na vrhu atmosfere. RF komponente iz zrakoplovstva proizlaze iz sljedećih procesa:

- emisija  $CO_2$ , (pozitivan RF)
- emisija  $NO_x$  (pozitivan RF i izraz je koji proizlazi iz zbroja triju komponenti: proizvodnja troposferskog ozona (pozitivni RF), dugoročno smanjenje ambijentalnog metana ( $CH_4$ ) (negativan RF) i daljnje dugoročno malo smanjenje ozona (negativan RF)
- emisije  $H_2O$  (pozitivan RF)
- formiranje dugoročnih linearnih kondenzacijskih tragova (pozitivan RF)
- oblačnost uzrokovana od strane zrakoplova (potencijalno pozitivan RF)
- emisija sulfatnih čestica (negativan RF)
- emisija čestica i čađe (pozitivan RF) [11].

Ovi efekti emisije i formacije oblaka mijenjaju kemijska i mikrofizička svojstva gornje atmosfere, što rezultira promjenama snage zračenja te klimatskih promjena na Zemlji koji šteti cjelokupnom ekosustavu. U izvješću IPCC-a (1999.) zaključeno je da zrakoplovstvo predstavlja malu, ali potencijalno značajnu i sve veću silu u uzrokovanju klimatskih promjena ponajprije zbog svog konstantnog i velikog rasta [11].

### **2.2.1. Kondenzacijski tragovi (contrails)**

Jedan od utjecaja na klimatske promjene su emisije vodene pare ( $H_2O$ ) i čestica (PM) kojima se stvaraju kondenzacijski tragovi takozvani contrails (engl.). Kondenzacijski tragovi zrakoplova su zapravo vrsta ledenih oblaka koji nastaju nakon što se vodena para kondenzira oko čestica. Čestice predaju vodenoj pari potrebnu energiju kako bi se smrznula i pretvorila u ledene oblake. Vodena para se već nalazi u zraku oko zrakoplova, dok se čestice, točnije čađa, stvaraju prilikom procesa sagorijevanja. Kondenzacijski se tragovi također mogu stvoriti spajanjem vodene pare iz zrakoplova i vodene pare iz okolnog zraka. Postoje tri tipa kondenzacijskih tragova: kratkoročni i dugoročni i tragovi s vrha krila.

Kratkoročni kondenzacijski tragovi u zraku ostaju kratko (slika 6.) Njihov životni vijek je svega nekoliko minuta nakon prolaska zrakoplova te se pojavljuju kao kratke, bijele linije iza produžene osi zrakoplova u letu. Kratkoročni tragovi brzo nakon stvaranja sublimiraju natrag u plinovito stanje. To se događa zbog suhoće zraka koja ne dopušta da se velika količina vodene pare pretvori u kondenzacijski trag.



**Slika 6.** Kratkoročni kondenzacijski trag

Izvor: [https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/contrails\\_k-12.pdf](https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/contrails_k-12.pdf)

Druga vrsta kondenzacijskih tragova su dugoročni tragovi (slika 7.). Dugoročni tragovi nastaju kada je zrak oko zrakoplova vlažan, a emisija vodene pare i čestica velika. Ova vrsta tragova ostaje u zraku do sat vremena zato što dodatna vlažnost zraka otežava sublimaciju leda. Dugoročni se tragovi zbog vjetera u gornjem dijelu atmosfere mogu pomaknuti nekoliko kilometara. Dugoročni se tragovi formiraju jednako kao kratkoročni, a njihovo rasprostiranje nastaje uslijed nestabilnosti ili turbulencije zračne mase. Ta turbulencija raspršuje guste tragove te ih širi na veliko područje, zbog čega više nalikuju oblacima.



**Slika 7.** Dugoročni kondenzacijski trag

Izvor: <https://science-edu.larc.nasa.gov/contrail-edu/contrails-persistent.html>

Kondenzacijski tragovi vrha krila stvaraju se na drugačiji način od ostalih tragova, ali ih se također svrstava u contrailse. Prilikom polijetanja i slijetanja, uz prisutne specifične

vremenske uvjete na krajevima vrhova krila može se stvoriti trag vodene pare. Taj se fenomen javlja zbog pada temperature i tlaka prilikom stvaranja sile uzgona na krilima zrakoplova [12].

Problem koji stvaraju kondenzacijski tragovi je efekt zagrijavanja. Infracrveno zračenje koje emitira sunce ulazi u atmosferu i zbog kondenzacijskih tragova koji blokiraju ne može izaći natrag u svemir. Zbog te refleksije infracrvenih valova dolazi do povišenja srednje temperature zemljine atmosfere što utječe na globalno zatopljenje. Oko 10-20% svih letova turbomlaznih zrakoplova, zbog atmosferskih uvjeta može prouzročiti pojavu kondenzacijskih tragova. 1992. godine procijenjeno je da cirrus oblaci pokrivaju oko 0,1% Zemljine površine godišnje, ali s većim regionalnim vrijednostima. Prema Međuvladinom panelu o klimatskim promjenama očekuje se da će pokrivenost narasti do 0,5% do 2050. prema najvjerojatnijem scenariju [13].

Kondenzacijski tragovi su kratkog vijeka i imaju učinak ukupnog zagrijavanja koji je sličan tankim, visokim oblacima. Učinci zagrijavanja od strane tragova različiti su tijekom dana i tijekom noći. Tijekom dana oni zadržavaju infracrveno, a reflektiraju sunčevo zračenje što pridonosi učinku zagrijavanja, odnosno učinku hlađenja zemljine atmosfere. Noću je samo infracrveno zračenje je zadržano što u konačnici zagrijava atmosferu. Učinak zagrijavanja je stoga jači noću. Budući da su tragovi kratkog vijeka, ako su formirani u područjima visoke gustoće zračnog prometa mogu uzrokovati lokalne ili regionalne klimatske promjene [13].

### **2.2.2. Ledeni cirrus oblaci**

Cirrus oblaci (prikazani na slici 8.) su prirodni oblaci u gornjoj atmosferi koji tvore od 20 do 30% globalne površine [11] i imaju velik utjecaj na zemljinu klimu i njeno zračenje, no oni ne moraju biti samo prirodni. Povećanjem zračnog prometa, povećava se i stvaranje dugoročnih kondenzacijskih tragova, koji se razvijaju i šire atmosferom pod utjecajem vjetra. Ti rasprostranjeni tragovi zajedno akumulirani stvaraju ledene cirrus oblake koje je nemoguće razlikovati od prirodnih. To je prvi način kako se može povećati količina cirrus oblaka u atmosferi. Drugi način je akumulacija čestica koje emitiraju zrakoplovi na visini krstarenja u atmosferi. Oni sadrže crni ugljik, sulfate i druge organske spojeve koji mogu djelovati kao jezgre kondenzacije oblaka. Takva oblačnost je takozvano zrakoplovno izazvana oblačnost (engl. aviation-induced cloudiness - AIC). Prema atmosferskim modelima crne čestice ugljika iz zrakoplova mogu povećati ili smanjiti gustoću broja ledenih kristala u cirrusu. To ovisi o pretpostavkama ponašanja jezgre leda atmosferskog aerosola u uvjetima cirrusa. Promjena količine ili jezgre gornjeg troposferskog leda može dovesti do promjena svojstava cirrus oblaka uključujući njihovu učestalost formiranja i optička svojstva, što zauzvrat mijenja RF doprinos naoblake u gornjoj atmosferi [11].





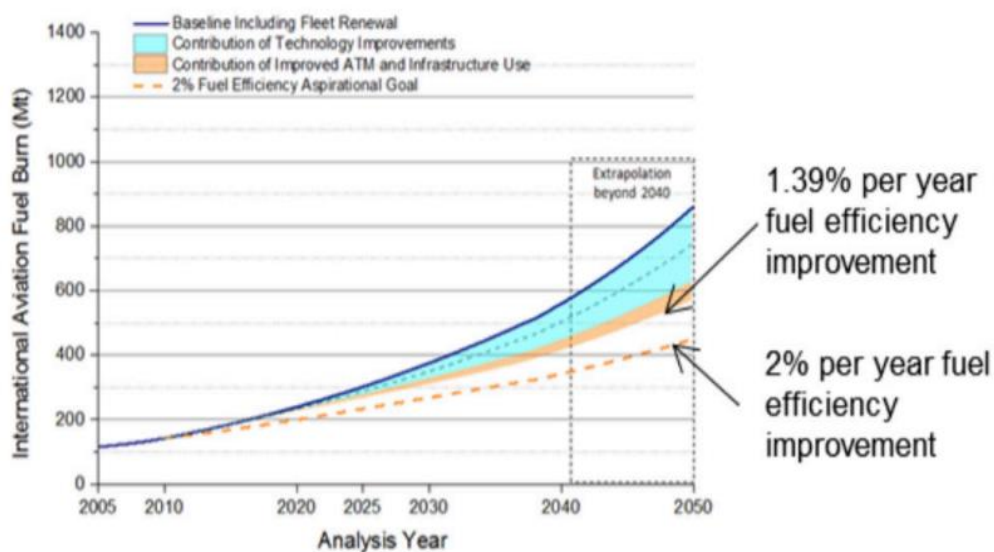
**Slika 8.** Cirrus oblaci

Izvor: <https://scool.larc.nasa.gov/GLOBE/cirrus.html>

### **2.3. Utrošak energije u zračnom prometu i prognoze rasta**

Od 2000. godine potražnja za zračnim prijevozom se udvostručila, te se očekuje da će u budućnosti ona konstantno rasti. 2018. godine putnički promet zabilježio je 8.2 bilijuna prihodnih putničkih kilometara, što je povećanje za 6.1% u odnosu na 2017. Ukupan je broj putnika narastao na rekordnih 4.3 milijarde, što je povećanje od 7.9% u odnosu na godinu prije, to jest 2017 [14].

Povećanje godišnjeg broja putnika izravno utječe na količinu potrošenog goriva u zračnome prometu, no to nije jedini faktor koji u tome sudjeluje. Na kratkoročne promjene u globalnoj efikasnosti potrošnje goriva može značajno utjecati čitav niz čimbenika kao što su fluktuacije cijena goriva i globalni ekonomski uvjeti. Na slici 9. se može vidjeti dosadašnja potrošnja goriva od strane međunarodnog zrakoplovstva, te projekcije do 2040. te ekstrapolirane do 2050. godine. U analizi je korišten doprinos u okviru tehnološkog napretka zrakoplovstva, poboljšano upravljanje zračnim prometom i korištenje infrastrukture koja potiče smanjenje potrošnje fosilnih goriva. Također je uzeto u obzir postizanje cilja od ICAO-a koji se odnosi na poboljšanje godišnje učinkovitosti goriva za 2%.



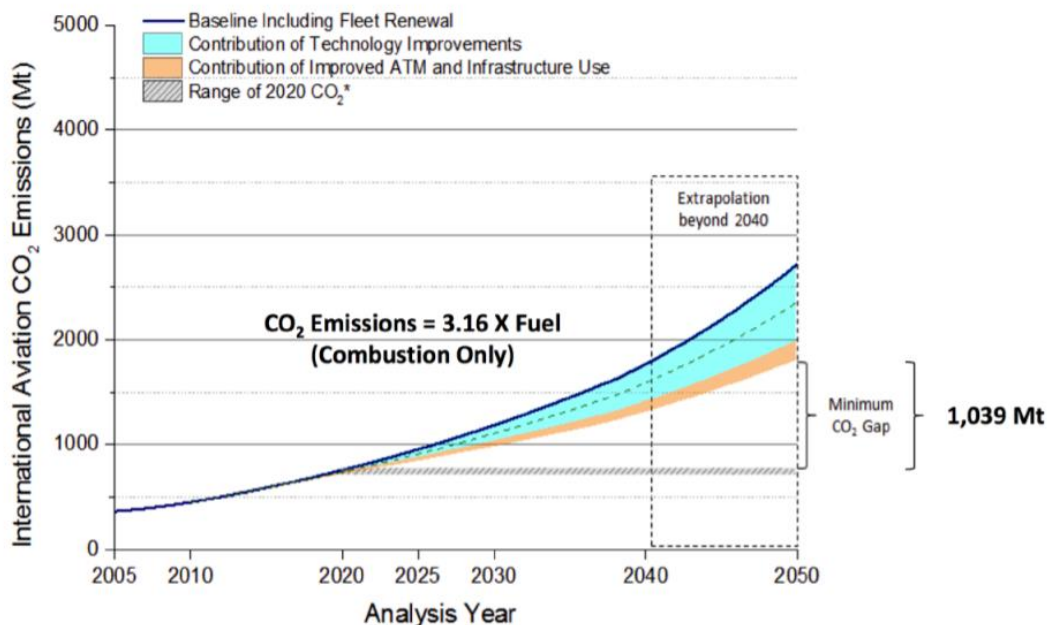
**Slika 9.** Potrošnja goriva u međunarodnom zračnom prometu ovisna o tehničkim i operativnim unapređenjima u megatonama (Mt)

Izvor: [15]

Slika 9. uzima u obzir prognozu potražnje za zračnim prometom, koja više utječe na cjelokupnu potrošnju goriva od tehnoloških i operativnih poboljšanja. Potražnja, koja je opisana prihodnim tonskim kilometrima (engl. revenue tonne kilometers – RTK) i odnosi se na međunarodni zračni promet, prognozira se s godišnjim porastom od 5.9% od 2010. do 2030. godine. Za usporedbu prognoza rasta, izračunata u prihodnim putničkim kilometrima (Revenue passenger kilometers – RPK), od strane Boeinga, Airbusa i Embraera iznosi 4.9, 4.6, odnosno 4.9% za razdoblje od 2014. do 2034. godine. S druge strane odbor za zaštitu okoliša u avijaciji (engl. Committee on Aviation Environmental Protection – CAEP), prognozira srednji porast od 4.9% kao Boeing i Embraer koji u niskim izgledima iznosi 4.2%, a u visokima 5.7% [15].

