



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

BIOPALIVÁ ČTVRTÉ GENERACE PRO PROUDOVÉ MOTORY

FOURTH-GENERATION BIOFUELS FOR JET ENGINES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

Adam Marko

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE

Ing. Milan Malý, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2024



Zadání bakalářské práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	Adam Marko
Studijní program:	Základy strojního inženýrství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Milan Malý, Ph.D.
Akademický rok:	2023/2024

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Biopalivá čtvrté generace pro proudové motory

Stručná charakteristika problému:

K dosažení uhlíkové neutrality dopravy je nutné zajistit nízkoemisní leteckou dopravu. Kvůli nízké energetické hustotě baterií není ani výhledově možné sestrojít mezikontinentální letadlo čistě na elektrický provoz. Nicméně z budoucích přebytků elektrické energie je možné tuto energii uschovat ve formě kapalných či plyných paliv. Cílem práce je provést rešerši použitelných biopaliv čtvrté generace pro proudové motory s ohledem na nutné konstrukční změny v motorech a nádržích paliva a provést energetickou bilanci perspektivních druhů paliv.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Analýza možných cest pro dekarbonizaci letecké dopravy
- 2) Přehled potenciálně použitelných obnovitelných paliv pro proudové motory (e-fuels, vodík, čpavek atd.)
- 3) Základní energetická bilance nejperspektivnějších paliv
- 4) Diskuse nutných úprav proudového motoru a případně nádržích letadla pro zvolená paliva

Seznam doporučené literatury:

- [1] Brynolf et al., Review of electrofuel feasibility—prospects for road, ocean, and air transport, Prog. Energy, 2022
- [2] Scheelhaase et al., Synthetic fuels in aviation – Current barriers and potential political measures, Transportation Research Procedia, 2019
- [3] Ballal et al., Synthetic fuels in aviation – Current barriers and potential political measures, Fuel, 2023
- [4] Detsios et al., Recent Advances on Alternative Aviation Fuels/Pathways: A Critical Review, Energies, 2023

Termín a odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/2024

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalárska práca sa zaoberá dekarbonizáciou leteckej dopravy a možným použitím biopalív na pohon prúdových motorov. Keďže použitie súčasného paliva, kerozínu, je časovo obmedzené z dôvodu konečných zásob ropy, výskum a testovanie jeho ekologických nástupcov je nutné. Rovnako dôležitý je aj súbežný vývoj kompatibilnej leteckej a letiskovej infraštruktúry, či už vo forme leteckých konštrukcií, motorov a palivového systému ale aj vo forme pozemných podporných zariadení. V prípade prechodu na nový typ leteckého paliva je nutné aby bol technicky vyspelý, finančne dostupný, environmentálne nezávadný, bezpečný a mal široký reťazec dodávateľov. V súčasnosti sa vedecká obec najviac zameriava na použitie udržateľných leteckých palív SAF, vodíka, čpavku, skvapalneného zemného plynu a e-palív. Aby mohli byť zmienené palivá považované za biopalivá, musí byť ich proces výroby uhlíkovo neutrálny a primárnym zdrojom ich výroby musí byť obnoviteľná energia.

Klíúčové slová

Biopalivá, SAF, prúdové motory, dekarbonizácia, energetická bilancia, znižovanie emisií, letecká doprava

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with the decarbonisation of air transport and the possible use of biofuels to power jet engines. As the use of the current fuel, kerosene, is time limited due to finite oil supplies, research and testing of its environmentally friendly successors is necessary. Equally important is the parallel development of compatible aviation and airport infrastructure, both in the form of airframes, engines and fuel systems and ground support equipment. In the event of a transition to a new type of aviation fuel, it is essential that it is technically advanced, affordable, environmentally sound, safe and has a wide supply chain. Currently, the scientific community is most focused on the use of sustainable aviation fuels SAF, hydrogen, ammonia, LNG and e-fuels. To qualify as a biofuel, the production process must be carbon neutral and the primary source of production must be renewable energy.

Key words

Biofuels, SAF, jet engines, decarbonization, energy balance, emission reduction, air transport

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

MARKO, Adam. *Biopaliva čtvrté generace pro proudové motory*. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/158060>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Milan Malý.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením Ing. Milan Malý, Ph.D. a s použitím informačných zdrojov uvedených v zozname.

.....
V Brně dňa 24.mája 2024

.....
Adam Marko

POĎAKOVANIE

Rád by som sa poďakoval vedúcemu bakalárskej práce Ing. Milan Malý, Ph.D. za vedenie pri vypracovaní bakalárskej práce, za jeho cenné rady a pripomienky. Ďalej by som sa rád poďakoval svojej rodine a priateľke za podporu pri štúdiu a vypracovaní bakalárskej práce.

Zoznam skratiek

APU – Pomocná pohonná jednotka

ATJ – Alkohol na letecké palivo

CHJ - Katalytická hydrotermolýza-syntetizovaný kerozín

CSS – Zachytávanie a ukladanie uhlíka

FT – Fischer-Tropschov proces

GSE – Pozemné podporné zariadenie

HEFA – Hydroprocesované estery a mastné kyseliny

HHC-SPK – Hydroprocesovaný uhľovodíkový syntetický parafínový kerozín

HFS-SIP – Hydroprocesing fermentovaných cukrov na syntetické izoparafíny

IAE – Medzinárodná energetická agentúra

IATA – Medzinárodné združenie pre leteckú dopravu

LNG – Skvapatnený zemný plyn

NASA – Národný úrad pre letectvo a vesmír

PtG – Energia na plyn

PtL – Energia na kvapalinu

RWGS – Reverzný vodný posun plynu

SAF – Udržateľné letecké palivo

SMR – Technika parného reformingu metánu

UAV – Bezpilotné lietadlo

Obsah

1. Úvod	10
2. Špecifikácia konvenčne používaného leteckého paliva	12
2.1 Fyzikálne vlastnosti paliva Jet A-1	12
2.1.1. Energetický obsah	12
2.1.2. Kvalita spaľovania	13
2.1.3. Stabilita	13
2.1.4. Stabilita pri skladovaní	13
2.1.5. Tepelná stabilita	13
2.1.6. Viskozita	14
2.1.7. Bod tuhnutia	14
2.1.8. Prchavosť	14
2.1.9. Lubricita	14
2.1.10. Nekorozívnosť	15
2.1.11. Čistota	15
2.2. Výrobné metódy konvenčne používaného leteckého paliva	16
2.2.1. Destilácia	16
2.2.2. Hydrogenizácia (Hydrotreating)	17
2.2.3. Hydrokrakovanie (Hydrocracking)	17
2.3. Konštrukcia prúdového motoru(turbofanu)	18
2.3.1. Ventilátor	18
2.3.2. Kompresor	19
2.3.3. Spaľovacia komora	19
2.3.4. Turbína	19
2.3.5. Dýza	19
3. Prehľad používaných biopalív v leteckej doprave	20
3.1. Biopalivá	21
3.1.1. Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (HEFA)	21
3.1.2. Fischer-Tropsch fuels (FT Fuels)	21
3.1.3. Alcohol-to-Jet (ATJ)	22
3.1.4. Hydroprocessed Fermented Sugars to Synthetic Isoparaffins (HFS-SIP)	22
3.1.5. Iné	22
3.2. Electrofuels(e-Fuels)	23

3.2.1. E – metanol	24
3.2.2. E-kerozín	25
3.3. Vodík.....	26
3.4. Čpavok (Amoniak).....	27
3.4.1. E-čpavok	28
3.5. Elektrifikácia.....	28
3.5.1. Hybridný pohon	28
3.5.2. Plne elektrický pohon	29
3.6. LNG (Liquified Natural Gas)	30
3.6. E-metán	31
3.7. Porovnanie	31
4. Potrebne zmeny v konštrukcií lietadiel.....	33
4.1. Potrebne zmeny na začlenenie SAF.....	33
4.2. Potrebne zmeny na začlenenie kvapalného vodíka a vodíkových článkov.....	33
4.3. Potrebne zmeny na začlenenie kvapalného amoniaku	35
4.4. Potrebne zmeny na začlenenie LNG	36
5. Energetická bilancia palív	37
5.1. Energetická bilancia kerozínu	37
5.2. Energetická bilancia SAF (HEFA)	37
5.3. Energetická bilancia vodíka	38
5.4. Energetická bilancia amoniaku.....	39
5.5. Energetická bilancia LNG	39
5.6. Energetická bilancia e-paliva (e-Kerozínu).....	40
5.7. Porovnanie	40
5.7.1. Porovnanie potrebných plôch dvoch najperspektívnejších biopalív (HEFA/e-Kerozín).....	41
Zhodnotenie.....	42
Záver	43
Zoznam použitých zdrojov.....	44

1. Úvod

Aby sektor dopravy prispel k dosiahnutiu cieľov v oblasti klímy, musí výrazne znížiť emisie skleníkových plynov. Doprava (vrátane cestnej, železničnej, leteckej a námornej) je zodpovedná za približne 24% celosvetových emisií oxidu uhličitého (CO₂) a očakáva sa, že tieto emisie budú bez ďalších opatrení naďalej narastať [1]. Podobne ako v cestnej doprave, aj v námornej a leteckej doprave dominujú práve fosílna palivá [1]. Letecká doprava zmenila spôsob globálneho spojenia a uľahčila presun ľudí a tovaru po celom svete. Letecká doprava ako kľúčový dopravný prostriedok poskytuje rýchly a ľahko dostupný spôsob prepravy výrobkov a ľudí, čím uľahčuje obchod, cestovný ruch a iné sociálno-ekonomické činnosti. Medzinárodné združenie pre leteckú dopravu (IATA) predpovedalo, že počet cestujúcich na celom svete sa do 20 rokov zdvojnásobí z 3,8 miliardy v roku 2016 na 8,2 miliardy do roku 2037. Tento 3,5% ročný nárast je spôsobený očakávaným rastom populácie, zlepšením životnej úrovne a lacnejšími letenkami v nasledujúcich rokoch [2].

Konvenčné palivá pre prúdové motory sú primárne získavané z ropných zdrojov, čo vedie k emisiám značného množstva skleníkových plynov. Spaľovanie týchto palív predstavuje 2-3% celosvetových emisií CO₂. V roku 2022 zaznamenali emisie CO₂ z odvetvia dopravy výrazný nárast, keď dosiahli celkovú globálnu hodnotu 11,2 gigaton [2]. Napriek pokroku v technológiách elektrických vozidiel čelí letecký priemysel značným výzvam pri zavádzaní elektrifikácie. Medzi tieto výzvy patrí nedostatočná infraštruktúra pre elektrickú leteckú dopravu a nepraktickosť používania batérií ako priamej náhrady paliva v lietadlách. Vzhľadom na tieto obmedzenia je čoraz zrejmejšie, že udržateľné letecké palivo (SAF) predstavuje najživotaschopnejšiu trajektóriu na dosiahnutie výrazného zníženia emisií skleníkových plynov v leteckom sektore [2].

Udržateľné letecké palivo (SAF) je čistý obnoviteľný zdroj paliva, ktorý ma porovnateľné chemické vlastnosti ako bežné letecké palivo. Na výrobu udržateľného leteckého paliva je možné použiť niekoľko technológií [2]. Technológia je možné rozdeliť na biologické, termochemické alebo integrované procesy. Biologické procesy zahŕňajú premenu alkoholu na letecké palivo (ATJ) a fermentáciu. Medzi termochemické procesy patrí hydrotermálne skvapalňovanie, pyrolýza, splyňovanie a metódu Fischer-Tropsch (GFT). Metóda výroby udržateľného leteckého paliva pomocou hydrospracovania mastných kyselín (HEFA) premieňa biologické materiály na čistejšie palivo, čím znižuje emisie skleníkových plynov. Avšak táto metóda čelí väčším výzvam, pretože nie je dostatočne rozvinutá na uspokojenie globálnej spotreby leteckého paliva, spotrebováva vysoké množstvo vodíka a vstupné suroviny sú veľmi nákladné. V dôsledku nákladov a problémov so škálovateľnosťou vstupných surovín sa preto skúmajú alternatívne metódy výroby udržateľného leteckého paliva [2].

Vzhľadom na dlhý životný cyklus existujúcej infraštruktúry, leteckej techniky a motorov je zatiaľ veľmi obmedzený rozsah aplikácií nových technológií (ako je priame využívanie elektrickej energie z obnoviteľných zdrojov na elektrický pohon). S ohľadom na potrebu celosvetovo jednotných technických a prevádzkových noriem, by bolo v dohľadnej dobe príliš nákladné prejsť na iné formy nízkouhlíkovej dodávky energie akou je napríklad vodík. Okrem toho, vzhľadom na dlhé časové obdobie potrebné na zavedenie úplne nových konštrukcií lietadiel založených na vodíku a obmedzený uhlíkový rozpočet dostupný pre letecký sektor, by bolo

vodíkové zameranie plytváním uhlíkového rozpočtu v porovnaní s udržateľným leteckým palivom. Inými slovami, aj keď sú dnes e-palivá (SAF) po zavedení uhlíka stále pomerne drahé, je pravdepodobnejšie, že prispesú k celosvetovému úsiliu v oblasti emisií uhlíka v leteectve oveľa skôr ako akékoľvek iné palivá na báze vodíka [3].

Okrem toho je ťažké nájsť nosič energie, ktorý by mal podobné vlastnosti ako letecké palivo, pokiaľ ide o energetický obsah, využiteľnosť a technickú životaschopnosť. V tomto ohľade sa letecká doprava líši od pozemnej dopravy, kde je aj na dnešnej technologickej úrovni možné priame využívanie elektrickej energie ako nosiča energie považovať za osvedčený koncept [3].

2. Špecifikácia konvenčne používaného leteckého paliva

Kerozín, ktorý bol vyrábaný pre knôtové lampy sa používal na pohon prvých turbínových motorov, keďže sa predpokladalo že motory sú relatívne necitlivé na vlastnosti paliva. Kerozín bol zvolený najmä kvôli dostupnosti, pretože si vojnové úsilie vyžadovalo každú kvapku benzínu (ako je možné vidieť na obrázku 1, kerozín nespadá ani do oblasti nafty ani benzínu). Po druhej svetovej vojne začalo americké letectvo používať "wide cut" palivo, čo je v podstate zmes uhľovodíkov, ktorá preklenula oblasti varu benzínu a kerozínu. Aj v tomto prípade bol tento výber podmienený z dôvodu dostupnosti. Predpokladalo sa, že "wide cut" palivo bude dostupné vo väčších množstvách ako samotný benzín alebo kerozín, najmä v čase vojny. Avšak v porovnaní s kerozínovým druhom paliva sa zistilo, že "wide cut" palivo je v prevádzkovej nevýhode z dôvodu vyššej prchavosti [4]. Preto sa letectvo začalo v 70. rokoch 20. storočia vraciť ku kerozínovému typu paliva a dokončilo proces prechodu z "wide cut" paliva (JP-4) na kerozínový typ (JP-8) v celom systéme [4]. Keď sa v 50. rokoch 20. storočia rozvíjal priemysel komerčných prúdových lietadiel, zvolilo sa práve palivo kerozínového typu kvôli najlepšej kombinácii vlastností. "Wide cut" palivo (Jet B) je stále používané v niektorých častiach Kanady a na Aljaške, pretože je vhodné do chladného podnebia. Avšak palivá kerozínového typu Jet A a Jet A-1 prevládajú vo zvyšku sveta [4]. Jet A sa používa v USA, zatiaľ čo vo zvyšku sveta je preferované palivo Jet A-1. Dôležitý rozdiel medzi týmito palivami je, že Jet A-1 má nižší maximálny bod tuhnutia ako Jet A (Jet A: $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, Jet A-1: $-47\text{ }^{\circ}\text{C}$). Vďaka nižšiemu bodu tuhnutia je Jet A-1 vhodnejší na dlhé medzinárodné lety, najmä na polárne trasy v zimnom období [4].

2.1 Fyzikálne vlastnosti paliva Jet A-1

Keďže primárnou funkciou paliva pre prúdové motory je pohon lietadla, energetický obsah a kvalita spaľovania sú jeho kľúčovými vlastnosťami. Ďalšími dôležitými výkonnostnými vlastnosťami sú stabilita, tekutosť, prchavosť, mazivosť, nekoroziivnosť a čistota. Okrem použitia ako zdroj energie, palivo sa používa aj ako hydraulická kvapalina v riadiacich systémoch a ako chladiaca kvapalina pre niektoré komponenty palivového systému [4].

2.1.1. Energetický obsah

Prúdový motor lietadla vyrába energiu premenou chemickej energie uloženej v palive na kombináciu mechanickej energie a tepla. Keďže vo väčšine lietadiel je priestor obmedzený, množstvo energie obsiahnutej v určitom množstve paliva je dôležité. Energetický obsah paliva je možné merať. Je to uvoľnené teplo (nazývané aj spaľovacie teplo), keď sa známe množstvo paliva spáli za určitých podmienok. Množstvo závisí od toho, či voda, ktorá vzniká pri spaľovaní zostáva v parách alebo skondenzuje na kvapalinu. Ak voda skondenzuje do kvapalnej fázy a v procese odovzdá svoje výparné teplo, uvoľnená energia sa nazýva hrubý energetický obsah. Čistý energetický obsah je nižší, pretože voda zostáva v plynnej fáze (vodná para). Keďže prúdové motory vypúšťajú vodu ako vodnú paru, čistý energetický obsah je vhodnou hodnotou na porovnanie palív [4]. Energetický obsah možno vyjadriť buď gravimetricky (energia na jednotku hmotnosti paliva), alebo objemovo (energia na jednotku objemu paliva). Medzinárodné metrické jednotky (SI) sú megajoule na kilogram (MJ/kg) alebo megajoule na liter (MJ/l) [4].

