

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA DOPRAVNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
ALTERNATIVNÍ PALIVA V CIVILNÍM LETECTVÍ**

JAN KUBICZEK

2021

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

děkan

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



K621 **Ústav letecké dopravy**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Jan Kubiczek

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

B 3710 – PIL – Profesionální pilot

Název tématu (česky): **Alternativní paliva v civilním letectví**

Název tématu (anglicky): Alternative Fuels in Civil Aviation

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem práce je provést na základě literární rešerše posouzení proveditelnosti nahrazení stávajících fosilních paliv palivy z obnovitelných zdrojů, které by zajistily požadované snížení oxydu uhličitého v civilním letectví dle vize Evropské unie do roku 2050
- Palivová náročnost letadlových pohonných jednotek v současnosti a ve výhledu do roku 2050
- Současná paliva a jejich chemická složení a fyzikální vlastnosti
- Druhy alternativních paliv a jejich chemická složení a fyzikální vlastnosti, včetně možnosti použití elektrické energie k pohonu a jejich vhodnosti pro použití v letectví
- Způsoby získávání alternativních paliv z hlediska zdrojů a energetické náročnosti (biopaliva, kapalný vodík, metan, syntetický petrolej)
- Biopaliva a omezení jejich používání z hlediska omezeného zdroje a dopadu na životní prostředí (omezená plocha zemědělské půdy, poškození biodiverzity apod.)



Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího závěrečné práce

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: DDP Ing. Martin Voráček, Ph.D.

Daggett, D. - Alternative Fuels and Their Potential Impact on Aviation.

SimonBlakey - Aviation gas turbine alternative fuels: A review

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Daniel Hanus, CSc., EUR ING, AFAIAA**

Datum zadání bakalářské práce:

9. října 2019

(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce:

9. srpna 2021

- a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

doc. Ing. Jakub Kraus, Ph.D.
vedoucí
Ústavu letecké dopravy



doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Jan Kubiczek
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 3. prosince 2020

Abstrakt

Cílem bakalářské práce „Alternativní paliva v letectví“ je provést posouzení nahraditelnosti konvenčních paliv palivy a energií z obnovitelných zdrojů. Práce se postupně zabývá palivovou náročností v současnosti a s výhledem do budoucna, popisem stávajících paliv a vybraných alternativních zdrojů. Na základě analýzy práce dospěla k závěru, že se jako nejsmyslnější řešení v souladu cíli EU týkající se zelené transformace jeví využití konvenčních paliv s příměsí biosložky.

Klíčová slova

Alternativní palivo, letecké palivo, obnovitelné zdroje energie, uhlíková stopa

Abstract

The aim of the bachelor thesis "Alternative fuels in aviation" is to assess the substitutability of conventional fuels by fuels and energy from renewable sources. The thesis deals with fuel consumption at present and with a view to the future, description of existing fuels and selected alternative sources. Using an analysis, the thesis concludes that the use of conventional fuels with an admixture of biocomponents appears to be the most sensible solution in line with the EU green transformation targets.

Key words

Alternative fuel, aviation fuel, renewable energy, carbon footprint

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou závěrečnou práci s názvem „název práce“ vypracoval/a samostatně a že jsem uvedl/a veškeré použité informační zdroje v souladu s metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

v Praze dne 09. 08. 2021

podpis



Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval doc. Ing. Danielu Hanusovi, CSc., za cenné rady, tipy, připomínky a vstřícnost při vedení mé bakalářské práce. Rovněž bych rád poděkoval kamarádovi Ondrovi za pomoc s formální úpravou mé práce.

Obsah

Seznam obrázků	
Seznam grafů	
Úvod.....	1
1 Vývoj palivové náročnosti letadlových pohonných jednotek.....	2
1.1 Budoucnost a vývoj.....	4
1.2 Využití alternativních paliv v současnosti.....	7
2 Konvenční paliva v letectví	9
2.1 Letecký petrolej	10
2.2 Letecký benzín.....	11
3 Alternativní paliva v letectví	13
3.1 Syntetická paliva	13
3.2. Generace biopaliv	13
3.2.1 Výroba Syntetických paliv a biopaliv.....	15
3.2.2 Dostupnost a cena biopaliv a syntetických paliv.....	16
3.3 Elektrická energie.....	17
3.3.1 Dostupnost a cena elektrické energie	18
3.3.2 Ekologické dopady a využívání elektrické energie v současnosti	20
3.4. Vodík	20
3.4.1 Výroba vodíku a vliv na životní prostředí	22
3.4.2 Dostupnost a cena vodíku.....	25
4 Posouzení nahraditelnosti konvenčních paliv	27
4.1 Nahrazení konvenčního paliva biopalivem druhé generace	27
4.2 Možnost zajištění udržitelných zdrojů paliv pro leteckou dopravu na území EU	29
4.3 Emise CO ₂ při výrobě alternativního paliva.....	30
4.4 Porovnání ceny paliv	32
Diskuse.....	33
Závěr.....	35
Seznam zdrojů	37

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Koncept open-rotor.....	5
Obrázek 2 – Koncept blended wing body.....	6
Obrázek 3 – Hlavní kvalitativní požadavky na letecký petrolej JET A-1 (podle AFQRJOS)	11
Obrázek 4 – Nejdůležitější kvalitativní požadavky na letecké benziny podle ASTM D 910	12
Obrázek 5 – Řasa Algae	15
Obrázek 11 – (a) uložení konvenčního paliva, (b) možné uložení vodíkových nádrží u letounu pro krátké a středně dlouhé vzdálenosti, (c) možné uložení nádrží u letounů pro dlouhé vzdálenosti.....	22
Obrázek 12 – Palivové články PEMFC a SOFC.....	22
Obrázek 13 – Výroba vodíku ze solární energie	25

Seznam grafů

Graf 1 – Roční spotřeba leteckého paliva v EU	4
Graf 2 – Produkce primární energie v EU (2008 = 100 toe)	17
Graf 3 – Hrubá produkce elektrické energie podle typu paliva	18
Graf 4 – Cena elektrické energie pro domácnost	19
Graf 5 – Cena elektrické energie pro použití mimo domácnost	19
Graf 6 – Produkce CO ₂ při výrobě elektrické energie s predikcí do roku 2030	20

Seznam zkratek

ACARE	Advisory Council for Aviation Research and Innovation in Europe	Poradní rada pro letecký výzkum a inovace v Evropě
AFQRJOS	Aviation Fuel Requirements for Jointly Operated systems	Požadavky na letecké palivo pro společně provozované systémy
APU	Auxiliary power unit	Pomocná energetická jednotka
ASTM	American Society for Testing and Materials	Americká společnost pro testování a materiály
AVGAS	Aviation Gasoilne	Letecké palivo
BTL	Biomass to liquid	Palivo vyrobené z biomasy
CNG	Compressed Natural Gas	Stlačený zemní plyn
GTL	Gas to liquid	Palivo vyrobené z plynu
CVR	Cockpit voice recorder	Hlasový záznamník v pilotní kabině
ČR	Czech Republic	Česká republika
EU	European Union	Evropská Unie

FDR	Flight data recorder	Zapisovač letových údajů
FT	Fischer-Tropsch	Fischer-Tropschova
HEFA	Hydroprocessed esters and fatty acids	Hydro estery mastných kyselin
HRJ	Hydrotreated renewable jet	Obnovitelné letecké palivo
ICAO	International Civil Aviation Organization	Mezinárodní organizace pro civilní letectví
NARDP	National Aeronautics Research and Development Policy	Národní politika výzkumu a vývoje v oblasti letectví
NASA	National Aeronautics and Space Administration	Národní úřad pro letectví a vesmír
OSN	United Nations	Organizace spojených národů
OZE	Renewable sources of energy	Obnovitelné zdroje energie
PEM	Proton Exchange Membrane	Protonová výměnná membrána
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell	Palivový článek s protonovou výměnnou membránou
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell	Palivový článek s pevným oxidem

SPE	Solid Polymer Electrolyte	Pevný polymerový elektrolyt
SPK	Synthetic paraffinic kerosene	Syntetický parafínový petrolej
USA	United States of America	Spojená státy americké
XWB	eXtra Wide Body	Extra širokotrupý

Úvod

Alternativním palivům v letectví se dostává stále více pozornosti, toto tvrzení dokládá fakt, že jsou tyto alternativní zdroje základním stavebním kamenem strategie Evropské Unie pro dosažení klimatické neutrality do roku 2050. Letecká doprava v roce 2017 v EU vyprodukovala zhruba 3,8 % emisí oxidu uhličitého z celkové výše. Na tvorbě emisí oxidu uhličitého v dopravním sektoru se podílela 13,9 %, což jí činí druhým největším producentem skleníkových plynů v tomto odvětví, hned po silniční dopravě. Jedním z dalších důvodů přechodu z konvenčních paliv na alternativní zdroje je postupný úbytek zásob ropy, která je hlavní surovinou pro výrobu většiny paliv. Podle odhadů dojde ke spotřebování světových zásob ropy přibližně během následujících 40 let [1, 2, 3].

Letectví je v dnešní době kromě bezpečnosti zaměřeno především na efektivitu. Díky tomu dochází k vývoji nových technologií, které mají za úkol snížit provozní náklady a negativní dopady na životní prostředí. Jedním ze způsobů, jak tohoto cíle dosáhnout je nahrazení stávajících paliv palivy obnovitelnými a udržitelnými nebo vývojem nových pohonných systému. Otázkou vývoje se již zabývají přední světoví výrobci letadel Airbus i Boeing. V této otázce sází Airbus především na elektrický a vodíkový pohon [4, 5].

Cílem této práce je posouzení proveditelnosti nahrazení stávajících konvenčních paliv palivy a energií z obnovitelných zdrojů, které by nahradily letecký petrolej z hlediska dostupnosti, ceny, udržitelnosti a vlivu na životní prostředí na území EU. Práce se rovněž zabývá současnou palivovou náročností pohonných jednotek s výhledem do budoucna. Co se struktury práce týče, je rozdělena do několika kapitol. Tématem první z nich je popis současného stavu a vývoje pohonných jednotek. V další kapitole jsou představena současná konvenční paliva, na které práce v nadcházející kapitole navazuje palivy alternativními. Následně je provedeno posouzení nahraditelnosti konvenčního paliva palivem alternativním, včetně využití alternativních zdrojů energie k jeho produkci.

V neposlední řadě tato část práce kvantifikuje emisní úsporu v případě přechodu na palivo alternativní. Tyto výsledky jsou poté interpretovány v diskusi. Vzhledem k omezení rozsahu práce autor ve věci alternativních paliv v její závěrečné části podrobněji zkoumá pouze biopalivo druhé generace, vodík a elektrickou energii.

1 Vývoj palivové náročnosti letadlových pohonných jednotek

Efektivní, spolehlivá a bezpečná letecká doprava je hlavním předpokladem pro ekonomickou stabilitu a růst. Lidstvo v tomto odvětví udělalo v posledních desetiletích ohromný skok dopředu, co se týče technologií a bezpečnosti. I přesto se stále nabízejí příležitosti, jak tuto dopravu učinit efektivnější, šetrnější k životnímu prostředí, spolehlivější a především bezpečnější. V posledních letech se většina světových velmocí zaměřuje právě na ekologii a efektivitu v dopravním sektoru. Spojené státy, které jsou světovým lídrem ve vývoji leteckých a kosmických technologií si již dlouhou dobu uvědomují, jak významnou roli v moderním světě hraje právě letectví. V důsledku toho vznikl úřad National Aeronautics Research and Development Policy (NARDP), aby pomohl řídit vývojové a výzkumné projekty USA v oblastech letectví. Efektivita a vliv na životní prostředí byly určeny jako klíčové faktory pro technologický vývoj a budoucnost letectví ať už civilního nebo vojenského sektoru [6].

Především emise ať už hlukové nebo ty, které vznikají spalováním leteckého paliva mohou mít neblahý vliv na životní prostředí. Vypouštění skleníkových plynů vlivem letecké dopravy nebo zmenšování ozónové vrstvy, obojí má velký vliv na změnu globálního klimatu naší planety. Toto jsou ovšem dlouhodobé negativní účinky, ty krátkodobé mohou mít negativní vliv na lidské zdraví, zvířata a ekosystémy v okolí letišť. V tomto důsledku Organizace spojených národů (OSN) založila 4. dubna 1947 Mezinárodní organizaci civilního letectví známou též pod zkratkou ICAO, aby zajistila jejím členům směrnice, podle kterých se budou řídit v otázce hluku a emisí v civilní letecké dopravě. Aktuálně má ICAO 193 členů. Po vzniku této organizace byly určeny standardy, které regulují emise pod 3000 ft (přibližně 914 m) výšky nad letištěm. Jedná se o emise, které vznikají při vzletu a přistání, které zahrnují vzlet, stoupání, klesání a pojíždění. Všechny letadla, než jsou uvedena do provozu musí být opatřena certifikací, která zajišťuje splnění požadavků na hlukové emise [7].

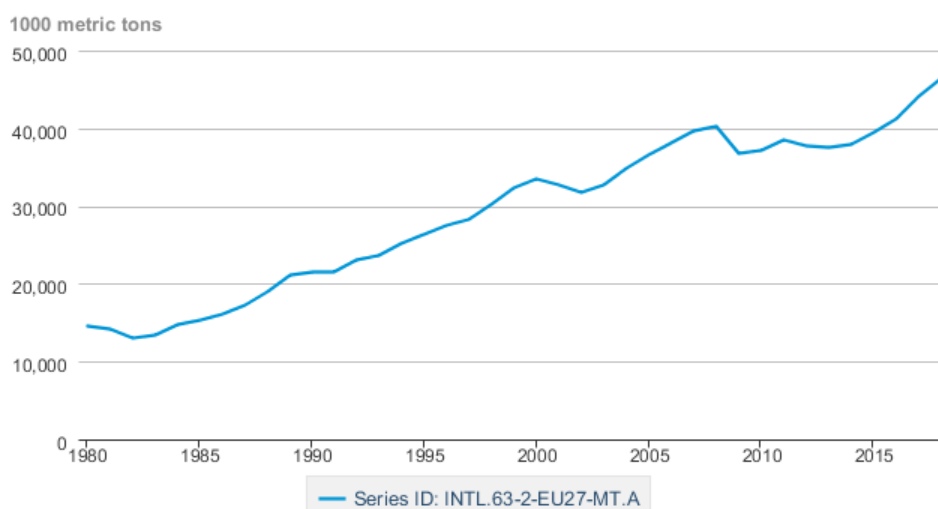
Obavy z dlouhodobého poškození globálního klimatu vedly ICAO k zaměření se na vypouštění emisí během letu v cestovní hladině. Se současným růstem letového provozu se očekává, že emise z letecké dopravy se přibližně ztrojnásobí v roce 2030. Pokud nedojde k žádné změně v následujících letech mohly by mít emise značný vliv na zhoršení globálního klimatu. Technologie a jejich postupný vývoj se považuje za stěžejní při snižování dopadu na životní prostředí. Mnoho organizací a společností, které jsou zapojeny do výzkumu v leteckém odvětví si daly za cíl snížení emisí vznikajících spalováním a rovněž emisí hluku. Jako součást strategie EU do roku 2050 se ACARE (Advisory Council for Aviation Research and Innovation in Europe) řídí cílem snížit emise o 75 % CO_2 na kilometr za osobu. Snížit emise dusíku o 90 % a o 65 % snížit hlukové emise oproti roku 2000 [8, 9].