Emisija najutjecajnijeg stakleničkog plina, ugljičnog dioksida ( $\text{CO}_2$ ), je prognozirana pretpostavkom da se sagorijevanjem jednog kilograma kerozina u atmosferi generira 3.16 kilograma  $\text{CO}_2$  (slika10.). Kao i kod analize količine godišnje potrošnje goriva, ova analiza razmatra doprinos tehnologije zrakoplova, poboljšano upravljanje zračnim prometom i korištenje infrastrukture koja potiče smanjenje potrošnje fosilnog goriva. Dodatno, količina emisija  $\text{CO}_2$  u 2020. prikazana je s pretpostavkom da je postignut globalni aspiracijski cilj zadržavanja neto emisija  $\text{CO}_2$  na toj razini [15].

Postavljena su 2 scenarija su vezana za  $\text{NO}_x$  emisije. Prvi scenarij je umjeren napredak zrakoplovnih tehnologija i CAEP/9 (2013) operativno poboljšanje koje pretpostavlja smanjenje emisija  $\text{NO}_x$  za 50% od trenutne količine emisija  $\text{NO}_x$ . Drugi scenarij je izuzetan napredak tehnologije zrakoplova i CAEP/9 (2013) operativno poboljšanje koje pretpostavlja smanjenje emisija  $\text{NO}_x$  za 100% od trenutne količine emisija. Vrijednost  $\text{NO}_x$  za 2010. godinu iznosi 2.15 Mt. 2040. vrijednost  $\text{NO}_x$  se kreće od oko 4.81 Mt s drugim scenarijem, a 6,35 Mt s prvim scenarijem [15].



**Slika 10.** Količina emisija ugljičnog dioksida (CO<sub>2</sub>) u međunarodnom zračnom prometu do 2050.

Izvor: [15]

Prema najpozitivnijem scenariju učinkovitost potrošnje goriva u zrakoplovstvu (izražena u količini goriva po RTK-u) će se smanjiti za 1.4% godišnje do 2040. godine te 1.39% godišnje, ako se taj scenarij ekstrapolira do 2050. Iako se očekuje da će do 2020. učinkovitost koja je vezana za tehnološki napredak, efikasno upravljanje zračnim prometom i infrastrukturom biti umjerena, predviđa se njeno poboljšanje u razdoblju od 2020. do 2030. To poboljšanje bi se trebalo odraziti na povećanje učinkovitosti goriva za 1.76%. Analizom od strane ICAO-a je utvrđeno da će biti potrebno veće tehnološko i operativno poboljšanje od onog u najpovoljnijem scenariju kako bi se postigao globalni aspiracijski cilj smanjenja godišnje potrošnje goriva za 2%. 2020. godine prognozira se potrošnja goriva od 216 do 239 Mt što bi rezultiralo emisijom od 682 do 755 Mt ugljičnog dioksida. Ta potrošnja je prognozirana s pretpostavkom da će 2% svih letova biti na alternativna goriva što se ne može sa sigurnošću pretpostaviti [15].

CAEP prognozira kako bi se do 2050. sva fosilna goriva u zračnom prometu mogla zamijeniti alternativnim gorivima i tako ukloniti sve emisije CO<sub>2</sub>. Takva cjelokupna zamjena bi bila moguća kada bi 170 novih bio rafinerija bilo otvoreno svake godine od 2020. do 2050. s kapitalnim troškovima od 15 do 60 milijardi američkih dolara. U tu prognozu su također svrstani scenariji u kojima bi se ostvarilo najveće povećanje produktivnosti u poljoprivredi, najveća dostupnost zemljišta za uzgoj sirovina, najveća poboljšanja učinkovitosti pretvorbe sirovina u biogorivo, najveća smanjenja emisija stakleničkih plinova komunalnih usluga, kao i snažan tržišni te politički naglasak na bioenergiji općenito. Vjerojatnost postizanja svih tih uvjeta je mala tako da je potreban velik skok u otkrivanju novih načina smanjenja emisija u avijaciji kako bi se ostvarila ugljična neutralnost [15].

### **3. Tehnološka i operativna rješenja smanjenja utjecaja zračnog prometa na lokalnu kvalitetu zraka i klimatske promjene**

Smanjenje emisija u zračnom prometu se može smanjiti na više različitih načina. To uključuje razna tehnološka i operativna rješenja, ali i korištenje, novih, obnovljivih izvora energije za pokretanje zrakoplova. Tehnološkim se rješenjima pokušava povećati efikasnost korištenja zrakoplovnog goriva raznim tehničkim unaprijeđenima zrakoplovnih motora, implementacijom novih dizajna strukture zrakoplova te poboljšanjem aerodinamičkih svojstava zrakoplova. S druge strane, operativnim rješenjima se mogu smanjiti emisije različitim postupcima kao što su: navigacija, korištenje optimalne rute, načini prilaza i penjanja zrakoplova te separacijom. Postoji mnogo različitih mogućnosti za pozitivan utjecaj na zrakoplovne emisije, neke su već implementirane, a druge su još u razvoju.

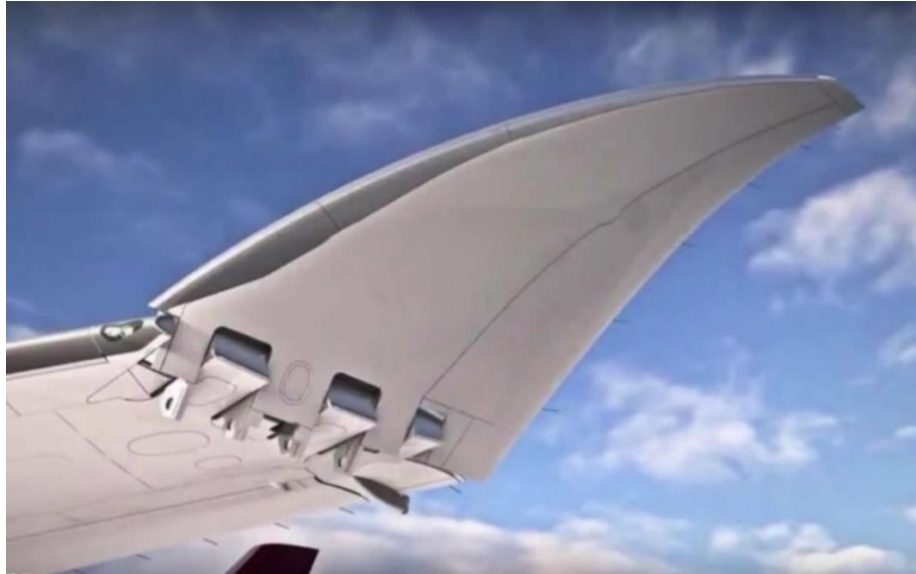
#### **3.1. Tehnološka rješenja**

Pod tehnološkim rješenjima podrazumijevaju se sva poboljšanja vezana za pogon zrakoplova, njegovu strukturu, aerodinamiku te tehnologiju dizajna i proizvodnje kako bi se smanjile emisije. U posljednjih pet godina, potpuno novi, napredni zrakoplovi dugog dometa (kao što su Boeing 787-8 i 787-9, Airbus A350-900) su započeli s operacijama u civilnom zračnom prometu uz značajna poboljšanja u svakom od tih tehnoloških područja. Veliki nacionalni i internacionalni programi se provode diljem svijeta koji provode suradnju između industrije, vlade i akademske zajednice kako bi se proizvela i implementirala razna tehnička rješenja. Neka od tih tehničkih rješenja su laminarno strujanje, prilagodljivi materijali i zrakoplovi na električni pogon. Ta rješenja se istražuju zadnje desetljeće i uvelike utječu na smanjenje ugljičnog utjecaja na atmosferu, no ona se moraju detaljnije istražiti i implementirati. Njihova potpuna implementacija i sektor zračnog prometa očekuje se u sljedećih deset do dvadeset godina [15].

Poboljšanjem aerodinamike zrakoplova, može se smanjiti sila otpora pri letu i konačno potrošnja goriva. Povećanjem efektivnog raspona krila zrakoplova sa unaprijeđenim materijalima, strukturama i aerodinamikom moguće je smanjiti otpor koji je ovisan o uzgonu. To se može ostvariti tehnologijama kao što su vertikalna i preklopna krilca (koja je Boeing konstruirao na novom B777X zrakoplovu, a prikazana su na slici 11.). Otpor trenja (engl. skin friction drag) ostaje jedan od faktora koji ima potencijal za značajno povećanje aerodinamične efikasnosti, a može se smanjiti uporabom rebrastih površina na oplutama zrakoplova.

Što se tiče tehničkih poboljšanja zrakoplovnih motora, ono se može postići:

- povećanjem termalne efikasnosti (koja se može postići povećanjem cjelokupnog omjera tlakova u kompresoru (ulaznog i izlaznog))
- povećanjem pogonske efikasnosti (koja se može postići povećanjem stupnja optočnosti (engl. bypass ratio – BPR))
- smanjenjem otpora i težine zrakoplovnog motora [15].



**Slika 11.** Preklopna krilca Boeinga 777X

Izvor: <https://www.travelandleisure.com/travel-news/folding-wing-tips-faa-regulations>

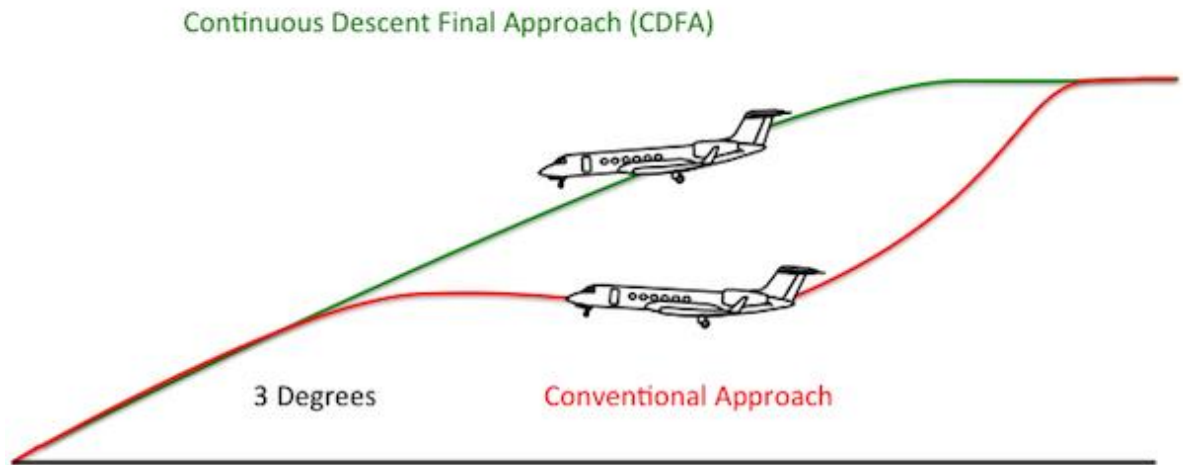
Velik iskorak u smanjenju mase praznog zrakoplova pružali su napredni kompozitni materijali. Kompozitne materijale su u strukturama svojih zrakoplova već implementirali proizvođači zrakoplova kao što su: Airbus sa A350XWB, Boeing sa B787 i B777-9 te Bombardier s C Serijom. Istraživanja vezana za lagane legure u očekivanom su rastu u godinama koje slijede pa se počinje implementirati i proizvodnja a aditivnim slojevima (engl. additive layer manufacturing – ALM) ili 3D printanje. U budućnosti se očekuje razvoj materijala koji će se moći programirati tako da se prilagođavaju vanjskim uvjetima ovisno o tlaku i/ili temperaturi kojoj su izloženi [15].

### **3.2. Operativna rješenja**

Učinkovitost sustava upravljanja zračnim prometom (engl. air traffic management - ATM) od ključne je važnosti za održivost zrakoplovstva i zračnog prometa. Operativna rješenja se temelje upravo na tom sustavu, a ona su sljedeća: sustavi za upravljanje polascima, let optimalnom rutom i kontinuirano slijetanje i penjanje.

Sustav za upravljanje polascima omogućuje se da se zrakoplovi kreću učinkovito, jedan za drugim, od terminala do uzletno sletne staze, bez nepotrebnog čekanja u redu ili zaustavljanja. Let optimalnom rutom omogućuje zrakoplovu da leti na najefikasnijoj ruti. Utvrđeno je da se slobodnim planiranjem mogu smanjiti ukupne duljine letova za 5%, vremena letova za 2 minute što bi značilo smanjenje potrošnje goriva i emisija za 12% što je značajna brojka [15]. Operacijom kontinuiranog slijetanja i penjanja (engl. continuous descent operation – CDO i continuous climb operation – CCO) zrakoplov prema dizajnu zračnog prostora i u suradnji s kontrolom leta slijeće, odnosno polijeće (što je više moguće) pod kontinuiranim kutom kao što je prikazano na slici 12. Rezultat ovih tehnika je povećanje vremena koje

zrakoplov provodi na efikasnijim, višim visinama krstarenja, što u konačnici smanjuje potrošnju goriva, ali i buku koju zrakoplovi proizvode prilikom slijetanja i uzlijetanja [16].



**Slika 12.** Razlika između kontinuiranog i konvencionalnog slijetanja

Izvor: <http://code7700.com/cdfa.htm>

## 4. Alternativna goriva

Rješenje koje ima velik potencijal za drastično smanjenje emisija od strane zračnog prometa su razvoj, proizvodnja i korištenje alternativnih goriva za pokretanje zrakoplova. Prva konferencija vezana za alternativne izvore energije koju je održao ICAO bila je 2009. godine. Na toj konferenciji postignut je velik napredak u kreiranju rješenja za budućnost avijacije u okviru korištenja izvora energije. Iako je korist koja može biti ostvarena korištenjem alternativnih goriva dokazana, prepreka se nalazi u problemu proizvodnje resursa na svjetskoj razini. Problem se također nalazi u velikoj razlici u cijeni između fosilnog i biogoriva. Smanjena potražnja za alternativnim gorivima negativno utječe na investicije u biorafinerije koje su potrebne za produkciju ovog izvora energije. Poticaji i politički utjecaj su moguća rješenja kako bi se populariziralo biogorivo i povećala potražnja.