2.1.2. Kvalita spaľovania

Hlavný rozdiel medzi piestovými a prúdovými motormi je v tom, že spaľovanie v piestových motoroch je prerušované a v prúdových motoroch nepretržité. V dôsledku toho majú tieto motory odlišné požiadavky na kvalitu spaľovania paliva. V piestových motoroch je pre dobrý výkon rozhodujúce načasovanie spaľovania. Pri nepretržitom spaľovaní už nie je dôležité načasovanie spaľovania. V prúdovom motore sa na začiatku spaľovacieho procesu tvoria malé uhlíkové častice, ktoré pokračujú v horení pri prechode plameňom a sú úplne spotrebované pri vhodných podmienkach [4]. Ak tieto uhlíkové častice nie sú úplne spotrebované, môžu byť škodlivé pri narážaní na lopatky a statory turbíny, čím spôsobujú eróziu [4]. Palivá s vysokým obsahom aromatických látok, najmä palivá s vysokým obsahom naftalénov tvoria viac týchto uhlíkatých častíc. Keďže sú tieto uhlíkaté častice potenciálne škodlivé, celkový obsah aromatických látok aj celkový obsah naftalénov je kontrolovaný [4].

2.1.3. Stabilita

Stabilné palivo je také, ktorého vlastnosti sa nemenia. Ku faktorom, ktoré môžu viesť ku škodlivým zmenám vlastností paliva patria čas (stabilita pri skladovaní) a vystavenie vysokým teplotám (tepelná stabilita). Nestabilita paliva zahŕňa viacstupňové chemické reakcie, z ktorých niektoré sú oxidačné. Hydroperoxydy a peroxydy sú počiatočnými produktami reakcie. Tieto produkty zostávajú rozpustené v palive, avšak môžu napadnúť a skrátiť životnosť niektorých elastomérov palivového systému. Ďalšie reakcie vedú k tvorbe rozpustných gúm a nerozpustných častíc. Tieto produkty môžu upchávať palivové filtre a usadzovať sa na povrchu palivových systémov, čím obmedzujú prietok v kanáloch s malým priemerom [4].

2.1.4. Stabilita pri skladovaní

Nestabilita leteckého paliva počas skladovania nepredstavuje vo všeobecnosti problém, pretože väčšina paliva sa spotrebuje v priebehu niekoľkých týždňov alebo mesiacov od výroby [4]. Letecké palivo, ktoré bolo správne vyrobené a skladované, by malo zostať stabilné najmenej jeden rok. Letecké palivo, ktoré je skladované dlhšie alebo bolo skladované nesprávne by sa malo pred použitím otestovať, či spĺňa všetky platné požiadavky [4].

2.1.5. Tepelná stabilita

Tepelná stabilita je jednou z najdôležitejších vlastností leteckého paliva, pretože slúži ako médium na výmenu tepla v motore a v trupe lietadla. Letecké palivo sa používa na odvod tepla z motorového oleja, hydraulikkej kvapaliny a klimatizačného zariadenia. Ako je uvedené vyššie, výsledné zahrievanie paliva urýchľuje reakcie, ktoré vedú k tvorbe gúm a pevných častíc. Tieto gumy a častice sa môžu usadzovať [4]:

- na palivových filtroch,
- na tryskách vstrekovačov paliva,
- v riadiacom systéme motora,
- na výmenníkoch tepla.

Tieto usadeniny môžu viesť k prevádzkovým problémom a zvýšenej údržbe. Antioxidanty, ktoré sa používajú na zlepšenie stability pri skladovaní, nie sú vo všeobecnosti účinné pri zlepšovaní tepelnej stability [4].

2.1.6. Viskozita

Viskozita je odpor kvapaliny alebo plynu voči zmene tvaru alebo pohybu susedných častí voči sebe. Znamená aj odpor voči prúdeniu. Obrátená hodnota viskozity je tekutosť, čo je miera jednoduchosti toku. Keďže časť kvapaliny, ktorá sa pohybuje a do určitej miery prenáša aj susedné časti, je možné si viskozitu predstaviť ako vnútorné trenie medzi molekulami. Viskozita je hlavným faktorom pri určovaní síl, ktoré je nutné prekonať pri mazaní a preprave kvapalín v potrubiach [5]. Letecké palivo sa pod vysokým tlakom vstrekuje do spaľovacej časti turbínového motora cez dýzu. Tento systém je navrhnutý tak, aby vytváral jemný rozprašovač kvapôčok paliva, ktoré sa rýchlo odparujú pri zmiešaní so vzduchom. Vzor rozstreku a veľkosť kvapiek je ovplyvnená viskozitou. Ak je príliš vysoká, znovu zapálenie motora počas letu je príliš náročné. Z tohto dôvodu sa vo špecifikáciách leteckého paliva uvádza horná hranica viskozity. Viskozita paliva ovplyvňuje pokles tlaku v potrubí palivového systému. Vyššia viskozita má za následok vyšší pokles tlaku v potrubí, čo si vyžaduje aby palivové čerpadlo pracovalo intenzívnejšie. Viskozita paliva ovplyvňuje aj výkon riadiacej jednotky palivového systému [4].

2.1.7. Bod tuhnutia

Keďže je letecké palivo zložené z niekoľkých stoviek uhľovodíkov, z ktorých má každý vlastný bod tuhnutia, nestáva sa pevným pri jednej teplote ako je to v prípade vody. Počas ochladzovania paliva, uhľovodíkové zložky s najvyšším bodom tuhnutia tuhnú ako prvé a vytvárajú voskové kryštáliky. Ďalšie ochladzovanie spôsobuje tuhnutie uhľovodíkov s nižšími bodmi tuhnutia. Palivo sa tak mení z homogénnej kvapaliny na kvapalinu obsahujúcu niekoľko uhľovodíkových kryštálov. Bod tuhnutia paliva pre prúdové motory je definovaný ako teplota, pri ktorej sa rozpustí posledný kryštál počas zahrievania paliva, ktoré bolo chladené až do vytvorenia kryštálov [4].

2.1.8. Prchavosť

Prchavosť je tendencia paliva vyparovať sa. Na charakterizáciu prchavosti paliva sa používajú dve fyzikálne vlastnosti: výparný tlak a destilačný profil. Prchavejšie palivo má vyšší výparný tlak a nižšie počiatočné destilačné teploty. Prchavosť je dôležitá, pretože palivo sa musí vypariť predtým ako zhorí. Avšak privysoká prchavosť môže mať za následok straty pri odparovaní alebo zablokovanie palivového systému. Prchavosť je jedným z hlavných rozdielov medzi kerozínovým palivom a "wide-cut" palivom. Palivo kerozínového typu je relatívne netrvanlivé. Jeho výparný tlak podľa Reida je približne 1 kiloPascal (kPa). "Wide-cut" palivo má Reidov výparný tlak na úrovni 21 kiloPascalov [4].

2.1.9. Lubricita

Lubricita je schopnosť znižovať trenie medzi pevnými povrchmi pri relatívnom pohybe, takže ju môžeme považovať za meradlo účinnosti materiálu ako maziva. Palivo pre prúdové motory musí mať určitý stupeň lubricity, pretože maže určité pohyblivé časti palivových čerpadiel a jednotiek na reguláciu prietoku. Mechanizmus mazania je kombináciou hydrodynamického a medzného mazania. Pri hydrodynamickom mazaní zabraňuje vrstva kvapalného maziva vzájomnému dotyku medzi protichodnými pohybujúcimi sa povrchmi. Kvapaliny s vyššou viskozitou poskytujú viac hydrodynamického mazania ako kvapaliny s nižšou viskozitou. Hoci špecifikácie leteckého paliva neobsahujú vyslovene spodnú hranicu viskozity, špecifikácia destilácie slúži ako náhradný limit. Prúdové motory sú navrhnuté na prácu s palivami

v normálnom rozsahu viskozity, a preto typické palivá poskytujú primerané hydrodynamické mazanie [4].

2.1.10. Nekorozívnosť

Letecké palivo prichádza pri používaní do kontaktu s mnohými materiálmi. Preto je dôležité, aby nespôsobovalo koróziu žiadneho z týchto materiálov, najmä tých v palivovom systéme lietadla. Palivové nádrže sú zvyčajne hliníkové, ale palivové systémy obsahujú oceľ a iné kovy. Palivové nádrže môžu obsahovať aj tesniace prvky, nátery a elastoméry. Výrobcovia leteckých motorov vykonávajú rozsiahle skúšky kompatibility paliva pred schválením materiálu na použitie v palivovom systéme. Medzi korozívne zlúčeniny potencionálne prítomné v leteckom palive patria organické kyseliny a merkaptány [4].

2.1.11. Čistota

Čistota leteckého paliva znamená neprítomnosť pevných častíc a voľnej vody. Čiastočky hrdze a nečistôt môžu upchať palivové filtre a zvýšiť opotrebenie palivového čerpadla. Okrem toho, že sa voda nedokáže spáliť, zamrzá pri nízkych teplotách, ktoré sa vyskytujú pri letoch vo veľkých výškach. Vzniknutý ľad môže upchávať palivové filtre a brániť prietoku paliva. Voda v palive môže tiež uľahčiť koróziu niektorých kovov a podporuje rast mikroorganizmov [4]. Porovnanie vyššie spomenutých vlastností paliva JET A-1 s vlastnosťami ostatných konvenčne používaných palív je možné vidieť v tabuľke 1.

Tabuľka 1: Porovnanie konvenčne používaných druhov leteckých palív [4]

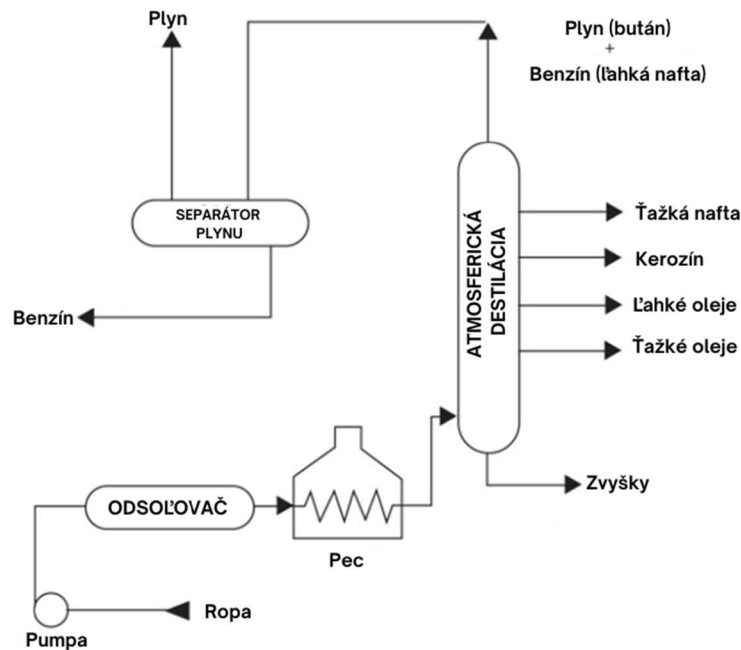
	Palivo	JET A	JET A-1	TS-1	JET B
Špecifikácia	Jednotka	ASTM D 1655	DEF STAN 91-91	GOST 10227	CGSB-3.22
Síra	[% hmotnosti]	0,3	0,3	0,25	0,4
Konečný bod destilácie	[°C]	300	300	250	270
Výparný tlak	[kPa, max]	/	/	/	21
Samozápalný bod	[°C, min]	38	38	28	/
Hustota	[15 °C, kg/m ³]	775-840	775-840	min 774 pri 20 °C	750-801
Bod tuhnutia	[°C, max]	-40	-47	-50	-51
Viskozita	[-20 °C, mm ² /s, max]	8	8	8 pri -40 °C	/
Čistý energetický obsah	[MJ/kg, min]	42,8	42,8	42,9	42,8

2.2. Výrobné metody konvenčne používaného leteckého paliva

Objavenie ropy vytvorilo lacné kvapalné palivo, ktoré pomohlo industrializovať svet a zlepšiť životné štandardy, zatiaľ čo fosílna palivá prispeli k viac ako 80% energetických výdavkov. Surová ropa, nazývaná aj ropa, je zložitá zmes uhľovodíkov. Predpokladaný vznik uhlíka a vodíka v rope je zo zvyškov mikroskopických morských organizmov, ktoré sa usadili na dne morí a oceánov a boli premenené pri vysokej teplote a tlaku [6]. Celosvetová produkcia ropy je približne 81,5 milióna ton barelov denne, čo zodpovedá ročnej produkcii 3905,9 miliónov ton v roku 2008. Medzinárodná energetická agentúra (IAE) odhadla že celková svetová produkcia rafinérií v roku 2006 predstavuje 3861 miliónov ton. Letecké palivo predstavuje 6,3% z celkového objemu spotrebovaného množstva ropy. Rafinácia ropy je proces separácie mnohých zlúčením prítomných v surovej rope. Tento proces sa nazýva atmosférická a vákuová frakčná destilácia, pri ktorej sa ropa zahrieva a zlúčeniny dosahujú bod varu pri rôznych teplotách a menia sa na plyny [6]. Tieto plyny sú následne skondenzované späť na kvapaliny [6]. Ku ďalším bežným rafinérskym procesom, pri ktorých sa vyrába letecké palivo patrí hydrogenizácia a hydrokrakovanie. Každý z týchto rafinačných procesov môže byť konečným krokom na výrobu leteckého paliva. Niekedy je však nutné zmiešať viacero rafinačných procesov, aby bolo možné vyrobiť palivo, ktoré spĺňa požadované špecifikácie [7].

2.2.1. Destilácia

Hlavnou výrobnou metódou, ktorá sa používa na výrobu najväčšieho množstva ropno-prúdových produktov je destilácia ropy [8]. Ropná destilácia, známa aj ako frakcionácia, je prvým krokom v procese rafinácie. Ide o rozdelenie ropy na rôzne frakcie destiláciou v atmosférickej destilačnej veži. Získané frakcie majú špecifické rozsahy bodov varu a možno ich klasifikovať v poradí podľa klesajúcej prchavosti na plyny, ľahké destiláty, stredné destiláty, plynové oleje a zvyšky [9]. Odsolovaná ropa sa najprv predhreje pomocou rekuperovaného technologického tepla. Následne sa posieľa do ohrievača s priamym ohrevom, odkiaľ sa privádza do vertikálnej destilačnej veže. Tu je tlak mierne nad atmosférickým a teplota sa pohybuje od 650-700 °F (340-370°C). Akékoľvek zahrievanie ropy nad tieto teploty môže spôsobiť nežiadúce termálne krakovanie. Všetky frakcie okrem najťažších sa premieňajú na paru. Ako horúca para stúpa vo veži, teplota sa znižuje pomocou prirodzenej konvekcie. Zo spodnej časti destilačnej veže sa odoberá ťažký vykurovací olej alebo asfaltové zvyšky. V postupne vyšších bodoch veže sa zachytávajú rôzne hlavné produkty vrátane mazacieho oleja, vykurovacieho oleja, kerozínu a benzínu [9].



Obrázok 1: Zjednodušené schéma ropnej destilácie [9]

2.2.2. Hydrogenizácia (Hydrotreating)

Hydrogenizácia je proces pri vysokej teplote (350 – 410 °C) a tlaku (8-14 MPa), pri ktorom sa uhľovodíky upravujú vodíkom v reaktore s fixnou vrstvou. Reaktory s fixnou vrstvou sú vhodné pre tento proces, pretože sú to kontinuálne procesné systémy a podporujú konfigurácie plyn-kvapalina-pevná látka, kde plyn a kvapalina prúdia cez pevnú látku v režime klesajúceho toku. Podobne ako mnohé katalytické procesy, aj hydrogenácia sa riadi 7 krokmi katalytickej reakcie a krok hydrogenácie, ktorý zahŕňa prídanie vodíka na odštiepenie atómu z uhľovodíka, je v mnohých prípadoch krokom limitujúcim rýchlosť. Je to preto, že hydrogenácia si vyžaduje rozbitie relatívne silných chemických väzieb, a preto je zvyčajne pomalá. Kinetiku hydrogenácie môžu ovplyvniť rôzne faktory vrátane zloženia uhľovodíka, teploty, tlaku, hydrodynamiky kvapaliny, výberu katalyzátora a parciálneho tlaku vodíka [10].

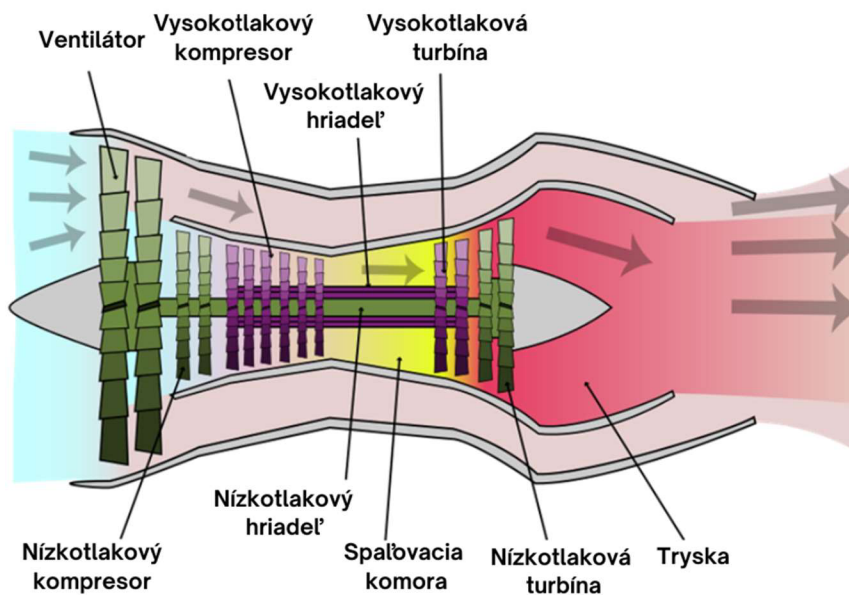
2.2.3. Hydrokrakovanie (Hydrocracking)

Hydrokrakovanie sa používa v moderných ropných rafinériách na premenu rôznych uhľovodíkov s vyššou teplotou varu na hodnotnejšie produkty ako je benzín, nafta a kerozín. Hydrokrakovanie je veľmi flexibilný proces rafinácie ropy, ktorý môže využívať suroviny od ľahkých naftových frakcií až po deasfaltované vákuové zvyšky. Medzi ďalšie aplikácie tohto procesu patrí zušľachtovanie petrochemických surovín, zvyšovanie oktánového čísla benzínu a výroba vysokokvalitných mazív. Okrem toho sa hydrokrakovaním môžu zušľachťovať veľmi ťažké uhľovodíkové ložiská, ako sú dechtové piesky a bridlicová ropa. Týmto procesom sa pôvodné zásoby vylepšujú zvýšením celkového pomeru vodíka k uhlíku a znížením priemernej relatívnej molekulovej hmotnosti [11].

