

Syntetická paliva

Michal Scheichenost

Bakalářská práce
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav inženýrství ochrany životního prostředí

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Michal Scheichenost
Osobní číslo:	T22246
Studijní program:	B0711A130009 Materiály a technologie
Specializace:	Ochrana životního prostředí
Forma studia:	Kombinovaná
Téma práce:	Syntetická paliva

Zásady pro vypracování

- Prostudovat literaturu k danému tématu
- Popsat možné technologie a jejich aktuální stav
- Diskutovat pozitiva a negativa
- Výsledky přehledně sepsat do formy bakalářské práce

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Stone, M. L., Webber, M. S., Mounfield, W. P., Bell, D. C., Christensen, E., Morais, A. R. C., Li, Y., Anderson, E. M., Heyne, J. S., Beckham, G. T.,; Román-Leshkov, Y. (2022). Continuous hydrodeoxygenation of lignin to jet-range aromatic hydrocarbons. *Joule*. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.08.005>
2. Ram, V.; Salkuti, S.R. An Overview of Major Synthetic Fuels. *Energies* 2023, 16, 2834. <https://doi.org/10.3390/en16062834>
3. Rosenfeld, D. C., Lindorfer, J.; Fazení-Fraisl, K. (2019). Comparison of advanced fuels—Which technology can win from the life cycle perspective? *Journal of Cleaner Production* 238 117879. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.117879>

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Mgr. Marek Koutný, Ph.D.**
Ústav inženýrství ochrany životního prostředí

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2025**
Termín odevzdání bakalářské práce: **16. května 2025**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

doc. Ing. Jaroslav Filip, Ph.D.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 17. února 2025

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení bakalářské práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – bakalářskou práci – nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá; neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji, že

- jsem na bakalářské práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne

.....
podpis autora

ABSTRAKT

Cílem práce je shrnout a popsat aktuální stav syntetických paliv ve vztahu k životnímu prostředí, především způsob jejich výroby a vlastnosti. Za syntetická paliva lze považovat chemicky syntetizované úschovny energie pocházející z obnovitelných zdrojů. Hlavním zdrojem těchto paliv může být biomasa nebo obnovitelná elektrická energie využitá k jejich výrobě. Smyslem syntetických paliv má být nahrazení dosavadně celosvětově užívaných fosilních paliv, čímž lze docílit uhlíkové neutrality nebo se jí alespoň přiblížit. Klimatická změna planety Země je v současnosti důležitým tématem a znečišťování ovzduší skleníkovými plyny, mezi něž řadíme i oxid uhličitý produkovaný ve velké míře spalováním fosilních paliv, je jedním z jeho hlavních příčin. Do budoucna se nelze spoléhat pouze na jedno palivo, ale je třeba zkoumat i jiné možnosti, které budou vyplňovat vzájemné nedostatky. Každá syntetická alternativa paliva má své unikátní vlastnosti vhodné pro konkrétní využití.

Syntetická paliva, skleníkové plyny, klimatická změna, biopaliva, e-paliva, paliva budoucnosti, uhlíkově neutrální zdroje, dekarbonizace.

ABSTRACT

The aim of this thesis is to summarize and describe the current state of synthetic fuels in relation to the environment, especially their production methods and properties. Synthetic fuels can be considered chemically synthesized energy stores derived from renewable sources. The main source for these fuels can be biomass or renewable electrical energy used for their production. The purpose of synthetic fuels is to replace fossil fuels currently used worldwide, thereby achieving carbon neutrality or at least approaching it. Climate change is currently an important issue, and air pollution by greenhouse gases, including carbon dioxide produced in large quantities by the combustion of fossil fuels, is one of its main causes. In the future, we cannot rely on a single fuel, but must explore other options that will complement each other's shortcomings. Each synthetic fuel alternative has unique properties suitable for specific applications.

Synthetic fuels, greenhouse gases, climate change, biofuels, e-fuels, fuels of the future, carbon neutral sources, decarbonisation.