Održiva zrakoplovna goriva imaju značajan utjecaj kao izvor "čiste" energije, koju je sektor zračnoga prometa već usvojio. Pozitivan utjecaj zasigurno ima i pad cijene instalacije infrastrukture za proizvodnju solarne energije i energije vjetra. To će omogućiti lakšu implementaciju takvih sustava na zračnim lukama i općenito u sektoru zračnog prometa. 59 zemalja koje čine 79% svjetskog udjela zračnog prometa je izjavilo da će sudjelovati u investicije u održiva alternativna goriva, dok je 37 zemalja (35% svjetskog udjela) izjavilo kako će implementirati obnovljive izvore energije na zračnim lukama. U Jamajci je ICAO implementirao početni projekt u kojemu koristi solarnu energiju na izlazima, gdje pruža parkiranim zrakoplovima napajanje električnom energijom i opskrbu klimatiziranog zraka [17].

ICAO danas realizira razmjenu informacija, promocije i komunikaciju između svih članica vezano za održive, alternativne izvore energije kako bi se aktivno mogao riješiti problem neželjenih emisija.

### 4.1. Kriteriji za primjenu alternativnih goriva

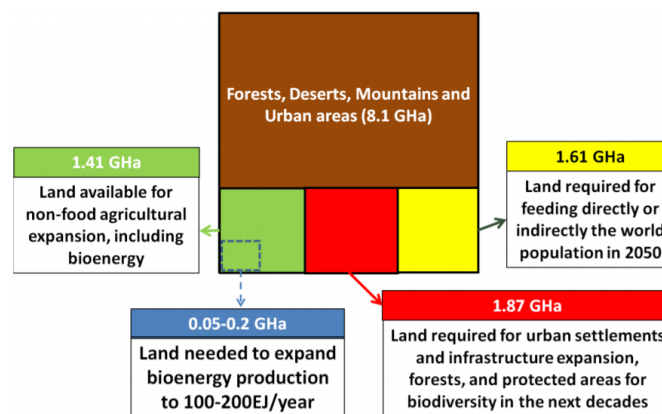
Kako bi se alternativno gorivo moglo primijeniti u sektoru zračnog prometa potrebno je zadovoljiti nekoliko kriterija kao što su:

- mogućnost korištenja na postojećim zrakoplovnim motorima
- mogućnost proizvodnje
- dovoljno visoka specifična energija
- smanjenje utjecaja na klimatske promjene [17].

Jedan od kriterija je mogućnost korištenja alternativnih goriva na postojećim motorima. Civilni zračni promet je usvojio rigorozne sigurnosne standarde i procedure vezane za održavanje zrakoplova i njegove opreme. Zbog toga gorivo koje pojedini zrakoplov koristi mora proći niz standarda kvalitete kako bi se moglo primijeniti za let. Pošto se zrakoplovi opskrbljuju gorivom u različitim državama od kojih svaka ima drugačije norme potrebno je harmonizirati tehničke specifikacije goriva. Zbog strogih kriterija vezano za kvalitetu zrakoplovnog goriva, implementacija goriva od drugačijih izvora zahtjeva primjenu upadnog koncepta (engl. drop in fuel concept). Gorivo upadnog koncepta je potpuno zamjenjivo i

prilagodivo miješanjem s konvencionalnim zrakoplovnim gorivom. Ono ne zahtjeva posebne modifikacije na motoru zrakoplova pa se može koristiti za pokretanje današnjih modela.

Proizvodnja sirovina je također jedan od kriterija za uspješnu implementaciju alternativnog goriva u zračnom prometu. Agronomski potencijal za proizvodnju sirovina ovisi o korištenju tla pogodnog za rast i ekološkim ograničenjima kao što su bioraznolikost, prirodna i kulturna baština te očuvanje bogatstva vode. Ti su problemi intenzivno proučavani zadnjih nekoliko godina, što je rezultiralo u obilju informacija vezano za količinu tla pogodnog za proizvodnju bioenergenata i ostalih ograničenja. Na zemlji je potrebno osigurati dovoljno površine za prirodne resurse (kao što su šume, planine i pustinje), urbana područja i infrastrukturu, zemljišta za proizvodnju hrane te ostalu agronomsku proizvodnju (u što spada proizvodnja bioenergenata). Istraživanjima je dokazano kako je zemljišta za razvitak i više nego dovoljno, što je pokazano u slici 13.



**Slika 13.** Dostupnost površina na Zemlji

Izvor: [17]

Različiti tipovi goriva imaju različite specifične energije. Specifična energija je izraz kojim se opisuje koliko je mase nekog goriva potrebno kako bi se proizvela određena količina energije. Stoga bi alternativno gorivo trebalo imati sličnu ili u najboljem slučaju višu specifičnu energiju od fosilnog goriva kako bi bilo upotrebljivo. Ako to nije slučaj, učinkovitost leta je ugrožena, to jest količina plaćenog tereta i domet su smanjeni. Let gorivom koje ima malu specifičnu energiju ne bi bio prihvatljiv, zato što bi veća masa toga alternativnog goriva (u usporedbi s fosilnim) bila potrebna kako bi se izvršila ista operacija. S druge strane, gorivo s visokom energetsom specifičnošću zahtijevalo bi manju masu pa bi povećanje plaćenog tereta i dometa bilo moguće. Zbog toga je potrebno otkriti alternativno gorivo s dovoljnom specifičnom energijom kako bi ono bilo isplativo [18].

Konačno i najvažnije, potencijalno alternativno gorivo bi trebalo pružati određen utjecaj na smanjenje sveukupnih emisija stakleničkih plinova u usporedbi s kerozinom. Ako to nije ostvareno, nema potrebe za uvođenjem takvog alternativnog goriva. To se primarno može ostvariti izvorima ugljikovodika koji se ne temelje na fosilnim gorivima putem različitih biokemijskim i termokemijskim procesima. Tako su mnogi entiteti ovjerili tehničku sposobnost



produkcije sintetičkog zrakoplovnog goriva ili miješanjem različitih izvora ugljikovodika s tradicionalnim zrakoplovnim gorivom [19].

## **4.2. Prednosti i nedostaci primjene alternativnih izvora energije u zračnom prometu**

Korištenje alternativnog goriva u zračnom prometu nailazi na različite prednosti, ali i nedostatke koji koče njihovu brzu i jednostavnu implementaciju.

Jedna od prednosti je njihov povoljan životni ciklus koji u obzir uzima sve emisije vezane za produkciju zadnje verzije goriva. U to se ubrajaju emisije od njegovog početnog oblika (npr. naftni izvor, sadnja uljarica ili konverzija čvrstog komunalnog otpada) do zrakoplovnih emisija. Primjerice, prednost goriva baziranih na biomasi nad fosilnim gorivima je ta što sirovine vrijeme svog rasta apsorbiraju približno jednake količine CO<sub>2</sub> koje će kasnije biti emitirane od strane zrakoplova. Biogorivo međutim ne mora nužno imati emisije životnog ciklusa koje su ispod onih temeljenih na nafti, budući da tu postoje emisije povezane s nabavom sirovine, proizvodnjom goriva, transportom sirovine i goriva, kao i s promjenom korištenja zemljišta proizvodima na bazi biomase. Iako ti faktori i dalje imaju svoj utjecaj na emisije stakleničkih plinova, kada se pogleda šira slika, cjelokupna emisija CO<sub>2</sub> može pasti za 41-89% [20].

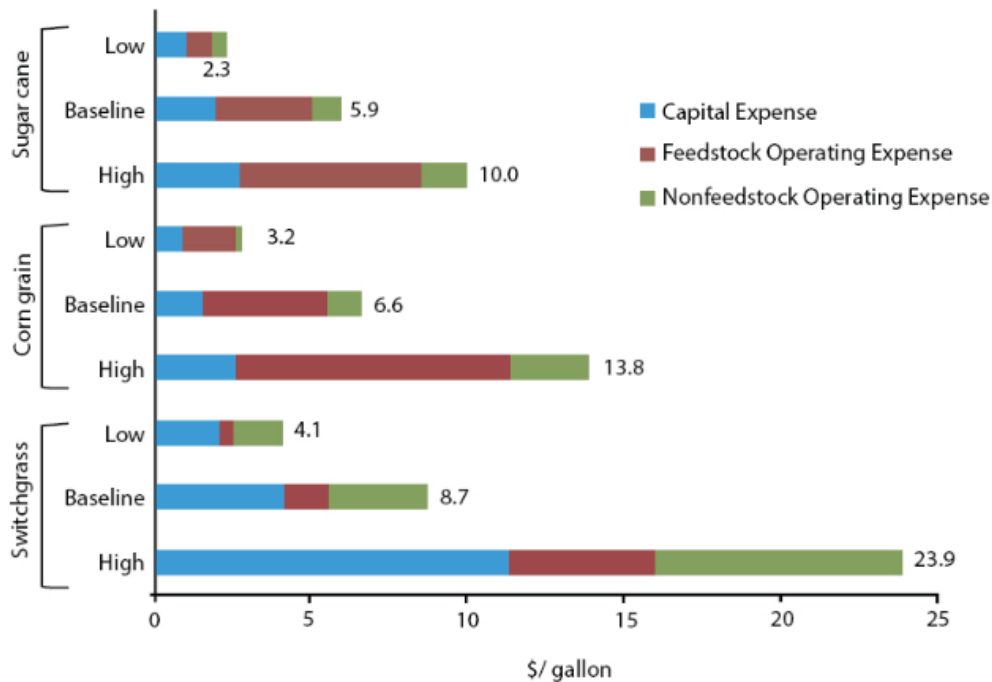
Komercijalizacija alternativnog goriva ima niz potencijala kao što su: širenje domaće proizvodnje energije, smanjenje stakleničkih plinova i drugih emisija koje utječu na kvalitetu zraka, promicanje gospodarskog razvoja i socijalne skrbi te uvođenje drugih ekoloških benefita u biosferu (npr. poboljšanje kvalitete vode, obnova degradiranih tla, povećanje biološke raznolikosti i pomoć u smanjenju štetočina i korova). Mnogo pozitivnih koristi proizlaze iz novih mogućnosti u poljoprivredi koje ne bi bile moguće samo s proizvodnjom hrane. To je osviješteno i od strane saveznih, državnih i lokalnih vladinih agencija koje su prepoznale sljedeće koristi:

- ekološke prednosti kao što su smanjenje emisija na zračnim lukama miješanjem komponenti koje sadrže manju količinu sumpora od fosilnog goriva što pozitivno utječe na emisije SO<sub>x</sub> i čestica
- socijalne prednosti koje se odražavaju na otvaranje novih poslova i ruralni razvoj, npr. razvoj sirovina na različitim lokacijama diljem svijeta tako da ne utječu na proizvodnju hrane kako ne bi došlo do nenamjernih posljedica kao što je nestašica hrane
- prednosti u nekomercijalnoj avijaciji kao što su vojna, poslovna i generalna, gdje na primjer ministarstvo obrane u SAD-u podržava korištenje održivih zrakoplovnih goriva [20].

Uz mnoge prednosti se može naći i broj nedostataka u potencijalu široke primjene alternativnog goriva u zračnom prometu. Iako alternativno gorivo ima potencijal za smanjenje ugljičnog otiska postoje brojne ekonomske, tehničke i političke prepreke koje se moraju riješiti

kako bi se ta vizija mogla ostvariti. Od tih prepreka najveći problem stvaraju ekonomski izazovi koji koče komercijalizaciju održivog goriva.

Stvaranje industrijskog sektora za proizvodnju održivog alternativnog goriva bit će vrlo teško, prvenstveno zbog natjecanja sa konvencionalnim zrakoplovnim gorivom koje nudi velike količine za opskrbu uz relativno nisku cijenu. Održivo zrakoplovno gorivo generira veće troškove od konvencionalnog zrakoplovnog goriva koji su prikazani u slici 14. Održivo zrakoplovno gorivo bit će isplativo kada cijena galona sirove nafte naraste na 120 \$, no danas



**Slika 14.** Prikaz troškova (kapitalnih i operativnih vezanih i nevezanih za sirovinu) u proizvodnji održivih zrakoplovnih goriva kao što su šećerna trska, kukuruz i divlje proso u američkim dolarima po galonu

je njegova cijena 55 \$ po galonu [21].

Detaljno definirani i dobro uspostavljeni opskrbeni lanci su potrebni za veliku produkciju alternativnog goriva, pogotovo poljoprivrednih i drvnih sirovina. Ostaje upitno hoće li sve sirovine od interesa moći isporučiti dovoljno energije po jediničnom trošku za različite procese konverzije, posebno za proizvodnju "prve jedinice". Zato što je veći dio istraživačkog rada do danas za bilo koju specifičnu proizvodnju sirovina provedeno na ograničenoj osnovi. Problem se javlja i kod dostupnosti sirovina tijekom godine, zato što različite kulture uspijevaju u različitim vremenskim periodima. Zato će biti potrebne različite vrste izvora s različitim tehnologijama pretvorbe ili će se različite sirovine morati uvoziti iz drugih zemalja. Mnoge sirovine su raznovrsne i jedinstvene prema tehnologijama berbe, rukovanjem, uvjetima skladištenja i preradom što zahtjeva više različite opreme. Bez integratora koji upravlja cjelokupnim razvojem čitavog opskrbenog lanca, njime se izuzetno teško upravlja.

Za produkciju održivih alternativnih goriva potreban je vodik jer je udio njegovih atoma u fosilnom gorivu veći nego u sirovinama. Zato je u većini slučajeva vodik ključni sudionik u konverzijskom procesu. U mnogim regijama s velikom količinom sirovina vodik je teško nabaviti ili nije ekonomski isplativ što također stvara problem za pokretanje produkcije.