2.3. Konštrukcia prúdového motoru(turbofanu)

Plynová turbína pracuje na základe Braytonovho cyklu, v ktorom je pracovnou kvapalinou nepretržitý prúd vzduchu privádzaný do vstupného otvoru motora [12]. Podobne veľké motory dodávajú podobný výkon ventilátoru alebo vrtuli. Turbofan je veľmi účinný spôsob výroby ťahu, najmä ak sa používa vysoký obtokový pomer, t.j. väčšina hmotnostného toku prechádza cez ventilátor a ventilátor vytvára väčšinu ťahu [13]. Prúdenie v turbofane je rozdelené na dve cesty, ako je znázornené na obrázku 2 nižšie:

- Prúdenie cez jadro motora
- Ventilátor vytvára okolité axiálne „obtokové“ prúdenie



Obrázok 2: Schéma konštrukcie prúdového motoru[13]

Prúdenie v turbofane je rozdelené na dve cesty, pričom obtokový pomer je pomer medzi hmotnostným prietokom cez ventilátor a hmotnostným prietokom cez jadro. Ventilátor sa otáča oveľa pomalšie ako vnútorné jadro motora, čo prispieva k jeho účinnosti a znižuje hluk. Zistilo sa, že účinnosť tohto typu motora pri výrobe ťahu sa výrazne zvyšuje zvýšením obtokového pomeru [13]. Tak ako pri všetkých motoroch, aj pri turbofanoch sa ťah a charakteristiky spotreby paliva menia v závislosti od letových podmienok, t. j. od rýchlosti letu alebo Machového čísla a výšky letu [13].

2.3.1. Ventilátor

Prvou časťou turbofanu je ventilátor, je to tiež časť, ktorú je možné vidieť pri pohľade na prednú časť prúdového lietadla. Ventilátor, ktorý je takmer vždy vyrobený z titánových lopatiek, nasáva do motora obrovské množstvo vzduchu. Vzduch sa pohybuje cez dve časti motora, časť vzduchu smeruje do jadra motora kde dôjde k spaľovaniu. Zvyšok vzduchu, nazývaný „obtokový vzduch“, sa pohybuje po vonkajšej strane jadra motora prostredníctvom potrubia. Tento obtokový vzduch vytvára dodatočný ťah, ochladzuje motor a robí motor tichším tým, že zakrýva výfukový vzduch ktorý vychádza z motora. V dnešných moderných turbofanoch vytvára obtokový vzduch väčšinu ťahu motora [14].

2.3.2. Kompresor

Kompresor sa nachádza v prvej časti jadra motora a slúži na kompresiu vzduchu. Kompresor, ktorý sa nazýva „axiálny kompresor“, využíva na zrýchlenie a stlačenie vzduchu sériu rotujúcich lopatiek. Nazýva sa axiálny, pretože vzduch prechádza motorom v smere rovnobežnom s hriadeľom motora (na rozdiel od odstredivého prúdenia). Ako sa vzduch pohybuje cez kompresor, každá sada lopatiek je o niečo menšia, čo dodáva vzduchu viac energie a stláča ho. Medzi každou sadou lopatiek kompresora sa nachádzajú nepohyblivé lopatky nazývané „statory“. Tieto statory zvyšujú tlak vzduchu premenou rotačnej energie na statický tlak. Statory tiež pripravujú vzduch na vstup do ďalšej sady rotujúcich lopatiek. Inými slovami, „narovnávajú“ prúdenie vzduchu [14].

2.3.3. Spaľovacia komora

Spaľovacia komora je miesto, kde vzniká zápal. Keď vzduch vychádza z kompresora a vstupuje do spaľovacej komory, zmieša s palivom a zapáli sa. Je to komplexný proces, pri ktorom sa musí udržiavať stabilné spaľovanie zmesi paliva a vzduchu, zatiaľ čo extrémne rýchly vzduch prúdi spaľovacou komorou. Difúzor spomaľuje vzduch z kompresora, čím uľahčuje jeho zapálenie. Ďalšie súčasti spôsobujú vo vzduchu turbulencie, aby sa mohol ľahšie premiešať s palivom. Následne vstrekovač paliva rozprašuje palivo do vzduchu, čím vytvára zmes paliva a vzduchu, ktorú možno zapáliť. Poslednou súčasťou je zapaľovač, ktorý je veľmi podobný zapaľovacím sviečkam v aute alebo v lietadle s piestovým motorom [14].

2.3.4. Turbína

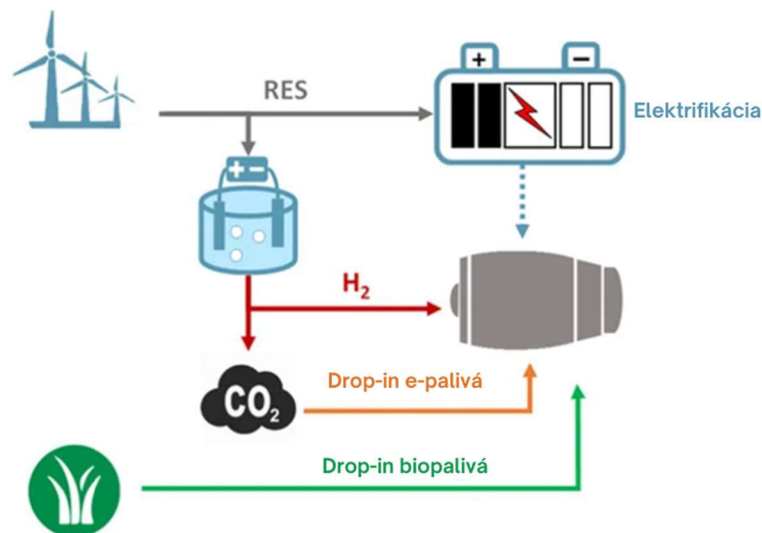
Keď sa vzduch dostane cez spaľovaciu komoru, prúdi cez turbínu. Turbínu tvorí rad lopatiek v tvare aerodynamických krídel, ktoré sú veľmi podobné lopatkám v kompresore. Keď horúci, vysokorýchlostný vzduch prúdi cez lopatky turbíny, získavajú zo vzduchu energiu, roztáčajú turbínu a otáčajú hriadeľom motora, s ktorým je spojená. Je to ten istý hriadeľ, ku ktorému je pripojený ventilátor a kompresor, takže otáčaním turbíny ventilátor a kompresor v prednej časti motora pokračujú v nasávaní ďalšieho vzduchu, ktorý sa čoskoro zmiešava s palivom a spaľuje [14].

2.3.5. Dýza

Posledný krok procesu sa uskutočňuje v dýze. Dýza je výfukové potrubie motora a je to miesto, kde vysokorýchlostný vzduch vyteká zo zadnej časti. V tejto časti vstupuje do hry aj tretí zákon Isaaca Newtona: na každú akciu existuje rovnaká reakcie opačného smeru. Jednoducho povedané, vytláčaním vzduchu zo zadnej časti motora sa lietadlo posúva smerom vpred. V niektorých motoroch je vo výfukovej dýze aj mixér. Ten jednoducho zmiešava časť obtokového vzduchu prúdiaceho okolo motora s horúcim, spáleným vzduchom, vďaka čomu je motor tichší [14].

3. Prehľad používaných biopalív v leteckej doprave

Súčasnú tendenciu pre udržateľnejší letecký priemysel zahŕňajú tzv. "drop-in" alternatívne letecké palivá, vodík a potenciálnu elektrifikáciu letectva (t. j. hybridné alebo plne elektrické lietadlá). "Drop-in" alternatívne letecké palivá alebo udržateľné letecké palivá (SAF) sa vzťahujú na úplne zameniteľné náhrady za konvenčné letecké palivo pochádzajúce z ropy (t. j. Jet A alebo Jet A-1), ktoré sa vyrábajú z udržateľných zdrojov (napr. biogénne suroviny, obnoviteľný vodík + CO₂). Skutočnosť, že nie sú potrebné žiadne úpravy existujúcich palivových systémov (t. j. motorov, distribučnej siete paliva), stanovuje SAF ako dominantnú alternatívu smerom k dekarbonizácii leteckej dopravy. Vodík je dlhodobou udržateľnou palivovou alternatívou, ale vyžaduje si rozsiahle úpravy súčasnej palivovej infraštruktúry a celkovej konštrukcie lietadla. Napokon, pohon lietadiel prostredníctvom elektrifikácie v čistom alebo v hybridnom režime by mohol byť novou možnosťou. Napriek tomu obmedzenia skladovania energie zostávajú hlavným problémom, najmä pri aplikáciách na dlhé vzdialenosti [15].



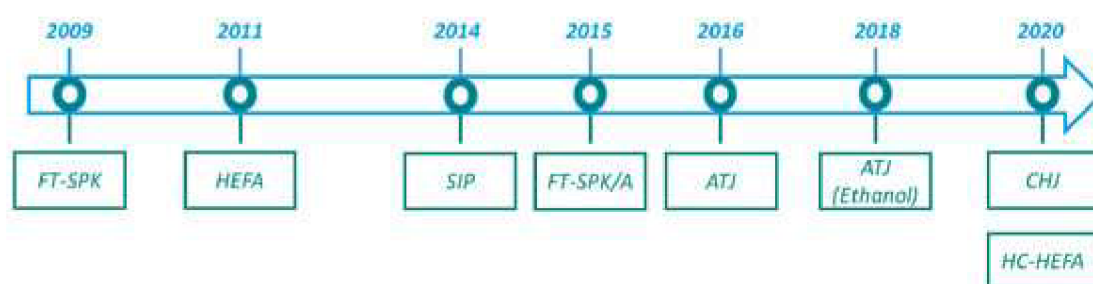
Obrázok 3: Alternatívy k dekarbonizácii leteckej dopravy [15]

O SAF sa v poslednom čase začal prejavovať veľký záujem a IATA ich označila za najslubnejšiu stratégiu znižovania emisií CO₂ v leteckom sektore. Palivá pre letecký sektor vyrábané z obnoviteľných alebo recyklovateľných surovín môžu priniesť až 80% zníženie emisií uhlíka počas celého životného cyklu paliva. Medzinárodná energetická agentúra tvrdí, že do roku 2050 by biopalivá mohli zabezpečiť 27% celkového množstva pohonných hmôt v doprave, pričom by nahradili najmä naftu, petrolej a kerozín [15]. V súčasnosti sa väčšina technológií SAF ešte stále testuje alebo je na úrovni prototypov, ale dosahujú značný pokrok, pričom niektoré (napr. HEFA) sa už používajú v komerčných letoch ako zložky palivovej zmesi. Jednou z výziev, ktorým čelí výroba SAF, je však vytvorenie paliva z obnoviteľných zdrojov ako je biomasa za prijateľnú cenu. Okrem toho suroviny používané na výrobu SAF nesmú vyvolávať otázku potravinovej verzu palivo, nesmú spôsobovať odlesňovanie ani iné environmentálne alebo spoločenské škody. Ďalším dôležitým problémom je výroba paliva, ktoré zodpovedá energetickej hustote konvenčných palív a ich vlastnostiam, ako je nízky bod tuhnutia a dobré vlastnosti pri prúdení za studena [15]. Špecifikácia ASTM D7566 sa vyvíjala mnoho rokov po

prísnom testovacom režime a schvaľovacom procese venovanom bezpečnosti SAF smerom k ich implementácií v komerčnej leteckej doprave. Očakávané rozšírenie výroby SAF v nasledujúcich rokoch si vyžaduje súbežné zintenzívnenie kontroly kvality s cieľom zabezpečiť, aby boli nové palivové technológie bezpečné [15].

3.1. Biopalivá

Certifikáciu ASTM na komerčné použitie (prostredníctvom miešania) získali zatiaľ len biopalivá. SAF sa vyskytujú skôr ako zložky zmesi v kombinácií s konvenčným leteckým palivom, než ako 100% bio zložky [15]. Pretože prienik SAF na trh je stále obmedzený (riadi sa podľa HEFA), je možné ich miešať až do 50% s tradičným leteckým palivom, avšak všetky testy kvality sa vykonávajú ako pri tradičnom leteckom palive [15]. Spolu s včasným rozšírením pre ostatné certifikované spôsoby výroby paliva pre prúdové motory, by sa mal však výskum bezpečnosti rozšíriť aj na hodnotenie miešateľnosti palív obsahujúcich rôzne syntetické zlúčeniny [15].



Obrázok 4: Časová linka certifikácie SAF technológií [15]

3.1.1. Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (HEFA)

Hydroprocesované obnoviteľné palivá pre tryskové motory (HRJ alebo HEFA) sa vyrábajú hydrogenáciou rastlinných olejov, použitých kuchynských olejov, živočíšnych tukov, odpadových tukov, oleja z rias alebo bio olejov. Sú to vysoko energetické biopalivá, ktoré sa môžu používať v bežných leteckých motoroch bez ďalších úprav motora. Niektoré ich slabé stránky (napríklad nízka mazivosť) sa prekonávajú miešaním HEFA s inými konvenčnými palivami [15]. Používanie HEFA ako leteckého paliva už testovali mnohé letecké spoločnosti. Treba však spomenúť, že suroviny na výrobu HEFA paliva sú nákladné, a často vyvolávajú otázku potravinovej verzu palivo a ich pestovanie môže spôsobiť vážne zmeny vo využívaní pôdy. Bionafta sa vyrába aj z masných kyselín prostredníctvom esterifikácie, ale ako letecké palivo sa považuje za nedostatočnú, pretože jej energetická hustota je v porovnaní s konvenčnými palivami veľmi nízka a jej bod tuhnutia veľmi vysoký [15].

3.1.2. Fischer-Tropsch fuels (FT Fuels)

Fischer-Tropschov proces (FT) je chemický proces používaný na výrobu kvapalných uhľovodíkov (benzínu, kerozínu, nafty a mazív) na báze syntézy plynu (CO a H_2). Charakter a podiel pôvodných produktov závisí od typu reaktora a katalyzátora. Bežnými surovinami na FT syntézu sú uhlie, zemný plyn alebo biomasa [16]. Uhlie a zemný plyn však nie sú obnoviteľné zdroje, a preto nie sú vhodné na výrobu udržateľného leteckého paliva. Na zvýšenie účinnosti príslušného termochemického procesu musia mať uvedené vstupné suroviny vysokú koncentráciu uhlíka a vodíka. FT syntézu možno opísať ako súbor katalytických procesov, kde sú katalyzátory založené na železe alebo kobalte v závislosti od teploty syntézy a požadovaných

produktov. V tomto zmysle FT zahŕňa kroky, ako je splyňovanie biomasy, čistenie a úprava vyrobeného syntézneho plynu a následná syntéza na získanie kvapalných biopalív. Podobne ako pri HEFA je možné zmiešať až 50% objemu FT zložky s konvenčným palivom Jet A alebo Jet A-1 [16]. Fischer-Tropschov proces bol prvým schváleným procesom podľa normy ASTM, uvedeným v prílohe A1 k norme D7566 [17]. Ako je možné vidieť na obrázku 4, tento proces bol schválený v roku 2009.

3.1.3. Alcohol-to-Jet (ATJ)

Alcohol-to-Jet (ATJ) je biochemický proces na výrobu leteckej palivovej zmesi na báze alkoholu. Existuje niekoľko vstupných surovín, ktoré sa môžu použiť [16]. Príslušné alkoholy sa môžu vyrábať bežnými postupmi, ktoré zahŕňajú fermentáciu cukrov pochádzajúcich z plodín bohatých na cukor a škrob ako je cukrová trstina, kukurica a pšenica, alebo pokročilými spôsobmi z lignocelulóзовých surovín (napr. hydrolýzou). Alkoholy sa môžu vyrábať aj plynovou fermentáciou, pričom sa využíva obsah uhlíka a vodíka v plynach, napríklad v priemyselných splodinách. Cesty výroby ATJ sú atraktívne, pretože dokážu premeniť rôzne druhy alkoholov (zatiaľ boli schválené etanol a izobutanol) zo širokého spektra zdrojov na palivo pre lietadlá, ako aj na iné uhľovodíky [15][18].