Pro splnění těchto požadavků, které mají za cíl zmenšení vlivu leteckého provozu na životní prostředí, je potřeba vyvinutí nových technologií, které budou využity jak při vývoji nových letounů, tak i při konstrukci nových pohonných jednotek. Technologie zaměřené na palivovou a energetickou efektivitu mají za cíl zlepšit celkovou účinnost propulsního systému.

Vývoj v odvětví letecké konstrukce je zase především zaměřen na redukci aerodynamického odporu a hmotnosti. Propulsní účinnost se skládá ze dvou hlavních částí: tepelné účinnosti, která určuje, s jakou účinností je energie paliva převedena na mechanickou energii a propulsní účinnost, která ukazuje, s jakou efektivitou je mechanická energie převedena na energii, která slouží k pohybu letounu. Tepelná účinnost roste s celkovým tlakovým poměrem cyklu motoru a s celkovým teplotním poměrem teploty hnacích plynů na vstupu do turbíny a atmosférické teploty. V praxi to znamená, že je celkový tlakový poměr limitován citlivostí materiálu turbíny a spalovací komory na vysokou teplotu. Propulsní účinnost je maximální při rychlostech hnacích plynů, které jsou velmi blízko dopředné rychlosti pohybu: tah se vytváří pohybem velkého množství vzduchu s malým přírůstkem rychlosti. Z těchto důvodů se propulsní účinnost turboventilátorového motoru zvyšuje s obtokovým poměrem, který je definován jako poměr hmotnostního průtoku ventilátorem k průtoku jádrem motoru.

Palivové efektivity a snížení hlukových emisí může být dosaženo vývojem a vylepšením jak draku letounu, tak patřičnou úpravou pohonného systému. Naproti tomu redukce emisí vypouštěných do ovzduší spalováním leteckého paliva lze dosáhnout pouze prostřednictvím technologického pokroku a úpravou pohonného systému, který je zaměřen na snížení emisí NO_x produkovaných na jednotku hmotnosti spáleného paliva. Co nejrychlejší a nejrovnoměrnější promíchání paliva se vzduchem před zapálením je klíčové pro omezení vzniku tzv. hotspotů (téměř stechiometrických kapes směsi paliva se vzduchem), v nichž se velmi rychle vytvoří NO_x [9].

Současné proudové pohonné jednotky dopravních letadel jsou více než dvakrát efektivnější proti pohonným jednotkám, které využívala první proudová letadla (ve srovnání s prvním proudovým letadlem De Havilland Comet je to až pětinasobně). Například jeden z nejmodernějších a nejefektivnějších motorů Rolls Royce Trent XWB, který je primárně nasazován jako pohonná jednotka letounu Airbus A350 má u menší verze A350-900 přibližnou spotřebu 2,9 l na 100 km na jednoho pasažéra. Pro představu celková roční spotřeba leteckého paliva EU v roce 2018 činila přibližně 46 miliónů tun [10, 11].



Graf 1 – Roční spotřeba leteckého paliva v EU [11]

1.1 Budoucnost a vývoj

V krátkodobém horizontu není ekonomicky výhodné výrazně zasahovat do stávající konstrukce letounů. To znamená jakkoli měnit konfiguraci křídel s uložením motorů. Místo toho se vývoj zaměřuje na efektivitu pohonného systému pomocí zvyšování obtokového poměru. Některé koncepce zahrnují přidání převodového ústrojí do motoru, což by mělo za následek snížení hluku produkovaného motorem díky nižším otáčkám ventilátoru, a také přidání převodového ústrojí k nízkotlaké turbíně, což by mělo za následek její vyšší rychlosti otáčení. Použití tohoto konceptu je zkoumáno společností Pratt & Whitney, který v této technologii pokročil ve spolupráci s NASA Glenn. Dalším z projektů, který využívá vysokého obtokového poměru je takzvaný open-rotor koncept, vyvíjený společností General Electric, založený na jejich dřívějším výzkumu ve spolupráci s NASA. Ovšem v tomto konceptu zůstává stále největší výzvou snížení hlukových emisí, jelikož open-rotor koncept převyšuje stávající hlukové normy. Odborníci ovšem tvrdí, že spotřeba tohoto typu motoru bude až o 30 % nižší než současná spotřeba proudového motoru CFM56, který je využíván jako jedna z variant pohonu letadel typu Airbus A320 a Boeing 737 [12].



Obrázek 1 – Koncept open-rotor [13]

Pro projekty vyvíjené v horizontu nadcházejících 20 let, které si kladou za cíl snížení emisí a snížení spotřeby paliva jsou zvažovány konstrukce tzv. wing-body konstrukce nebo také blended-wing-body konstrukce se zabudovaným distribuovaným pohonným systémem. Tato konstrukce dovoluje unikátní rozložení interiéru, nakládku i vykládku nákladu a pasažérů z obou stran letounu. Výhodou je i to, že díky této konstrukci vznikne větší prostor pro uložení nákladu nebo usazení cestujících. NASA potvrzuje, že konstrukce takového typu letounu pro komerční užívání je možná. Díky efektivitě NASA očekává, že tento typ konstrukce dokáže využívat o 20 % méně paliva než současné konvenční letouny, které létají podzvukovými rychlostmi a s doletem až 7000 námořních mil. Touto konstrukcí se zabírají i přední evropští výrobci letadel, jako například společnost Airbus, která v roce 2019 dokonce otestovala zmenšený model tohoto typu konstrukce [14, 15].



Obrázek 2 – Koncept blended wing body [14]

V horizontu 30 a více let se zvažuje využití nových pohonných systémů. Jelikož se jedná o dlouhodobý výzkum, jsou zde zvažovány poměrně radikální koncepce. Jednou z nich je například využití supravodivosti při použití elektrického nebo hybridního pohonu. Tomuto konceptu se v Evropě věnuje například společnost Airbus, která tuto možnost vidí jako jednu z mnoha dalších při vývoji bezemisních technologií. Stejně tak se uvažuje i o použití nových materiálů v současných pohonných ústrojích, které si kladou za cíl zvýšení celkového tlakového poměru. Některé koncepty se zaměřují i na zefektivnění dalších zařízení v letounech, jako je například pomocná jednotka APU. Alternativní paliva s nízkým obsahem karbonu v kombinaci s nižšími cestovními rychlostmi, mohou být vhodnými kandidáty snížení emisí a palivové efektivity. Společnost Airbus při zkoumání létání ve formaci dospěla k závěrům, že v případě letounu Airbus A350 došlo ke snížení spotřeby paliva o 5–10 %. Rovněž se uvažuje o využití vodíkových palivových článků nebo baterií, výzkumy se především zaměřují na energetickou hustotu (energie na jednotku hmotnosti) těchto článků nebo baterií, jelikož je potřeba, aby se tato energetická hustota alespoň blížila energetické hustotě paliva v současných proudových motorech. Bohužel i v dlouhodobém horizontu se předpokládá, že elektrická energie, ať už s využitím baterií nebo palivových článků nebude schopna konkurovat současným pohonným jednotkám využívaným v dálkové letecké dopravě [16, 17].

Jak již bylo zmíněno, probíhající výzkumy se také zaměřují na alternativní paliva, především na ty, které mohou být použity v současných pohonných jednotkách bez potřeby jejich úpravy. Co se týče vlivu na životní prostředí u alternativních paliv, která jsou vyráběna z rostlinných zdrojů, jedná se o téměř bezemisní palivo, jelikož emise vypuštěné spalováním tohoto paliva jsou z velké míry pohlcovány pěstováním těchto rostlinných zdrojů. Nicméně u těchto paliv

se z větší části jedná o suroviny, které mohou být využity ke konzumaci. Proto se jeví jako vhodnější využití surovin, které nejsou primárně využívány k produkci potravin. Těmito zdroji mohou být například řasy.

1.2 Využití alternativních paliv v současnosti

První komerční let s využitím příměsí biopaliv proběhnul v roce 2008. Od té doby bylo uskutečněno více než 150 000 letů využívajících biopaliva. Používání udržitelného leteckého paliva se v dnešní době řadí mezi nejúčinnější cesty ke snížení emisí oxidu uhličitého v letecké dopravě. Udržitelné letecké palivo, které je v dnešní době převážně vyráběno z odpadů a zbytkových surovin, má plnou certifikaci podle standardních specifikací leteckého paliva (ATSM) a splňuje stejné jakostní i bezpečnostní požadavky jako palivo konvenční.

Společnost Neste, která je největším světovým producentem udržitelného leteckého paliva z odpadů a zbytkových surovin plánuje zvýšit svoje produkční kapacity až na 500 tisíc tun udržitelného paliva ročně. Společnost rovněž předpokládá, že dosáhne produkční kapacity až 1,5 miliónů tun udržitelného paliva ročně. Tímto postupným navyšováním produkčních kapacit si společnost Neste klade za cíl snížení emisí oxidu uhličitého až o 20 miliónů tun ročně do roku 2030 [18].

Pro ukázkou je zde uvedeno několik příkladů využívání alternativních paliv leteckými společnostmi. V létě roku 2020 největší světový producent udržitelných paliv, Finská společnost Neste, začala s dodávkami biopaliv třem hlavním leteckým společnostem v USA pro lety ze San Francisca. Jednou z těchto leteckých společností jsou mimo jiné jsou Alaska Airlines, které v roce 2011 využily pro 75 komerčních letů palivo s obsahem 20 % biopaliva. V roce 2016 se staly prvním dopravcem, který využil alternativní letecké palivo vyrobené z kukuřice a dřevní štěpky. Cílem společnosti Alaska Airlines pro rok 2020 bylo využívat udržitelná letecká paliva alespoň z jednoho letiště. Díky dodávkám společnosti Neste to vypadá, že se cíl podařilo splnit [19].

V květnu roku 2021 letecká společnost skupiny Air France-KLM použila na dálkové trati Paříž-Montreal 16% směs konvenčního a syntetického paliva vyrobeného převážně z použitého kuchyňského oleje francouzskou společností Total. Mezi lety 2014 a 2016 tato skupina využila biopaliva na 78 krátkých a středně dlouhých tratích a prohlásila, že postupně pracuje na využití směsi konvenčního paliva s biopalivy u všech svých letounů [20, 21].

Společnost Boeing a All Nippon Airways, jako první využili příměsí biopaliva u letounu Boeing 787 Dreamliner. Tento let byl uskutečněn mezi doručovacím střediskem společnosti Boeing v Everettu a Tokijským letištěm Haneda, jednalo se tak o první přelet přes Tichý oceán

s využitím biopaliv vyrobených převážně z použitého kuchyňského oleje. Během tohoto letu bylo vyprodukováno přibližně o 30 % méně emisí oxidu uhličitého [22].

Společnost Finnair oznámila, že plánuje využívat biopaliva pro své lety. Společnost provozovala lety mezi Nizozemským letištěm Schiphol a Finskými Helsinkami. Na tyto trasy byl nasazen letoun společnosti Airbus, který byl poháněn 50 % směsí paliva konvenčního a biopaliva vyrobeného z použitého rostlinného oleje [19].

2 Konvenční paliva v letectví

V dnešní době je převážná většina motorových nebo leteckých paliv vyráběna z ropy. Samotná ropa se řadí do tzv. fosilních paliv, která vznikla přírodními procesy, která představují akumulaci slunečního záření prostřednictvím fotosyntézy, (kterou se sluneční energie ukládala ve formě ústrojných látek těl rostlin a živočichů živících se rostlinami získávaných fotochemickou reakcí z oxidu uhličitého a vody přeměnou na cukry) po velmi dlouhé období geologického vývoje Země v délce trvání mnoha set miliónů let. Působením geologických procesů v zemské kůře na uložená těla rostlin a živočichů se vytvořily zásoby plyných, kapalných a pevných uhlovodíků, které se liší počtem atomů uhlíku v molekule od jediného atomu uhlíku v molekule plyného metanu, který obsahuje 75% uhlíku až po 258 atomů uhlíku v molekule antracitu (antracitové uhlí), které dosahuje obsahu uhlíku až 98 % [23].

Fosilní paliva jsou sice stále vytvářena přirozenými procesy v přírodě, nicméně tento proces trvá desítky až stovky milionů let, a proto je řadíme mezi neobnovitelné zdroje. K obrovskému skoku ve využívání fosilních paliv došlo během průmyslové revoluce v 19. století. Od té doby započala těžba těchto surovin, které jsou dnes nepostradatelnou součástí ať už v odvětví průmyslu nebo dopravy. Mezi jejich hlavní nevýhody patří znečištění ovzduší, vody a půdy, které vzniká jejich spalováním. V ČR aktuálně dle zákona o ochraně ovzduší má být v benzínu obsaženo minimálně 4,1 % bioetanolu a v naftě 6 % biosložek [24].

Kapalná paliva získávána frakční destilací ropy byla v roce 2011 nejvíce využívána v dopravním odvětví, pro leteckou, lodní a pozemní dopravu to bylo (54 %), následováno průmyslem (18 %), komerční sektor a zemědělství (11 %), petrochemický průmysl (10 %) a výroba elektrické energie (7 %). Poptávka po pohonných hmotách vyrobených z fosilních paliv nadále roste a očekává se stálý růst přibližně 1,3 % ročně do roku 2030 [25].

Hlavní surovinou pro výrobu leteckého petroleje nebo benzínu je ropa. Ropa vzniká z odumřelých mořských mikroorganismů a živočichů z období před mnoha miliony let. Vyskytuje se hlavně ve svrchních vrstvách zemské kůry pod nepropustnými vrstvami v hloubkách několika set metrů. Při těžbě se ropa získává čerpáním nebo vyvěrá pod tlakem. Kromě jejího hlavního využití v petrochemickém průmyslu se ropa využívá k výrobě elektrické energie, plastů, asfaltu a v neposlední řadě, jak již bylo zmíněno v úvodu, při výrobě motorových a leteckých pohonných hmot. V současné době dosahuje denní světová spotřeba ropy přibližně 96 milionů barelů. Převážná část se spotřebovává k zajištění dopravy (57,2 %), jako energetická surovina 20 % a přibližně 23 % jako chemická surovina. Při tomto vývoji spotřeby se předpokládá, že zásoby ropy vydrží asi jen na 40 let [3].

2.1 Letecký petrolej

Letecký petrolej též známý pod názvem „kerosin“ se využívá ke spalování v proudových motorech. Je složen z lehčích ropných frakcí uhlovodíku vroucích v rozmezí (podle typu) od 150 °C do 275 °C, díky čemuž se podobá lehké motorové naftě pro arktické klima. Ovšem jeho kvalitativní parametry musí splňovat náročné požadavky, které musí odpovídat náročným provozním podmínkám (např. velmi nízké teploty okolo -50 °C). Letecký petrolej zároveň podléhá velmi přísným kontrolám kvality. Cena leteckého paliva se pohybuje kolem 0,5 €/l [26]. V přepočtu tedy 0,053€/kWh.