Na poteškoće također nailaze mali proizvođači koji nemaju velik kapital za ekonomsku isplativost i rast. Dobro rješenje bi bili novčani potencijali za njihov rast i razvoj što bi smanjilo rizike ulaska u industriju. Također su moguća smanjenja poreza za takve proizvođače i smanjenje cijena sirovina koje su potrebne za proizvodnju.

Postupci kvalifikacije i certificiranja goriva su skupi, goriva koja su potrebna za testiranje teško je proizvesti u dovoljnim količinama u razumnim vremenskim razmacima, a subjekti koji se kvalificiraju obično su male, nedovoljno financirane početne organizacije koje će se također morati baviti mnogim drugim tehničkim i ekonomskim izazovima.

Industrijski proces je uspostavljen korištenjem standardnih postupaka i specifikacija, a koristi se za kvalificiranje proizvodnih puteva alternativnih mlaznih goriva. Proces testiranja i kvalificiranja previše se temelji na fizičkom testiranju, a nedovoljno na znanosti (kemiji i znanosti o izgaranju). Napredak je ostvaren, ali ključni nedostaci postoje u nekoliko područja kao što su: nedostatak ispitnih postrojenja, temeljnog razumijevanja utjecaja kemijskog sastava na fizička svojstva, nesigurnosti u vezi s kompatibilnošću različitih molekula goriva s materijalima koji se općenito koriste u motornim sustavima zrakoplova, plinskim turbinama i postojećoj infrastrukturi za opskrbu i skladištenje goriva te nedostatak istraživačkih i demonstracijskih postrojenja. Ovi nedostaci ometaju široku komercijalizaciju takvih goriva [20].

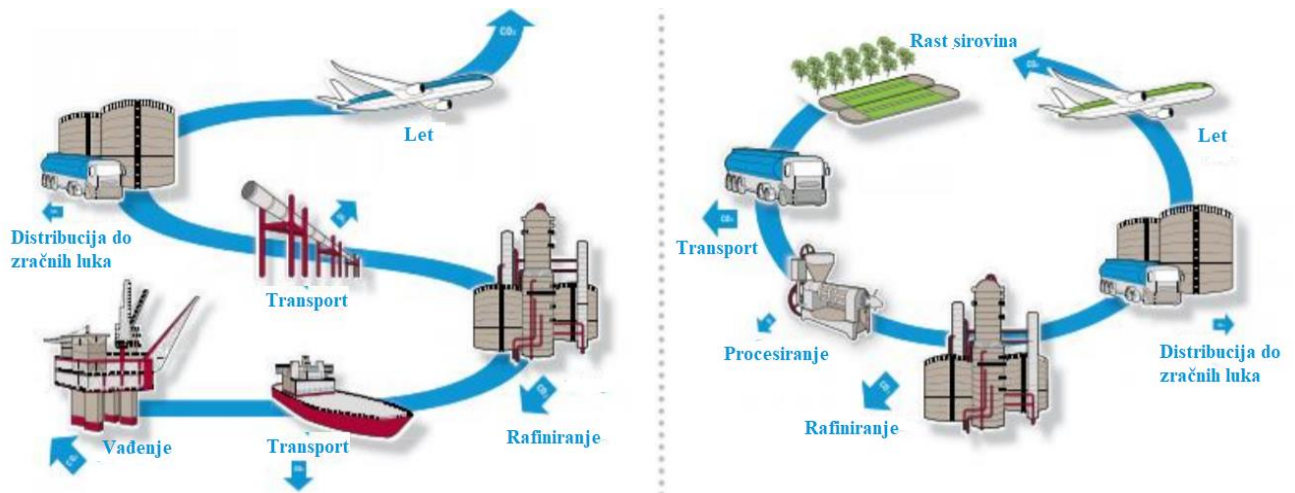
## 5. Održiva zrakoplovna biogoriva (SAF)

Održiva zrakoplovna goriva (engl. sustainable aviation fuel – SAF) je glavni pojam koji se u zračnom prometu koristi za nekonvencionalna fosilna goriva za pokretanje zrakoplova. Prema IATA-i je to preferirani termin za takvu vrstu goriva iako se u industriji koriste termini kao što su održiva alternativna goriva ili obnovljivo zrakoplovno gorivo. SAF je izveden iz održivih uljarica kao što su jatrofa, camelina i alge ili iz drvenih i otpadnih biomasa. Njegovom implementacijom se ugljični otisak avijacije može smanjiti za oko 80% tijekom cijelog životnog ciklusa. Testni letovi koristeći SAF su već odrađeni u praksi od strane dvadesetak aviokompanija. Tim se letovima dokazala tehnološka mogućnost za njegovu usklađenost s konvencionalnim gorivom [22] [23].

Kemijske i fizikalne karakteristike SAF-a su gotovo identične onima u kerozinu pa se mogu sigurno miješati s konvencionalnim gorivom u različitim postocima bez potrebe za tehničkim modifikacijama na motoru zrakoplova tako da spadaju u prije navedena "drop-in" goriva. Održiva goriva svojim karakteristikama moraju zadovoljiti kriterije vezane za emisije stakleničkih plinova, ne utjecati na bogatstvo prirodne vode i krčenje šuma. Održivost SAF goriva očituje se u mogućnosti za ponovnim i repeticijskim korištenjem tako da su konstantna u ekonomskim, socijalnim i ekološkim ciljevima i da ne rezultiraju u intenzivnom trošenju prirodnih resursa [23].

Održiva zrakoplovna goriva su odlična alternativa u kratkoročnom smislu zato što ne zahtijevaju puno kako bi se koristila za razliku od revolucionarnih ideja kao što su zrakoplovi na električni i solarni pogon koje zahtijevaju još puno istraživanja. Njihova laka implementacija je idealna za korištenje u današnjem civilnom zrakoplovstvu koje traži brza rješenja što se tiče smanjenja ugljičnih emisija.

Sirovine koje se koriste za produkciju SAF-a su različite, a mogu biti ulje koje se koristi za kuhanje, različita biljna ulja, komunalni otpad, otpadnu plinovi i agronomski ostaci. Pošto je produkcija održivih zrakoplovnih goriva vezana za uzgajanje bilja, otkriveno je da bi količina ugljičnog dioksida koji bi to bilje koristilo za disanje i rast bilo jednako količini CO<sub>2</sub> emitiranog iz zrakoplovnih motora. Zbog toga bi SAF mogao biti približno ugljično neutralna opcija za zračni promet, no zbog emisija koje se pojavljuju prilikom produkcije, korištenja opreme i transporta ovog alternativnog goriva djelomične emisije bile bi neizbježne (ciklus proizvodnje SAF-a na slici 15). U svakom slučaju emisije CO<sub>2</sub> bi pale za spomenutih 80% u usporedbi s produkcijom fosilnih goriva. Još jedna prednost SAF-a je drastično smanjenje emisija sumporovog dioksida (SO<sub>2</sub>) i čađe zato što ono sadrži jako malo nečistoće [17].



**Slika 15.** Razlika u ciklusima produkcije fosilnog (lijevo) i održivog zrakoplovnog goriva (desno)

Izvor: [17]

## 5.1. Certifikacija održivih zrakoplovnih goriva

Kako bi se očuvala sigurnost zračnog prometa koja je prvi prioritet u industriji svako SAF gorivo se mora certificirati. Ako se ono ne certificira neće se uopće moći upotrebljavati. SAF mora imati iste kvalitete i karakteristike kao i konvencionalno zrakoplovno gorivo kako bi ga moglo zamijeniti. To je važno kako proizvođači ne bi trebali redizajnirati svoje motore, a zračne luke i opskrbljivači gorivom izgraditi nove sisteme dovoda goriva. Danas je industrija fokusirana na primjeni SAF-a kao gorivo upadnog koncepta, gdje se ono miješa u određenim postocima s kerozinom. Potencijalno, budućnosti se očekuje stopostotna zamjena fosilnog goriva.

Zbog toga što se zrakoplovi opskrbljuju gorivom u raznim državama, uvedeni su međunarodni standardi za zrakoplovna goriva. Dva najšire upotrebljavana standarda, uvedena od strane Američkog društva za testiranje materijala (engl. American Society for Testing Materials – ASTM), su D1655 (certificira standardno, Jet A1 gorivo) i DEF STAN 91-91 koji u svojoj analizi testiraju sastav goriva, njegovu isparljivost, fluidnost, izgaranje, koroziju, termičku stabilnost, kontaminante i aditive. SAF goriva moraju biti "drop-in" karaktera. Ako to svojstvo nije zadovoljeno to bi značilo da treba izgraditi novu infrastrukturu na aerodromima što bi nepotrebno povećalo troškove i ugrozilo sigurnost. Standard koju regulira certifikaciju SAF-a je ASTM D7566. On klasificira tehnologije, karakteristike i uvjete pod kojima se SAF može koristiti na današnjim zrakoplovima. Kada se produkcija SAF-a vrši u biorafinerijama, on se miješa do maksimalne certificiranog postotka prikazanog u tablici 1 [24].

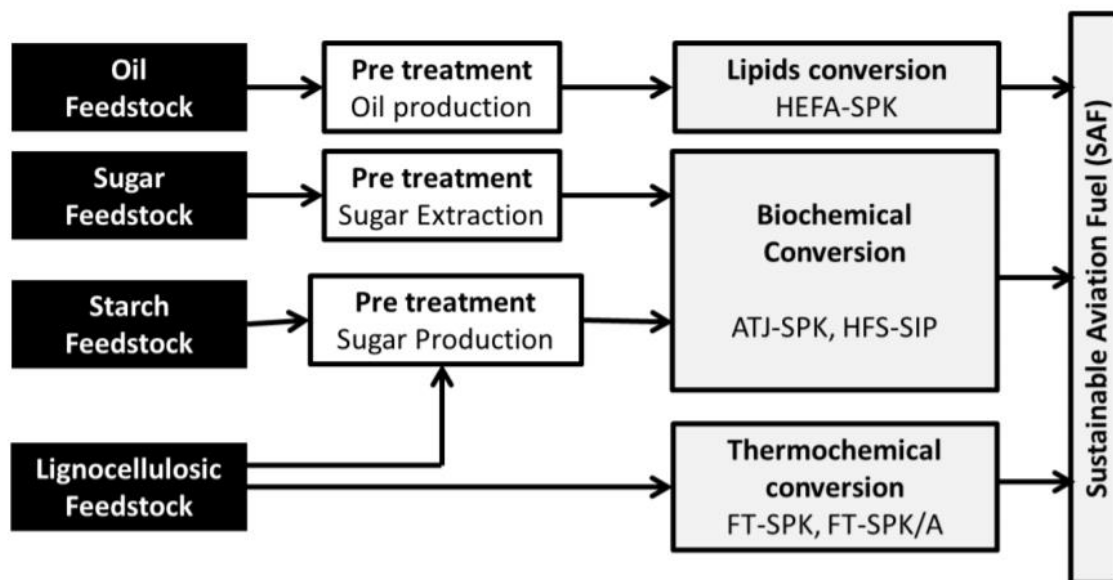
**Tablica 1.** maksimalni udio SPF-a (u %) ovisno o tehnologiji miješanja i sirovinama

Tehnologija	Maksimalni udio (%)	Sirovina
Fischer-Tropsch i Fischer-Tropsch s aromatima	50	Otpad, ugljen, plin, piljevina
Hidroprocesirani esteri i masne kiseline	50	Biljna ulja: palmino, kamelino, jatrofino i iskorišteno ulje za kuhanje.
Sintetizirani izoparafin	10	Šećerna trska, šećerna repa
Alkohol u zrakoplovno gorivo (engl. Alcohol-to-Jet – ATJ) (izobutanol i etanol)	50	Šećerna trska, šećerna repa, piljevina, ostaci lignoceluloze

Izvor: [23]

## 5.2. Produkcija održivih zrakoplovnih biogoriva

Produkcija SAF-a sastoji se od nekoliko faza kao što su (redom): produkcija sirovina, njihova obrada te konverzija u zrakoplovno gorivo. Izvedivost proizvodnje goriva snažno je povezana s konfiguracijom proizvodnog puta, što uključuje i transport proizvoda kroz faze. Sirovine iz kojih se mogu dobiti SAF goriva su ulja, šećeri, škrob i lignoceluloza koji se mogu pretvarati tehnologijama navedenim u tablici 1. Međusobna povezanost sirovina i tehnologija prikazana je u slici 16. Kako bi SAF goriva mogla doživjeti široku uporabu ona moraju biti kvalitetna i održiva po prirodi.



**Slika 16.** Međusobna korelacija sirovina i tehnologija konverzije

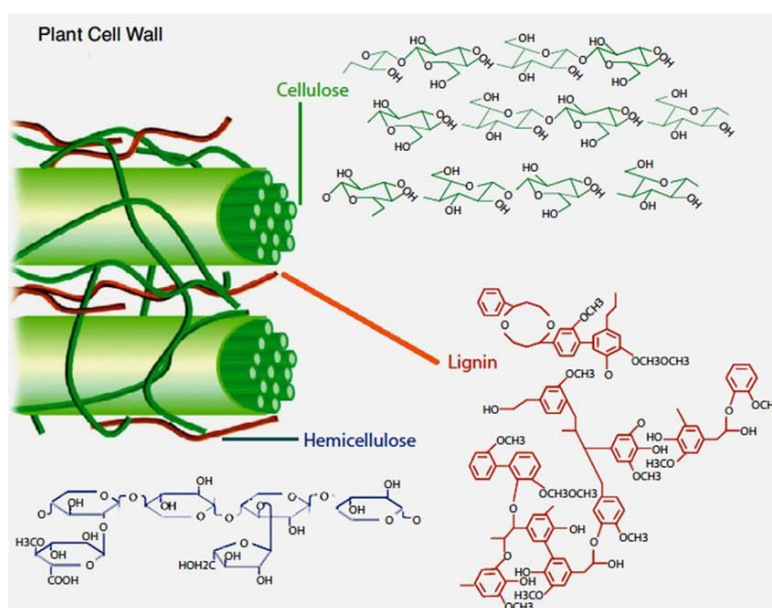
Izvor: [17]

Šećer i škrob se mogu pretvoriti u alkohole kao što su etanol i butanol. To je izvedivo nakon prijašnje prerade koja se može ostvariti njihovim mljevenjem ili difuzijom. Plod šećerne

trske se najviše proizvodi u Brazilu, zatim slijede Indija i Kina. Što se tiče škroba on se najprije dobiva iz kukuruza, čiji je najveći proizvođač SAD, ali ga je i moguće dobiti iz plodova pšenice i kasave. Etanol kao alternativno gorivo koristi Air France na relaciji Paris-Toulouse. Air France ga koristi jednom tjedno u udjelu od 10% mješavinom s kerozinom [17].