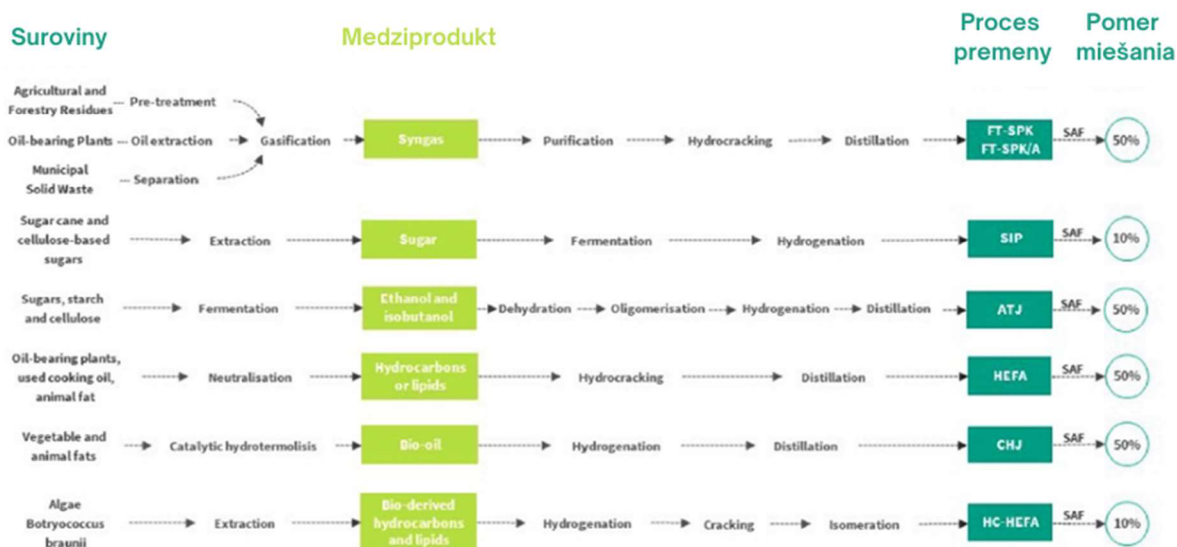
3.1.4. Hydroprocessed Fermented Sugars to Synthetic Isoparaffins (HFS-SIP)

Príloha A3 k dokumentu D7566 sa týka používania SIP palív a bola schválená v roku 2014. Pred certifikáciou podľa normy ASTM sa táto cesta označovala aj ako DSHC (direct sugar to hydrocarbons). Na rozdiel od palív FT a HEFA pri HFS-SIP nevzniká syntetizovaný parafínový kerozín, a preto sa vyžaduje, aby sa používali v zmesiach, ktorých pomer miešania nepresahuje 10%, hoci sa úspešne uskutočnili skúšobné lety s použitím 20% zmesi [17]. Táto metóda je založená na biochemickej konverzii, pri ktorej sa biologická platforma (modifikované kvasinky alebo mikróby) používa na premenu cukrov na uhľovodíky, konkrétne na alkén C15 so štyrmi dvojitými väzbami nazývaný farnesén, prostredníctvom fermentácie. Následne sa premení príslušný alkén (farnesén) a destiláciou sa získava letecké palivo. V súčasnosti je hlavnou surovinou používanou v tomto procese cukrová trstina, hoci ako alternatívy sa môžu používať aj iné cukry na báze celulózy, aby sa predišlo konfliktom medzi potravinami a palivami. Jednou z nevýhod tejto metódy sú vysoké prevádzkové náklady spojené s potrebnými krokmi spracovania. Očakáva sa však, že po rozšírení dodávateľského reťazca sa tieto náklady výrazne znížia [17].

3.1.5. Iné

Medzi dve najnovšie SAF palivá patria CHJ (Catalytic-Hydrothermolysis-Synthesized Kerosene) a HHC-SPK (Hydroprocessed Hydrocarbon-Synthetic Paraffinic Kerosene), ktoré boli v roku 2020 certifikované na komerčné použitie. CHJ je možné použiť s maximálnym pomerom 50%, zatiaľ čo HHC-SPK je možné použiť len do 10% pomeru miešania, pretože toto palivo získalo ASTM certifikáciu pomocou zrýchleného procesu [17].

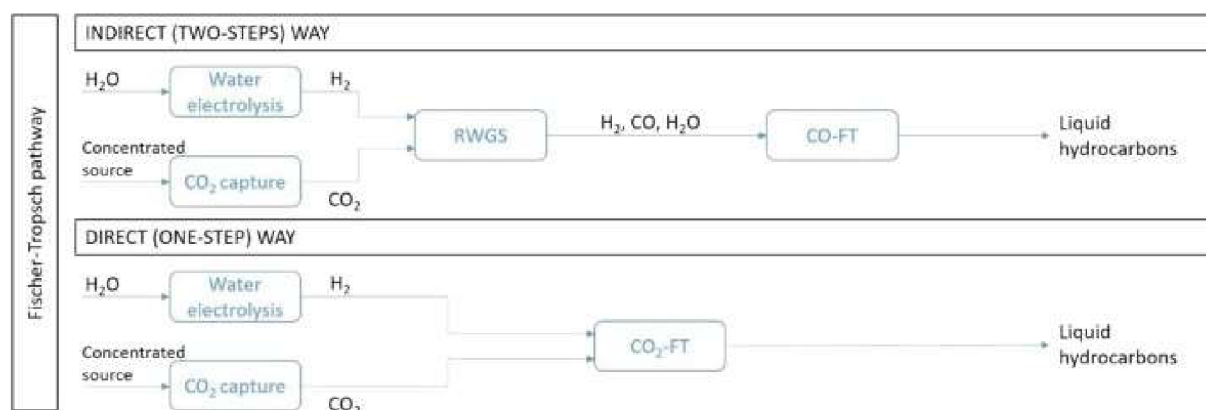
Na obrázku 5 je možné vidieť pomer miešania, potrebné suroviny a metódy na výrobu biopalív zmienovaných v kapitole 3.1. .



Obrázok 5: Potrebne suroviny a metody na výrobu SAF [17]

3.2. Electrofuels(e-Fuels)

Na dosiahnutie strednodobých a dlhodobých cieľov podporuje ReFeulEU Aviaton aj používanie syntetických palív, známych ako e-palivá (e-Fuels). Táto nová kategória palív sa syntetizuje pomocou ekologického vodíka vyrábaného elektrolýzou vody, ktorá využíva energiu z obnoviteľných zdrojov alebo oxidu uhličitého, ktorý sa môže vyrábať z priemyselných zdrojov alebo sa zachytávať priamo zo vzduchu [19]. Vo všeobecnosti sú e-palivá alebo „energetické palivá“ plynné alebo kvapalné syntetické palivá, ktorých výroba je založená na obnoviteľnej energii. Umožňujú prepravu energie a predstavujú alternatívu fosílnym palivám. Vďaka transformáciám na chemickú energiu, e-palivá umožňujú dlhodobé skladovanie obnoviteľnej energie a jej jednoduchú prepravu. Predstavujú jeden z pilierov globálnej energetickej transformácie a sú nevyhnutné na dosiahnutie klimatických cieľov do roku 2050. Hlavné charakteristiky e-palív spočívajú v klimatickej udržateľnosti, jednoduchej preprave, využívaní už existujúcej infraštruktúry, a teda znížení nákladov na energetický prechod a v jednoduchom skladovaní [19]. Výrobný postup e-palív zahŕňa tieto kroky: elektrolýzu vody, zachytávanie oxidu uhličitého, syntézu produktu a jeho zlepšovanie. V posledný rokoch sa výroba kvapalných e-palív dostáva do popredia hlavne kvôli možnosti nahradiť fosílna palivá vo všetkých ťažko elektrifikovateľných odvetviach, ako je napríklad letectvo. Tieto syntetické kvapalné palivá, ktoré sú syntetizované pomocou vodíku a oxidu uhličitého sa môžu vyrábať dvoma spôsobmi: Fischer-Tropschovou syntézou (FT syntéza) a syntézou metanolu. Pri jednostupňovom (priamom) FT procese sa kvapalné uhľovodíky tvoria priamo z vodíku a oxidu uhličitého, zatiaľ čo pri dvojstupňovom (nepriamom) FT procese si reaktorová časť vyžaduje dve rôzne jednotky [19]. Schematický popis oboch procesov je možné vidieť na obrázku 6.

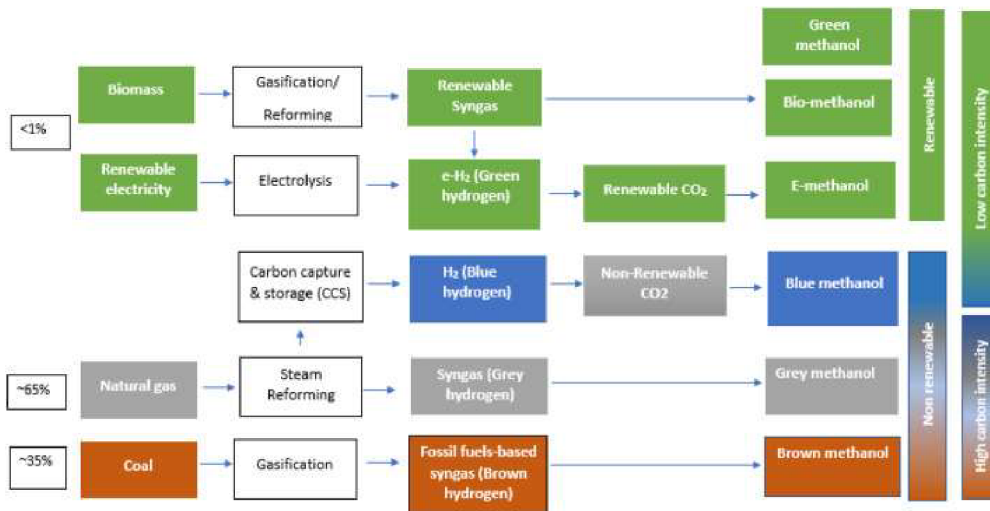


Obrázok 6: Popis výroby e-palív priamym a nepriamym procesom [19]

Dvojstupňový FT proces spočíva vo výrobe syntetického plynu z vodíku a oxidu uhličitého prostredníctvom reverzného vodného posunu plynu (Reverse Water Gas Shift - RWGS), po ktorej produkt reaguje tradičnou Fischer-Tropschovou syntézou, ktorá umožňuje tvorbu kvapalných uhľovodíkov. RWGS reakcia môže prebiehať s katalyzátormi na báze niklu, železa alebo medi, zatiaľ čo FT reakcie prebieha s katalyzátormi na báze kobaltu a železa. Jednostupňový FT proces naopak zahŕňa priamu premenu vodíku a oxidu uhličitého na uhľovodíky. Táto syntéza sa ukazuje ako komplikovanejšia, pretože si vyžaduje katalyzátory schopné pracovať pri konverzii oxidu uhličitého na oxid uhoľnatý a aj pri FT reakcii. Na tento účel sa zvyčajne používajú katalyzátory na báze železa [19].

3.2.1. E – metanol

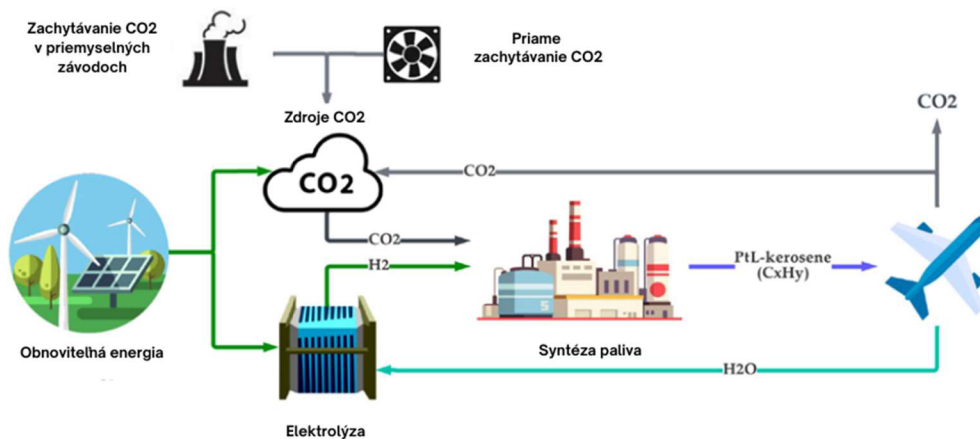
Jedným z významných palív pre PtL (Power to Liquid) technológiu je metanol (CH_3OH). Metanol je jednou z cenných surovín používaných na výrobu mnohých chemických látok, ako napr. formaldehyd, dimetyléter, kyseliny octovej a mnohých ďalších výrobkov ako sú farby, plasty a stavebné materiály. Považuje sa tiež za vynikajúce rozpúšťadlo a čisté syntetické palivo používané v doprave, pri čistení odpadových vôd, výrobe elektrickej energie a.i.. Pri štandardných okolitých podmienkach je metanol v kvapalnom skupenstve a je ľahko distribuovateľný a manipulovateľný. V súčasnosti sa metanol vyrába z fosílnych palív (zemný plyn alebo uhlie), pričom ročná celosvetová produkcia predstavuje 98 miliónov ton, ktorá emituje 0,3 gigatony CO_2 , čo predstavuje 10% celkových emisií v chemickom sektore [20]. Aby mohol byť metanol považovaný za 100% obnoviteľný, musia všetky suroviny pochádzať z obnoviteľných zdrojov ako je biomasa, slnečná, veterná, vodná alebo geotermálna energia. Obnoviteľný metanol sa môže vyrábať buď cestou bio-metanolu alebo e-metanolu. Bio-metanol je získavaný splyňovaním surovín z biomasy ako je napr. lesný/poľnohospodársky odpad, bioplyn zo skládok, pevný komunálny odpad, papier atď. E-metanol sa vyrába zo zachyteného CO_2 a zeleného vodíka vyrobeného z obnoviteľnej elektrickej energie. Zachytený CO_2 možno tiež klasifikovať ako obnoviteľný ak pochádza z biomasy a priameho zachytávania vzduchu, zatiaľ čo neobnoviteľný CO_2 sa recykluje z fosílnych palív [20]. Možné výrobné cesty sú vyobrazené na obrázku 7.



Obrázok 7: Farebné spektrum výroby e-metanolu [20]

3.2.2. E-kerozín

E-kerozín je ďalšie syntetické palivo vyrábané Fischer – Tropschovým procesom. Výroba e-kerozínu zvyčajne zahŕňa použitie elektrolýzy na výrobu vodíka z vody, ktorý sa potom kombinuje s oxidom uhličitým na vytvorenie syntézneho plynu, po ktorom nasleduje FT proces na výrobu e-kerozínu. Na zlepšenie kvality jeho výroby sa po FT procese používa hydrokrakovacia jednotka na rozbitie dlhých uhľovodíkových reťazcov a podporu výroby uhľovodíkov v strednom destilačnom pásme, kde sa nachádza aj kerozín. E-kerozín sa považuje za udržateľné letecké palivo (SAF), keďže jeho hlavné použitie je na pohon lietadiel. Vyrobený E-kerozín sa mieša s konvenčnými leteckými palivami ako sú Jet A, Jet A-1, JP-5 a iné. Jet A-1 je forma leteckého paliva najbližšia k E-kerozínu, keďže je vysoko rafinovanou formou kerozínu. Na obrázku 8 je znázornený cyklus výroby e-kerozínu a jeho použitie. [21; 22]



Obrázok 8: Produkcia a použitie e-kerozínu [22]

E-kerozín sa v súčasnosti používa vo viacerých krajinách sveta vrátane USA a Nemecka. Medzi kľúčových hráčov v odvetví e-kerozínu patria spoločnosti SkyNRG, Neste a LanzaTech. Tieto spoločnosti pracujú na vývoji a komercializácii e-kerozínu ako udržateľnej a čistej alternatívy tradičného leteckého paliva. Okrem týchto spoločností aj viaceré letecké spoločnosti skúmajú používanie e-kerozínu ako spôsob na zníženie vplyvu na životné prostredie. Napríklad Lufthansa uskutočnila niekoľko úspešných testovacích letov s použitím e-kerozínu a oznámila plány na pravidelné používanie tohto paliva. Množstvo výroby SAF je v porovnaní s objemom výroby bežného leteckého paliva zanedbateľné, keďže výroba tohto paliva v komerčnom meradle má niekoľko výziev, ktoré je potrebné zväžiť. Napríklad zložitosť a variabilita vstupných surovín, rýchly rast technológií výroby vodíka a riziko investícií do výstavby zariadení vzhľadom na históriu zrušených vlajkových projektov v leteckom priemysle [22].

3.3. Vodík

Vodík je považovaný za čisté palivo, pretože sa môže spotrebovať bez znečisťovania ovzdušia. Čistý vodík nie je ľahko dostupný a musí sa získavať alebo vyrábať, preto sú k dispozícii rôzne postupy na výrobu vodíkových palív, ktoré síce znižujú emisie uhlíka, ale nie sú úplne bez znečisťujúcich látok. Zelený vodík je jediný uhlíkovo neutrálny vodík, pretože počas procesu jeho výroby a používania nevzniká žiadny uhlík. Šedý vodík vytvára uhlík v procese ťažby/výroby. Vylepšenou verziou šedého vodíka je modrý vodík, pri ktorom sa uhlík vznikajúci pri výrobe zachytáva a uskladňuje. Na výrobu zeleného vodíka sa používajú obnoviteľné zdroje energie. V tabuľke 2 sú uvedené tri farby spektra vodíka: šedá, modrá a zelená na základe produkcie uhlíka [23].

Tabuľka 2: Porovnanie farebného spektra vodíka (upravené podľa [23])

	Šedý vodík	Modrý vodík	Zelený vodík
Proces výroby	Automatický tepelný reforming	Zachytávanie a skladovanie uhlíku	Elektrolýza
Zdroj	Zemný plyn alebo ťažká ropa	Para obohatená o oxid uhličitý	Voda
Emisie uhlíka	8,5 - 10 kg	0,8 - 4,4 kg	Žiadne

Štyri spôsoby výroby vodíka sú termolýza, elektrolýza, fotolýza a biolýza. Ostatné spôsoby výroby sa týkajú kombinovaných zdrojov energie. Mnohí výskumníci sa prikláňajú zvýšeniu účinnosti procesu prostredníctvom aditívnej energie, ako je katalýza. Výroba vodíka by mohla prebiehať z jadrovej energie elektrolýzou alebo priamou tepelnou premenou z obnoviteľných zdrojov, ako je vietor alebo solárna energia. Hlavným cieľom je stanoviť politiky v oblasti letectva pre vodíkovú iniciatívu na roky 2025 – 2050 [23].

Vývoj vodíkového priemyslu pre komerčné letectvo možno rozdeliť do týchto oblastí [23]:

- Letiskové aplikácie, kde vodíkové palivové články poháňajú činnosti na letisku, napríklad pozemnú podporu a dopravu.
- Existujúca infraštruktúra, pri ktorej nie je potrebná žiadna úprava lietadiel a môže využívať e – palivá ako „drop – in“ palivá, ktoré sa vyrábajú zmiešaním oxidu uhličitého s vodíkom.
- Novovznikajúca infraštruktúra, kde sa lietadlá prekonštruujú alebo upravia tak, aby mohli používať vodíkové palivové nádrže.