Kvalitativní požadavky na letecký petrolej můžeme rozdělit do několika skupin. Hlavními parametry, které se posuzují jsou: čistota paliva, těkavost a nízkoteplotní vlastnosti, stabilita, kontaminace nežádoucími příměsemi a stabilita paliva. Každá vyrobená šarže leteckého petroleje musí být od výrobce/dodavatele opatřena certifikátem osvědčujícím složení a vlastnosti paliva. Pro zlepšení potřebných vlastností leteckého petroleje jsou do něj přidávána vhodná chemická aditiva. Jedná se především o antioxidanty, antistatické přísady, antikorozi, mazivostní kapaliny a kapaliny, které zabraňují zamrznutí paliva [27].

Parametr		JET A-1
Vzhled		čirý, jasný, bez viditelné vody a mechanických nečistot při teplotě okolí
Mechanické nečistoty, mg/l	max.	1,0
Celková kyselost, mg KOH/g	max.	0,015
Obsah aromátů, % (V/V)	max.	25,0
Celkový obsah síry, % (m/m)	max.	0,30
Obsah merkaptanů, % (m/m)	max.	0,0030
Destilační křivka, °C: 10 % (V/V) předdestiluje při konec destilace	max. max.	205 300
Bod vzplanutí, °C	min.	38
Hustota, kg/m ³		775,0 – 840,0
Bod krystalizace, °C	max.	-47
Viskozita/-20.°C, cSt	max.	8,000
Výhřevnost	min.	42,80
Výška nečadivého plamene (VNP)	min.	25,0
Koroze na mědi (2 h při 100.°C)	max.	třída 1
Termická stabilita JFTOT při 260 °C: tlaková diference na filtru úšady (vizuálně)	max. max.	25,0 < 3, žádné červené nebo abnormální barvy úsad
Skutečné pryskyřice, mg/100 ml	max.	7
Reakce s vodou, fázové rozhraní	max.	1 b
MSEP paliva s antistatickou přísadou	min.	70
Elektrická vodivost, pS/m		50 – 600
Mazivost, BOCLE wsd, mm	max.	0,85
Obsah antioxidantu, mg/l		17,0 – 24,0
Obsah antistatické přísady, mg/l (Stadis 450)	max.	3,0

Obrázek 3 – Hlavní kvalitativní požadavky na letecký petrolej JET A-1 (podle AFQRJOS)[27]

2.2 Letecký benzín

V případě leteckého benzínu se kvalitativně nejedná o diametrálně odlišnou látku od konvenčních paliv pro motorové vozidla. Pro zážehové pístové motory (ve valné většině u malých letounů) se využívá letecký benzín (AVGAS). Na letecký benzín nejsou kladeny tak velké požadavky jako na letecký petrolej, a proto je možnost ho v některých případech nahradit benzínem využívaným ve spalovacích motorech silničních automobilů. Letecké benzíny mají oproti automobilovým benzínům nižší těkavost. Obsah olova v olovnatých leteckých benzínech se v minulosti pohyboval až na úrovni 2,11 g/kg. V současné době se však již používají environmentálně přijatelnější typy olovnatého leteckého benzínu označované jako 100 LL s obsahem olova max. 0,75 g olova/kg benzínu [27].

Parametr		Typ leteckého benzínu			
		80	91	100 LL	100
OČ MM	min.	80,0	91,0	99,5	99,5
Výkonové číslo	min.	87,0	98,0	130,0	130,0
Obsah olova, g Pb/l	max.	0,14	0,56	0,56	1,12
Barva		červená	hnědá	modrá	zelená
Destilační křivka, °C:					
10 % (V/V) předestiluje při	max.		75		
40 % (V/V) předestiluje při	min.		75		
50 % (V/V) předestiluje při	max.		105		
90 % (V/V) předestiluje při	max.		135		
FBP	max.		170		
suma 10 % + 50 % (V/V)	min.		135		
Tlak par/38 °C, kPa			38 – 49		
Bod krystalizace, °C	max.		-58		
Obsah síry, % (m/m)	max.		0,05		
Výhřevnost, MJ/kg	min.		43,5		
Koroze na mědi (2 h při 100 °C)	max.		třída 1		

Obrázek 4 – Nejdůležitější kvalitativní požadavky na letecké benziny podle ASTM D 910 [27]

3 Alternativní paliva v letectví

Alternativní paliva jsou považována za alternativu ke konvenčním palivům. Ať už z pohledu snížení emisí produkovaných spalováním konvenčních paliv tak z pohledu udržitelnosti do budoucna. Současná paliva v letectví musí dosahovat určitých standardů specifikovaných v ASTM International D1655 (2014). ASTM D7566 (2014) aktuálně dovoluje využití příměsí synthetic paraffinic kerosene (SPK), Fischer-Tropsch (FT), hydroprocessed esters and fatty acids (HEFA), hydrotreated renewable jet (HRJ) paliv až do výše 50v/v% směsi s konvenčním leteckým palivem [28].

Aktuálním cílem zůstává postupné nahrazení konvenčních paliv za paliva alternativní bez potřeby jakkoli upravovat stávající pohonné jednotky. Testy FT paliv, provedených na současných pohonných jednotkách prokázaly, že mají zanedbatelný nebo žádný vliv na výkonnost pohonné jednotky a jen drobnou odchylku od konvenčních paliv, co se týče výfukových emisí. Na druhou stranu se také prokázalo, že při využití různých SPK došlo k velkému úbytku emisí, které vznikají při spalování[29].

3.1 Syntetická paliva

Syntetická paliva také často označovaná za ekologická paliva jsou vyráběna štěpením vody a následným přidáním CO₂. Postup výroby takových paliv je rozdělen na dvě části, ze všeho nejdříve se pomocí elektrolýzy štěpí voda na vodík a kyslík a následně se k vodíku přidává CO₂, pomocí chemické reakce je získáno syntetické palivo. Výsledkem tohoto procesu může být výroba paliv v plynné nebo kapalně formě, podle toho, zda jsou syntetizovány plynné nebo kapalně složky.

3.2. Generace biopaliv

Vzhledem k rostoucímu technologickému rozvoji hraje energie čím dál tím větší roli v životě každého z nás a v sociálně-ekonomickém rozvoji každé země. Industrializace, rostoucí světová populace, globalizace a další faktory jsou jedním z hlavních důvodů zvyšující se poptávky po přírodních zdrojích energie. Cenově efektivní, bezpečná a „čistá“ energie se stala jedním z hlavních cílů při řešení tohoto problému do budoucna. Jednou z alternativních variant mohou být biopaliva.

V současné době rozdělujeme biopaliva na tři generace. První generace biopaliv je především bioethanol vyráběný z cukerných, resp. škrobnatých plodin (cukrová řepa, obilí, cukrová třtina, brambory nebo kukuřice). Jejich hlavní nevýhodou je, že tyto biopaliva jsou získávána především ze surovin, které se primárně využívají jako potraviny pro obyvatelstvo a krmiva pro zvířata. Další nevýhodou je poměrně nízká energetická výnosnost, což znamená, že k jejich

pěstování je zapotřebí velkých zemědělských ploch, díky čemuž se pak zvedá cena půdy a především potravin. Během analýzy celého životního cyklu, tedy od vypěstování po spálení vychází biopaliva první generace v energetické bilanci hůř než současná fosilní paliva. Z těchto důvodů nepředstavují biopaliva první generace vhodnou alternativu k současným fosilním palivům. [30]

Druhá generace biopaliv se skládá z nepotravinářské biomasy (šťovík, čirok, křídlatka atp.) a biologického odpadu (především ze zemědělství, lesnictví, průmyslu a v neposlední řadě i odpadu z domácnosti). Tyto paliva na rozdíl od biopaliv první generace vykazují vyšší účinnost, ovšem současně s tím se pojí technologická náročnost jejich výroby oproti první generaci. I u těchto paliv platí, že velkou nevýhodou je pěstování surovin pro jejich výrobu na zemědělské půdě, která by jinak mohla být využita pro pěstování potravin určených k obživě. Naopak jako výhoda této generace biopaliv se jeví využití biologicky rozložitelného odpadu [30, 31]

„Český petrochemický průmysl (např. společnost UniCRE) projevil zájem o vývoj dalších biopaliv, zejména pro dálkovou nákladní dopravu, a to zkapalněním dřevní štěpky a jiného bioodpadu. S podporou rozvoje biopaliv druhé generace obecně, zejména biometanu (vyrobeného čištěním bioplynu), počítá i národní klimaticko-energetický plán.“ [31]

„Společnost EFG Green gas, člen holdingu Energy financial group, jako první v České republice zahájila v lednu 2020 komerční výrobu biometanu upgradingem bioplynu z biologicky rozložitelného odpadu. Skupina EFG, jediný současný dodavatel biometanu odhaduje, že v České republice existuje v letech 2021-2030 potenciál pro 75 výroben s celkovou produkcí 127 mil. m³ biometanu za rok. Výhoda využití biometanu v dopravě spočívá v tom, že má v celém životním cyklu nejnižší hodnotu skleníkových plynů jeho spalováním se do ovzduší uvolní až o 80 % méně emisí oxidu uhličitého oproti konvenčním palivům a až o 60 % méně než při spalování tradičního CNG.“ [32]

Biopaliva třetí generace se jeví jako nejvýhodnější, jelikož se pro jejich výrobu používají zejména nepotravinářské suroviny. Pro jejich získávání se plánuje využití zejména surovin získaných z vodní biomasy. Do budoucna se pro výrobu bionafty a bioetanolu předpokládá využití řasy nazývané Algae, jejíž hlavní výhodou je rychlý růst, vysoký výnos a obsah lipidů a uhlovodíků. Nicméně i zde se vyskytuje hned několik problémů spojených především s pěstováním těchto surovin [33].

V první řadě řasy nelze jednoduše sklídit, z těchto důvodů se mohou pěstovat v uzavřených nebo otevřených nádržích, u těch otevřených se hovoří o nižší spolehlivosti, jelikož zde závisí na množství slunečního záření a zároveň dochází k odparu vody, z ekologického hlediska je pěstování v otevřených nádržích také problém, jelikož u nich není možno regulovat únik

skleníkových a dusíkatých plynů do atmosféry. Fotobioreaktory, jak se uzavřeným nádržím říká, jsou na tom z pohledu produktivity lépe, ovšem i zde existuje několik nevýhod, zejména se jedná o finančně nákladnou instalaci a údržbu takového zařízení. [31]



Obrázek 5 – *Řasa Algae* [34]

3.2.1 Výroba Syntetických paliv a biopaliv

Pro výrobu syntetických paliv se využívá po dlouhou dobu tzv. Fischer-Tropschova syntéza. Tato metoda byla vynalezena Franzem Fischerem a Hansem Tropschem v roce 1925 v Německu. Hlavní surovinou pro získávání paliva pomocí Fischer-Tropschovy metody je syntézní plyn tzv. syngas (směs oxidu uhelnatého a vodíku). Ten lze získávat mnoha způsoby, ze zemního plynu, uhlí, těžkých petrochemických frakcí nebo z biomasy. V současné době se surový plyn vyrábí pomocí autotermní reformace, parní reformace nebo oxidací methanu. Zároveň se také využívá různých druhů biomasy (dřevní, agromateriály, vyříděné složky průmyslových a komunálních odpadů) [35].

Před vstupem plynu do reaktoru syntézy je potřeba jej vyčistit. Toto čištění se odvíjí od způsobu jeho výroby. Při výrobě pomocí zplyňování je potřeba nejprve odstranit prachové částice a dehty. Další kroky čištění se již vztahují na surový plyn vyráběný ze zemního plynu. Nejprve se za pomoci ochlazení odstraní vodní páry. Následuje odstranění částic síry a halogenů pomocí alkalického roztoku hydroxidu. Před samotnou syntézou se ještě upraví poměr oxidu uhelnatého a vodíku na optimální úroveň. Následně se takto upravený syngas stlačí na 2-3 MPa a ochladí. Poté vstupuje do reaktoru [35].

V případě vlastní syntézy se jedná o katalyzovanou reakci syntézního plynu, která probíhá při teplotách 220-350°C a tlaku 2-3 MPa. Optimální poměr vodíku a oxidu uhelnatého je přibližně 2:1. Tato reakce je silně exotermní, takže při ní vzniká velké množství tepla, které je při procesu

odváděno ve formě páry. Během reakce dochází k redukci oxidu uhelnatého vodíkem za vzniku uhlovodíku a vody. V dalších krocích je směs rozdělena na jednotlivé frakce. Oddělují se plynné produkty, voda, vosky a odpadní produkty, které vznikly během procesu. Konečným produktem je syntetická ropná surovina, která se zpracovává stejně jako ropa získaná pomocí těžby. Dále se upravuje v rafinériích na požadované typy paliv [35].

Podle typu syntézy rovněž rozdělujeme procesy syntézy na nízkoteplotní a vysokoteplotní. Vysokoteplotní proces probíhá při teplotách kolem 300°C a katalyzátorem je železo. Produkty této vysokoteplotní syntézy jsou především nenasycené a aromatické uhlovodíky, ethan, propan a methan. Z těchto důvodů se výsledný produkt využívá především k výrobě benzínu. V případě nízkoteplotní reakce, která probíhá při teplotách do 250°C a s kobaltovým katalyzátorem vznikají nasycené uhlovodíky (vosky). Tento typ reakce je vhodný především pro následnou výrobu nafty a maziv. Zároveň nezreagovaný synplyn může být recyklován nebo použit ke kombinované výrobě tepla a elektrické energie. Nízkoteplotní výroba je preferována hlavními výrobci paliv, kteří využívají FT metody (Sasol, TexacoMobil, Shell, Exxon a další.), u syntetické nafty hovoříme o velmi kvalitním motorovém palivu, které lze využít pro výrobu tepla a elektrické energie. Na druhou stranu u benzínu vyrobeného pomocí FT metody, který je charakteristický vysokým obsahem n-alkanů a bez přítomnosti aromátů, je jako motorové palivo nevhodný. Naopak se jedná o velmi vhodnou surovinu pro pyrolýzu na lehké alkeny [35, 36].

3.2.2 Dostupnost a cena biopaliv a syntetických paliv

Výslednou cenu paliva vyrobeného pomocí FT metody ovlivňuje hned několik faktorů. Převážně se jedná o cenu zemního plynu, výrobní kapacita závodu a hloubka zpracování produktu. I zde platí, že v případě navýšení výrobní kapacity dochází ke snižování konečné ceny. V případě paliva vyrobeného z plynné složky (GTL) je důležité zajistit dlouhodobý přísun zemního plynu. Pro tento způsob výroby alternativního paliva bylo publikováno, že pro produkci 10 tis. bl (barel) denně je potřeba pro 30 let provozu zajistit přibližně $1,1 \cdot 10^{12} m^3$ zemního plynu. Ovšem pouze 7 % ze světových nalezišť mají tuto kapacitu [36].