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce prof. Mgr. Marku Koutnému, Ph.D. za všestrannou pomoc, množství cenných a inspirativních podnětů, doporučení, připomínek a zároveň za velkou ochotu při konzultacích ke zpracování této práce. Mé díky patří také mé rodině, především manželce PharmDr. Romaně Scheichenostové, za dlouholetou trpělivost, kterou se mnou měla, a za velkou podporu.

OBSAH

ÚVOD.....	11
1 SYNTETICKÁ PALIVA A JEJICH DĚLENÍ.....	12
1.1 BIOPALIVA	14
1.1.1 Bionafta	15
1.1.2 Hydrogenovaný rostlinný olej (HVO)	16
1.1.3 Bio-methanol a bio-ethanol.....	17
1.2 VODÍKOVÁ PALIVA.....	19
1.2.1 Vodík.....	21
1.2.2 E-methanol	23
1.2.3 Dimethylether (DME)	24
1.3 PALIVA Z OBNOVITELNÉ ELEKTRINY (PTL)	25
1.3.1 Syntetická nafta (syntetický diesel)	26
1.3.2 PtL-petrolej	26
1.3.3 Amoniak.....	27
2 TECHNOLOGIE A START-UPY.....	30
2.1 EKOLOGICKÁ VÝROBA DME.....	30
2.2 LIGNIN PRO LETECKÉ PALIVO	33
2.3 JUPITER IONICS.....	35
2.4 TERRAFORM INDUSTRIES	37
2.5 NANO ADVANCED	39
2.6 SYNHELION	40
2.7 PALIVA Z PLASTU	41
2.8 BIO-LPG	42
3 SOUČASNÝ STAV DEKARBONIZACE DOPRAVY.....	44
3.1 LETECKÁ DOPRAVA	44
3.2 LODNÍ DOPRAVA	44
3.3 NÁKLADNÍ DOPRAVA	45
ZÁVĚR	47
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	49
SEZNAM OBRÁZKŮ	55
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	56

ÚVOD

Již od minulého století se neustále setkáváme se zprávami a studiemi dávajícími lidstvu za vinu znečišťování životního prostředí, ovzduší a klimatickou změnu vedoucí k tání ledovců, změnám počasí a nadměrnému ohřívání planety Země. Nedílnou součástí a příčinou těchto problémů jsou skleníkové plyny. Mimo běžné přírodní a lidstvem neovlivnitelné skleníkové plyny, svou průmyslovou a hospodářskou činností neustále vypouštíme další skleníkové plyny do atmosféry, především oxid uhličitý, což výrazně ke zhoršení klimatické situace přispívá.

Podstatným původcem tohoto znečištění jsou energetické a průmyslové nároky čerpající převážně z neobnovitelných fosilních zdrojů. Ropa, zemní plyn, uhlí, a další fosilní zdroje využíváme k pohonu industriálních továren, výrobě tepla, ale i paliv pro osobní a nákladní dopravní prostředky. Právě z těchto důvodů se zdá být nezbytné hledat zdroje jiné, které pomohou k dosažení rovnováhy a dekarbonizace lidské činnosti, čímž klimatické změně i jiným dalším environmentálním problémům budeme moci v budoucnu čelit.

Benzín, motorová nafta (diesel), letecký petrolej, zemní plyn a další je nezbytné plně nahradit nebo alespoň kompenzovat energiemi z uhlíkově neutrálních a obnovitelných zdrojů. Protože jsme se již naučili získávat elektrickou energii i z obnovitelných zdrojů, máme příležitost začít ji využívat k výrobě dalších ekologických energií, obdobným aktuálně využívaným fosilním palivům. O dosavadních ekologických náhražkách, jejich zdrojích, výrobě, vlastnostech a budoucnosti pojednává tato práce.