Na výrobu vodíka sa využíva niekoľko spôsobov. Jedným z nich je výroba vodíku prostredníctvom fosílnych palív. Tento proces sa nazýva termochemický (napr. pomocou parného reformingu metánu a zachytávania a skladovania uhlíka). Druhý spôsob je elektrochemický (napr. pomocou alkalickéj elektrolýzy), ktorý oddeľuje kyslík a vodík z vody pomocou elektrickej energie. Elektrická energia používaná v tomto procese musí mať nulové alebo nízke emisie [23]. Vodík je najrozšírenejším prvkom vo vesmíre, avšak jeho skladovanie je náročné. Výroba vodíka si nevyžaduje takú rozsiahlu plochu ako produkcia biopalív a použitie vodíkového palivového článku nemá žiadny vplyv na životné prostredie. Energetická hustota kvapalného vodíku je trikrát vyššia ako pri skvapalnenom zemnom plyne a nafta. Na rozdiel od fosílnych palív, pri používaní vodíkového palivového článku nevznikajú takmer žiadne emisie skleníkových plynov. Vodíkové palivové články sa dajú dobiť za 5 minút, zatiaľ čo elektrická batéria potrebuje viac ako 30 minút. Výhody a nevýhody použitia vodíka je možné charakterizovať nasledovne: [23].

- Výhody: skoro nulové emisie, vysoká energetická účinnosť, žiadne zvukové/vizuálne znečistenie, dlhá skladovateľnosť
- Nevýhody: horľavý, problémy so skladovaním, nedostačujúca infraštruktúra, vysoké výrobné náklady, proces extrakcie

Skladovanie vodíka na palube predstavuje rôzne problémy. Vodík ma v porovnaní s kerozínom vyššiu energiu na jednotku hmotnosti. Pri normálnom atmosférickom tlaku a teplote sa jeden liter kerozínu rovná približne 11 tisícim litrov plynného vodíka. To zjavne nie je ideálne pre letectvo.

3.4. Čpavok (Amoniak)

Aby sa čpavok stal použiteľným dekarbonizovaným nosičom energie pre letectvo, musí spĺňať minimálne požiadavky na letecké palivo z hľadiska integrácie, musí byť škálovateľný, cenovo dostupný a bezpečný [24]. Čpavok (NH_3) zostáva v kvapalnom stave v oveľa širšom teplotnom rozsahu ako vodík a má vyspelý reťazec dodávateľov [24]. Príslušné porovnanie vlastností čpavku, vodíku, metanolu a kerozínu sú uvedené v tabuľke č 3.

Tabuľka 3: Porovnanie vlastností čpavku, vodíku, metanolu, kerozínu a LNG [24; 25]

Vlastnosti	Jednotka	Kerozín	Vodík		Metanol	Amoniak	LNG
Skladované ako	—	Kvap.	Plyn	Kvap.	Kvap.	Kvap.	Kvap.
Teplota	°C	Okolité	Okolité	-252.9	Okolité	-33 (alebo 25)	-160
Tlak	MPa		70	Okolité		0.1 (alebo 0.99)	0,15
Hustota	kg/m ³	840	42	70.8	792	600	Kap 3.6
Hranica výbušnosti	% obsahu	0,7–5	4–75	4–75	6,7–36	15–28	5-15
Čistý energ. obsah	MJ/kg	43–46	120	120	20,1	18,6	49,5
	MJ/l	35–38	4,5	8.49	15,8	12,7	21-24
Obsah vodíku	wt%	N/A	100	100	12.5	17.8	N/A
	kg-H ₂ /m ³	N/A	42.2	70.8	99	121	N/A

Čpavok, ktorý pôsobí ako nosič vodíka, ponúka lepšie endotermické vlastnosti paliva ako kerozín, pretože sa skladuje ako kvapalina pri teplote 240 K (-33 °C) a tlaku okolia. Priame spaľovanie čpavku znižuje množstvo tepelnej absorpcie, ktorú ma palivo k dispozícii, v porovnaní s prístupom založeným na krakovaní [24].

3.4.1. E-čpavok

Podobne ako metanol, aj väčšina amoniaku sa v súčasnosti vyrába z fosílnych palív, napr. zo zemného plynu, ťažkého benzínu, ťažkého vykurovacieho oleja a uhlia, ktorý sa označuje ako hnedý amoniak. Zatiaľ čo amoniak, vyrobený z fosílnych palív so začlenením CSS (Carbon capture and storage – zachytávanie a skladovanie uhlíka), sa označuje ako modrý amoniak. Konkrétne modrý amoniak sa vyrába z dusíka a „modrého“ vodíka získaného zo surovín zemného plynu, kde sa zachytáva a ukladá CO₂ ako vedľajší produkt. To vedie k zníženiu vplyvu na klímu v porovnaní so sivým amoniakom. Zelený amoniak sa vyrába s nulovými emisiami pomocou elektrolýzy vody alebo vodíka na báze biomasy [20].

3.5. Elektrifikácia

Elektrifikácia letectva je trendom od 60. rokov 20. storočia, pričom mnohé pomocné systémy sú čoraz viac elektrifikované, vďaka relatívnej ľahkosti a vyššej účinnosti v porovnaní s mechanickými systémami. Elektrický pohon tiež zaznamenal vývoj od 70. rokov 20. storočia, ale zatiaľ je obmedzený na demonštračné alebo voľnočasové aktivity [26]. Elektrický pohon by mohol poskytnúť významné výhody vrátane úspory paliva, emisií a zníženia hluku, ale technické nedostatky spojené s energetickou hustotou a hustotou batérií pretrvávajú. Podobne ako pri elektrifikácii automobilov, sú potrebné rôzne stupne elektrifikácie a zmeny v architektúre [26]. Elektrifikáciu leteckej dopravy je možné rozdeliť na hybridný a plne elektrický pohon.

3.5.1. Hybridný pohon

V hybridných elektrických systémoch, kde sú elektromotor a turbofan usporiadané sériovo alebo paralelne, môže elektrická batéria dodávať energiu na optimalizáciu celkovej spotreby

energie a emisií. Elektromotor pracuje spolu s turbofanom keď je potrebný vysoký ťah, ale samostatne keď je potrebný nízky ťah (typicky počas cruise módu). Tento mechanizmus umožňuje zmenšiť veľkosť turbomotorov a zvýšiť úsporu paliva [26]. Veľké priemyselné subjekty pracovali na demonštrácií hybridnej elektrifikácie pre potreby budúceho použitia v segmente veľkých komerčných lietadiel. V roku 2017 spoločnosti Airbus, Siemens AG, Rolls-Royce nadviazali spoluprácu na vývoji hybridného lietadla E-Fan X¹ [26]. Plánovali nahradiť jeden zo štyroch prúdových motorov v dopravnom lietadle BAE 146/RJ 100 elektrickým motorom s výkonom 2 MW, ktorý poháňa plynová turbína Rolls-Royce AE2100 s lítium-iónovou batériou. Boeing a NASA spolupracovali na štúdií tzv. Subsonic Ultra Green Aircraft Research (SUGAR), s cieľom vyvinúť elektrické lietadlo s názvom Volt vybavené dvoma motormi. Motory boli navrhnuté tak, aby spaľovali palivo počas vzletu a používali elektrinu na doplnenie alebo nahradenie paliva počas "cruise-módu"[26].

3.5.2. Plne elektrický pohon

Plne elektrický pohon (batéria ako jediný zdroj energie) by mohol viesť k nulovým palubným emisiám a ku veľmi vysokým úrovňam energetickej účinnosti a redukcii hluku. Z týchto dôvodov sa politici začínajú zaujímať o elektrické lietadlá. Nórsko napríklad oznámilo, že do roku 2040 budú všetky jeho lety na krátke vzdialenosti elektrické [26]. Jednou z inovácií, ktorú umožňuje plne elektrický pohon a ktorá by mala priniesť výhody úplnej elektrifikácie je „distribučovaný elektrický pohon“. Táto stratégia pohonu je založená na optimálnom umiestnení viacerých elektricky poháňaných vrtúľ po celom povrchu lietadla [26]. Príkladom distribuovaného pohonu je lietadlo Lilium Jet, plne elektrické päťmiestne lietadlo s 36 vrtuľami rozmiestnenými tak, aby umožňovali vertikálny vzlet a pristátie (VTOL). S doletom 300 km bolo lietadlo Lilium Jet navrhnuté pre vnútromestské lety. V roku 2019 spoločnosť Lilium GmbH oznámila zámer do roku 2025 spustiť svoju leteckú taxislužbu vo viacerých mestách [26].



Obrázok 9: Lietadlo Lilium Jet s viditeľnými elektricky poháňanými vrtuľami [27]

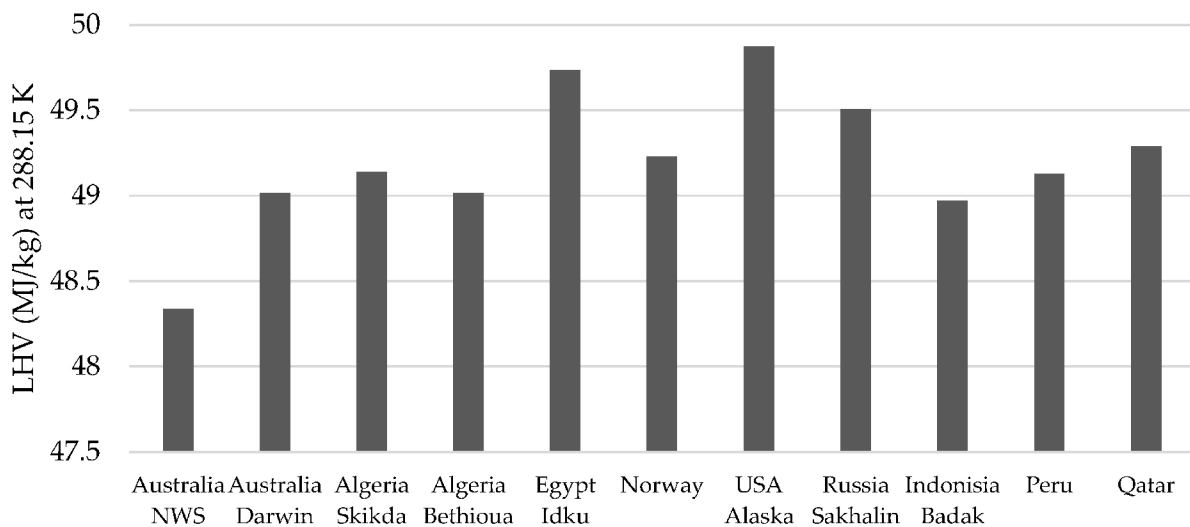
Napriek veľmi sľubným prínosom, plne elektrický pohon je konfrontovaný so zásadným obmedzením pokiaľ ide o skladovanie energie v batériách. Súčasný technický stav lítium-

¹ V roku 2020 bolo predstaviteľmi spoločností Airbus a Rolls-Royce oznámené pozastavenie projektu [49]

iónových baterií povoľuje energetickú hustotu na úrovni 0,9 MJ/kg, ktorá by teoreticky mohla dosiahnuť až 1,4 MJ/kg[26]. Avšak, stále je to rádovo menej proti leteckému palivu, ktoré sa pohybuje na úrovni 43 MJ/kg[4]. Li-O₂ je sľubná nová batéria, ktorej sa teoretická gravimetrická hustota pohybuje na úrovni 12 MJ/kg, čo je stále rádovo menej ako pri kerozíne. Ďalšie obmedzenie predstavuje pomer výkonu k hmotnosti elektrických pohonných systémov, ktorý bol historicky nižší ako v prípade turbofanov [26]. Úplná elektrifikácia letectva si vyžaduje významný vývoj v oblasti batérií a energetickej hustoty, ako aj v ďalších oblastiach, akými sú konštrukcia motoru a trupu lietadla, elektroniky, chladenia, rekuperácia tepla a integrácia energetických systémov. Otázky o bezpečnosti batérií, nabíjaní a energetickej infraštruktúre je tiež potrebné zväžiť pre zvýšenie elektrifikácie letectva [26].

3.6. LNG (Liquified Natural Gas)

LNG má potenciál fungovať ako čistejšia alternatíva leteckého paliva. Predtým ako sa začne uvažovať o jeho využití v letectve, je však potrebné vyriešiť niekoľko technických problémov. Na začiatok treba povedať, že rozdielne zloženie zemného plynu v závislosti od jeho zdroja ovplyvňuje nižšiu výhrevnosť aj hustotu paliva, čo môže mať negatívny vplyv na výkon lietadla [25]. Okrem toho sú pred použitím tohto kryogénneho paliva potrebné úpravy konštrukcie lietadla a jeho motorov. Ďalším faktorom, ktorý je potrebné zohľadniť, sú environmentálne dôsledky používania LNG z hľadiska emisií CO₂. Napríklad spaľovanie LNG v porovnaní s leteckým palivom vedie k zníženiu emisií CO₂. Metán, ktorý je jeho hlavnou zložkou, však vo väčšej miere prispieva ku globálnemu otepľovaniu. Únik alebo nespálenie len 1% paliva by viac ako zničilo jeho prínosy v oblasti globálneho otepľovania z hľadiska zníženia emisií CO₂ [25]. Zemný plyn je dostupný vo viacerých krajinách a jeho zloženie sa výrazne líši v závislosti od oblasti. Rozdiely v zložení znamenajú, že vlastnosti paliva sa líšia, napríklad vyššie výhrevnosti sa môžu medzi jednotlivými európskymi ložiskami pohybovať od 27,5 do 48,7 MJ/m³. Syntéza a vlastnosti LNG sa tiež líšia v závislosti od zdroja, hoci výkyvy výhrevnosti sú menšie v dôsledku odstraňovania CO₂ a N₂ [25] Výhrevnosť sa vypočítava na základe zloženia s využitím metódy ISO. Uvažované hodnoty sa pohybujú od 48 339 do 49 877 kJ/kg, ako je vidieť na obrázku 10.



Obrázok 10: Hodnoty výhrevnosti LNG v závislosti od regiónu

Okrem toho zloženie ovplyvňuje aj hustotu, v prípade skvapalneného LNG pri teplote $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ sa hodnoty hustoty pohybujú od 421,4 do 470,2 m^3/kg . Tieto výsledky naznačujú, že pre konkrétne lietadlo a objem nádrže bude energia na palube závisieť od zloženie LNG dostupného na letisku [25].

3.6. E-metán

E-metán možno získať kombináciou elektrolyzy s metanizáciou v dvojstupňovom procese. Na začiatku sa H_2 vyrába elektrolyzou vody s využitím obnoviteľnej energie ako je slnečná, vodná a veterná energia. Následne sa CO_2 zachytáva pomocou CSS a hydrogenuje v metanačnom reaktore na výrobu e-metánu. Existuje už niekoľko zariadení na výrobu energie z metánu pomocou elektrolyzy a metanizácie CO_2 . Napríklad projekt Audi e-gas v Nemecku je najväčším závodom PtG (Power to Gas) na svete, ktorý bol spustený v roku 2013. Na výrobu vodíka sa používajú tri elektrolyzéry AEC s celkovým elektrickým príkonom 6 MW, zatiaľ čo CO_2 dodáva bioplynová stanica. Vodík sa mieša s CO_2 v metanačnej jednotke na výrobu obnoviteľného syntetického metánu, ktorý sa označuje ako Audi e-gas, s vedľajšími produktami: vodou a kyslíkom. Tento plyn je približne podobný fosílnemu zemnému plynu a distribuuje sa prostredníctvom existujúcej infraštruktúry do čerpacích staníc na stlačený zemný plyn [20].

3.7. Porovnanie

Prúdové motory a turbínové pomocné pohony sú dva hlavné systémy lietadla, ktoré produkujú emisie. Existujú dve stratégie znižovania emisií, ktoré sa týkajú nahradenie paliva na fosílny báze Jet A-1 inými nosičmi energie, ako sú vodík a batérie, alebo používaním uhľovodíkových palív s neutrálnym obsahom uhlíka. Porovnanie paliva JET A-1, elektrického pohonu, vodíkového palivového článku, vodíkovej turbíny, udržateľnými leteckými palivami a čpavku je uvedené v tabuľke 5 a 6 [24].