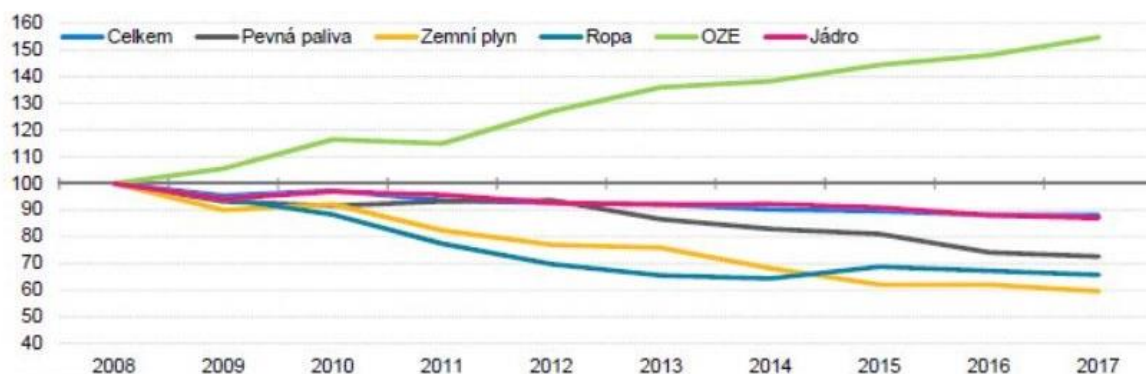
V případě výroby BTL (biomass to liquid), především pro výrobu biopaliv tzv. druhé generace, lze syntézní plyn (základní surovinu pro FT metodu) získat pomocí zplyňování biomasy nebo může být pyrolýzou biomasy přímo zplyňován vyrobený bio-olej. Bylo uvedeno, že pro výrobu 1 t syntetické motorové nafty vyrobené touto metodou na bázi biomasy s použitím dřeva, je její potřeba přibližně 8 t. To znamená přibližně 150 l motorové nafty z 1 t dřeva nebo také přibližně 7 kg/l [36]. Podle odhadů by se cena takto produkované syntetické nafty v krátkodobém a střednědobém časovém horizontu měla pohybovat mezi kolem 16 €/GJ, tedy při přepočtu

0,06 €/kWh. V případě dlouhodobé návratnosti by cena mohla klesnout na 9 €/GJ tedy 0,03 €/kWh [36].

3.3 Elektrická energie

Elektrická energie se do budoucna jeví jako nejvhodnější alternativa, s přehlédnutím všech negativ, která jsou spojená s výrobou a skladováním. Zároveň elektrické pohonné jednotky neboli elektromotory dosahují v praxi vysokých účinností. Hlavním problémem v otázce nahrazení stávajících konvenčních paliv je především její výroba, při které se stále využívají konvenční paliva, i když tento trend postupně zaniká a přechází se na výrobu z obnovitelných zdrojů. V neposlední řadě se jedná o problém s efektivním skladováním takto vyrobené elektrické energie, v automobilové dopravě se nejedná o tak velký problém, jelikož těžké baterie (pokud jsou umístěny v podlaze automobilu) dokáží vzhledem k nižšímu těžišti jízdní vlastnosti vozidla vylepšit. Ovšem v otázce použití v letecké dopravě se jedná o důležitý parametr, který výrazně zkracuje délku doletu a zmenšuje užitečné zatížení letounu.

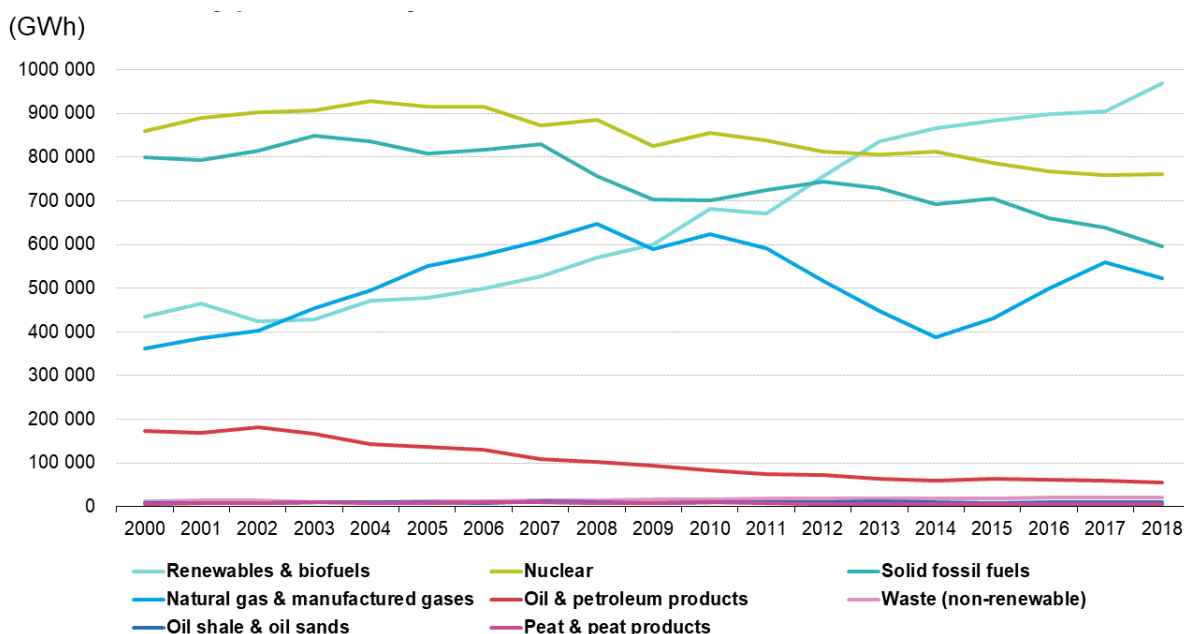
Je jasné, že s rostoucí industrializací a globalizací současně roste i spotřeba elektrické energie. V roce 2018 činil meziroční nárůst 2,9 % oproti předchozímu roku. Podíl Evropské Unie na celosvětové spotřebě je přibližně 12 %. Produkce primární elektrické energie na území Evropské Unie činila v roce 2017 celkem 758 Mtoe (ton of oil equivalent), to znamenalo pokles o 0,1 % oproti předchozímu roku. Tento sestupný trend v EU pokračuje od roku 2011 a z toho důvodu klesla produkce energie z pevných paliv proti roku 2008 o 27 %, u zemního plynu o 40 %, ropy 34 % a jádra 13 %. Naproti tomu vzrostla produkce OZE (obnovitelné zdroje energie) a to o 55 % oproti roku 2008 [37].



Graf 2 – Produkce primární energie v EU (2008 = 100 toe) [37]

Celková hrubá produkce elektrické energie na území EU v roce 2018 činila 2 941 TWh. Největší podíl na hrubé produkci elektrické energie v roce 2018 byla energie vyrobená z obnovitelných zdrojů (vodní, solární, větrné elektrárny 32,9 %) na druhém místě byla energie vyrobená jadernými elektrárnami 25,9 %. Následovány uhelnými elektrárnami

20,2 % a elektrárnami využívajícími zemní plyn 17,8 %. V roce 2000 bylo 87% elektrické energie z obnovitelných zdrojů vyrobeno pomocí vodních elektráren. Do roku 2018 tato hodnota klesla na 38,3 % naproti tomu vzrostla produkce pomocí větrných elektráren 33,1 %, solární a fotovoltaické 11,4 %, biopaliva a bioplyny 13,5 % [38].



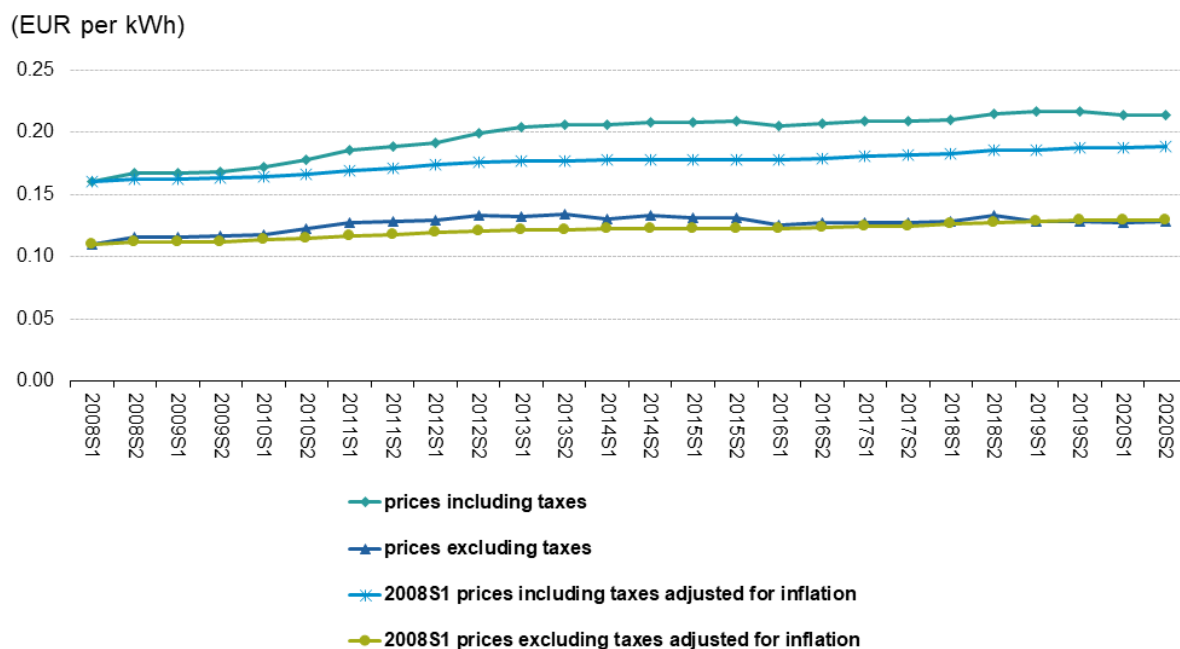
Graf 3 – Hrubá produkce elektrické energie podle typu paliva [38]

3.3.1 Dostupnost a cena elektrické energie

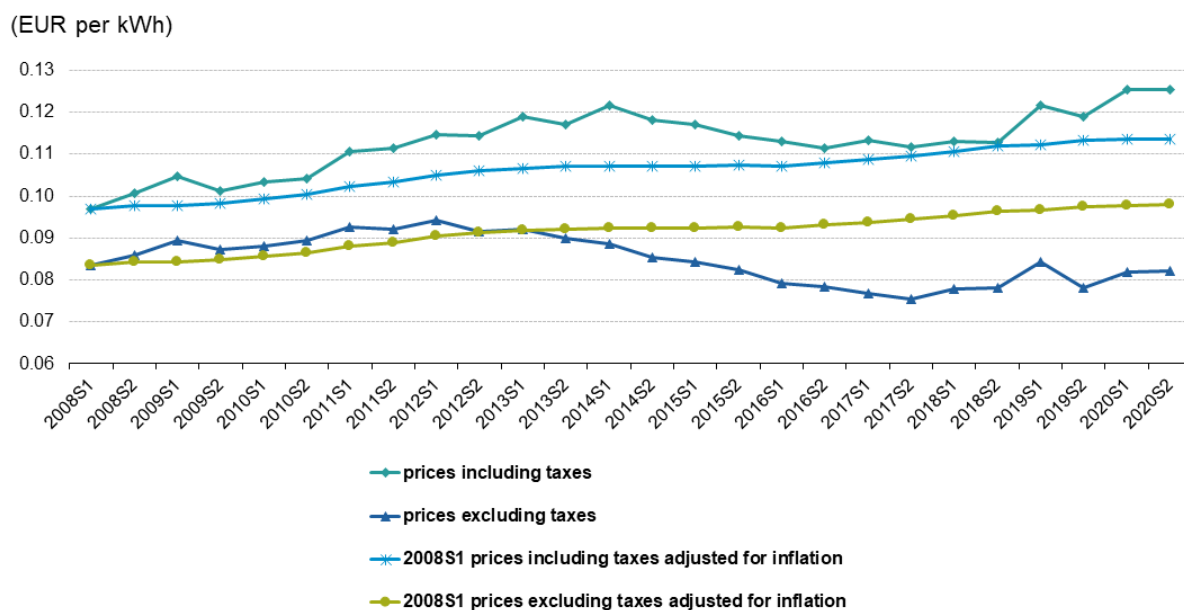
Je jasné, že pro udržitelnost a dostupnost elektrické energie do budoucna je zapotřebí využívání elektrické z obnovitelných zdrojů. Po zaměření se na tento typ získávání elektrické energie, dojde ke zjištění, že plán Evropské Unie je stát se do roku 2050 prvním klimaticky neutrálním kontinentem na světě, což znamená, že veškerá produkce elektrické energie je plánována z obnovitelných zdrojů [39].

Co se týče dostupnosti elektrické energie na území je patrný trend, zejména v severovýchodních zemích pro její získávání za využití vodních a větrných elektráren, tento trend je logický, jelikož geologické členění daných krajín k tomu poskytuje vhodné podmínky. Zároveň je patrný ústup od výroby energie pomocí štěpení jádra uranu. Nicméně v současné době stále platí, že většina energie je vyrobena „klasickou“ metodou, tedy spalováním fosilních paliv a přeměny tepla na elektrickou energii. Jelikož stále využíváme převážnou část tzv. „špinavé energie“ dokážeme držet finální cenu za kWh poměrně nízko, to je zapříčiněno především nízkou cenou nákladů na vybudování a provoz těchto fosilních elektráren, naproti tomu konstrukce jaderných, vodních, větrných elektráren sebou nese vyšší pořizovací a provozní náklady. Cena

elektrické energie pro domácnosti se v současnosti pohybuje kolem 0,20 €/kWh včetně daně. Při pohledu na graf je jasné, že vývoj ceny má stabilní rostoucí trend. Stejný trend má i vývoj ceny pro použití mimo domácnosti, kde se cena pohybuje na úrovni 0,13 €/kWh [40, 41, 42].



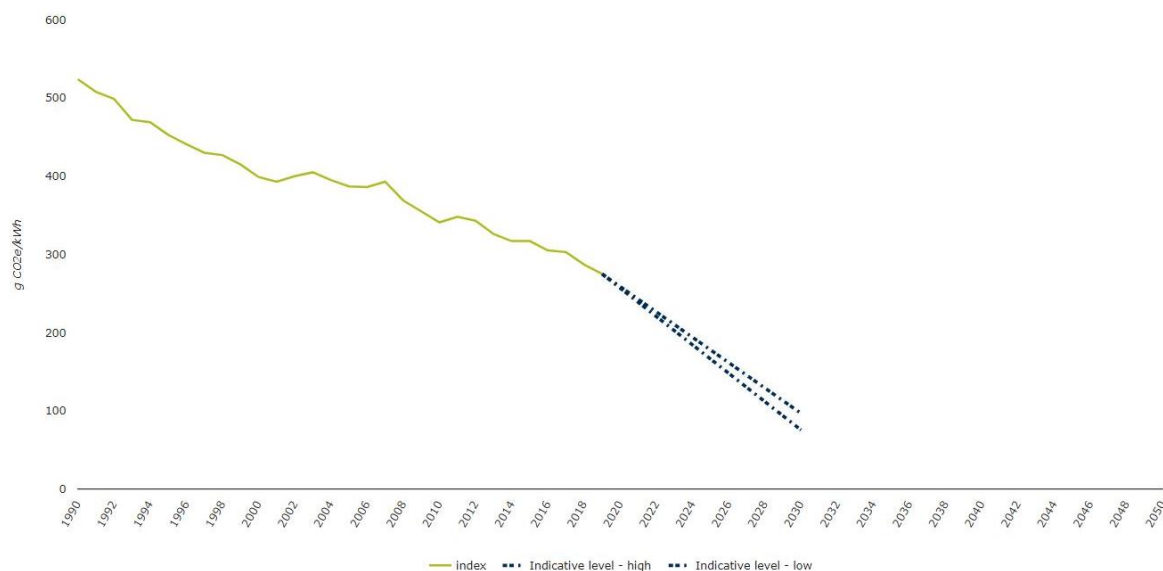
Graf 4– Cena elektrické energie pro domácnost [41]



Graf 5 – Cena elektrické energie pro použití mimo domácnost [42]

3.3.2 Ekologické dopady a využívání elektrické energie v současnosti

Využívání elektrické energie z obnovitelných zdrojů má mnoho výhod, včetně redukce vypouštění skleníkových plynů do atmosféry, diverzifikace energetických zdrojů a v neposlední řadě ovlivní i trh s fosilními palivy. Rostoucí produkce energie z obnovitelných zdrojů také může vést k nabídce nových pracovních míst. Nicméně v současné době je větší část elektrické energie stále vyráběna za použití fosilních paliv, což má negativní vliv na životní prostředí. Při její výrobě dochází k značnému uvolňování škodlivých látek do ovzduší především CO₂, které má za následek postupné oteplování atmosféry. Jak již bylo zmíněno výše, Evropská Unie tuto situaci bere velmi vážně, a proto se snaží dosáhnout uhlíkové neutrality do roku 2050. Na základě dostupných dat pozorovat klesající trend vypouštění emisí CO₂ při výrobě elektrické energie. V roce 1990 činila hodnota CO₂ emisí vypuštěných do ovzduší 524 g/kWh. V roce 2019 klesla tato hodnota na 255 g/kWh, což je téměř poloviční hodnota z roku 1990. V tomto ohledu EU postupuje nekompromisně a jejím cílem je snížit produkci CO₂ na hodnotu až o 55% nižší než v roce 1990. Toto je jedním z hlavních cílů pro dosažení uhlíkové neutrality do roku 2050 [43].