Što se tiče biljnih i otpadnih ulja, najutjecajni izvori su soja i palmino ulje. Oni se također koriste u produkciji biodizela u cestovnom prometu. Soja se najviše kultivira u SAD-u i Brazilu, dok je produkcija palminog ulja najveća u tropskim azijskim državama kao što su Malezija i Indonezija. Problem kod palminog ulja je u dugome vremenu od produkcije do korištenja koje može trajati od 5 do 20 godina kako bi se moglo iskoristiti kao gorivo. Kao izvori se još istražuju jatrofa i camelina koje imaju prednost u tome što nisu jestive pa se njihovom kultivacijom ne utječe na proizvodnju hrane. Velik potencijal imaju i alge, koje se sa svojim visokim udjelom lipida po suhoj masi od 60% mogu odlično iskoristiti kao gorivo. Prednost algi je i ta što one ne zauzimaju nikakvo zemljište, no problem se nalazi u velikim troškovima njene proizvodnje [17].

Problem koji se nazire u produkciji biogoriva je njegov utjecaj na proizvodnju hrane. Zbog toga je neprehrambena sirovina vrlo interesantna za primjenu. Primjer takve sirovine je vegetativna biomasa ili lignoceluloza od koje se gorivo može dobiti na dva načina: termalnim procesima i biokemijskom konverzijom. U lignocelulozu (prikazana na slici 17.) spadaju drva i drveni ostaci kao što je piljevina te ostaci iz drvne industrije. S druge strane izvori lignoceluloze kao što su višegodišnje trave također su predloženi zbog svojih visokih prinosa, niskih troškova i potencijala za rast. Najaktivniji sudionici u uvođenju lignoceluloze kao SAF-a su nordijske države koje broje velike količine drvnog otpada. Nordijska inicijativa za održivu avijaciju (engl. The Nordic Initiative for Sustainable Aviation – NISA) je okupila zračne prijevoznike, zračne luke, vlade i proizvođače goriva kako bi se podržala istraživanja i angažman za kupnju alternativnog goriva. Osim drva, za lignocelulozno gorivo javlja se i mogućnost korištenja komunalnog krutog otpada nakon uklanjanja stakla, plastike i metala. Heterogena kompozicija tog otpada može biti dobar pokretač za proizvodnju SAF-a [17].



Slika 17. Detaljni prikaz lignoceluloze

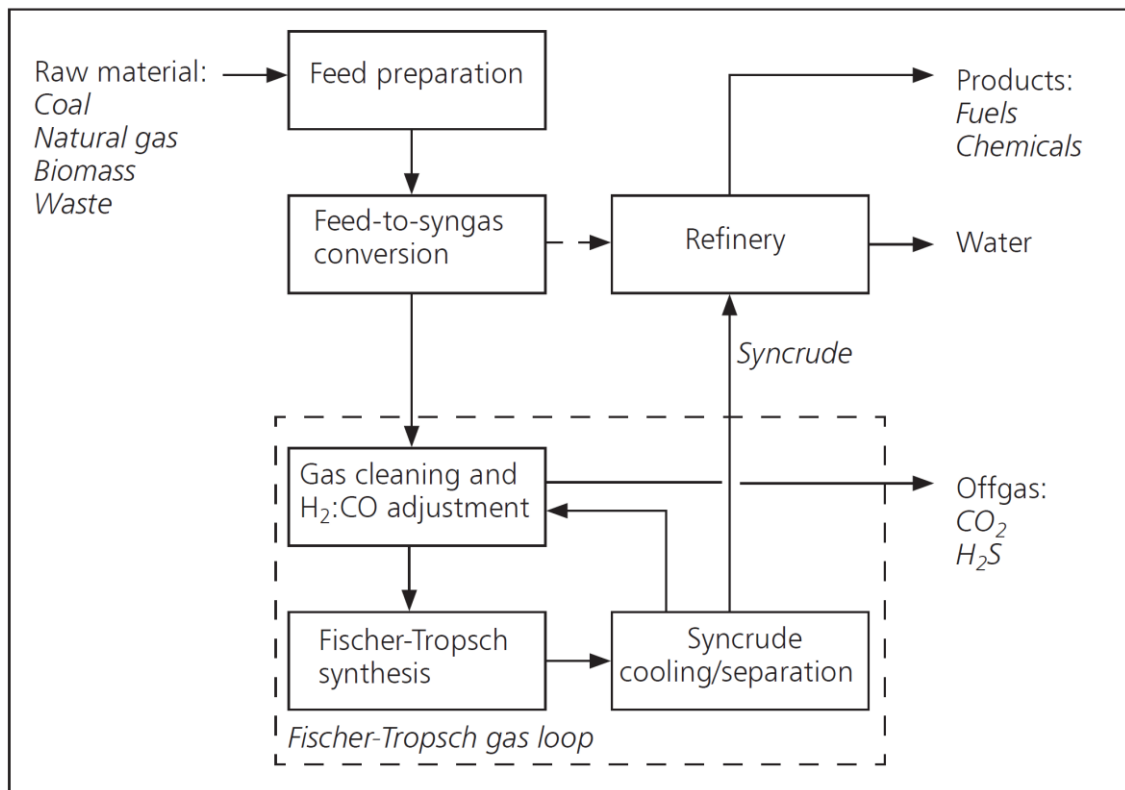
Izvor: [https://www.researchgate.net/figure/Structure-of-Lignocellulosic-biomass-80\\_fig2\\_317510902](https://www.researchgate.net/figure/Structure-of-Lignocellulosic-biomass-80_fig2_317510902)

Postoji više načina na koje se sirovine mogu pretvoriti u SAF upadnog koncepta. Do danas je više kombinacija sirovina i konverzijskih procesa bilo predloženo, no samo su neki certificirani kao što je već opisano.

Konverzija lipida je jedan od certificiranih načina pretvorbe različitih biljnih ulja. Lipidi su jedan od primarnih sastojaka koji se nalaze u biljnim uljima i njihovim ostacima. Hidrobradom lipida se mogu dobiti hidroprocesirani esteri i masne kiseline (engl. Hydroprocessed Esters and Fatty Acids – HEFA) koje imaju slične karakteristike kao konvencionalno zrakoplovno gorivo. HEFA proces je ujedno i najpoznatija vrsta pretvorbe sirovina u SAF, slična rafiniranju benzina. Proces se sastoji od reakcije biljnih ulja s vodikom i različitim katalizatorima kako bi se dobilo tekuće zrakoplovno gorivo, nafta, dizel i benzin. HEFA tehnologije imaju najveći potencijal za produkciju velikih razmjera prema raznim studijama. Međutim, ova vrsta konverzije ima broj izazova kao što su potreba za velikom količinom vodika, cijena, visoka emisija topline iz reakcije, koja zahtijeva rigoroznu kontrolu, ovisnost o troškovima sirovina i moguća niska kvaliteta ulja.

Termodinamičkom konverzijom (poznatijom kao Fischer-Tropsch proces prikazan na slici 18.) omogućava se dobivanje mješavine različitih plinova sublimacijom biomase na visokim temperaturama. Uglavnom su to ugljični monoksid (CO) i vodik (H<sub>2</sub>) koji se još nazivaju i sintetskim plinovima. Nakon što se ti plinovi pročiste oni sintetiziraju u mješavinu tekućina i plinova koji sadrže ugljikovodične lance različitih veličina. Takva je katalitička reakcija poznatija kao Fischer-Tropsch postupak. Zavisno o temperaturi na kojoj se postupak provodi, katalizatorima i procesom naknadnog rafiniranja moguće je dobiti produkte koji imaju slične karakteristike kao i fosilno zrakoplovno gorivo. Postoje i drugi termokemijski postupci dobivanja SAF-a, ali oni još nisu priznati od strane američke organizacije za testiranje i materijale (engl. American Society for Testing and Materials – ASTM). Jedan od takvih je i postupak pretvorbe hidroobrađene depolimerizirane celuloze u gorivo (engl. Hydrotreated depolymerized cellulosic to jet – HDCJ) koji koristi dekompoziciju biomase za dobivanje tekuće biološke tekućine koja se dalje konvertira u SAF.





**Slika 18.** Fischer-Tropsch proces

Izvor: <http://biofuelsacademy.org/index.html%3Fp=388.html>

Vežano za biokemijsku konverziju, postoje dva načina pretvorbe, a to su: pretvorba alkohola u zrakoplovno gorivo (engl. alcohol-to-jet – ATJ) i proces dobivanja sintetičkih izoparafina iz hidroprocesiranih estera i masnih kiselina (engl. Synthetic Iso-Paraffins produced from hydroprocessed esters and fatty acids – HFS-SIP). ATJ procesom se SAF dobiva iz molekula alkohola kao što su etanol i izobutanol koji se mogu proizvesti iz biljka bogatih šećerom ili škrobom te lignoceluloznih materijala. Proces se sastoji podprocesa dehidracije, oligomerizacije (način pretvorbe malih u veće, kompleksne molekule) i hidrogeniranja. Tehnička poboljšanja u podprocesu oligomerizacije i razvoj selektivnijih katalizatora su aspekti koje treba razmotriti kada se cilja na konkurentnu proizvodnju. HFS-SIP procesom se koriste genetski modificirani mikroorganizmi za pretvaranje šećera u ugljikovodike ili lipide. U jednom od slučajeva, ti mikroorganizmi, umjesto proizvodnje etanola, proizvode tvari kao što si farnesen (sintetički izoparafin) koji se može pretvoriti kvalitetno zrakoplovno gorivo. U ovom specifičnom slučaju, niska korisnost povezana s niskim prinosima konverzije je važno ograničenje [17].

### 5.3. Korištenje biogoriva u komercijalnom zračnom prometu

Prvi let koji je za pogon koristio mješavinu fosilnog zrakoplovnog goriva i biogoriva dogodio se 24.02.2008. iz Londona za Amsterdam. Zračni prijevoznik Virgin Atlantic je u suradnji s GE Aviationom za gorivo na Boeingu 747-400 koristio mješavinu kerozina s babasu

i kokosovim uljem. Gorivo je izrađeno tehnologijom pretvaranja biomase u gorivo (engl. biomass-to-fuel – BTL) te je pokazalo mogućnost korištenja biogoriva u komercijalnom zračnom prometu [25]. Nakon tog pothvata prošlo je 3 godine do sljedećeg leta na SAF, a do lipnja 2018. više od 130 000 letova je koristilo održivo zrakoplovno gorivo.

Jedan od najutjecajnijih zračnih prijevoznika koji redovno koriste SAF u svojim letovima je United Airlines koji se posvetio cilju za smanjenje emisija stakleničkih plinova za 50% do 2050. United nabavlja SAF od rafinerije World Energy iz Kalifornije čije je gorivo napravljeno HEFA procesom od sirovina temeljenih na otpadu. Druge aviokompanije i aerodromi također koriste SAF. JetBlue iz SAD-a je u suradnji s kompanijom SG Preston koja opskrbljuje zračnog prijevoznika s 33 milijuna galona miješanog goriva godišnje. U rujnu 2018. JetBlue je nabavio Airbus A321 od tvrtke Airbus Mobile iz Alabame koji je poletio na mješavinu biogoriva od 15% British Airways, KLM, Air Canada, i Cathay Pacific su jedni od zračnih prijevoznika koji su se obvezali koristiti i testirati SAF u redovnim linijama.

Što se tiče zračnih luka, LAX iz Los Angelesa te zračne luke u Oslu, Stockholm i Brisbane imaju mogućnosti opskrbe zračnih prijevoznika održivim zrakoplovnim gorivima.

U listopadu 2018. Virginov let iz Orlanda u London Gatwick je koristio alternativno gorivo koje je proizvedeno od recikliranja ugljičnih plinova iz proizvodnje čelika i drugih teških industrijskih procesa. Proces, koji je razvio LanzaTech, eliminira zabrinutosti povezane s biogorivima na bazi usjeva, uključujući i premještanje drugih poljoprivrednih aktivnosti [26]. U tablici 2. prikazani su različiti letovi aviokompanija na biogorivo.