Tabuľka 4: Porovnanie elektrického pohonu, vodíku, SAF a čpavku s kerozínom [24]

	Elektrický pohon	Vodíkový palivový článok	Vodíková turbína	Udržateľné letecké palivo	Čpavok
Vplyv na klímu	100% redukcia emisií	75-90% redukcia emisií	50-75% redukcia emisií	30-60% redukcia emisií	50-99% redukcia emisií
Emisie oxidov dusíka	Žiadne	Žiadne	Potenciálny nárast	Rovnaké	Skoro žiadne
Dizajn lietadla	Hustota batérií limituje vzdialenosť na 500-1000 km	Realizovateľné len pre lety na krátke vzdialenosti	Nerealizovateľné pre lety nad 10000 km	Iba minimálne zmeny	Nerealizovateľné pre lety nad 8000 km

Tabuľka 5: Porovnanie elektrického pohonu, vodíku, SAF a čpavku s kerozínom [24]

	Doba na otočenie/tankovanie	Prevádzka lietadla	Obavy týkajúce sa reťazca dodávateľov
Elektrický pohon	Rovnaká alebo kratšia	Potrebný systém rýchlych nabíjania/výmeny batérií	Minimálne
Vodíkový palivový článok	1-2 x dlhšia, potrebné bezp. normy	Vyžaduje sa distribúcia a skladovanie tekutého vodíka s kryochladením, sú potrebné osobitné bezpečnostné opatrenia	Prerušenie dodávok
Vodíková turbína	2-3 x dlhšia, potrebné bezp. normy		
Udržateľné letecké palivo (SAF)	Rovnaké časy na otočenie	Môže byť použitá súč. let. infrašt.	Uniformná kvalita, využitie poľnohosp. Pôdy
Čpavok	Rovnaká alebo dlhšia	Potrebná distribučná a skladovacia sieť, bez kryochladenia	Minimálne, existujúca infraštruktúra

Každá nová letecká technológia musí riešiť niekoľko problémov zároveň: technické požiadavky, bezpečnosť, náklady a harmonogram modernizácie globálnej flotily lietadiel a letísk, prevádzkové náklady a reťazec dodávateľov. Palivo predstavuje až 43% prevádzkových nákladov leteckej spoločnosti. V posledných dvoch desaťročiach sa úsilie o bez emisnú leteckú dopravu sústredilo na používanie biopalív typu „drop-in“ ako náhrady fosílnych leteckých palív[24]. „Drop-in“ biopalivá sú atraktívnou možnosťou na zníženie emisií uhlíka, pretože sa dajú zaradiť do globálneho použitia bez toho, aby boli potrebné veľké zmeny v dizajne lietadiel alebo leteckej infraštruktúry. Hoci sa v oblasti chémie a výroby týchto palív dosiahol významný pokrok, rozšírenie výrobných kapacít na zabezpečenie nákladovo konkurencieschopných prúdových palív pre globálnu flotilu lietadiel je výzvou[24]. Dve dôležité alternatívy k palivám na báze uhľovodíkov sú batérie a vodík. So zvyšujúcim sa podielom výroby energie z obnoviteľných zdrojov sa pozornosť presunula na potrebu energeticky hustého a cenovo dostupného skladovania energie. V tomto kontexte, skladovanie energie v batériách a chemické skladovanie vodíka sú dve prominentné technológie. Vodík sa dá získať elektrolýzou vody, najmä ak dodávka elektrickej energie prevyšuje dopyt. Preto sa táto forma vodíka môže nazývať e-H₂, a často sa označuje ako „zelený“ ak je zdrojom elektrickej energie obnoviteľný zdroj[24]. Hoci sa v letectve môžu použiť elektrické aj chemické akumulátory, požadovaný pomer ťahu k hmotnosti obmedzuje navrhované použitie na malé lietadlá a lety s krátkou dobou trvania. Analýza naznačuje, že na dosiahnutie bez emisného letectva do roku 2050 má e-vodík (e-H₂) spomedzi skúmaných kandidátov najvyššie výkonnostné ukazovatele pre mnohé letové profily. Vodík má bezkonkurenčnú gravimetrickú hustotu energie (čistý energetický obsah) 120 MJ/kg, čo je oveľa viac ako 43-46 MJ/kg v prípade kerozínu. Skladovanie kvapalného vodíka je však spojené so zložitými problémami, a jeho objemová energetická hustota 8,5 GJ/m³ je oveľa nižšia ako 35-38 GJ/m³ kerozínu. Vzhľadom na nízku objemovú hustotu energie sa vodík musí skladovať ako kryogénna kvapalina pri teplote -253 °C alebo ako plyn pri vysokom tlaku (okolo 700 barov), čo by mohlo zvýšiť hmotnosť lietadla

a potenciálně snížit dolet alebo počet cestujúcich. Každá z týchto alternatív skladovania vodíka na palube je spojená s výzvami pre sektor komerčnej leteckej dopravy [24].

4. Potrebné zmeny v konštrukcií lietadiel

Ako už bolo spomenuté, prechod súčasnej leteckej flotily na rôzne zdroje energie, SAF, kvapalný vodík, kvapalný amoniak, LNG, e-Fuels, si vyžadujú rôzne úsilie, aby bola platforma lietadla technologicky realizovateľná [24; 25].

4.1. Potrebné zmeny na začlenenie SAF

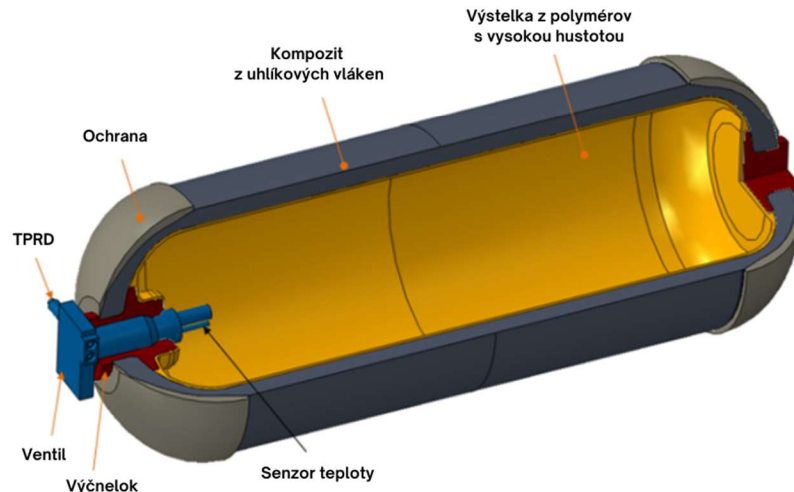
Na začlenenie SAF je kľúčovým rozdielom medzi platformami lietadiel používanie nitrilových tesnení v palivových systémoch niektorých lietadiel. Doterajšie palivové systémy a testovacie platformy ukázali, že tesnenia v palivovom systéme zaznamenávajú rozdiely v napučaní a zmeny v pevnostiach v ťahu v dôsledku vystavenia rôznym typom a množstvám aromatických látok v palive [24]. Keď sú nitrilové tesnenia vystavené primeraným množstvám aromatických látok dôjde k napučaniu, to znamená, že rovnaké aromatické látky môžu byť potrebné v budúcnosti, aby sa zachoval dostatočný tesniaci objem. V budúcom scenári, v ktorom sa v palivových systémoch môžu striedať aromatické a parafínové SAF, môžu byť potrebné alternatívne materiály tesnení, aby bolo možné predísť problémom v palivovom systéme. Na overenie tejto skutočnosti sú ale potrebné ďalšie testy [24].

4.2. Potrebné zmeny na začlenenie kvapalného vodíka a vodíkových článkov

Existujú dva spôsoby využitia vodíka ako paliva v lietadlách [23]:

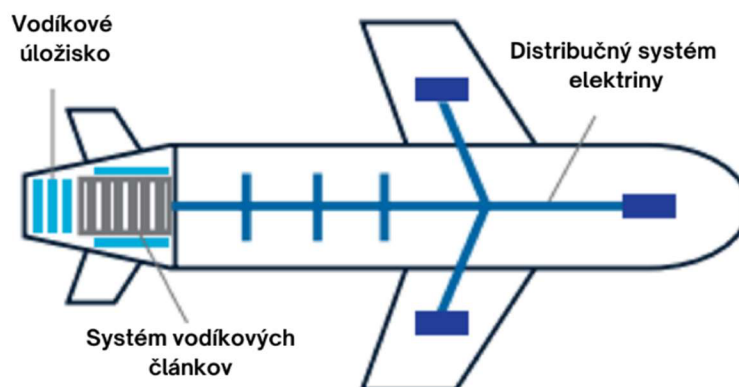
- Použitie vodíka ako leteckého paliva na nahradenie kerozínu vo veľkých a stredných lietadlách.
- Použitie vodíkových palivových článkov ako zdroja energie v malých vrtuľových lietadlách namiesto benzínových motorov

Na uskladnenie paliva sú však potrebné zosilnené palivové nádrže. Umiestnenie nádrží v lietadle je náročné na bezpečnosť a zachovanie rovnováhy lietadla. Ak sa má vodík používať ako letecké palivo, musí sa upraviť konštrukcia lietadiel a prúdových motorov. Palivo by sa mohlo skladovať v priestore za kabínou pre cestujúcich, tým sa však posunie ťažisko lietadla. Druhým možným umiestnením zásobníkov je umiestnenie jednej nádrže pred kabínou pre cestujúcich a jednej nádrže za ňou. Energetický potenciál by sa zvýšil o 6 až 19 percent, ak by lietadlá stredného doletu používali nádrž v hornej časti. Ďalšou možnosťou je umiestniť dve vodíkové nádrže v hornej časti kabíny a jednu v chvoste trupu [23]. Na obrázku 11 je znázornená možná konštrukcia vodíkovej nádrže.



Obrázok 11: Konštrukcia vodíkovej nádrže

Na optimalizáciu hustoty energie musí byť teplota pri skladovaní kvapalného vodíka v izolovanej nádrži veľmi nízka. Pri výbere vhodnej technológie skladovania je potrebné zohľadniť množstvo vodíka, stopu uskladnenia a spotreby energie. Tieto technológie sú kompresné (s plynným stavom pri 5 – 15 MPa a 25 °C), skvapalňovacie (s vodíkom v kvapalnom stave pri -235 °C a 0,1 MPa) a chemické (napr. s použitím amoniaku a metalhydridov v okolitých podmienkach) [23]. Ďalším z možných aplikácií vodíka v leteckom priemysle, je použitie vodíkoveho palivového článku v pomocnej pohonnej jednotke (APU – Auxiliary Power Unit). Pomocná pohonná jednotka zabezpečuje prevádzku elektrického systému, kým je lietadlo na zemi. APU tiež spúšťa prúdové motory a dodáva vzduch na chladenie a vykurovanie. APU je umiestnená za trupom a obsahuje malý turbínový motor a jej cieľom je vyrábať elektrickú energiu. V tomto prípade sa musí existujúci turbínový motor nahradiť vodíkovým palivovým článkom. Na obrázku 12 je možné vidieť umiestnenie palivového článku.



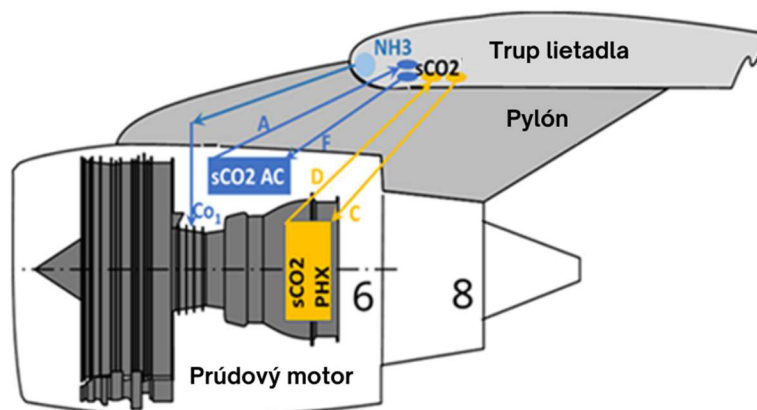
Obrázok 12: Potencionálne umiestnenie vodíkoveho palivového článku [23]

Využitie vodíkových palivových článkov v leteckej doprave zahŕňa APU, GSE (Ground Support Equipment – pozemné podporné zariadenia) a UAV (Unmanned Aerial Vehicle – bezpilotné

lietadlá). Tradičná APU spôsobuje hluk a emisie lietadla približne vo výške 20 % spotreby paliva. Tieto problémy by sa mohli riešiť nahradením tradičnej APU zariadeniami s palivovými článkami alebo inštaláciou hybridného systému kombináciou palivového článku so systémom APU. Typy palivových článkov sú pevný oxidový (SOFC) a protónovo výmenný membránový palivový článok (PEMFC). PEMFC je ľahší ako SOFC. Účinnosť SOFC sa zvyšuje vďaka vysokej prevádzkovej teplote. Spotreba paliva sa znižuje o 40% počas letu konštantnou rýchlosťou a o 75% počas stacionárneho režimu. Okrem toho sa pri použití SOFC APU zníži množstvo emisií NO_x o 80%.[28] Hybridný systém pre pozemné podporné zariadenia bol použitý na letisku v Tokiu a na letisku na Havaji na prevádzku kyvadlovej dopravy [23].

4.3. Potrebné zmeny na začlenenie kvapalného amoniaku

Zaujímavé je, že kvapalný amoniak nesie viac vodíka na jednotku objemu ako samotný kvapalný vodík, čo by poskytovalo výhodu pri skladovaní v krídlach budúcich lietadiel. Preto by bolo možné predstaviť si koncepciu znázornenú na obrázku 13, v ktorej sa celkový výkon lietadla zvýši použitím nadkritického energetického cyklu oxidu uhličitého na premenu tepla z výfukových plynov na elektrickú energiu na palubné použitie. Tento subsystem by mohol zohrávať dôležitú úlohu pri kompenzácií nízkeho čistého energetického obsahu amoniaku(18,6 MJ/kg) [24].

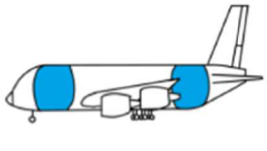
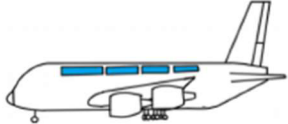

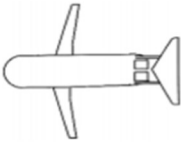



Obrázok 13: Navrhované usporiadanie motora s amoniakovým palivom[24]

Zatiaľ čo integrácia SAF si vyžaduje minimálne úsilie a integrácia vodíka vyzerá skôr ako úplná zmena dizajnu, integrácia amoniaku by sa nachádzala niekde uprostred. Podobne ako v prípade vodíka by bol potrebný nový palivový systém, aby sa zabezpečila správna úprava a distribúcia amoniaku. Ďalšie zmeny by boli potrebné v pohonnom systéme na zabezpečenie správneho spaľovania paliva (a možné zníženie emisií NO_x). Pokiaľ ide o skladovanie, amoniak sa môže skladovať v krídle a v strednej nosnej časti lietadla, čo je veľká výhoda v porovnaní s čistým vodíkom. Avšak vzhľadom na zníženie výhrevnosti a hustoty amoniaku môžu byť na kompenzáciu potrebné aj ďalšie skladovacie priestory v iných častiach lietadla. Nie je jasné, či by na zvládnutie tohto zvýšeného objemu paliva boli potrebné väčšie úpravy trupu, a teda aj zmeny podvozku [24].

4.4. Potřebné zmeny na začlenenie LNG

Na to, aby sa LNG mohol používať, sú potrebné úpravy v rôznych oblastiach. Z hľadiska konštrukcie trupu lietadla si konvenčná „tube – wing“ architektúra vyžaduje dodatočný úložný priestor na uskladnenie paliva[25]. Vzhľadom na to, že budú potrebné kryogénne nádrže, ich umiestnenie v krídlach je menej uskutočniteľné. Niektoré možné alternatívy sú zobrazené na obrázku 14.

Konštrukčné zmeny v konvenčných lietadlách		
Predná a zadná nádrž	Horné nádrže	Externá nádrž pod krídlami
		
Inovatívne konštrukcie trupov		
“Double bubble fuselage”	“Blended wing body”	
		

Obrázok 14: Navrhované konštrukčné zmeny pre použitie LNG [25]

Konvenčná konfigurácia sa predĺži, ak sa nádrže umiestnia v prednej a zadnej časti trupu, pričom palivo musí byť čerpané z oboch nádrží spoločne, aby sa zabránilo posunu ťažiska lietadla za prijateľné hranice. Alternatívne by sa nádrže mohli umiestniť v hornej časti trupu, čo by viedlo k zväčšeniu čelnej plochy. Bolo by možné použiť aj externé nádrže pod krídlami, hoci by sa tým dosiahlo zmiernenia ohybového momentu krídla kvôli väčšej ploche vystavenej prúdeniu vzduchu[25]. Iné konfigurácie by tiež mohli poskytnúť väčšiu kapacitu zásobníkov bez toho, aby príliš ovplyvnili pomer vztlaku a odporu, ktorý je v prípade konvenčného lietadla nevyhnutne znížený. Sľubným kandidátom je konfigurácia „double bubble“, ktorá sa príliš nelíši konvenčnej konfigurácie. Alternatívne by konfigurácia BWB mohla okrem výrazného zlepšenia pomeru vztlaku a odporu poskytnúť aj viac úložného priestoru. Realizácia konštrukcie BWB by si však vyžadovala podstatne viac času [25].

5. Energetická bilancia palív

Energetická bilancia je najbežnejším meradlom ekonomického a environmentálneho vplyvu biopalív a fosílnych palív. Vyjadruje vzťah medzi potrebnou energiou vo výrobnom procese a energetickým obsahom vyrobeného paliva. Palivo s hodnotou energetickej bilancie väčšou ako jedna má vyšší energetický obsah ako je energia potrebná na jeho výrobu [29]. Pri výpočte energetických bilancií v kapitole 5 budú zanedbávané energetické nároky na transport a straty spôsobené skladovaním.

5.1. Energetická bilancia kerozínu

Ako už bolo spomenuté v kapitole 2.2., ktorá sa zaoberala procesmi na výrobu kerozínu, najbežnejšou a najúčinnnejšou metódou výroby kerozínu je atmosférická destilácia. Spotreba energie pri destilácii ropy je ovplyvnená mnohými faktormi, ako je napríklad druh ropy, prevádzkovanie zariadenia a výrobný cyklus. Predvídanie a zlepšovanie prevádzkových podmienok je tiež dôležitým spôsobom úspory energie a znižovania spotreby. V súčasnosti sa úspora energie pri destilácii ropy zameriava najmä na zníženie spotreby pohonných hmôt, elektrickej energie, pary a vody. Účinnosť atmosférickej destilácie sa pohybuje v rozmedzí 80-90% [30], zatiaľ čo energetická účinnosť ťažby ropy je 93% [31]. Následne je možné spočítať energiu potrebnú na výrobu 1 kg kerozínu nasledovne:

$$\eta_{ad} \cdot \eta_{tr} = \frac{LHV_{KER}}{E_{potrebnáKER}}$$

Z tohto vzorca dostaneme vzťah pre výpočet energie potrebnej na výrobu 1 kg kerozínu:

$$E_{potrebnáKER} = \frac{LHV_{KER}}{\eta_{ad} \cdot \eta_{tr}}$$
$$E_{potrebnáKER} = \frac{44}{0,85 \cdot 0,93} = 55,66 \text{ MJ/kg}$$

kde LHV_{KER} je čistý energetický obsah kerozínu v MJ na 1 kg, η_{ad} je energetická účinnosť atmosférickej destilácie a η_{tr} je energetická účinnosť ťažby ropy.