Graf 6 – Produkce CO₂ při výrobě elektrické energie s predikcí do roku 2030 [43]

3.4. Vodík

Vodík je mnoha experty považován za palivo budoucnosti, jelikož jeho výhřevnost dosahuje vysokých hodnot (přibližně až 2,5x větší výhřevnost než současně používaný letecký kerosin Jet A-1), a zároveň při spalování vodíku nedochází ke vzniku téměř žádných emisí.

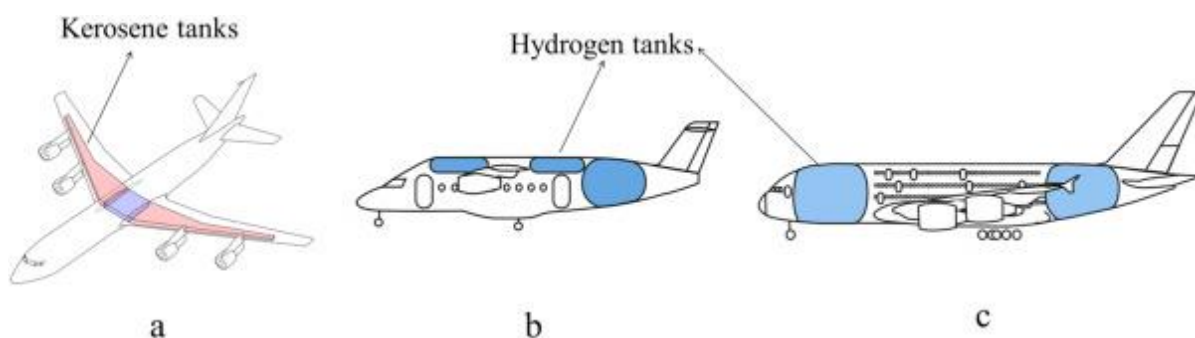
Vodík a palivové články mají vysoký potenciál pro uplatnění v leteckém odvětví. Použití vodíku v civilním letectví lze rozdělit do dvou částí, buďto jako náhrada za současný letecký petrolej nebo v podobě palivových článků jako náhrada stávajících pohonných jednotek pro menší letouny. V současnosti době se využitím vodíku v letectví zabývají oba největší dodavatelé letadel na trhu Airbus i Boeing. Zároveň probíhají studie o možnosti nahrazení stávajících pomocných jednotek tzv. APU vodíkovými palivovými články. Potenciál těchto palivových článků lze vidět i v možnosti využití pro některé letadlové systémy jako například: přetlakování, osvětlení, ochrana náběžných hran proti námraze, vysouvání podvozku atd [44].

S aktuálním technologickým vývojem a zkoumáním lze očekávat v horizontu 10 až 20 let příchod komerčního letounu, který bude využívat právě vodíkové palivové články jako primární zdroj energie pro generaci tahu. V případě využití vodíku v letectví ovšem je nutné zvýšit jeho objemovou hustotu nebo energetickou hustotu na jednotku objemu. V porovnání s kerosinem je potřeba většího množství vodíku pro získání stejného množství energie. Dolní výhřevnost 1 kg kerosinu činí 42 800 000 J, přičemž jeho objem činí 1,25 litru. Naproti tomu dolní výhřevnost 1 kg kapalného vodíku je 120 000 000 J, přičemž objem 1 kg kapalného vodíku je 14 litrů. Objem kapalného vodíku, který má stejnou výhřevnost jako kerosin je tedy přibližně 5x větší. Obecně využití vodíku jako paliva v letectví si žádá nezbytnou úpravu pohonné jednotky nebo konstrukce. Zde situaci komplikuje právě na jeden z problémů a tím je skladování vodíku [45, 46, 47].

Použití kapalného vodíku si žádá jeho skladování při velmi nízkých teplotách (-215°C). A rovněž je zapotřebí jej skladovat ve vysoce odizolovaných nádržích nikoliv v křídlech, jak je to běžné u kerosinu. Z těchto důvodů je zapotřebí nezbytná úprava konstrukce letounů. Pro letouny využívané na krátké a střední vzdálenosti mohou být nádrže umístěny nad kabinou pro cestující, zatímco pro letouny využívané na dlouhé tratě se jeví být přijatelná koncepce konstrukce dvou vodíkových nádrží, jedna v přední části hned za kokpitem a druhá v zadní části u ocasu letounu.

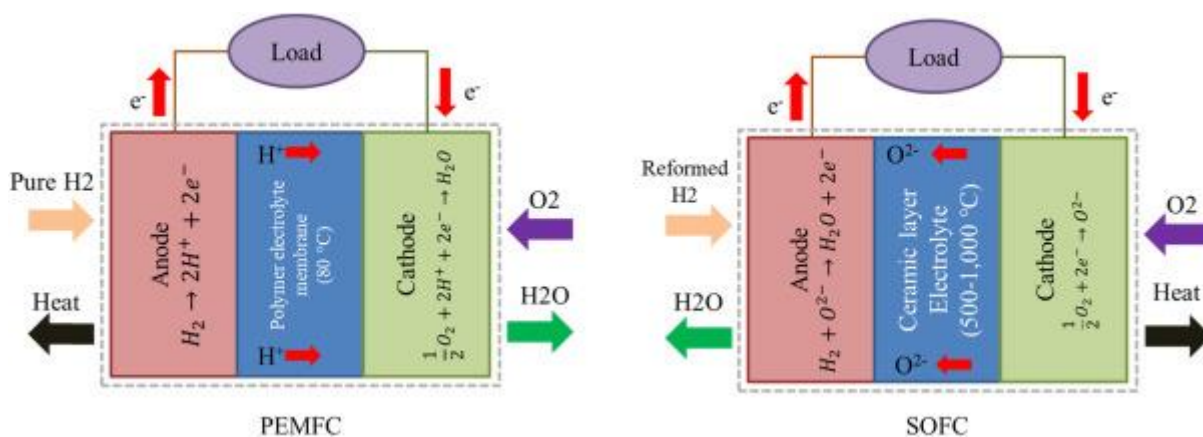
U konstrukce pro krátké a středně dlouhé tratě se může spotřeba energie zvýšit až o 6-19 % především z důvodu vyšší hmotnosti těchto nádrží. Naproti tomu konstrukce pro dálkové lety může dosáhnout energetické úspory až o 12 %, z čehož plyne, že vodík jako palivo se jeví nejvhodnější pro použití v dálkové dopravě. Pokud tedy předpokládáme uložení vodíkových nádrží v trupu letounu, je nutné k tomu zajistit i odpovídající zpevnění konstrukce. Díky tomu se nadále nebudou muset využívat křídla pro skladování paliva, a tak se změní jejich konstrukční parametry, dovolí nám to zmenšit rozpětí, ale na druhou stranu bude potřeba zvýšit jejich hmotnost, aby zůstala zachována jejich strukturální integrita proti ohybu, vibracím a aerodynamickým silám na ně působícím. Toto přepracování konstrukce letounu může

negativně ovlivnit aerodynamickou efektivitu. V souvislosti s přepracováním konstrukce letounu při přechodu z kerosinu na vodík bude potřeba i úprava pohonných jednotek. Tyto změny vedou k zvýšení nákladu na produkci a údržbu a mohou dosáhnout až 25 % [48].



Obrázek 6 – (a) uložení konvenčního paliva, (b) možné uložení vodíkových nádrží u letounu pro krátké a středně dlouhé vzdálenosti, (c) možné uložení nádrží u letounů pro dlouhé vzdálenosti [44]

Palivové články jsou zařízení, která pomocí chemické reakce mezi vodíkem a kyslíkem produkují elektrickou energii. Tyto palivové články jsou tiché, produkují minimum vibrací a žádné emise. Nejvíce se o využití v letectví uvažuje o dvou typech palivových článků. Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) a Solid Oxide Fuel Cell (SOFC). SOFC pracuje při vysokých teplotách a využívá hustou keramickou vrstvu jako elektrolyt, zatímco PEMFC pracuje při nízkých teplotách a využívá vodivou protonovou membránu jako elektrolyt. Tyto palivové články mohou na palubě letadla zásobovat řadu přístrojů, a to především systémy, které aktuálně využívají elektrickou energii z baterií jako jsou například: Flight Data Recorder (FDR), Cockpit Voice Recorder (CVR) a další [44].



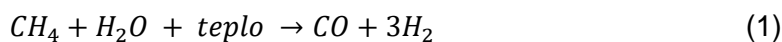
Obrázek 7 – Palivové články PEMFC a SOFC [44]

3.4.1 Výroba vodíku a vliv na životní prostředí

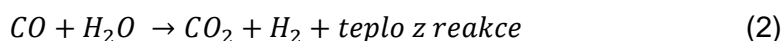
I přesto, že se jedná o nejhojněji zastoupený prvek ve vesmíru se naskytuje se zde hned k několik problémů. I přes jeho značný výskyt se vodík téměř nikde v přírodě nevyskytuje jako

volný prvek, ale je vázán na jinou látku, tudíž je nutné jej získávat pomocí poměrně nákladných výrobních procesů. Vzhledem k tomu, že při spalování vodíku nevznikají žádné emise CO₂, tak při jeho výrobě se hovoří o přesném opaku, i když samozřejmě záleží na metodě. Proto se do budoucna při produkci vodíku počítá s elektrickou energií dodávanou především z obnovitelných zdrojů. Jak již bylo zmíněno výše, je nutné se při získávání vodíku zaměřit na jeho sloučeniny a jejich úpravu. V současné době se bohužel pro výrobu vodíku využívají primárně suroviny (až z 90 %) jako je ropa, zemní plyn. Samozřejmě existují i způsoby výroby z obnovitelných zdrojů jako jsou voda a biomasa [47].

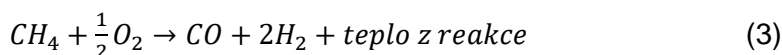
Při výrobě vodíku ze zemního plynu se využívají nejčastěji dvě metody jako jsou parní reformace a částečná oxidace. V prvním případě se zemní plyn, nejčastěji metan (CH₄) a vodní páry přemění na oxid uhelnatý (CO) a vodík pomocí endotermické reakce známé jako parní reformace (1).



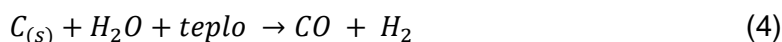
Vyprodukovaný oxid uhelnatý (CO) může být dále přeměněn na CO₂ a vodík pomocí tzv. water-gas shift reakce (2).



Při metodě částečné oxidace, která je exotermická, dochází k částečnému hoření metanu s kyslíkem, to má za následek produkci oxidu uhelnatého (CO), vodíku a tepla (3).

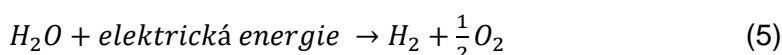


Rovněž existuje několik metod pro přeměnu uhlí na vodík pomocí endotermické gasifikace, neboli zplyňování. U většiny těchto reakcí se palivo a činidla přeměňují na směs oxidu uhelnatého (CO) a vodíku (4).



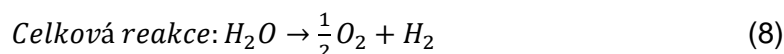
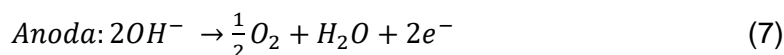
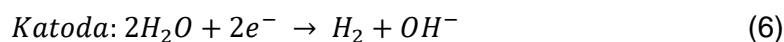
Produkce vodíku z fosilních paliv je pokaždé spojená s vypouštěním CO a CO₂ do ovzduší, pokud není během reakce zachytáván. Z tohoto důvodu byly vyvinuty metody pro získávání vodíku z vody nebo z biomasy.

Proces, při kterém dochází k separaci vodíku a kyslíku z vody se nazývá elektrolýza a probíhá prostřednictvím oxidačně-redukční reakce. Rovnice pro chemickou elektrolýzu vody (5).

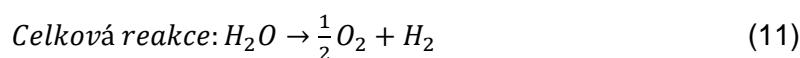
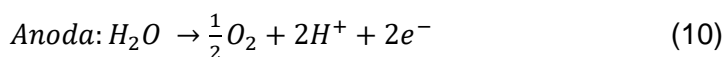
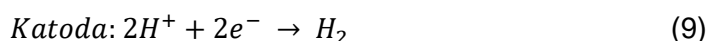


Elektrolyzéry mohou být buď nízkoteplotní, jako jsou alkalické elektrolyzéry a elektrolyzéry s protonovou výměnnou membránou (PEM), nebo vysokoteplotní, jako jsou elektrolyzéry

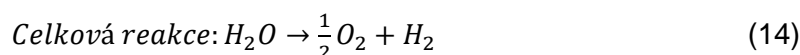
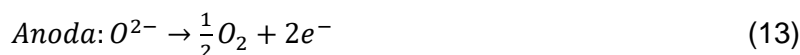
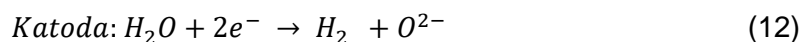
s pevnými oxidy. Nízkoteplotní elektrolyzéry často pracují při teplotách pod 100 °C, zatímco vysokoteplotní fungují při vyšších teplotách až do 1 000 °C. Při alkalické elektrolýze voda v katodě odebírá elektrony, a to má za následek vznik vodíku. Hydroxidové ionty proudí roztokem směrem k anodě, při tomto procesu se uvolňují elektrony. Rovnice (6), (7), (8) ukazují chemickou rovnici pro alkalickou elektrolýzu [40].