**Tablica 2.** Letovi zračnih prijevoznika na biogorivo

Zračni prijevoznik	Alternativno gorivo	Rute
Lufthansa	100% biogorivo od biljnih ulja i životinjske masti	Hamburg – Frankfurt
Air France	50/50 mješavina kerozina i korištenog ulja za kuhanje	Toulouse – Paris
Iberia	Mješavina 75% kerozina i 25% biogoriva od camelina	Madrid – Barcelona
Finnair	50/50 mješavina kerozina i recikliranog biljnog ulja	Amsterdam Schiphol – Helsinki
KLM	Biokerozin proizveden od korištenog ulja za kuhanje	Amsterdam Schiphol – Paris Charles de Gaulle
Etihad	Biogorivo proizvedeno od korištenog ulja za kuhanje	Seattle - Abu Dhabi
All Nippon Airways	Biogorivo proizvedeno od korištenog ulja za kuhanje	Everett, Washington - Tokyo Haneda Airport
Qantas	50/50 mješavina kerozina i korištenog ulja za kuhanje	Sidney – Adelaide
Alaska Airlines	Mješavina 75% kerozina i 20% korištenog ulja za kuhanje	Seattle – Portland
Porter Airlines	50/50 mješavina jet A1 zrakoplovnog goriva i biogoriva	Billy Bishop Toronto City Airport – Ottawa

LAN Chile i Air BP Copec	Biogorivo proizvedeno od korištenog ulja za kuhanje	Santiago – Concepcion
Aeromexico	Mješavina 75% kerozina i sintetičkog parafina	Mexico City – San Jose

Izvor: <https://intelligent-partnership.com/aviation-biofuels-which-airlines-are-doing-what-with-whom/>

## 6. Mogućnost primjene tekućeg vodika, solarnog, nuklearnog goriva i električne energije

Među tehnologijama pogona zrakoplova nalaze se goriva koja zahtijevaju cjelokupni redizajn motora i konfiguracije zrakoplova. Takva goriva mogu biti tekući vodik, električna i solarna energija pa čak i nuklearno gorivo. Ovakve tehnologije će zahtijevati više godina za krajnju certifikaciju i implementaciju u civilni zračni promet, no motivacija je velika zato što su one mnogo čišće od biogoriva, a pogotovo fosilnih goriva. Visoko dinamičan sektor zračnog prometa potiče zrakoplovnu industriju da postigne sve veće ekonomske, ekološke i socijalne standarde. Glavni izazov je uspostaviti i razviti budućnost zrakoplovstva nakon 2050. što se tiče emisija i ugljične neutralnosti.

### 6.1. Tekući vodik

Tekući vodik jedna je od obećavajućih tehnologija propulzije koja omogućuje kompletnu eliminaciju emisija CO<sub>2</sub>. Jedine emisije koje se stvaraju korištenjem tekućeg vodika su vodena para (H<sub>2</sub>O) i male količine dušikovih oksida (NO<sub>x</sub>). Međutim, veliki izazovi za dizajn i rad zrakoplova te zračnih luka, kao i sigurnosna pitanja povezani su s uvođenjem vodika kao alternativnog goriva. U prošlosti se vodik u kombinaciji s benzinom koristio za pokretanje cepelina. Zatim je Rusija 80-ih i 90-ih godina prošlog stoljeća eksperimentirala s vodikom za pokretanje Tupoleva TU-155, koji je vodik koristio za pokretanje jednog od svoja 3 motora. Nakon toga su Rusija i Njemačka započele sa zajedničkim programom kako bi konstruirale zrakoplov s dometom od 500 nautičkih milja koji bi mogao prevesti 200 putnika. Za referentne zrakoplove su uzeti Airbus A310 i Tupolev TU-204 koji bi spremnike za tekući vodik smjestili na kabinu zrakoplova. Sličan se dizajn kasnije iskoristio za europski projekt pod nazivom "Cryoplane" (čiji je prototip prikazan na slici 19.) koji je predvodio Airbus Deutschland, a ujedinjavao je 35 partnera iz industrije. Studija projekta je procijenila temeljne metrike povezane s uvođenjem tekućeg vodika, kao i sigurnosne standarde koji su bili uspoređeni s onima za mlazna goriva, naglašavajući potrebu za posebnom pažnjom pri rukovanju s vodikom.

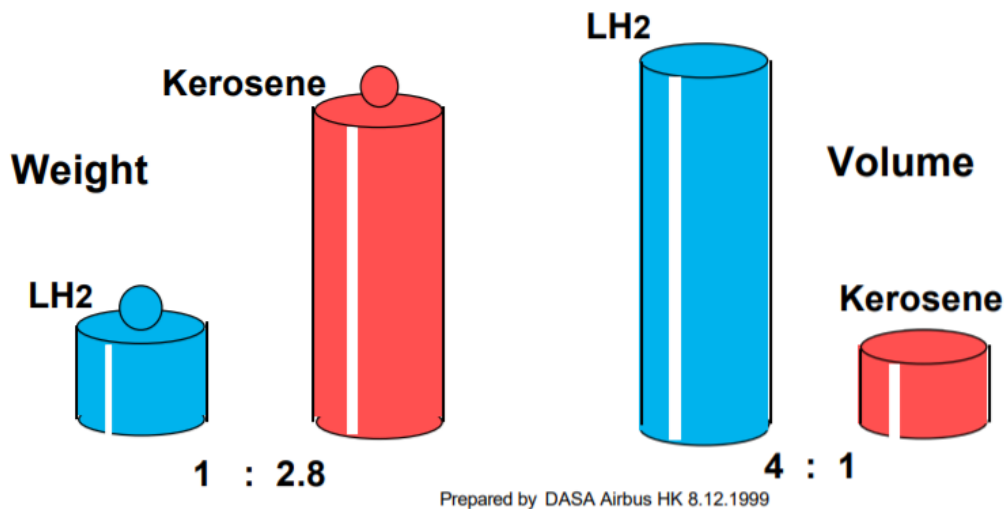


### Slika 19. Dizajn cryoplanea

Izvor: <https://www.foi.se/rest-api/report/FOI-R--1636--SE>

Produkcija tekućeg vodika može se realizirati na više načina, no potrebno je naći kombinaciju koja će ekonomski i ekološki biti najbolje održiva. Potrošnja energije i emisije onečišćujućih tvari povezane s proizvodnjom moraju se uzeti u obzir pri ocjenjivanju potencijalnog izvora vodika. Razne tehnologije produkcije su istraživane kao što su fotolitički, biološki, elektrolitički, termokemijski i kemijski procesi, no najbolji način produkcije je onaj vezan za fosilna goriva kao što su nafta i ugljen i obnovljive izvore energije kao što su voda, biomasa, solarna energija i energija vjetra [27].

Tekući vodik ima 4 puta veći volumen od kerozina za proizvodnju iste količine energije, no ima 2.8 puta manju masu kao što je prikazano na slici 20. To predstavlja problem, zato što spremnici za gorivo kod zrakoplova pokretanih na vodik zahtijevaju i veći volumen. Zato su spremnici na zrakoplovima dizajnirani na dva načina: ne-integralno i integralno. U ne-integralnom dizajnu spremnici su odvojeni trupa zrakoplova. Oni se obično montiraju na konstrukciju zrakoplova, iznad ili ispod krila tako da narušavaju aerodinamičnost zrakoplova što nije idealno. S druge strane kod integralnog dizajna spremnici nalaze se unutar kabine zrakoplova. Tako se rješava i problem držanja tekućeg vodika na odgovarajućoj temperaturi od  $-253^{\circ}\text{C}$  [26], zato što se unutar kabine temperatura može lakše održavati različitim rashladnim tehnikama [27].



Slika 20. Razlika mase i volumena između kerozina i vodika iste energije

Izvor: [https://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/dglr/hh/text\\_2001\\_12\\_06\\_Cryoplane.pdf](https://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/dglr/hh/text_2001_12_06_Cryoplane.pdf)

Veliku ulogu u držanju tekućeg vodika na odgovarajućoj temperaturi i osiguravanju sigurnosnih standarda ima izolacija spremnika. Materijali koji se koriste u spremnicima trebaju ublažavati izgaranje vodika i smanjiti prijenos topline. Postoje 3 vrste izolacije tekućeg vodika, a to su:

- višeslojna izolacija: sastoji se od stotinjak slojeva različitih materijala kao što su poliester, staklena vuna i razni metali. Iznad unutarnjeg sloja nalazi se reflektivna folija koja minimizira prijenos zračenja. Ova vrsta izolacije ne radi dobro pod visokim tlakom.
- vakuumska izolacija: izvodi se pumpanjem zraka koje u spremniku stvara vakuum. Vanjski zrak ne smije doći u kontakt s vakuumom pa se zato koriste jači materijali koji povećavaju masu ove vrste izolacije.
- izolacija pjenom: pjena se stavlja između unutarnjih i vanjskih stijenki. Vanjska stijenka se sastoji od tankog metala, tako da je ova izolacija jeftinija i lakša od ostalih tipova, ali ovisi o razini isparavanja.

Kako bi se tekući vodik mogao ukomponirati u sadašnji zračni promet bit će potrebno unaprijediti tehnologije motora zrakoplova. To će utjecati na podsisteme kao što su vodovi za gorivo, komora za izgaranje i APU. Prednost se nalazi u potpunoj eliminaciji emisija CO<sub>2</sub> na zemlji. ATM i operativne procedure će se također trebati unaprijediti. Tijekom pokretanja zrakoplova, onečišćenje okolnog zraka unutar vodova za gorivo će predstavljati rizik, jer se može dogoditi povratni protok plina natrag u opremu ili dovod. To se može spriječiti ispiranjem inertnim plinom kao što je dušik. Poželjno je i prethodno zagrijavanje tekućeg dušika prije ulaska u komoru za izgaranje, što se može izvesti s izmjenjivačem topline koji može uhvatiti toplinu iz toplih dijelova motora, pogotovo kada su motori hladni.

Izgaranje vodika u zrakoplovnim motorima nailazi na probleme veće od miješanja goriva sa zrakom. Korištenje tekućeg vodika kao goriva u današnjim zrakoplovima zahtjeva zamjenu komore za izgaranje kako bi se postigla optimalna efikasnost. Korištenjem vodika u konvencionalnim komorama za izgaranje (koje koriste kerozin) povećavaju se emisije NO<sub>x</sub>-a.

Različite studije su se provele kako bi se omogućilo povećanje učinkovitosti izgaranja i stabilnosti plamena te smanjila buka. To se omogućilo suhim izravnim ubrizgavanjem (engl. lean direct injection – LDI) i konceptom mikromiješanja (engl. micro-mix concept). Oba načina imaju cilj smanjiti prisutnost velikih plamenova kako bi se smanjile NO<sub>x</sub> emisije, uz istodobno smanjenje povratnog protoka plina. To se postiže izmjenom i povećanjem intenziteta mješavine, jer NO<sub>x</sub> ovisi o vremenu zadržavanja i temperaturi.

Kako bi se korištenje tekućeg vodika proširilo zračne luke će se trebati razviti u pogledu održavanja letova na vodik osiguravajući potrebno održavanje i potpore zrakoplova na takav pogon. Integracija vodikovih sustava goriva zahtijevat će od zračnih luka usvajanje novih tehnologija i sustava kao što su integrirani logistički i opskrbeni lanci koji mogu zadovoljiti zahtjeve operatora zrakoplova na vodik s postrojenjem za proizvodnju i skladištenje vodika na licu mjesta. To će trebati uvesti više aerodroma (prvenstveno veći aerodromi) kako bi vodik postao komercijalno održiv. Letovi bi se trebali temeljiti na hub and spoke modelu, gdje bi središnje mjesto ili čvorište (hub) bio centar za opskrbu i održavanje zrakoplova na vodik. Takva praksa bi olakšala uvođenje ovog alternativnog goriva jer sve (pogotovo manje zračne luke) ne bi trebale puno ulagati u infrastrukturu, nego u napore za stabilnu i pouzdanu mrežu [27].

Radi problema u transportu tekućeg vodika, produkcija i lokacija spremišta goriva trebala bi se nalaziti u području bliskom zračnoj luci. Lokaciju spremnika treba posebno pažljivo razmotriti. Cjevovod treba sadržavati odgovarajuću izolaciju kako bi se tekući vodik mogao

održati na  $-253^{\circ}\text{C}$ . On se treba sastojati od tri cijevi, jednih koje udovoljavaju zahtjevima za transport, drugih koje sakupljaju ispareni vodik i trećih u slučaju kvara.

Često pogrešno shvaćanje je da je vodik opasniji od fosilnih goriva, najčešće zbog nesreće Hindenburga 1937. [27], no nove studije su pokazale kako je vodik sigurniji od kerozina [27]. Primjer je prikazan na slici 21. Jedan od razloga tomu su čvršći spremnici za tekući vodik koji se teže mogu oštetiti u slučaju izvanrednog događaja. Nadalje, u slučaju izlivanja vodik ne kontaminira vodu i zemlju kao što bi to učinio kerozin, a u slučaju eksplozije, toplina koju vodik emitira je 10 puta manja od one koju emitira eksplozija kerozina. S druge strane problemi se nalaze u činjenici da vodik može lako proći kroz zaštitne linije ili spremnik, a curenje je teško identificirati. Vodik je također opasan pri dodiru jer zbog svoje niske temperature može uzrokovati teške ozeblinae na koži. Stoga se komponente kao što su na primjer pumpe i cijevi zahtijevaju vrlo precizan inženjering provođenjem određenih udaljenosti zbog sigurnosti i zaštite [27].



Photo 1 - Time: 0 min, 0 sec - Hydrogen powered vehicle on the left. Gasoline powered vehicle on the right.



Photo 3 - Time: 1 min, 0 sec - Hydrogen flow is subsiding, view of gasoline vehicle begins to enlarge



Photo 2 - Time 0 min, 3 seconds - Ignition of both fuels occur. Hydrogen flow rate 2100 SCFM. Gasoline flow rate 680 cc/min.



Photo 6 - Time: 2 min, 20 sec - Deflagration in the interior, following frame shows flames exiting around edges of trunk lid.

**Slika 21.** Razlika između izgaranja automobila na vodik (lijevo) i benzin (desno)

Izvor: [26]

## 6.2. Električna energija

Uz današnju mogućnost korištenja goriva upadnog koncepta, potrebna je alternativa koja će u budućnosti imati još veći utjecaj na smanjenje emisija, tj. njihovu potpunu eliminaciju. Vrlo perspektivna tehnologija koja se danas intenzivno proučava je pogon zrakoplova na električnu energiju. Osim otvaranja novih poslovnih mogućnosti, implementaciju tiših zrakoplova i potencijalno sigurnijeg leta, ova tehnologija bi također mogla zadržati udio zrakoplovstva u emisijama na sadašnjim razinama, dok druge industrije postaju čišće. No kao i sva alternativna goriva, razvitak zrakoplova na električni pogon nailazi na mnogo prepreka. To uključuje gustoću energije baterija, učinkovitost električnih sustava i njihove integracije te učinkovita rješenja vezana za regulativu i plovidbenost koja bi omogućila nove pogonske sustave i arhitekture [30].