5.2. Energetická bilancia SAF (HEFA)

V tejto kapitole sa budeme venovať iba energetickej bilancii udržateľného leteckého paliva HEFA, pretože sa už aktívne používa v leteckej doprave ako zmes s kerozínom. Ako už bolo spomenuté v kapitole 3, HEFA palivo sa vyrába procesom hydrogenácie rastlinných olejov, kuchynských olejov a tukov. Čistý energetický obsah HEFA paliva sa mení v závislosti na použitej počiatočnej surovine, ale podľa Boehma a spol. sa pohybuje na úrovni 43,9 MJ/kg [32; 33]. Energetická účinnosť premeny olejov a tukov na palivo HEFA je približne 76%, čo je najvyššia účinnosť spomedzi spôsobov výroby biopalív. Energetická účinnosť premeny sa vypočíta ako pomer celkového energetického vstupu (vstupná surovina, elektrická energia, zemný plyn a vodík) k celkovému energetickému obsahu vyrobeného paliva [34]. Samotná účinnosť premeny olejov na palivo sa pohybuje na úrovni 98,1% pri teplotách 300-340 °C a tlaku vodíka 1,4-2,8 MPa po dobu 8 hodín, avšak v tomto prípade už je zakomponovaná v celkovej účinnosti [35].

$$\eta_{HEFA} = \frac{LHV_{HEFA}}{E_{potrebnáHEFA}}$$

Úpravou dostaneme vzťah pre výpočet potrebnej energie na výrobu HEFA paliva:

$$E_{\text{potrebnáHEFA}} = \frac{LHV_{\text{HEFA}}}{\eta_{\text{HEFA}}}$$
$$E_{\text{potrebnáKER}} = \frac{43,9}{0,76} = 57,76 \text{ MJ/kg}$$

kde LHV_{HEFA} je čistý energetický obsah HEFA paliva v MJ na 1 kg a η_{HEFA} je energetická účinnosť premeny olejov a tukov na HEFA palivo.

5.3. Energetická bilancia vodíka

Elektrolýza vody, ktorá už bola spomenutá v kapitole 3, je jednou z najschopnejších metód výroby vodíka, pretože využíva obnoviteľný H_2O a produkuje iba čistý kyslík ako vedľajší produkt. Okrem toho sa v procese elektrolýzy využíva jednosmerný prúd z udržateľných zdrojov energie (biomasa, veterná a slnečná energia). V súčasnosti sa však produkujú len 4% vodíka pomocou elektrolýzy, z dôvodu vysokej ceny (10,30\$/kg). Aj napriek tomu má elektrolýza určité výhody, napr. výroba vodíka s vysokou čistotou a vysoká účinnosť použitia na výrobu palivových článkov. Účinnosť elektrolýzy sa pohybuje v rozmedzí 60-80% [36]. Aby bolo možné použiť vodík v leteckej doprave, je potrebné ho skvapalniť, energia potrebná na skvapalnenie 1 kg vodíka sa pohybuje na úrovni 42,84-54 MJ/kg_{LH₂} [37]. Pomocou účinnosti elektrolýzy a energie potrebnej na skvapalnenie dokážeme spočítať potrebnú energiu na výrobu 1 kg vodíka nasledovne:

$$\eta_{el} = \frac{LHV_{\text{H}_2}}{E_{\text{potrebnáH}_2}}$$

Úpravou vyššie uvedeného vzorca dostanem vzťah pre výpočet potrebnej energie na výrobu 1 kg vodíka pomocou elektrolýzy.

$$E_{\text{potrebnáH}_2} = \frac{LHV_{\text{H}_2}}{\eta_{el}}$$
$$E_{\text{potrebnáH}_2} = \frac{120}{0,7} = 171,42 \text{ MJ/kg}$$

Následne je nutné pripočítať energiu potrebnú na skvapalnenie vodíka.

$$E_{\text{celková}} = E_{\text{potrebnáH}_2} + E_{\text{skvapalnenie}} = 171,42 + 48,42 = 219,84 \text{ MJ/kg}$$

Z toho vyplýva, že energetická účinnosť tohto procesu je definovaná nasledovne:

$$\eta_{\text{H}_2} = \frac{LHV_{\text{H}_2}}{E_{\text{celková}}} = \frac{120}{219,84} = 0,54$$

kde LHV_{H_2} je čistý energetický obsah vodíka na 1 kg, η_{el} je energetická účinnosť elektrolýzy, $E_{\text{skvapalnenie}}$ je energia potrebná na skvapalnenie, $E_{\text{celková}}$ je celková energia vo výrobnom procese a η_{H_2} je energetická účinnosť výroby kvapalného vodíka.

S ohľadom na skladovanie vodíka je nutné zohľadniť jeho výparné straty. Rýchlosť vyparovania vodíka zo zásobníka v dôsledku úniku tepla závisí od veľkosti, tvaru a tepelnej izolácie. Keďže

straty pri vyparovaní v dôsledku úniku tepla sú úmerné pomeru povrchu ku objemu, rýchlosť vyparovania sa so zväčšujúcou sa veľkosťou skladovacej nádrže prudko znižuje. V prípade dvojstenných vákuovo izolovaných sférických Dewarových nádob sú straty vyparovaním zvyčajne 0,4 % objemu za deň pre nádrže, ktoré majú skladovací objem 50 m³, 0,2 % pre nádrže s objemom 100 m³ a 0,06 % pre nádrže s objemom 20 000 m³ [38].

5.4. Energetická bilancia amoniaku

Najčastejšie používanou metódou výroby amoniaku je Haber-Boschov proces, ktorého nevýhodou sú vysoké emisie skleníkových plynov a vysoká spotreba energie, najmä v dôsledku vysokého prevádzkového tlaku a teploty. Haber-Boschov proces je vo všeobecnosti poháňaný fosílnymi palivami, zvyčajne za prítomnosti katalyzátora na báze železa. Energetická účinnosť tohto procesu sa pohybuje v rozmedzí 40-60% [39]. Rovnako ako v predchádzajúcich prípadoch vieme potrebnú energiu spočítať nasledovne:

$$\eta_{HB} = \frac{LHV_{NH_3}}{E_{potrebnáNH_3}}$$

Tak ako v predchádzajúcich prípadoch rovnicu upravíme do tvaru:

$$E_{potrebnáNH_3} = \frac{LHV_{NH_3}}{\eta_{HB}}$$

$$E_{potrebná} = \frac{18,6}{0,5} = 37,2 \text{ MJ/kg}$$

kde LHV_{NH_3} je čistý energetický obsah amoniaku v MJ na 1 kg a η_{HB} je energetická účinnosť Haber-Boschovho procesu. Pre úplnosť výpočtu je vhodné uviesť aj potrebnú energiu na výrobu surovín vstupujúcich do Haber-Boschovho procesu. SMR je v súčasnosti najčastejšie používaným procesom na výrobu vodíka používaného na výrobu amoniaku a jeho účinnosť sa pohybuje na úrovni 70%. Kryogénna separácia vzduchu, s účinnosťou 90% je zvolená technika na výrobu potrebného množstva dusíka [40].

5.5. Energetická bilancia LNG

Skvapalnený zemný plyn, ktorý bol zmienený v kapitole 3 sa vyrába procesom skvapalňovania zemného plynu. Skvapalňovanie je energeticky najnáročnejšia časť výroby LNG. V súčasnosti sa pripravuje alebo už používa niekoľko procesov, ktoré sa líšia v zložitosti a energetických nárokoch. Vhodnosť a energetická účinnosť vybraného procesu skvapalňovania závisí na mnohých faktoroch [41]. Energetickú účinnosť je možné definovať pomocou účinnosti ťažby zemného plynu, ktorá sa pohybuje na úrovni 92% [42] a účinnosťou procesu skvapalňovania nasledovne:

$$\eta_{tNG} = \frac{LHV_{NG}}{E_{potrebnáNG}}$$

Tak ako v predchádzajúcich prípadoch rovnicu upravíme do tvaru:

$$E_{potrebnáNG} = \frac{LHV_{NG}}{\eta_{tNG}} = \frac{49}{0,92} = 53,26 \text{ MJ/kg}$$

kde LHV_{NG} je čistý energetický obsah zemního plynu v MJ na kg, η_{LNG} je účinnost těžby zemního plynu a $E_{potrebnáLNG}$ je potřebná energia na těžbu zemního plynu.

$$\eta_{LNG} = \frac{LHV_{LNG}}{E_{potrebnáLNG}} = \frac{LHV_{LNG}}{LHV_{NG} + E_{DLNG}} = \frac{46.7}{49 + 2,52} = 0,906$$

kde LHV_{LNG} je čistý energetický obsah LNG na 1 kg a E_{DLNG} je dodaná energia v procese skvapalňovania, ktorá sa pohybuje na úrovni 2,52 MJ/kg [41].

Pre úplnosť výpočtu by bolo vhodné zahrnúť aj energiu potrebnú na transport a skladovanie. Energetická účinnosť prepravy a skladovania LNG sa hodnotí na základe množstva vypareného plynu. Jeho množstvo závisí od času potrebného na prepravu [41]. Na základe štúdie Pospíšila a spol., jednoduchové uskladnenie LNG odpovedá strate 0,15% objemu LNG [41].

5.6. Energetická bilancia e-paliva (e-Kerozínu)

Ako už bolo spomenuté v kapitole 3.2.2., e-Kerozín je vyrábaný v pomocou kombinácie vodíka vyrobeného elektrolýzou a oxidu uhličitého a následného FT procesu zobrazeného na obrázku 6. Podľa štúdie vykonanej Rojasom a spol. sa účinnosť priameho zachytávania CO₂ pohybuje na úrovni 88%, premeny vodíka na úrovni 39,16% a následnej výroby e-Kerozínu na 28,06% [43]. Zo zmienovaných účinností je možné spočítať množstvo potrebnej energie nasledovne:

$$\eta_{CO_2} \cdot \eta_{H_2} \cdot \eta_{PtL} = \frac{LHV_{PtL}}{E_{potrebnáPtL}}$$

Tak ako v predchádzajúcich prípadoch rovnicu upravíme do tvaru:

$$E_{potrebnáPtL} = \frac{LHV_{PtL}}{\eta_{CO_2} \cdot \eta_{H_2} \cdot \eta_{PtL}} = \frac{43}{0,88 \cdot 0,3916 \cdot 0,2806} = \frac{43}{0,0966} = 445,13 \text{ MJ/kg}$$

Kde LHV_{PtL} je čistý energetický obsah PtL-kerozínu (e-Kerozínu) v MJ na kg, η_{CO_2} je účinnosť zachytávania CO₂, η_{H_2} je účinnosť premeny vodíka a η_{PtL} je účinnosť výroby PtL-kerozínu.

5.7. Porovnanie

V nasledujúcej tabuľke je sumarizovaná energetická bilancia palív spomenutých v kapitole 5. Pre úplnosť výpočtu sú zahrnuté aj celkové účinnosti prúdových motorov. Účinnosti prúdových motorov sú rozdielne pre typy palív:

- Palivo Jet A-1, biopalivo HEFA a e-Kerozín budú použité v prúdových motoroch s rovnakou energetickou účinnosťou v rozsahu od 44,61 do 29,15% [44].
- Účinnosť prúdového motoru poháňaného amoniakom sa bude pohybovať na úrovni 80% [45].
- Účinnosť prúdového motora, ktorý používa vodíkové palivo sa pohybuje na hranici 40% [46].
- Účinnosť prúdového motora s použitím LNG paliva sa pohybuje na hranici 44% [47].

Tabuľka 6: Energetické bilancie palív zmienených v kapitole 5

Typ paliva	Jet A1	HEFA	Vodík	LNG	Amoniak	e-Kerozín
Čistý energetický obsah [MJ/kg]	44	43,9	120	46,7	18,6	43
Energia potrebná na výrobu [MJ/kg]	55,76	57,76	219,84	53,26	37,2	445,13
Energetická účinnosť	0,79	0,76	0,54	0,906	0,5	0,096
Účinnosť príslušného prúdového motora	0,35	0,35	0,375	0,44	0,8	0,35
Energia použitá na pohon [MJ/kg]	15,4	15,36	45	20,5	14,4	15,05
Celková strata energie [MJ/kg]	40,36	42,4	174,84	32,76	22,8	430,08

5.7.1. Porovnanie potrebnej plochy dvoch najperspektívnejších biopalív (HEFA/e-Kerozín)

Dopyt po pôde predstavuje ďalší ukazovateľ výkonnosti, ktorý má environmentálny a spoločenský význam. Tabuľka 6 znázorňuje špecifické hrubé nároky na plochu a dosiahnuteľný dolet z rozličných surovín. Ako je zrejmé, plošná špecifická výnosnosť e-Kerozínu je vo všeobecnosti vysoká a prevyšuje výnosnosť dosiahnutú pri biopalivách. Dôležité je, že toto porovnanie vychádza z hrubej potreby plochy, pričom fotovoltaika a najmä veterná energia majú podstatne nižšie pokrytie pôdy ako poľnohospodárska výroba biomasy (pokrytie pôdy takmer 100%). To znamená, že najmä v prípade veternej energie sa zabrána pôda môže využívať na iné účely. Je tiež dôležité uznať, že sa musí zohľadniť nielen množstvo pôdy potrebnej na výrobu, ale aj typ pôdy. Výroba energie z obnoviteľných zdrojov v zásade nezávisí od ornej pôdy, napríklad púštne oblasti ponúkajú veľmi vhodné podmienky na výrobu energie z fotovoltaických alebo solárnych zdrojov. V dôsledku toho sa výrazne znižuje riziko konkurencie medzi potravinami a energiou. [48]

Tabuľka 7: Porovnanie množstva paliva a doletu na základe vstupnej suroviny [48]

Spôsob výroby	Množstvo leteckého paliva [GJ/ha]	Dosiahnuteľný dolet [km/ha]
Jatrofový olej (HEFA)	15-50	124-425
Palmový olej (HEFA)	162	1379
Olej z rias (HEFA)	156-402	1327-3422
e-Kerozín (fotovoltaika)	580-1070	4950-9080
e-Kerozín (veterná energia)	470-1040	4040-8860

Rozsah množstva leteckého paliva vyplýva zo stredne výnosných verus vysoko výnosných výrobných miest a zdrojov CO₂. Dosiahnuteľný dolet bol vyčíslený pre Airbus A320neo, ktorý má spotrebu 0,37 km/kg_{leteckého paliva}. Fotovoltaika zahŕňa pracovný priestor a vzdialenosť medzi radmi panelov, aby sa zabránilo čiastočnému zatieneniu. Väčšina plochy pre veternú energiu sa stále môže využívať na iné účely, pretože len približne 2,6 – 3,4% plochy je v skutočnosti pokrytých [48].

Zhodnotenie

Použitie alternatívnych palív v leteckej doprave je neodvratiteľným následkom vyčerpania zásob fosílnych palív. Avšak, k tejto zmene je potrebné pristúpiť zodpovedne, pretože nevhodný výber budúcich palív na pohon leteckých motorov môže mať katastrofické následky.

V súčasnosti medzi uvažované palivá na pohon leteckej dopravy patria: udržateľné letecké palivá, kvapalný a plynný vodík, skvapalnený zemný plyn, amoniak, e-palivá a elektrická energia.

Podľa môjho názoru sú najperspektívnejším palivami udržateľné letecké palivá, presnejšie druhy HEFA a ATJ, ktorých používanie bolo otestované, schválené a v súčasnosti už sú plne adaptované na použitie v leteckom priemysle ako zložky zmesi leteckého paliva s kerozínom. Avšak aj pri použití týchto palív je nutné byť obozretný, keďže sú vyrábané z jedlých surovín a ich použitie vo veľkom množstve môže začať vyvolávať otázku palivo verzus potraviny. Za negatívum použitia týchto palív by som označil vysoké ekonomické nároky na výrobu, ktoré však môžu byť kompenzované použitím existujúcej infraštruktúry.

Za druhý najperspektívnejší druh paliva by som označil vodík, a to z dôvodu jeho vysokej dostupnosti a vysokého čistého energetického obsahu. Avšak, veľkým negatívom použitia vodíka je nutné kompletné prerobenie palivového systému lietadiel a leteckej infraštruktúry, keďže jeho použitie nie je kompatibilné s infraštruktúrou pre kerozín. Ďalším negatívom použitia vodíka môže byť jeho skladovanie, ktoré je energeticky náročné a pri nehodách môže mať fatálne následky kvôli potrebe vysokého tlaku pri skladovaní.

Elektrická energia s použitím bateriek nebola v tejto práci uvažovaná z dôvodu nízkej energetickej hustoty. Proti použitiu elektrických batérií hovorí aj potrebná hmotnosť, ktorá drasticky znižuje teoreticky dolet lietadla. Na rozdiel od kvapalných palív by bola hmotnosť lietadla po celú dobu letu konštantná, čo je nevhodná vlastnosť pre aplikovanie v letectve. Pre možné použitie elektrickej energie vo forme batérií by bolo potrebné minimálne 40-50 násobné zvýšenie energetickej hustoty čo v tejto dobe považujem za nereálne.

Medzi zaujímavú alternatívu môže patriť použitie syntetických palív, napríklad syntetického e-kerozínu. Toto syntetické palivo je fyzikálne najbližšie ku kerozínu, keďže je jeho vysoko rafinovanou formou a je možné ich použiť ako zmes. Negatívom tohto paliva je vysoká zložitosť vstupných surovín a rizikovosť investície, keďže letecký priemysel má dlhú históriu rušenia vlajkových projektov. Za ďalšie negatívum použitia e-kerozínu by som považoval veľké množstvo potrebnej energie vo výrobnom procese.

Záver

Táto bakalárska práca sa zaoberá možným použitím biopalív v leteckom priemysle a doprave. Podstata nahradenia kerozínu spočíva jednak v možnosti zníženie emisií skleníkových plynov produkovaných v leteckom priemysle, ale aj budúceho prechodu z fosílnych palív na alternatívne palivá pri vyčerpaní ropných zásob.