PEM elektrolyzér obsahuje pevný polymerní elektrolyt (SPE), který vede protony mezi katodou a anodou elektrolyzéro. Díky vysoké iontové vodivosti SPE je účinnost PEM elektrolyzéro vyšší než u alkalického. Hlavní chemické reakce, které probíhají v PEM elektrolyzéro, jsou uvedeny v rovnicích (9), (10), (11).

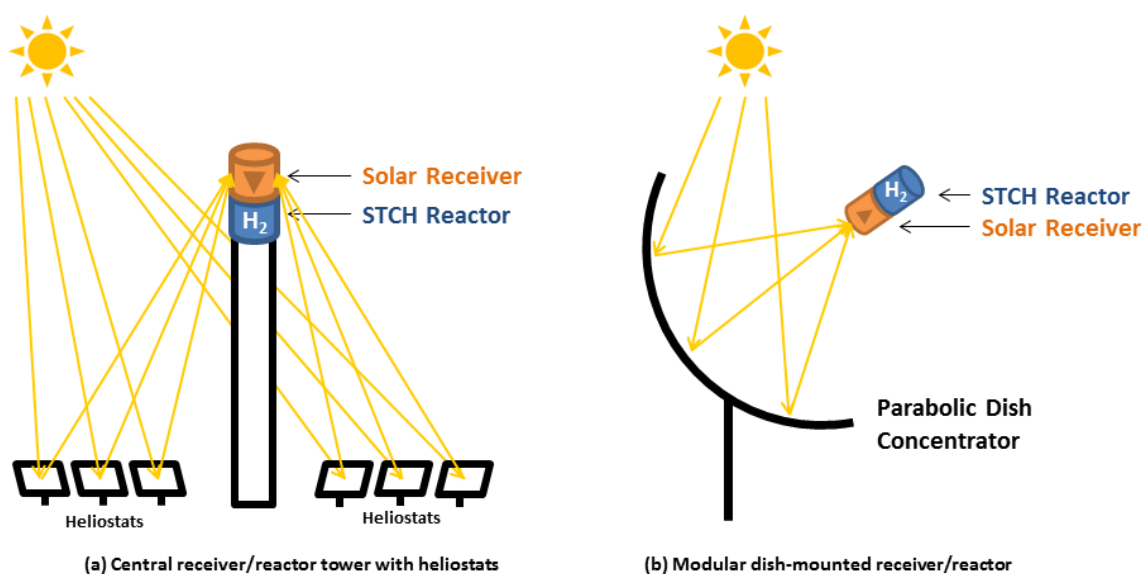


V elektrolyzéro na bázi pevných oxidů, který pracuje při vysokých teplotách obvykle mezi 500 a 850 °C, dochází v katodické oblasti k redukci vody za vzniku vodíkových a kyslíkových iontů. Plynný vodík se shromažďuje na katodě, zatímco kyslíkové ionty jsou přenášeny hustým elektrolytem na anodovou stranu, kde se vytváří kyslík. Hlavní reakce probíhající v elektrolyzéro na bázi pevných oxidů jsou uvedeny v rovnicích (12), (13), (14).



Jako doplněk k elektrolýze může být vodík vyráběn z vody pomocí termochemické reakce, která využívá vysokého tepla, především z kombinace solární energie nebo z odpadního tepla vzniklého při jaderné reakci a chemické reakce k získání vodíku a kyslíku z vody. Tento způsob

se jeví do budoucna jako udržitelný, jelikož nevznikají téměř žádné skleníkové plyny [49].



Obrázek 8 – Výroba vodíku ze solární energie [49]

Zplyňování biomasy je další možností ekologické výroby vodíku. Při zplyňování, které zahrnuje použití tepla, páry a kyslíku dohromady bez potřeby spalování dochází k získání vodíku z organických materiálů, jakými jsou například: kukuřice, pšenice, ale třeba i organický odpad. Tento způsob zároveň při výrobě nezanechává téměř žádné skleníkové plyny, jelikož suroviny, ze kterých se vyrábí během pěstování pohlcují CO_2 . Aktuálně tedy převládá získávání vodíku především ze zemního plynu, a to má za následek vypuštění emisí, zejména CO_2 do ovzduší [50].

3.4.2 Dostupnost a cena vodíku.

Dostupnost vodíku je v dnešní době poměrně omezená, jelikož se převážná většina vyrábí ze zemního plynu (až 95 %). Pokud se do budoucna uvažuje o udržitelné výrobě z dostupné suroviny (vody), bude potřeba počítat s určitými ztrátami, jelikož toto řešení není zrovna energeticky výhodné. Vodík využívající elektrolýzu vody vyžaduje přibližně 50 kWh elektrické energie pro získání 1 kg H_2 . Finanční náklady na tuto výrobu se pohybují v rozmezí 2,5-5,5 €/kg (pokud uvážíme střední hodnotu 4€/kg, jedná se v přepočtu o 0,12 €/kWh) ovšem obrovskou výhodou stále zůstává, že při tomto procesu nevznikají žádné emise CO_2 . Při výrobě vodíku ze zemního plynu pomocí prání reformace metanu se cena pohybuje kolem 1,5 €/kg (v přepočtu 0,045 €/kWh), nicméně zde záleží na aktuálních cenách zemního plynu a ceně za vypouštění emisí. Tento proces výroby vytváří přibližně 9,3 kg CO_2 na 1 kg vyrobeného vodíku. V tomto případě existuje možnost výroby stejným principem, tedy parní reformací metanu ovšem při procesu je zachytáván a ukládán CO_2 . Tato produkce vychází na

2 €/kg (v přepočtu 0,06 €/kWh). Z čehož vyplývá, že aktuálně se cenově nejvíc vyplatí produkce vodíku z metanu s vypouštěním CO₂ do ovzduší [51, 52, 53].

4 Posouzení nahraditelnosti konvenčních paliv

V této kapitole bude na základě dostupných statistických dat provedena analýza nahraditelnosti konvenčních paliv. Konkrétně bude vypočtena celková roční spotřeba leteckého paliva v EU (15), hmotnost (16) a množství (17) dřeva jako alternativy leteckého paliva v daném kontextu. Dále budou provedeny výpočty (18), (19), (20) se zohledněním cíle EU v podobě nahrazení 1,2 % celkového množství paliva, biopalivem druhé generace. Následně bude posouzena možnost zajištění obnovitelných zdrojů paliv pro leteckou dopravu na území EU (21, 22, 23, 24, 25). V neposlední řadě je součástí kapitoly také vyčíslení úbytku emisí oxidu uhličitého spojeného s přechodem na vodík jako alternativní palivo pro leteckou dopravu (26, 27, 28, 29, 30). V závěrečné části této kapitoly na výpočty naváže grafické znázornění ceny jednotlivých druhů paliv.

4.1 Nahrazení konvenčního paliva biopalivem druhé generace

Jednou z větších nevýhod produkce biopaliva první a druhé generace je, že vzhledem k vstupním surovinám, kterými jsou převážně rostliny nemůžeme počítat s celoročním přísunem těchto surovin. Další problém nastává v otázce zpracovatelských podniků, které by tolik biopaliva dokázaly vyrobit. Jako vhodná alternativa se nabízí dřevo, které je celoročně dostupné. Jak již bylo zmíněno výše, v EU se ročně spotřebuje přibližně 46 miliónů tun leteckého paliva. Hustota leteckého paliva Jet A/Jet A-1 při 15°C = 0,808 [11, 54].

$$\frac{\text{Celková spotřeba [kg]}}{\text{Hustota leteckého paliva [kg/l]}} = \text{Celková spotřeba [l]} \quad (15)$$

$$\frac{46\,000\,000\,000}{0,808} \cong 56\,931 \text{ mil. litrů}$$

Celková spotřeba leteckého paliva činí přibližně 57 miliónů litru paliva ročně.

$$\frac{\text{Celková spotřeba [l]}}{\text{Výtěžnost [l/kg]}} = \text{Celkový počet [kg]} \quad (16)$$

$$\frac{56\,931\,000\,000}{0,143} \cong 398\,118\,881\,000 \text{ kg}$$

K výrobě požadovaného množství paliva a jeho nahrazení biopalivem vyrobeného ze dřeva je potřeba 398 119 miliónů tun dřeva. Pro další výpočty bude použita hodnota středně tvrdého dřeva (smrku), jehož hustota činí přibližně 500 kg/m^3 [55].

$$\frac{\text{Celková hmotnost [kg]}}{\text{Hustota [kg/m}^3]} = \text{Celkový počet [m}^3] \quad (17)$$

$$\frac{398\,118\,881\,000}{500} \cong 796\,238\,000 \text{ m}^3$$

Pro nahrazení konvenčního paliva by bylo potřeba získat 796 miliónů m^3 dřeva. Při zohlednění cíle EU z roku 2019, kterým je nahradit 1,2 % spotřeby konvenčních paliv příměsí biopaliv druhé generace, činí výsledná hodnota 683 miliónů litrů [56].

$$\text{Celková spotřeba v litrech} \times 1,2 \% = 683\,172\,000 \text{ l}$$

Pro příměs s obsahem 1,2 % složek z obnovitelných zdrojů (v případě biopaliva vyrobeného ze dřeva) je nutné nahradit 683 miliónů litrů paliva.

$$\frac{\text{Celková potřeba [l]}}{\text{Výtěžnost [l/kg]}} = \text{Celkový počet [kg]} \quad (18)$$

$$\frac{683\,172\,000}{0,143} \cong 4\,777\,427\,000 \text{ kg}$$

$$\frac{\text{Celková hmotnost [kg]}}{\text{Hustota [kg/m}^3]} = \text{Celkový počet [m}^3] \quad (19)$$

$$\frac{4\,777\,427\,000}{500} \cong 9\,555\,000 \text{ m}^3$$

Výroba 1,2 % příměsí by vyžadovala 9 555 000 m^3 dřeva.

4.2 Možnost zajištění udržitelných zdrojů paliv pro leteckou dopravu na území EU

Účelem této části práce je zjistit, kolik elektrické energie by se získalo, kdyby se 2 % území EU využila pro produkci solární energie pomocí fotovoltaických článků. Takto získaná energie by byla následně využita při výrobě vodíku, který by v budoucnu mohl sloužit jako alternativní palivo v letectví. Průměrná intenzita slunečního záření v ČR je přibližně 300 W/m^2 a pro získání přibližně Získání 1 MWh elektrické energie za rok v našich podmínkách vyžaduje fotovoltaické panely o ploše $6,1 \text{ m}^2$. Pokud bychom teoreticky uvažovali rozmístění fotovoltaických panelů po EU ve výši 2 % její celkové rozlohy, která činí $4\,272\,000 \text{ km}^2$ [57, 58, 59].

$$\text{Celková rozloha v } [m^2] \times 2\% = \text{Využitelná plocha v } [m^2] \quad (20)$$

$$4\,272\,000\,000\,000 \times 0,02 = 8\,544\,000\,000 \text{ m}^2$$

Využitelná plocha činí $8\,544\,000\,000 \text{ m}^2$.

$$\frac{\text{Využitelná plocha v } [m^2]}{\text{Plocha pro produkci za rok } [m^2/\text{MWh}]} = \text{Celková produkce elektrické energie v } [\text{MWh}] \quad (21)$$

$$\frac{8\,544\,000\,000}{6,1} \cong 1\,400\,655\,737 \text{ MWh}$$

Z čehož vyplývá, že využití 2 % celkové rozlohy EU by po osazení fotovoltaickými články vygenerovalo 1 400 TWh elektrické energie. Jak již bylo uvedeno výše, elektrolýzou vody lze získat přibližně 50kWh elektrické energie pro získání 1 kg H_2 .

$$\frac{\text{Získaná elektrická energie z fotovoltaických panelů } [kWh]}{\text{Energie potřebná pro získání } H_2 [kWh/kg]} = \text{Získané množství } [kg_{H_2}] \quad (22)$$

$$\frac{1\,400\,655\,737\,000 [kWh]}{50 [kWh]} = 28\,013\,114\,740 \text{ kg}_{H_2}$$

Výpočet dostupné energie z vodíku:

$$\text{Celkové množství } H_2 [kg] \times \text{Energie } H_2 [MJ/kg] = \text{Celková energie } H_2 [MJ] \quad (23)$$

$$28\,013\,114\,740 \times 120 = 3\,361\,573\,768\,800 \text{ MJ}$$

Přepočet na kWh:

$$1 \text{ MJ} = 0,28 \text{ kWh}$$

$$\text{Celková spotřeba energie } [MJ] \times [kWh/MJ] = \text{Celková spotřeba energie v } [kWh] \quad (24)$$

$$3\,361\,573\,768\,800 \times 0,28 = 941\,240\,655\,264 \text{ kWh}$$

Celková energie vyrobeného vodíku činí přibližně 941 240 GWh.

Z celkové spotřeby paliva v EU, která činí 56 931 mil. litrů ročně, zjistíme, kolik energie by bylo potřeba nahradit. Jak již bylo zmíněno, dolní výhřevnost leteckého paliva činí 42 MJ/kg nebo také 34 MJ/l

$$\frac{\text{Celková roční spotřeba paliva v EU [l]} \times \text{Energie paliva [MJ/l]}}{\text{Celková roční spotřeba energie [MJ]}} = \quad (25)$$

$$56\,931\,000\,000 \times 34 = 1\,935\,654\,000\,000 \text{ MJ}$$

Přepočet na kWh

$$1 \text{ MJ} = 0,28 \text{ kWh}$$

$$\frac{\text{Celková roční spotřeba energie [MJ]} \times \text{kWh z 1 MJ}}{\text{Celková roční spotřeba energie v kWh}} = \quad (26)$$

$$1\,935\,654\,000\,000 \times 0,28 = 541\,983\,120\,000 \text{ kWh}$$

Celková spotřeba energie v letectví je tedy přibližně 542 983 GWh.