**Slika 22.** Extra 300LE električni zrakoplov

Izvor: <https://www.aerospace-technology.com/projects/extra-330le-electric-aircraft/>

Glavni i najveći problem koji koči razvitak pogona zrakoplova na električnu energiju je nedostatak potrebne snage za let. Usporedivši mali zrakoplov koji koristi klipni motor s onim koji koristi litij-ionske baterije može se izračunati kako zrakoplov na fosilno gorivo daje 50 puta više energije po jedinici mase od električne energije. No, postoji razlika u efikasnostima motora s unutarnjim izgaranjem i elektromotora. Motor s unutarnjim izgaranjem tipičnog klipnog motora (koji koristi Cirrus SR 22) 29% energije goriva pretvara u mehaničku energiju. 71% energije goriva izgubi se toplinom koja izlazi kroz ispušnu cijev, sustav za hlađenje i trenje. S druge strane Siemens SPD260 elektromotor instaliran na eksperimentalnom zrakoplovu Extra 300LE prikazanom na slici 22. radi s efikasnošću od 95%. Kada se razmotre



efikasnosti na kraju može se utvrditi kako zrakoplov na fosilno gorivo daje 15 puta više energije po jedinici mase od električne energije kao što je prikazano u tablici 2 [31].

**Tablica 3.** Razlika u specifičnim energijama motora s unutarnjim izgaranjem s 29% efikasnosti i elektromotora s 95% efikasnosti.

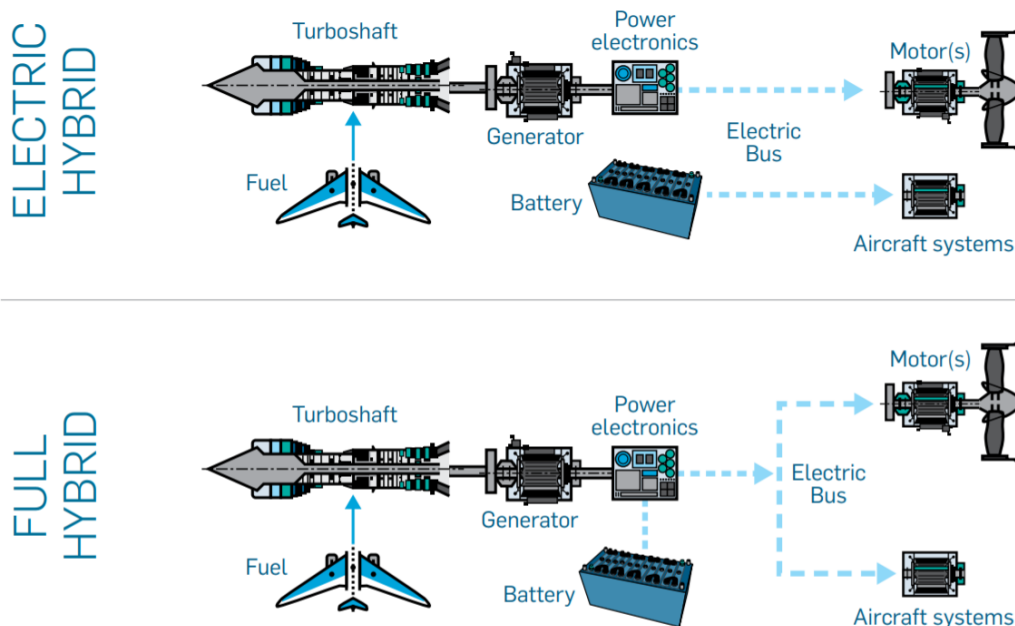
Vrsta pogona	Specifična energija
Motor s unutarnjim izgaranjem (29% efikasnosti)	3,625 Wh/kg
Elektromotor (95% efikasnosti)	237 Wh/kg
Omjer specifičnih energija:	15

Izvor: [31]

Čak i uz ovaj nevjerojatan napredak izazvan većom učinkovitošću elektromotora, vrhunska litij-ionska baterija dostupna u 2017. godini je 13 puta teža od ekvivalentne količine zrakoplovnog goriva za istu količinu pohranjene energije. Cirrus SR 22 ima spremnike za gorivo koji mogu iskoristiti 250 kg AVGAS-a za maksimalno vrijeme leta od 4.4 sata. Ako se spremnici goriva zamijene s 250 kg teškim Li-ion baterijama (tehnologijom iz 2017.), vrijeme leta bilo bi ograničeno na 20 minuta. To je problem koji koči litij-ionske baterije za implementaciju u zračni promet.

Prijelaz na električni pogon zahtijeva bolje skladištenje električne energije prije nego što postane održiva alternativa umjesto motora na fosilna goriva, no budućnost je optimistična. S nekolicinom novih dobavljača koji pokušavaju zauzeti svoju poziciju na budućim tržištima vrijedim 30 milijardi dolara, očekivana su poboljšanja vezana za snagu i težinu baterija. 2008. godine specifična energija litij-ionskih baterija iznosila je 117 Wh/kg, ona se udvostručila do 2015., dosegnuvši 250 Wh/kg, tako da se u budućnosti očekuju još veća poboljšanja. Postoje i druge tehnologije baterija koje su u fazi razvoja kao što su cink-zrak, natrij-ion, i natrij-kisik baterije. Ovakvim tempom do sredine 2020-ih se mogu očekivati nove baterije (najvjerojatnije različite od litij-ionskih), ćelije i kondenzatore koji bi zajedničkim naporima mogli omogućiti specifičnu energiju od 1.000 Wh/kg [31].

Predviđanja o tome kada će odgovarajuće baterije biti dostupne za potpuno električne zrakoplove, pa čak i specifične tehnologije koje će se koristiti ne mogu se s točnošću potvrditi. Potpuna integracija sa zrakoplovom vjerojatno će se protezati i do 2040-ih. Zato bi se najprije trebalo iskoristiti rješenje hibridnog pogona. To bi doprinijelo značajnom smanjenju emisija te bi omogućilo bolji razvitak električnih motora i električne energije za potpuni pogon zrakoplova. U hibridnom sustavu plinska turbina i električni generator sastavljeni su zajedno. Kerozin, koji bi mogao uključivati biogoriva za bolju redukciju emisija, pokreće turbinu koja zatim pokreće električni generator. Energetski elektronički sustav dalje prenosi električnu energiju na nove električne motore kako bi se osigurao potisak. Sustav eklektičnog hibrida može proširiti upotrebu baterija na napajanje ostalih sustava na zrakoplovu, dok bi sustav potpunog hibrida kombinirao snagu dostupnu od generatora i baterija za napajanje svih sustava zrakoplova u omjeru ovisnom o fazi leta (sustavi prikazani na slici 23.) Obije solucije mogu se zajednički opisati kao hibridna rješenja, s velikom vjerojatnošću da će testiranje prototipa omogućiti izravno korištenje potpunog hibrida [32].



**Slika 23.** Razlika između sustava električnog i potpunog hibrida

Izvor: [32]

Primjer projekta koji se fokusira na stvaranje potencijalnog električnog zrakoplova je Airbusov E-Fan projekt. E-Fan je prvi puta prezentiran na Air Showu u Parizu 2011. godine kao električni zrakoplov s dva sjedala i ventilatorskim motorima (slika 24.). Ovim projektom obavljen ključni korak prema uvođenju električnog pogona za veće regionalne zrakoplove s kapacitetom od 100 sjedala. Inovativna tehnologija E-Fan projekta služi kao poticaj za istraživanja u električnog pogona te pomaže u promicanju certificiranja električnih koncepata leta. Zrakoplov se sastoji od dva elektromotora koji isporučuju kombiniranu snagu od 60 kW, pri čemu je svaki propeler opremljen s mogućnosti promjene nagiba. Električna energija za te pokretanje motora dolazi iz akumulacijskog sustava zrakoplova čiji je kapacitet povećan za 60% od prvog leta 2014. godine.

U svojoj izvornoj konfiguraciji E-Fan je koristio niz litij-polimernih baterija smještenih unutar krila, no E-Fan je od tada prešao na snažniji sustav litij-ionskih baterija od 2 982 ćelija kapaciteta 2.8 ampera na sat, što je bila ključna nadogradnja koja je omogućila let zrakoplovom preko La Manchea 2015. Time je postao prvi svjetski, potpuno električni, dvomotorni avion koji je vlastitom snagom prešao kanal. U travnju 2016. Airbus Grupa je stupila u suradnju sa Siemensom s ciljem razvoja hibridnih električnih pogonskih sustava s različitim arhitekturama i veličinama zrakoplova u drugom koraku prema zrakoplovstvu bez emisija [15].

Sve u svemu pogon zrakoplova na električnu energiju zahtjeva još puno istraživanja, eksperimentiranja i certificiranja kako bi se mogao iskoristiti u komercijalne svrhe. Za sada se njegova namjena temelji na malim, osobnim zrakoplovima, no otkrićem novih baterijskih tehnologija i načina za povećanje specifične energije njihov razvitak će rezultirati u eliminaciji emisija i čišćoj budućnosti.



**Slika 24.** Airbus E-Fan

Izvor: <https://www.telegraph.co.uk/news/aviation/11730473/Watch-live-Airbus-E-Fan-to-fly-across-English-Channel.html>

### 6.3. Solarna energija

Pokretanje zrakoplova solarnom energijom također je mogućnost koja se može realizirati. Energija kojom Sunce zagrije Zemljinu površinu u jednome satu veća je od sume energije koju iskoristi cijela svjetska populacija u godini dana. To čini solarnu energiju vrlo dobrom opcijom za pretvaranje u koristan pogon za zrakoplove. Solarni zrakoplov prikuplja energiju iz sunca pomoću solarnih ćelija koja se zatim koristi za pokretanje elektromotora. Takvi zrakoplovi skladište višak energije u bateriju za kasnije korištenje. Zbog drastičnog povećanja prometa u svijetu ovakva bi se tehnologija mogla iskoristiti za robni i poštanski transport na kraćim udaljenostima. Do sada je nekoliko solarnih zrakoplova razvijeno koji su uspješno poletjeli. Solarne panele trebaju prekriti cijelu površinu krila koje bi energiju zračenja pretvarale u električnu energiju koja pokreće elektromotor. Propeler koji je montiran na osovina motora kontinuirano proizvodi potisak [33].

Primjer uspješnog korištenja zrakoplova na solarni pogon je u prvom letu oko svijeta na solarnu energiju 2016. godine. Piloti i osnivači tvrtke Solar Impulse Bertrand Piccard i André Borschberg poletjeli su iz Abu Dhabija za Hawaii i natrag, prešavši 40 000 km kako bi promovirali korištenje obnovljivih izvora energije. Zrakoplov koji je prikazan na slici 26. se sastojao od 4 propelera s baterijama, 17 248 solarnih ćelija s rasponom krila od 72 m. Maksimalno vrijeme u letu je iznosilo 117 sati i 52 minute, a zrakoplov se kretao srednjom brzinom od 75 km/h. Piccard i Borschberg su ovim pothvatom dokazali kako solarna energija ima velik potencijal za primjenu u zračnom prometu [34].



**Slika 25.** Cochin International Airport

Izvor: <https://www.bbc.com/news/world-asia-india-34421419>



**Slika 26.** Solarni zrakoplov tvrtke Solar Impulse

Izvor: <https://www.dnaindia.com/world/report-solar-impulse-takes-off-on-next-leg-of-round-the-world-flight-2208384>

Solarna energija se ne treba limitirati samo na korištenje za pogon zrakoplova. Velik potencijal nalazi se u korištenju solarnih panela na aerodromima. Primjer takvog aerodroma je Cochin International Airport u Indiji koji je prikazan na slici 25. To je prvi aerodrom u svijetu koji svu električnu energiju koristi pretvorbom iz solarnih panela. Elektrana uz teretni terminal

broji 46 150 solarnih panela koje su postavljene na površinu od 182 100 m<sup>2</sup> uz pomoć kojih može vršiti sve operativne funkcije. Ova je solarna elektrana do sada uštedjela 550 Mt CO<sub>2</sub> emisija čime je značajno doprinijela naporima njihovog smanjenja. Ova elektrana će godišnje proizvesti dovoljno električne energije od Sunca za napajanje 10.000 domova u tom periodu. Tijekom sljedećih 25 godina, ovaj projekt zamijenit će potrebu za emisijom ugljičnog dioksida iz termoelektrana na ugljen za više od 300.000 tona, što je ekvivalentno sadnji 3 milijuna stabala [15].

## 6.4. Nuklearna energija

Nuklearna energija za pokretanje zrakoplova ima velik potencijal, a najviše je razmatrana u vojne svrhe. Prošli i sadašnji koncepti nuklearne energije temelje se na fisiji. Fisija je proces razdvajanja atoma u dva manja fragmenta. Rezultat je eksplozija topline koja se može pretvoriti u iskoristivu energiju. Prva istraživanja su započela 1946. godine kada je američki general Curtis LeMay pokrenuo *Nuclear Energy Propulsion of Aircraft* (NEPA). Istraživanja su razmatrala mogućnosti za razvoj bombardera na nuklearnu energiju koji bi imao potencijal za neograničen domet. Problem se nalazio u izoliranju flote od radioaktivnog zračenja uz očuvanje težine s kojom zrakoplov može poletjeti. Razvijanje strategije u slučaju pada zrakoplova također je problem koji je zadao velike probleme u implementaciji ovog alternativnog goriva.

Što se tiče načina korištenja nuklearne energije za pokretanje zrakoplova, razvila su se dva rješenja. Prvo rješenje je razvila tvrtka General Electric gdje bi nuklearni reaktor direktno grijao zrak koji bi pokretao zrakoplov. S druge strane tvrtka Pratt & Whitney razvila je rješenje u kojemu bi se koristilo posredno sredstvo kao što je tekući metal koji bi prenosio toplinu u zatvorenom sustavu, što bi smanjilo izloženost radijaciji. Na kraju su obustavljena istraživanja zbog političkih tenzija SAD-a s ostalim državama.