Úvod práce sa venuje popisu fyzikálnych vlastností a výrobných metód konvenčne používaného leteckého paliva JET A1, ktoré neskôr slúži ako porovnávacie kritérium na posúdenie alternatívnych leteckých palív. Stredná časť tejto práce venuje popisu biopalív, kde boli spomenuté výrobné metódy a fyzikálne vlastnosti udržateľných leteckých palív, kvapalného a plynného vodíka, skvapalneného zemného plynu, amoniaku a e-palív. V tejto časti sú spomenuté výhody aj nevýhody budúceho použitia uvedených palív.

Nasledujúca časť tejto bakalárskej práce sa venuje potrebným konštrukčným a infraštruktúrnym zmenám, či už priamo na lietadlách alebo na letiskách, keďže nie je možné použiť existujúcu infraštruktúru pre všetky druhy alternatívnych palív. Najčastejšou konštrukčnou zmenou v lietadlách je prebudovanie palivového systému či už z dôvodu rozdielnych hustôt zmienených palív alebo priamo zmenou skupenstva navrhovaného paliva. Ako inovatívny nápad je nutné spomenúť použitie vodíkových palivových článkov na energetické zásobovanie ako letiskovej infraštruktúry, tak aj samotného lietadla.

Posledná časť tejto práce sa venuje energetickým bilanciam a účinnostiam výrobných procesov alternatívnych leteckých palív. Vo výpočte bola zohľadnená aj celková účinnosť leteckých prúdových motorov, pri použití rôznych druhoch palív. Tieto bilancie ale nemôžu byť jediným kritériom posudzovania vhodnosti leteckého paliva. Tento proces výberu musí zahŕňať nielen energetickú stránku použitia, ale napríklad aj ekonomickú, logistickú, etickú alebo environmentálnu.

Otázkou do budúcnosti zostáva, či bude nástupca konvenčne používaných leteckých palív zvolený z palív zmienených v tejto bakalárskej práci, alebo nastane výrazný technologický posun napríklad v oblasti energetickej hustoty batérií a lety budú realizované pomocou elektrickej energie. Je napríklad možné, že ideálny nástupca leteckého paliva ešte nebol vôbec objavený a na jeho objavenie bude potrebný veľký technologický prelom?

Zoznam použitých zdrojov

- [1] BRYNOLF, Selma, Julia HANSSON, James E ANDERSON, et al. Review of electrofuel feasibility—prospects for road, ocean, and air transport. *Progress in Energy* [online]. 2022, 2022-08-12, **4**(4), 042007 [cit. 2024-02-07]. ISSN 2516-1083. Dostupné z: doi:10.1088/2516-1083/ac8097
- [2] ROGACHUK, Brooke E. a OKOLIE, Jude A. Comparative assessment of pyrolysis and Gasification-Fischer Tropsch for sustainable aviation fuel production from waste tires. Online. *Energy Conversion and Management*. 2024, roč. 302, č. Volume 302, s. 118110. ISSN 01968904. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118110>. [cit. 2024-02-07].
- [3] SCHEELHAASE, Janina; MAERTENS, Sven a GRIMME, Wolfgang. Synthetic fuels in aviation – Current barriers and potential political measures. Online. *Transportation Research Procedia*. 2019, roč. 43, č. 43, s. 21-30. ISSN 23521465. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.12.015>. [cit. 2024-02-07].
- [4] HEMINGHAUS, Greg, Tracy BOVAL a John BACHA. Aviation Fuels. *Chevron* [online]. 2007 [cit. 2024-02-09]. Dostupné z: <https://www.chevron.com/-/media/chevron/operations/documents/aviation-tech-review.pdf>
- [5] Viscosity. *Britannica* [online]. 2024 [cit. 2024-02-12]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/viscosity>
- [6] LIU, Guangrui, Beibei YAN a Guanyi CHEN. Technical review on jet fuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2013, **25**(25), 59-70 [cit. 2024-02-12]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2013.03.025
- [7] WHITE, Russell D. Refining and Blending of Aviation Turbine Fuels. *Drug and Chemical Toxicology* [online]. 2008, 2008-09-27, **22**(1), 143-153 [cit. 2024-02-16]. ISSN 0148-0545. Dostupné z: doi:10.3109/01480549909029728
- [8] SORENSEN, Chuck. Petroleum-Based Jet Fuel Production. *Lee Enterprises Consulting* [online]. [cit. 2024-02-13]. Dostupné z: <https://lee-enterprises.com/petroleum-based-jet-fuel-production-saf/>
- [9] CHEREMISINOFF, Nicholas P. a Paul ROSENFELD. The petroleum industry. In: *Handbook of Pollution Prevention and Cleaner Production - Best Practices in The Petroleum Industry* [online]. Elsevier, 2009, s. 1-97 [cit. 2024-02-17]. ISBN 9780815520351. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-8155-2035-1.10001-6
- [10] KWAO, Simon, Sundaramurthy VEDACHALAM, Ajay K. DALAI a John ADJAYE. Review of current advances in hydrotreating catalyst support. *Journal*

- of Industrial and Engineering Chemistry* [online]. 2024, 2 [cit. 2024-04-08]. ISSN 1226086X. Dostupné z: doi:10.1016/j.jiec.2024.01.027
- [11] MOHANTY, S., D. KUNZRU a D.N. SARAF. Hydrocracking: a review. *Fuel* [online]. 1990, **69**(12), 1467-1473 [cit. 2024-04-08]. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/0016-2361(90)90192-S
- [12] BAXTER, Alexander a Fredric EHRICH. Jet engine. *Encyclopedia Britannica* [online]. 2024 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/jet-engine>
- [13] LEISHMAN, J.Gordon. *Introduction to Aerospace Flight Vehicles* [online]. 3rd. Embry-Riddle Aeronautical University, 2024 [cit. 2024-04-08]. ISBN 979-8-9852614-0-0. Dostupné z: <https://eaglepubs.erau.edu/introductiontoaerospaceflightvehicles/front-matter/4811/>
- [14] How Does A Turbofan Engine Work? CUTLER, Colin. *Boldmethod* [online]. 2022 [cit. 2024-04-08]. Dostupné z: <https://www.boldmethod.com/learn-to-fly/aircraft-systems/how-does-a-jet-engine-turbofan-system-work-the-basic-steps/>
- [15] DETSIOS, Nikolaos, Stella THEODORAKI, Leda MARAGOUDAKI, Konstantinos ATSONIOS, Panagiotis GRAMMELIS a Nikolaos G. ORFANOUDAKIS. Recent Advances on Alternative Aviation Fuels/Pathways: A Critical Review. *Energies* [online]. 2023, **16**(4), 1-25 [cit. 2024-02-17]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en16041904
- [16] ABRANTES, Ivo, Ana F. FERREIRA, André SILVA a Mário COSTA. Sustainable aviation fuels and imminent technologies - CO2 emissions evolution towards 2050. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2021, **313**, 1-14 [cit. 2024-02-18]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2021.127937
- [17] CABRERA, Eduardo a João M. Melo DE SOUSA. Use of Sustainable Fuels in Aviation—A Review. *Energies* [online]. 2022, **15**(7), 9-16 [cit. 2024-04-28]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en15072440
- [18] YAO, Guolin, Mark D. STAPLES, Robert MALINA a Wallace E. TYNER. Stochastic techno-economic analysis of alcohol-to-jet fuel production. *Biotechnology for Biofuels* [online]. 2017, **10**(1), 1-13 [cit. 2024-02-18]. ISSN 1754-6834. Dostupné z: doi:10.1186/s13068-017-0702-7
- [19] COLELLI, Leonardo, Valentina SEGNARI, Claudia BASSANO a Giorgio VILARDI. E-fuels, technical and economic analysis of the production of synthetic kerosene precursor as sustainable aviation fuel. *Energy Conversion and Management* [online]. 2023, **288**, 2-25 [cit. 2024-03-10]. ISSN 01968904. Dostupné z: doi:10.1016/j.enconman.2023.117165

- [20] NEMMOUR, Amira, Abrar INAYAT, Isam JANAJREH a Chaouki GHENAI. Green hydrogen-based E-fuels (E-methane, E-methanol, E-ammonia) to support clean energy transition: A literature review. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2023, **48**(75), 29011-29033 [cit. 2024-03-10]. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2023.03.240
- [21] ATSONIOS, Konstantinos, Jun LI a Vassilis J. INGLEZAKIS. Process analysis and comparative assessment of advanced thermochemical pathways for e-kerosene production. *Energy* [online]. 2023, **278**, 1-15 [cit. 2024-03-10]. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2023.127868
- [22] RAM, Vishal a Surender Reddy SALKUTI. An Overview of Major Synthetic Fuels. *Energies* [online]. 2023, **16**(6), 18-19 [cit. 2024-04-08]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en16062834
- [23] YUSAF, Talal, Louis FERNANDES, Abd Rahim ABU TALIB, et al. Sustainable Aviation—Hydrogen Is the Future. *Sustainability* [online]. 2022, **14**(1), 2-17 [cit. 2024-03-11]. ISSN 2071-1050. Dostupné z: doi:10.3390/su14010548
- [24] OTTO, Marcel, Ladislav VESELY, Jayanta KAPAT, Michael STOIA, Nicholas D. APPELEGATE a Gregory NATSUI. Ammonia as an Aircraft Fuel: A Critical Assessment From Airport to Wake. *ASME Open Journal of Engineering* [online]. 2023, 2023-01-01, **2**(2), 1-12 [cit. 2024-02-20]. ISSN 2770-3495. Dostupné z: doi:10.1115/1.4062626
- [25] ROMPOKOS, Pavlos, Sajal KISSOON, Ioannis ROUMELIOTIS, Devaiah NALIANDA, Theoklis NIKOLAIDIS a Andrew ROLT. Liquefied Natural Gas for Civil Aviation. *Energies* [online]. 2020, **13**(22), 2-20 [cit. 2024-03-10]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en13225925
- [26] BAUEN, Ausilio, Niccolò BITOSSI, Lizzie GERMAN, Anisha HARRIS a Khangzhen LEOW. Sustainable Aviation Fuels. *Johnson Matthey Technology Review* [online]. 2020, 2020-07-01, **64**(3), 263-278 [cit. 2024-02-18]. ISSN 2056-5135. Dostupné z: doi:10.1595/205651320X15816756012040
- [27] Introducing the first electric vertical take-off and landing jet. In: *Lilium* [online]. [2019] [cit. 2024-02-19]. Dostupné z: <https://lilium.com/jet>
- [28] FERNANDES, M.D., S.T. DE P. ANDRADE, V.N. BISTRITZKI, et al. SOFC-APU systems for aircraft: A review. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2018, **43**(33), 16311-16333 [cit. 2024-04-07]. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2018.07.004
- [29] CHAKAUYA, E., G. BEYENE a R. K. CHIKWAMBA. Food production needs fuel too: perspectives on the impact of biofuels in southern Africa. *South African Journal of Science* [online]. 2010, **105**(5/6) [cit. 2024-05-17]. ISSN 1996-7489. Dostupné z: doi:10.4102/sajs.v105i5/6.84

- [30] ZHANG, Yu, Zhe CUI, Mingzhang WANG, Bin LIU, Xiaomin FAN a Wende TIAN. An Energy-Efficiency Prediction Method in Crude Distillation Process Based on Long Short-Term Memory Network. *Processes* [online]. 2023, **11**(4), 10 [cit. 2024-05-15]. ISSN 2227-9717. Dostupné z: doi:10.3390/pr11041257
- [31] WANG, HeWu, XiaoBin ZHANG a MingGao OUYANG. Energy and environmental life-cycle assessment of passenger car electrification based on Beijing driving patterns. *Science China Technological Sciences* [online]. 2015, **58**(4), 659-668 [cit. 2024-05-21]. ISSN 1674-7321. Dostupné z: doi:10.1007/s11431-015-5786-3
- [32] BOEHM, Randall C., Zhibin YANG, David C. BELL, John FELDHAUSEN a Joshua S. HEYNE. Lower heating value of jet fuel from hydrocarbon class concentration data and thermo-chemical reference data: An uncertainty quantification. *Fuel* [online]. 2022, **311**, 3 [cit. 2024-05-17]. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2021.122542
- [33] TAO, Ling, Anelia MILBRANDT, Yanan ZHANG a Wei-Cheng WANG. Techno-economic and resource analysis of hydroprocessed renewable jet fuel. *Biotechnology for Biofuels* [online]. 2017, **10**(1), 4 [cit. 2024-05-16]. ISSN 1754-6834. Dostupné z: doi:10.1186/s13068-017-0945-3
- [34] BAUEN, Ausilio, Niccolò BITOSSI, Lizzie GERMAN, Anisha HARRIS a Khangzhen LEOW. Sustainable Aviation Fuels. *Johnson Matthey Technology Review* [online]. 2020, **64**(3), 263-278 [cit. 2024-05-19]. ISSN 2056-5135. Dostupné z: doi:10.1595/205651320X15816756012040
- [35] GŁÓWKA, Marek, Jan WÓJCIK, Przemysław BOBERSKI, Tomasz BIAŁECKI, Bartosz GAWRON, Marta SKOLNIAK a Tomasz SUCHOCKI. Sustainable aviation fuel – Comprehensive study on highly selective isomerization route towards HEFA based bioadditives. *Renewable Energy* [online]. 2024, **220**, 2 [cit. 2024-05-21]. ISSN 09601481. Dostupné z: doi:10.1016/j.renene.2023.119696
- [36] SHIVA KUMAR, S. a V. HIMABINDU. Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. *Materials Science for Energy Technologies* [online]. 2019, **2**(3), 442-454 [cit. 2024-04-29]. ISSN 25892991. Dostupné z: doi:10.1016/j.mset.2019.03.002
- [37] AL GHAFRI, Saif ZS., Stephanie MUNRO, Umberto CARDELLA, et al. Hydrogen liquefaction: a review of the fundamental physics, engineering practice and future opportunities. *Energy & Environmental Science* [online]. 2022, 2022-07-13, **15**(7), 2690-2731 [cit. 2024-05-21]. ISSN 1754-5692. Dostupné z: doi:10.1039/D2EE00099G
- [38] ZÜTTEL, Andreas. Hydrogen storage methods. *Naturwissenschaften* [online]. 2004, 2004-4-1, **91**(4), 157-172 [cit. 2024-05-21]. ISSN 0028-1042. Dostupné z: doi:10.1007/s00114-004-0516-x

- [39] GHAVAM, Seyedezhoma, Maria VAHDATI, I. A. Grant WILSON a Peter STYRING. Sustainable Ammonia Production Processes. *Frontiers in Energy Research* [online]. 2021, 2021-3-29, **9**, 2 [cit. 2024-04-29]. ISSN 2296-598X. Dostupné z: doi:10.3389/fenrg.2021.580808
- [40] BICER, Yusuf, Ibrahim DINCER, Greg VEZINA a Frank RASO. Impact Assessment and Environmental Evaluation of Various Ammonia Production Processes. *Environmental Management* [online]. 2017, **59**(5), 842-855 [cit. 2024-05-23]. ISSN 0364-152X. Dostupné z: doi:10.1007/s00267-017-0831-6
- [41] POSPÍŠIL, Jiří, Pavel CHARVÁT, Olga ARSENYEVA, Lubomír KLIMEŠ, Michal ŠPILÁČEK a Jiří Jaromír KLEMEŠ. Energy demand of liquefaction and regasification of natural gas and the potential of LNG for operative thermal energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2019, **99**, 1-15 [cit. 2024-05-17]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2018.09.027
- [42] Natural Gas. *Center for Climate and Energy Solutions* [online]. [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: <https://www.c2es.org/content/natural-gas/>
- [43] ROJAS-MICHAGA, Maria Fernanda, Stavros MICHAÏLOS, Evelyn CARDOZO, Muhammad AKRAM, Kevin J. HUGHES, Derek INGHAM a Mohamed POURKASHANIAN. Sustainable aviation fuel (SAF) production through power-to-liquid (PtL): A combined techno-economic and life cycle assessment. *Energy Conversion and Management* [online]. 2023, **292**(117427), 10 [cit. 2024-05-21]. ISSN 01968904. Dostupné z: doi:10.1016/j.enconman.2023.117427
- [44] CIHANGIR, Serhan Ahmet, Hakan AYGUN a Onder TURAN. Energy and performance analysis of a turbofan engine with the aid of dynamic component efficiencies. *Energy* [online]. 2022, **260**, 6 [cit. 2024-05-17]. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2022.125085
- [45] BONASIO, Vittorio a Silvia RAVELLI. Performance Analysis of an Ammonia-Fueled Micro Gas Turbine. *Energies* [online]. 2022, **15**(11), 7 [cit. 2024-05-17]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en15113874
- [46] OĞUR, Emine, Ali KOÇ, Hüseyin YAĞLI, Yıldız KOÇ a Özkan KÖSE. Thermodynamic, economic, and environmental analysis of a hydrogen-powered turbofan engine at varying altitudes. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2024, **55**, 1203-1216 [cit. 2024-05-17]. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2023.11.252
- [47] Baker Hughes LM9000 confirmed as world's most efficient simple cycle gas turbine after reaching key testing milestone for Arctic LNG 2. *Baker Hughes* [online]. 2020 [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: <https://www.bakerhughes.com/company/news/baker-hughes-lm9000-confirmed-worlds-most-efficient-simple-cycle-gas-turbine-after>

- [48] SCHMIDT, Patrick, Valentin BATTEIGER, Arne ROTH, Werner WEINDORF a Tetyana RAKSHA. Power-to-Liquids as Renewable Fuel Option for Aviation: A Review. *Chemie Ingenieur Technik* [online]. 2018, **90**(1-2), 127-140 [cit. 2024-05-21]. ISSN 0009-286X. Dostupné z: doi:10.1002/cite.201700129
- [49] EXCELL, Jon. Rolls-Royce and Airbus cancel E-Fan X project. *The Engineer* [online]. 2020 [cit. 2024-05-16]. Dostupné z: <https://www.theengineer.co.uk/content/news/rolls-royce-and-airbus-cancel-e-fan-x-project/>