4.3 Emise CO₂ při výrobě alternativního paliva

V následující části textu bude přibližným výpočtem zjištěno vyprodukované množství CO₂ spalováním leteckého paliva během jednoho roku a potřebné množství vodíku pro jeho nahrazení za předpokladu stejné účinnosti obou typů paliv. Rovněž bude pro porovnání vypočteno vypuštěné množství CO₂ při jeho výrobě za pomoci současného energetického mixu. Množství zplodin CO₂ je závislé na spotřebě a pro tento přibližný výpočet lze použít běžně udávané emisní faktory, které udávají, jaké množství tohoto plynu vznikne při spálení jednoho litru leteckého paliva [60].

$$\frac{\text{Emisní faktor leteckého paliva [kg}_{CO_2}\text{/l}_{letecké\ palivo}] \times \text{Spotřeba paliva [l]}}{\text{Množství uvolněného CO}_2 \text{ [kg}_{CO_2}\text{]}} = \quad (27)$$

$$3,16 \times 56\,931\,000\,000 = 179\,901\,960\,000 \text{ kg}_{CO_2}$$

Při spalování paliva vznikne přibližně 180 milionů tun CO₂. Požadované množství vodíku při náhradě konvenčního paliva:

$$\frac{\text{Celková roční spotřeba energie [MJ]}}{\text{Energie vodíku [MJ/kg}_{H_2}\text{]}} = \text{Potřebné množství [kg}_{H_2}\text{]} \quad (28)$$

$$\frac{1\,935\,654\,000\,000}{120} = 16\,130\,450\,000 \text{ kg}_{H_2}$$

Množství vodíku, který by sloužil jako náhrada konvenčního paliva, činí 16 130 450 tun. Celkové množství elektrické energie pro získání vodíku pomocí elektrolýzy vody, tentokrát

ovšem za použití energetického mixu nikoli obnovitelného zdroje energie, lze spočítat jako součin potřebného množství vodíku a elektrické energie pro jeho získání.

$$\text{Potřebné množství [kg}_{H_2}\text{]} \times \text{Energie potřebná pro získání [kWh/kg}_{H_2}\text{]} = \text{Celková potřeba energie [kWh]} \quad (29)$$

$$16\,130\,450\,000 \times 50 = 806\,522\,500\,000 \text{ kWh}$$

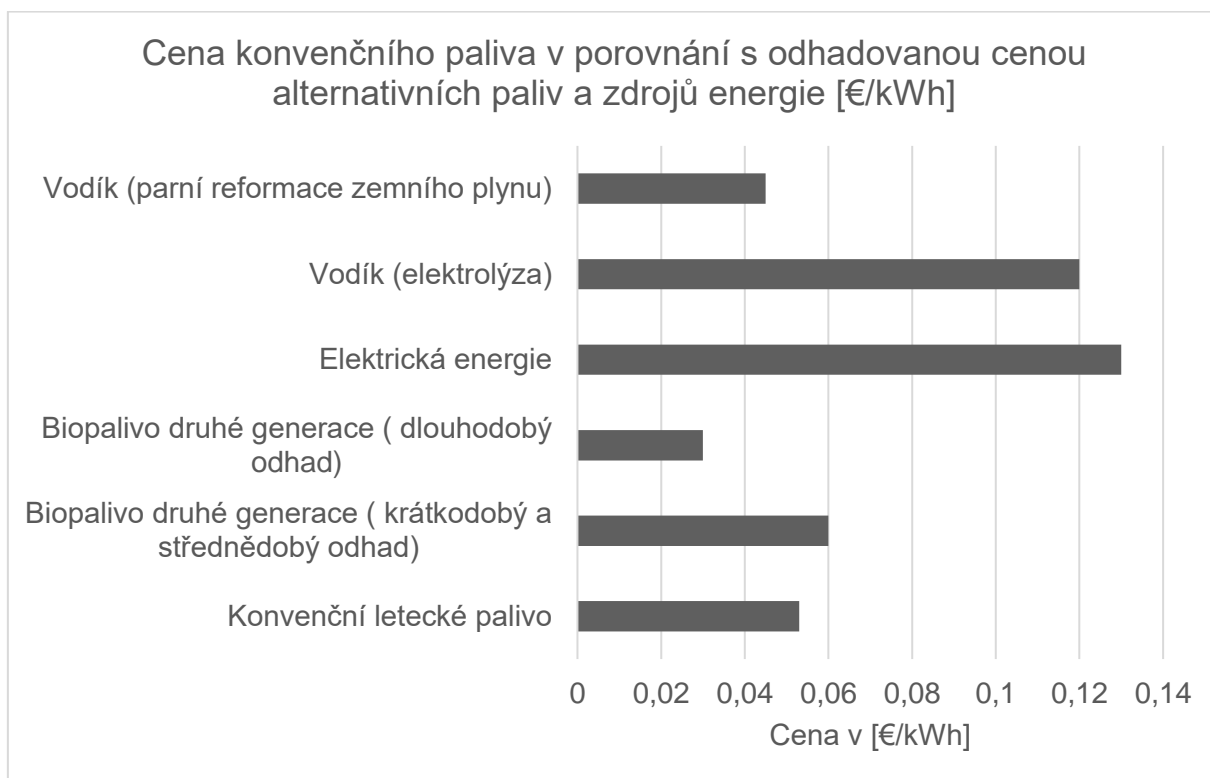
Potřebné množství elektrické energie potřebné pro produkci vodíku a pokrytí celkové roční spotřeby činí 806 522 GWh. Při nahrazení konvenčního paliva vodíkem lze předpokládat, že emise CO_2 zcela vymizí. Množství emisí vyprodukovaných využitím energetického mixu k výrobě vodíku lze spočítat jako součin potřebné energie a emisního faktoru CO_2 , který je pro EU uváděn [43].

$$\text{Celková potřeba energie [kWh]} \times \text{Emisní faktor EU [g}_{CO_2}\text{/kWh]} = \text{Množství } CO_2 \text{ [g}_{CO_2}\text{]} \quad (30)$$

$$806\,522\,500\,000 \times 290 = 233\,891\,525\,000 \text{ kg}_{CO_2}$$

Vypuštěno by bylo přibližně 234 miliónů tun CO_2 .

4.4 Porovnání ceny paliv



Graf 7 – Cena konvenčního paliva v porovnání s odhadovanou cenou alternativních paliv a zdrojů, vlastní zpracování, zdroj dat kapitoly: 2.1, 3.2.2, 3.3.1, 3.4.2

Diskuse

Na základě dostupných dat EU byla zjištěna přibližná roční spotřeba paliva, která se pohybuje řádově kolem 46 miliónů tun ročně. Následným přepočtem byla zjištěna spotřeba tohoto paliva v litrech, která přibližně činí 56 miliónů litrů. Dále byla vypočtená přibližná hmotnost a množství dřeva, které by sloužilo jako primární zdroj produkce biopaliva druhé generace. Výsledná hodnota činí přibližně 796 miliónů m^3 , což se při srovnání s celkovou roční produkcí dřeva v EU, která se pohybuje na úrovni kolem 500 miliónů m^3 ukazuje jako nedostatečné pro pokrytí celkové evropské spotřeby. Z toho důvodu došlo k posouzení možnosti nahradit alespoň 1,2 % celkové spotřeby, jakožto cíle EU v otázce příměsí biopaliv druhé generace. Výsledkem je hodnota na úrovni 10 miliónů m^3 , která se již jeví jako přijatelnější ovšem je třeba brát v potaz, že v obou případech v praxi vytěžené dřevo je použito na předem určené zpracování. Z toho důvodu by bylo vhodné využití více surovin pro získání potřebného množství biopaliva (řepka, odpad atd.) Zároveň je potřeba brát v úvahu cíl EU do roku 2030, kdy až 14 % paliva by mělo být tvořeno příměsí z obnovitelných zdrojů. Z tohoto důvodu se jeví jako nevhodné zaměřit se pouze na jediný typ suroviny potřebné pro získání biopaliva [61, 62].

Následně bylo provedeno posouzení zajištění obnovitelných zdrojů paliv pro leteckou dopravu na území EU. Účelem těchto výpočtů bylo zjistit, kolik elektrické energie by mohlo být teoreticky vyprodukováno při osazení určité rozlohy EU (2 %) fotovoltaickými panely. Pomocí zjednodušených výpočtů bylo zjištěno, že takto osazená plocha by vygenerovala přibližně 1 400 TWh elektrické energie za rok, což činí přibližně polovinu celkové roční spotřeby elektrické energie na území EU. Takto získaná energie by následně mohla být využita pro získání alternativního paliva (vodíku), pomocí elektrolýzy vody a jeho následné použití jakožto alternativního paliva v letectví. Výsledná energie vodíku činí 941 240 GWh. Což by pro náhradu konvenčního paliva (za předpokladu stejné účinnosti pohonných jednotek) bylo postačující. Spotřeba energie v letectví totiž činí 542 983 GWh. Získávání vodíku pomocí elektrolýzy momentálně příliš energeticky náročné, neboť v daném případě došlo při výrobě vodíku téměř k 33% ztrátám energie. Z tohoto důvodu tato transformace v současnosti neplatí za příliš ekonomickou [38].

V neposlední řadě bylo vypočteno množství oxidu uhličitého vypuštěného spalováním leteckého paliva během jednoho roku do ovzduší, které činí přibližně 180 miliónů tun. Následným výpočtem bylo zjištěno požadované množství vodíku, které by nahradilo palivo konvenční za předpokladu stejné účinnosti při spalování. Výsledek činí zhruba 16 miliónů tun vodíku. Uvážením výroby tohoto množství vodíku pomocí elektrolýzy s využitím současného energetického mixu EU bylo vypočteno přibližné množství oxidu uhličitého vypuštěného do ovzduší. Hodnota činí zhruba 234 miliónů tun. V případě nahrazení konvenčního paliva

vodíkem by došlo k redukci emisí oxidu uhličitého. Nicméně je poměrně překvapujícím zjištěním, že v procesu výroby tohoto alternativního paliva by bylo do ovzduší vypuštěno přibližně o 30 % oxidu uhličitého více. Z tohoto důvodu se jeví produkce vodíku jako neekologická. Pro dosažení cíle EU do roku 2050 v podobě klimatické neutrality připadají v úvahu obnovitelné zdroje energie jako jediné vhodné ekologické východisko v procesu hydrogenové výroby.

Pro porovnání cen konvenčního a alternativních paliv, o kterých tato práce pojednává, byla využita dostupná data a pro lepší přehlednost znázorněna v grafické podobě. Bylo zjištěno, že se v dlouhodobém horizontu jako cenově nejvýhodnější jeví biopaliva druhé generace.

Závěr

Cílem práce bylo provést posouzení nahraditelnosti konvenčních paliv energií z obnovitelných zdrojů s palivy alternativními. Tento cíl práce se podařilo naplnit. Na základě výpočtů bylo provedeno nahrazení celkové roční spotřeby konvenčních paliv v letectví biopalivy druhé generace (konkrétně s využitím kulatiny jako vstupní suroviny) na území EU.

Za pomoci výpočtů bylo zjištěno, že celková potřeba dřeva pro výrobu biopaliva druhé generace, které by nahradilo palivo konvenční, převyšuje roční produkci dřeva v EU o 60 %. Tudíž toto teoretické nahrazení bylo za předpokladu nedostatečného pokrytí importem vyhodnoceno jako neproveditelné. Z toho důvodu byla posuzovaná možnost nahrazení alespoň požadovaného množství příměsí dle legislativy EU týkající se biopaliv druhé generace. Výsledná potřeba činí přibližně 2 % z vyprodukovaného množství dřeva. Nahrazení je v tomto teoretickém případě proveditelné.

Za další byla posouzena možnost zajištění udržitelných zdrojů pro leteckou dopravu. Tato hypotetická situace předpokládala osazení 2 % území EU fotovoltaickými panely a následné využití této elektrické energie k získání vodíku pomocí elektrolýzy vody, který by sloužil jako náhrada konvenčního paliva. Vyprodukované množství vodíku by za předpokladu zachování účinnosti pohonného ústrojí bylo více než dostačující. Nicméně i zde bylo prokázáno, že výroba vodíku pomocí elektrolýzy není obzvláště efektivní a při transformaci by došlo přibližně ke 33% ztrátám.

Následně byla porovnána roční produkce oxidu uhličitého leteckou dopravou a produkce emisí oxidu uhličitého, které by vznikly při výrobě vodíku pomocí elektrolýzy vody s využitím současného energetického mixu EU. Takto vyrobený vodík by teoreticky sloužil jako náhrada za konvenční palivo (při uvážení zachování stejné účinnosti). Bylo však zjištěno, že v tomto případě by nahrazením stávajícího konvenčního paliva vodíkem nedošlo k úspoře emisí oxidu uhličitého nýbrž by se jejich produkce zvýšila přibližně o 30 %.

V neposlední řadě došlo ke srovnání cen konvenčního a alternativních paliv, o kterých tato práce pojednává, s využitím dostupných dat a pro lepší přehlednost jsou tyto hodnoty znázorněny v grafické podobě. Bylo zjištěno, že jako cenově nejvýhodnější se jeví biopaliva druhé generace v dlouhodobém horizontu. Zde je potřeba brát zřetel na politickou vůli v podobě zdanění konvenčních paliv, které ve výsledku zvýhodňují paliva alternativní.

Při posouzení proveditelnosti nahrazení konvenčních paliv palivy alternativními narážíme na hlavní limitaci práce, jež představuje zjednodušení výpočtů za použití omezeného množství dat. Toto omezení sice mohlo závěry určitým způsobem ovlivnit, je ale vzhledem k omezení

rozsahu bakalářské práce nevyhnutelné. Avšak i s ohledem na limitace, lze na základě výsledků této práce shledat, že úplný přechod na alternativní zdroje v současnosti by vyžadoval dalekosáhle strukturální změny v energetickém sektoru. Do té doby, než budou tyto změny provedeny, se jako nejsmysluplnější řešení v souladu cíli EU týkající se zelené transformace jeví využití konvenčních paliv s příměsí biosložky. Budoucí výzkum může na předkládanou práci navázat a zaměřit se právě na tyto uvedené limitace.

Seznam zdrojů

- [1] CABUZEL, Thierry. EU climate action and the European Green Deal. *Climate Action - European Commission* [online]. 23. říjen 2019 [vid. 2021-08-08]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/clima/policies/eu-climate-action_en
- [2] EUROPEAN COMMISSION. Reducing emissions from aviation. *Climate Action* [online]. 23. listopad 2016 [vid. 2021-08-08]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/aviation_en
- [3] MATYÁŠEK, Jiří a Miloslav SUK. 3. 1 Zdroje energie | 3 Vlivy získávání a využívání přírodních energetických zdrojů. *Antropogeneze v geologii* [online]. 2019 [vid. 2021-08-07]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/do/1499/el/estud/pedf/js10/antropog/web/pages/3-1-zdroje-energie.html>
- [4] AIRBUS. Electric flight. *Airbus* [online]. 2021 [vid. 2021-08-08]. Dostupné z: <https://www.airbus.com/innovation/zero-emission/electric-flight.html>
- [5] AIRBUS. Zero-emission flight is taking a giant leap forward. *Airbus* [online]. 2019 [vid. 2021-08-08]. Dostupné z: <https://www.airbus.com/newsroom/stories/zero-emission-flight-is-taking-a-giant-leap-forward.html>
- [6] MARBURGER, John H. *National Aeronautics Research and Development Policy* [online]. B.m.: National Science and Technology Council. 2006. Dostupné z: https://www.hq.nasa.gov/office/aero/releases/national_aeronautics_rd_policy_dec_2006.pdf
- [7] ICAO. Assembly. *International Civil Aviation Organization* [online]. [vid. 2021-08-07]. Dostupné z: <https://www.icao.int/about-icao/assembly/Pages/default.aspx>
- [8] SECOND CAEP NOISE TECHNOLOGY INDEPENDENT EXPERT PANEL, INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION, a COMMITTEE ON AVIATION ENVIRONMENTAL PROTECTION. *Report by the Second CAEP Noise Technology Independent Expert Panel: novel aircraft-noise technology review and medium- and long-term noise reduction goals : report*. 2014. ISBN 978-92-9249-401-8.
- [9] NELSON, Emily S. a D. R. REDDY, ed. *Green aviation: reduction of environmental impact through aircraft technology and alternative fuels*. The Netherlands ; Boca Raton: CRC Press/Balkema, 2017. Sustainable energy developments, volume 14. ISBN 978-0-203-11996-9.
- [10] LUFTHANSA. Airbus A350-900. *Lufthansa* [online]. [vid. 2021-08-07]. Dostupné z: <https://www.lufthansa.com/cn/en/35a>
- [11] EIA. API Query Browser. *U.S. Energy Information Administration* [online]. 2018 [vid. 2021-08-07]. Dostupné z: <https://www.eia.gov/opendata/qb.php?category=2135044&sdid=INTL.63-2-EU27-MT.A>