Danas su zrakoplovi na nuklearni pogon vjerojatniji i atraktivniji nego ikad. Razlog tomu su visoka razvijenost tehnologija elektromotora, nuklearnih reaktora te daljinskog upravljanja zrakoplovima (engl. *remotely piloted aircraft* – RPA prikazan na slici 27.). Tehnologijom daljinskog upravljanja zrakoplovom riješio bi se problem izloženosti flote radijaciji, no nastaje drugi kao što je prijenos radijacije na sam zrakoplov. Nuklearna energija ima mnoštvo problema koji uključuju velike političke rizike i javni nadzor, no najčešća pitanja koje se postavljaju su vezana za pad i otmicu zrakoplova. Sva ta pitanja vezana za sigurnost trebala bi se rješavati i prevladavati razvojem programa [35].



**Slika 27.** Zrakoplov na daljinsko upravljanje

Izvor: <https://www.asd-europe.org/asd-welcomes-eus-initiative-on-remotely-piloted-aircraft-systems>

## 7. Zaključak

Konstantnim povećanjem zračnog prometa dolazi do potrebe pronalaska alternativnog rješenja za smanjenje emisija, ponajprije CO<sub>2</sub> koji se najviše proizvodi letom zrakoplova na kerozin. Potrebno je doći do kratkoročnih, ali i dugoročnih rješenja za ovaj problem. Faktor koji koči brzu i efikasnu implementaciju alternativnih goriva je niska cijena i dostupnost fosilnih goriva koja i dalje ostaju prva opcija za većinu aviokompanija.

Što se tiče kratkoročnih rješenja, moguća je implementacija navedenih tehnoloških i operativnih rješenja koja ne zahtijevaju dugotrajnu certifikaciju koju trebaju proći alternativna goriva, a pogotovo ona koja zahtijevaju zamjenu zrakoplovnih motora. Kao kratkoročno rješenje trebalo bi se ozbiljno posvetiti širem uvođenju *drop-in* SAF-a koji ne zahtjeva modifikacije na zrakoplovnim motorima i može se lako implementirati u redovne linije. Inicijativu su pokazali vodeći zračni prijevoznici koji počinju uvoditi regularne letove na biogoriva, što bi trebali pratiti i ostali prijevoznici, no tu se nalazi ekonomski problem. No ekonomski problemi mogu biti riješeni raznim poticajima što od vlada, što od zračnih luka za korištenje alternativnih goriva u komercijalnim letovima.

Dugoročno rješenje fokusira se na eliminiranje emisija ugljika iz zrakoplovnih motora, cilj koji mogu ostvariti tekući vodik, električna, solarna i nuklearna energija. Obećavajući su mnogobrojni projekti koji su se u zadnjih nekoliko godina fokusirali na razvoj zrakoplova na električnu energiju. Oni pokazuju svijetlu budućnost i mogućnost eliminacije emisija stakleničkih plinova u zračnom prometu. Problem proizlazi u nedovoljnoj razvijenosti tehnologija kako bi se električna energija implementirala u komercijalno zrakoplovstvo za prijevoz većeg broja putnika, no brojna istraživanja mogu to promijeniti.

Sve u svemu potrebni su veliki naponi za uspješnu implementaciju alternativnih goriva u zračnom prometu, pogotovo zbog dugotrajne i rigorozne certifikacije, ali i ekonomske isplativosti. No, to ne koči brojne tvrtke koje i dalje provode temeljita i kvalitetna istraživanja kako bi alternativni izvori energije postali održivo rješenje u smanjenju emisija zračnog prometa. Europski cilj za godišnju proizvodnju od 2 milijuna tona SAF-a u civilnom zračnom prometu u 2020. je definitivno ostvariv, dok se cilj za ostvarenje 40 % udjela održivih goriva do 2050. ne može sa sigurnošću potvrditi.

## Literatura

- [1] European Aviation Safety Agency. Preuzeto sa: [https://www.easa.europa.eu/eaer/system/files/usr\\_uploaded/219473\\_EASA\\_EAER\\_2019\\_WEB\\_HI-RES\\_190311.pdf](https://www.easa.europa.eu/eaer/system/files/usr_uploaded/219473_EASA_EAER_2019_WEB_HI-RES_190311.pdf) [Pristupljeno: svibanj 2019.]
- [2] International Civil Aviation Organisation. Preuzeto sa: <https://www.icao.int/Newsroom/Pages/Solid-passenger-traffic-growth-and-moderate-air-cargo-demand-in-2018.aspx> [Pristupljeno: svibanj 2019.]
- [3] European Aviation Safety Agency. Preuzeto sa: <https://www.easa.europa.eu/eaer/topics/overview-aviation-sector/emissions> [Pristupljeno: svibanj 2019.]
- [4] Air Transport Action Group. Preuzeto sa: <https://www.atag.org/facts-figures.html> [Pristupljeno: svibanj 2019.]
- [5] Project Clean Air. Preuzeto sa: <http://www.project-cleanair.eu/measurements/documents/Air%20pollution%20in%20airports.pdf> [Pristupljeno: svibanj 2019.]
- [6] Preuzeto sa: <https://www.environment.gov.au/protection/publications/factsheet-nitrogen-dioxide-no2> [Pristupljeno: svibanj 2019.]
- [7] Preuzeto sa: <https://blissair.com/what-is-pm-2-5.htm> [Pristupljeno: svibanj, 2019.]
- [8] Preuzeto sa: [https://afdc.energy.gov/files/u/publication/egse\\_airports.pdf](https://afdc.energy.gov/files/u/publication/egse_airports.pdf) [Pristupljeno: srpanj, 2019.]
- [9] Preuzeto sa: <https://www.nlr.org/areas-of-change/increasing-single-engine-taxi-operations-taxi-inboard-engines-4-engine-aircraft/> [Pristupljeno: srpanj, 2019.]
- [10] Preuzeto sa: <https://www.livescience.com/37743-greenhouse-effect.html> [Pristupljeno: srpanj, 2019.]
- [11] Lee D., Fahey D., Forster P., Newton P., Wit R., Lim L., Owen B., Sausen R. Aviation and global climate change in the 21st century. Atmospheric Environment. 2009.
- [12] Preuzeto sa: [https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/contrails\\_k-12.pdf](https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/contrails_k-12.pdf) [Pristupljeno: srpanj, 2019.]
- [13] Preuzeto sa: <https://www.co2offsetresearch.org/aviation/Contrails.html> [Pristupljeno: srpanj, 2019.]
- [14] Preuzeto sa: <https://www.iea.org/tcep/transport/aviation/> [Pristupljeno: srpanj, 2019.]
- [15] Preuzeto sa: <https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ICAO%20Environmental%20Report%202016.pdf> [Pristupljeno: srpanj, 2019.]
- [16] Preuzeto sa: <https://www.eurocontrol.int/concept/continuous-climb-and-descent-operations> [Pristupljeno: srpanj, 2019.]



- [17] Preuzeto sa: [https://www.icao.int/environmental-protection/knowledge-sharing/Docs/Sustainable%20Aviation%20Fuels%20Guide\\_vf.pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/knowledge-sharing/Docs/Sustainable%20Aviation%20Fuels%20Guide_vf.pdf) [Pristupljeno: srpanj, 2019.]
- [18] Hileman, J. I., Donohoo, P. E., & Stratton, R. W. Energy Content and Alternative Jet Fuel Viability. *Journal of Propulsion and Power*, 2010;26(6): 1184–1196.
- [19] Preuzeto sa: <https://www.nap.edu/read/23490/chapter/8#72> [Pristupljeno: srpanj, 2019.]
- [20] Preuzeto sa: <https://www.nap.edu/catalog/23490/commercial-aircraft-propulsion-and-energy-systems-research-reducing-global-carbon> [Pristupljeno: srpanj, 2019.]
- [21] Preuzeto sa: <https://markets.businessinsider.com/commodities/oil-price?type=wti> [Pristupljeno: srpanj, 2019.]
- [22] Preuzeto sa: <https://www.iata.org/whatwedo/environment/Pages/sustainable-alternative-jet-fuels.aspx> [Pristupljeno: srpanj, 2019.]
- [23] Preuzeto sa: <https://www.iata.org/policy/environment/Documents/saf-what-is-saf.pdf> [Pristupljeno: srpanj, 2019.]
- [24] Preuzeto sa: <https://www.iata.org/policy/environment/Documents/saf-technical-certifications.pdf> [Pristupljeno: srpanj, 2019.]
- [25] Preuzeto sa: <https://boeing.mediaroom.com/2008-02-24-Boeing-Virgin-Atlantic-and-GE-Aviation-to-Fly-First-Commercial-Jet-on-Biofuel> [Pristupljeno: srpanj, 2019.]
- [26] <https://thepointsguy.com/news/how-sustainable-fuels-are-powering-airliners/> [Pristupljeno: srpanj, 2019.]
- [27] Preuzeto sa: [https://www.researchgate.net/publication/268814011\\_Challenges\\_and\\_Benefits\\_offered\\_by\\_Liquid\\_Hydrogen\\_Fuels\\_in\\_Commercial\\_Aviation](https://www.researchgate.net/publication/268814011_Challenges_and_Benefits_offered_by_Liquid_Hydrogen_Fuels_in_Commercial_Aviation) [Pristupljeno: srpanj, 2019.]
- [28] Preuzeto sa: [https://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/dglr/hh/text\\_2001\\_12\\_06\\_Cryoplane.pdf](https://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/dglr/hh/text_2001_12_06_Cryoplane.pdf) [Pristupljeno: srpanj, 2019.]
- [29] Preuzeto sa: <https://www.livescience.com/58982-history-of-airship-hindenburg-disaster-photos.html> [Pristupljeno: srpanj, 2019.]
- [30] Preuzeto sa: <https://www.rolandberger.com/en/Insights/Global-Topics/Electric-Propulsion/> [Pristupljeno: srpanj, 2019.]
- [31] Preuzeto sa: [https://www.researchgate.net/publication/326262874\\_General\\_Aviation\\_2025\\_-\\_A\\_study\\_for\\_electric\\_propulsion](https://www.researchgate.net/publication/326262874_General_Aviation_2025_-_A_study_for_electric_propulsion) [Pristupljeno: srpanj, 2019.]
- [32] Preuzeto sa: <https://www.atkinsglobal.com/~media/Files/A/Atkins-Corporate/Electrification%20White%20Paper%20-%20digital.pdf> [Pristupljeno: srpanj, 2019.]

[33] Preuzeto sa:

<https://pdfs.semanticscholar.org/569c/28302294ba1cb611bfe8432a22dd27aa7571.pdf>

[Pristupljeno: srpanj, 2019.]

[34] Preuzeto sa: <https://aroundtheworld.solarimpulse.com/adventure> [Pristupljeno: srpanj, 2019.]

[35] Preuzeto sa: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/1031576.pdf> [Pristupljeno: srpanj, 2019.]

## Popis slika

<b>Slika 1.</b> Prognozirani rast broja putnika do 2036. godine (ovisno o politici tržišta) u milijardama .....	2
<b>Slika 2.</b> Količina emisija prosječnog dvomotornog mlaznog zrakoplova sa 150 putnika po jednosatnom letu .....	3
<b>Slika 3.</b> Broj i masa čestica u zraku na stajanci .....	5
<b>Slika 4.</b> Vozilo za prijevoz prtljage na električnu energiju na zračnoj luci Seattle-Tacoma .....	7
<b>Slika 5.</b> Vozilo za vuču zrakoplova koje koristi United Airlines pokretano na električnu energiju .....	8
<b>Slika 6.</b> Kratkoročni kondenzacijski trag .....	10
<b>Slika 7.</b> Dugoročni kondenzacijski trag .....	10
<b>Slika 8.</b> Cirrus oblaci .....	12
<b>Slika 9.</b> Potrošnja goriva u međunarodnom zračnom prometu ovisna o tehničkim i operativnim unapređenjima u megatonama (Mt) .....	13
<b>Slika 10.</b> Količina emisija ugljičnog dioksida (CO <sub>2</sub> ) u međunarodnom zračnom prometu do 2050. ....	14
<b>Slika 11.</b> Preklopna krilca Boeinga 777X .....	16
<b>Slika 12.</b> Razlika između kontinuiranog i konvencionalnog slijetanja .....	17
<b>Slika 13.</b> Dostupnost površina na Zemlji .....	19
<b>Slika 14.</b> Prikaz troškova (kapitalnih i operativnih vezanih i nevezanih za sirovinu) u produkciji održivih zrakoplovnih goriva kao što su šećerna trska, kukuruz i divlje proso u američkim dolarima po galonu .....	21
<b>Slika 15.</b> Razlika u ciklusima produkcije fosilnog (lijevo) i održivog zrakoplovnog goriva (desno) .....	24
<b>Slika 16.</b> Međusobna korelacija sirovina i tehnologija konverzije .....	25
<b>Slika 17.</b> Detaljni prikaz lignoceluloze .....	26
<b>Slika 18.</b> Fischer-Tropsch proces .....	28
<b>Slika 19.</b> Dizajn cryoplanea .....	32
<b>Slika 20.</b> Razlika mase i volumena između kerozina i vodika iste energije .....	32
<b>Slika 21.</b> Razlika između izgaranja automobila na vodik (lijevo) i benzin (desno) .....	34
<b>Slika 22.</b> Extra 300LE električni zrakoplov .....	35
<b>Slika 23.</b> Razlika između sustava električnog i potpunog hibrida .....	37
<b>Slika 24.</b> Airbus E-Fan .....	38
<b>Slika 25.</b> Cochin International Airport .....	39

<b>Slika 26.</b> Solarni zrakoplov tvrtke Solar Impulse .....	39
<b>Slika 27.</b> Zrakoplov na daljinsko upravljanje .....	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 **Analiza primjene alternativnih izvora energije u zračnom prometu**

---

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

Student/ica:

U Zagrebu, 20-08-19

\_\_\_\_\_  
(potpis)