- [12] RISEN, Tom. Open rotor innovator. *Aerospace America* [online]. 2. červenec 2018 [vid. 2021-08-07]. Dostupné z: <https://aerospaceamerica.aiaa.org/departments/open-rotor-innovator/>
- [13] SAFRAN. What does the future hold in store for the Open Rotor? *Safran* [online]. 2019 [vid. 2021-08-07]. Dostupné z: <https://www.safran-group.com/news/what-does-future-hold-store-open-rotor-2019-03-28>
- [14] ALLEN, Bob. Blended Wing Body Fact Sheet. *NASA* [online]. 2008 [vid. 2021-08-07]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/centers/langley/news/factsheets/FS-2003-11-81-LaRC.html>
- [15] AIRBUS. Imagine travelling in this blended wing body aircraft. *Airbus* [online]. 2020 [vid. 2021-08-07]. Dostupné z: <https://www.airbus.com/newsroom/stories/Imagine-travelling-in-this-blended-wing-body-aircraft.html>
- [16] AIRBUS. Cryogenics and superconductivity for aircraft, explained. *Airbus* [online]. 2021 [vid. 2021-08-07]. Dostupné z: <https://www.airbus.com/newsroom/stories/ascend-cryogenics-superconductivity-for-aircraft-explained.html>
- [17] SAUNDERS, Eddie. Airbus: Formation-Flying Airliners Can Save Fuel. *Airline Ground Services* [online]. 25. září 2020 [vid. 2021-08-07]. Dostupné z: <https://airlinergs.com/airbus-formation-flying-airliners-can-save-fuel/>
- [18] NESTE. Neste to enable production of up to 500,000 tons/a of Sustainable Aviation Fuel at its Rotterdam renewable products refinery. *Neste worldwide* [online]. 29. duben 2021 [vid. 2021-08-09]. Dostupné z: <https://www.neste.com/releases-and-news/renewable-solutions/neste-enable-production-500000-tonsa-sustainable-aviation-fuel-its-rotterdam-renewable-products>
- [19] AHLGREN, Linnea. Which Airlines Use Sustainable Aviation Fuel? *Simple Flying* [online]. 13. říjen 2020 [vid. 2021-08-09]. Dostupné z: <https://simpleflying.com/sustainable-aviation-fuel-airlines/>
- [20] FRANCE 24. Air France powers long-haul flight to Canada with used cooking oil. *France 24* [online]. 18. květen 2021 [vid. 2021-08-09]. Dostupné z: <https://www.france24.com/en/france/20210518-air-france-powers-long-haul-flight-to-canada-with-used-cooking-oil>
- [21] TAKAHASHI, Paul. First long-haul flight powered by biofuels takes off. *Houston Chronicle* [online]. 19. květen 2021 [vid. 2021-08-09]. Dostupné z: <https://www.houstonchronicle.com/business/energy/article/First-long-haul-flight-powered-by-biofuels-takes-16188237.php>
- [22] INTELLIGENT PARTNERSHIP. Aviation biofuels: which airlines are doing what, with whom? *Intelligent Partnership* [online]. 6. červen 2012 [vid. 2021-08-09]. Dostupné z: <https://intelligent-partnership.com/aviation-biofuels-which-airlines-are-doing-what-with-whom/>

- [23] NEWMAGAZINEROOM. Antracitový původ. Co je antracit? Vlastnosti, výroba, použití a cena antracitu. *newmagazineroom* [online]. 2020 [vid. 2021-08-07]. Dostupné z: <https://newmagazineroom.ru/cs/buhgalterskaya-otchetnost/antracit-proishozhdenie-chto-takoe-antracit-svoistva-dobycha>
- [24] PROCHÁZKA, Martin. Piráti jsou proti povinné biosložce v benzínu - Novinky.cz. *Novinky.cz* [online]. 2020 [vid. 2021-08-07]. Dostupné z: <https://www.novinky.cz/ekonomika/clanek/pirati-proti-povinne-bioslozce-v-benzinu-40342169>
- [25] YILMAZ, Nadir a Alpaslan ATMANLI. Sustainable alternative fuels in aviation. *Energy* [online]. 2017, **140**, 1378–1386. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2017.07.077
- [26] LE FEUVRE, Pharoah. Are aviation biofuels ready for take off? – Analysis. *IEA* [online]. 2019 [vid. 2021-08-07]. Dostupné z: <https://www.iea.org/commentaries/are-aviation-biofuels-ready-for-take-off>
- [27] PETROLEUM. Pohonné hmoty pro leteckou dopravu. *petroleum.cz* [online]. 2021 [vid. 2021-08-08]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/vyroby/jet.aspx>
- [28] ZSCHOCKE, Alexander, DEUTSCHE LUFTHANSA AG, Sebastian SCHEUERMANN a Jens ORTNER. *High Biofuel Blends in Aviation (HBBA) ENER/C2/2012/420-1 Final Report* [online]. B.m.: Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Betriebsstoffe. 2014. Dostupné z: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/final_report_for_publication.pdf
- [29] BESTER, Nigel a Andy YATES. Assessment of the Operational Performance of Fischer-Tropsch Synthetic-Paraffinic Kerosene in a T63 Gas Turbine Compared to Conventional Jet A-1 Fuel. In: *ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea, and Air: Volume 2: Combustion, Fuels and Emissions* [online]. Orlando, Florida, USA: ASMEDC, 2009, s. 1063–1077 [vid. 2021-08-08]. ISBN 978-0-7918-4883-8. Dostupné z: doi:10.1115/GT2009-60333
- [30] PRAŽÁK, Václav. Motorová paliva a biopaliva. *biom.cz* [online]. 2008 [vid. 2021-08-08]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/knihovna/motorova-paliva-a-biopaliva>
- [31] MADEJ, Martin. Biopaliva jako alternativy fosilních zdrojů v těžko elektrifikovatelných sektorech. *oEnergetice.cz* [online]. 18. duben 2021 [vid. 2021-08-08]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/nazory/biopaliva-jako-alternativy-fosilnich-zdroju-tezko-elektrifikovatelnych-sektorech/>
- [32] EFG HOLDING. EFG o budoucnosti BioCNG z odpadu. *EFG* [online]. 9. říjen 2020 [vid. 2021-08-08]. Dostupné z: <https://www.efg-holding.cz/efg-o-budoucnosti-biocng-z-odpadu/>
- [33] TELEVIZE, Česká. Biopaliva nové generace se blíží. Řasy jsou sedmkrát účinnější než etanol z kukuřice. *ČT24 - Nejdůvěryhodnější zpravodajský web v ČR - Česká televize*

- [online]. 2018 [vid. 2021-08-08]. Dostupné z: <https://ct24.ceskatelevize.cz/veda/2419870-biopaliva-nove-generace-se-blizi-rasy-jsou-sedmkrat-ucinnejsi-nez-etanol-z-kukurice>
- [34] MARTIN, Andrew. Free Image on Pixabay - Seaweed, Rock, Round, Beach. *pixabay* [online]. 2017 [vid. 2021-08-08]. Dostupné z: <https://pixabay.com/photos/seaweed-rock-round-beach-seaside-2205570/>
- [35] PEER, Václav, Jan NAJSERT a Rafal CHLOND. Syntéza kapalných paliv. *Energie z biomasy XIV* [online]. 2013. Dostupné z: https://eu.fme.vutbr.cz/file/Sbornik-EnBio/2013/12_Peer.pdf
- [36] ŠEBOR, Gustav, Milan POSPÍŠIL a Jan ŽÁKOVEC. *Technicko – ekonomická analýza vhodných alternativních paliv v dopravě* [online]. B.m.: VŠCHT, Fakulta technologie ochrany prostředí, Ústav technologie ropy a petrochemie. 2006. Dostupné z: https://biom.cz/upload/6e01d6d4c4835ec93cda508772f3bf6e/technickoekonomicka_analyza_vhodnych_alternativnich_paliv_v_doprave.pdf
- [37] EDOTACE. Energetika ve světě a v EU. *Edotace* [online]. 2017 [vid. 2021-08-08]. Dostupné z: <http://www.edotace.cz/clanky/energetika-ve-svete-a-v-eu-tradicni-vs-zelena>
- [38] EUROSTAT. Electricity and heat statistics. *eurostat statistics explained* [online]. 2020 [vid. 2021-08-08]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_and_heat_statistics
- [39] EUROPEAN COMMISSION. 2050 long-term strategy. *Climate Action* [online]. 23. listopad 2016 [vid. 2021-08-08]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en
- [40] PLANÈTE ÉNERGIES. Electricity Generation and Related CO2 Emissions. *Planète Énergies* [online]. 2016 [vid. 2021-08-08]. Dostupné z: <https://www.planete-energies.com/en/medias/close/electricity-generation-and-related-co2-emissions>
- [41] EUROSTAT. Development of electricity prices for household consumers, EU-27, 2008-2020 (EUR per kWh). *eurostat statistic explained* [online]. 2020 [vid. 2021-08-08]. Dostupné z: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Development_of_electricity_prices_for_household_consumers,_EU-27,_2008-2020_\(EUR_per_kWh\)_v01.png](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Development_of_electricity_prices_for_household_consumers,_EU-27,_2008-2020_(EUR_per_kWh)_v01.png)
- [42] EUROSTAT. Development of electricity prices for non-household consumers, EU-27, 2008-2020 (EUR per kWh). *eurostat statistic explained* [online]. 2020 [vid. 2021-08-08]. Dostupné z: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Development_of_electricity_prices_for_non-household_consumers,_EU-27,_2008-2020_\(EUR_per_kWh\)_v11.png](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Development_of_electricity_prices_for_non-household_consumers,_EU-27,_2008-2020_(EUR_per_kWh)_v11.png)
- [43] EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. Greenhouse gas emission intensity of electricity generation in Europe — European Environment Agency. *European Environment Agency*

- [online]. 2021 [vid. 2021-08-08]. Dostupné z: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/overview-of-the-electricity-production-3/assessment-1>
- [44] BAROUTAJI, Ahmad, Tabbi WILBERFORCE, Mohamad RAMADAN a Abdul Ghani OLABI. Comprehensive investigation on hydrogen and fuel cell technology in the aviation and aerospace sectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2019, **106**, 31–40. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2019.02.022
- [45] BAUMI, Jonathan, Caroline Milani BERTOSSE a Carmen Luisa Barbosa GUEDES. *Aviation Fuels and Biofuels* [online]. B.m.: IntechOpen, 2020 [vid. 2021-08-08]. ISBN 978-1-78984-284-5. Dostupné z: doi:10.5772/intechopen.89397
- [46] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Heat values of various fuels - World Nuclear Association. *World Nuclear Association* [online]. 2021 [vid. 2021-08-08]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/heat-values-of-various-fuels.aspx>
- [47] CECERE, D., E. GIACOMAZZI a A. INGENITO. A review on hydrogen industrial aerospace applications. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2014, **39**(20), 10731–10747. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2014.04.126
- [48] VERSTRAETE, D. On the energy efficiency of hydrogen-fuelled transport aircraft. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2015, **40**(23), 7388–7394. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2015.04.055
- [49] ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY. Hydrogen Production: Thermochemical Water Splitting. *U. S. Department of Energy | Energy Efficiency & Renewable Energy* [online]. 2021 [vid. 2021-08-08]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-thermochemical-water-splitting>
- [50] BARTEN, Henk. International Energy Agency. *Electricity/heat in world in*. 2005.
- [51] LIU, Ke, Chunshan SONG a Velu SUBRAMANI. *Hydrogen and syngas production and purification technologies* [online]. Hoboken, N.J.; [New York: Wiley ; AIChE, 2010 [vid. 2021-08-09]. ISBN 9780470561256. Dostupné z: http://www.123library.org/book_details/?id=22465
- [52] GARDNER, Dale. Hydrogen production from renewables. *Renewable Energy Focus* [online]. 2009 [vid. 2021-08-08]. Dostupné z: <http://www.renewableenergyfocus.com/view/3157/hydrogen-production-from-renewables/>
- [53] ERBACH, Gregor a Liselotte JENSEN. *EU hydrogen policy, Hydrogen as an energy carrier for a climate-neutral economy* [online]. B.m.: European Parliamentary Research Service. 2021. Dostupné z: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2021/689332/EPRS_BRI\(2021\)689332_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2021/689332/EPRS_BRI(2021)689332_EN.pdf)

- [54] HEMIGHAUS, Greg, Tracy BOVAL, Carol BOSLEY, Roger ORGAN, John LIND, Rosanne BROUETTE, Toni THOMPSON, Joanna LYNCH a Jacqueline JONES. *Alternative Jet Fuels* [online]. B.m.: Chevron Corporation. 2006. Dostupné z: <https://www.chevron.com/-/media/chevron/operations/documents/chevron-alternative-jet-fuels.pdf>
- [55] NAŠE STROMY. Objemová hmotnost dřeva. *Naše stromy* [online]. 2021 [vid. 2021-08-08]. Dostupné z: <http://www.nasestromy.cz/objemova-hmotnost-dreva/>
- [56] FLACH, Bob, Sabine LIEBERZ a Sophie BOLLA. EU Biofuels Annual 2019. *etipbioenergy* [online]. [vid. 2021-08-08]. Dostupné z: <https://www.etipbioenergy.eu/databases/reports/429-eu-biofuels-annual-2019>
- [57] ČEZ, A. S. Slunce. *Skupina ČEZ - O Společnosti* [online]. 2021 [vid. 2021-08-08]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/obnovitelné-zdroje/slunce>
- [58] MATAJS, Vladimír. Jak velkou fotovoltaickou elektrárnu potřebujete? *Solární Experti* [online]. 2020 [vid. 2021-08-08]. Dostupné z: <https://www.solarniexpert.cz/kolik-solarnich-panelu-na-strechu-potrebujete/>
- [59] EVROPSKÁ UNIE. Rozloha EU ve srovnání se zbytkem světa. *Oficiální internetové stránky Evropské unie* [online]. 16. červen 2016 [vid. 2021-08-08]. Dostupné z: https://europa.eu/european-union/sites/default/files/docs/body/surface_area_world_cs.pdf
- [60] OVERTON, Jeff. The Growth in Greenhouse Gas Emissions from Commercial Aviation. *EESI* [online]. 2019 [vid. 2021-08-08]. Dostupné z: <https://www.eesi.org/papers/view/fact-sheet-the-growth-in-greenhouse-gas-emissions-from-commercial-aviation>
- [61] EUROSTAT. Wood products - production and trade. *eurostat statistics explained* [online]. 2020 [vid. 2021-08-08]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Wood_products_-_production_and_trade
- [62] EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. Use of renewable energy for transport in Europe. *European Environment Agency* [online]. 2021 [vid. 2021-08-08]. Dostupné z: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/use-of-cleaner-and-alternative-fuels-2/assessment?fbclid=IwAR0uj52OXYuHMag1fzwoBDVXjY92BuYi-IWlkekSj5Jb7d2Nvqt6b15cSBU>