1 SYNTETICKÁ PALIVA A JEJICH DĚLENÍ

Zatímco elektrifikace zůstává hlavní strategií dekarbonizace, nerovnoměrná dostupnost půdy, přírodních zdrojů a financí v jednotlivých zemích představuje zásadní výzvu pro výrobu a distribuci potřebné obnovitelné energie. Tyto problémy dále umocňují geopolitické a environmentální komplikace spojené se skladováním energie, například technologie baterií, které jsou náročné na těžbu nerostných surovin klíčových pro podporu plně elektrické budoucnosti. Kromě toho existují odvětví jako je těžký průmysl (chemický, ocelářský, cementářský), námořní doprava a letectví, která jsou méně vhodná pro elektrifikaci z důvodu vysokých nákladů a nároků na energetickou hustotu média, v němž je energie uložena. Tyto okolnosti odrazují od komplexního přepracování současných energetických systémů výhradně použitím přímé elektrické energie z obnovitelných zdrojů v krátko a střednědobém časovém horizontu. Z tohoto důvodu lze považovat za velmi důležité mít přenosný bezemisní energetický nosič, který doplní nerovnoměrnost obnovitelné energie a bude podporovat dekarbonizaci v těžce přizpůsobitelných odvětvích [4].

Syntetická paliva, někdy nazývána e-paliva, jsou chemicky syntetizovaná paliva, jejichž účelem je napodobit chemické a fyzikální vlastnosti fosilních paliv. Standardně jsou tato paliva vyrobena z obnovitelných nebo nefosilních zdrojů jako je biomasa, voda, oxid uhličitý, a to skrze chemické procesy přeměňující tyto zdroje v paliva. Tímto způsobem mohou být fosilní paliva nahrazena v mnoha sférách, např. v dopravě, při výrobě tepla nebo elektrické energie. Takto mohou syntetická paliva snižovat emise skleníkových plynů, jelikož jejich zdrojem mohou být skleníkově-neutrální zdroje, jako je biomasa nebo oxid uhličitý získaný z atmosféry. Atmosférický oxid uhličitý se touto cestou stává surovým zdrojem uhlíku pro výrobu benzínu, nafty, zemního plynu a kompenzuje tak oxid uhličitý vznikající při spalování těchto paliv, na rozdíl od fosilních paliv, která oxid uhličitý do atmosféry pouze uvolňují. V dopravě jsou syntetická paliva stabilnějším a spolehlivějším zdrojem, jelikož elektrické baterie, které rovněž nabízí čistý a účinný zdroj energie, jsou závislé na dostupnosti elektřiny ze sítě, která může být snadno narušena výpadky nebo anomáliemi, kdežto syntetická paliva se skladují a převážejí obdobně jako paliva fosilní. Jednou z dalších klíčových výhod spalovacích motorů využívajících syntetická paliva je možnost nadále využívat stávající síť čerpacích stanic [1].

Vzhledem k tomu, že poptávka po obnovitelných a udržitelných zdrojích energie se stále zvyšuje, budou syntetická paliva pravděpodobně hrát důležitou roli v globální energetice. Přesto je stále zapotřebí vynaložit velké úsilí, než bude možné syntetická paliva vyrábět ve velkém měřítku, protože jejich výroba je v tuto chvíli velmi nákladná. Další alternativou fosilních paliv jsou motory využívající čistě elektrickou energii. Elektromotory nicméně potřebují dostatečně velký zdroj elektrické energie pro překonávání vzdáleností i způsob uchování této energie. Nejčastěji se pro tento účel v současnosti využívají baterie, které prozatím nejsou vhodné pro leteckou a lodní dopravu. Přestože elektromobilita nabízí vyšší účinnost a potenciál stát se v nadcházejících letech levnější, výzkum syntetických paliv je důležitý pro jejich dostupnost a srovnatelnou účinnost s palivy fosilními. Budoucí energetický mix by tak měl zahrnovat vícero alternativních paliv, každé užit tam, kde se nejlépe hodí. Budoucnost alternativních paliv velmi závisí na vývoji a zavádění nových technologií, stejně tak jako na politických rozhodnutích, která tomuto nezbytnému snižování skleníkových plynů mohou přikládat vyšší či nižší váhu [1].

Rozdělení syntetických paliv do vzájemně vylučujících se skupin je komplikované a závisí na mnoha různých faktorech, jako je výrobní proces, výchozí surovina, použití, udržitelnost, chemické složení. V této práci proto budou syntetická paliva rozdělena do skupin podle jejich vstupní suroviny, neboť tento systém se zdá být nejsrozumitelnější [1].

- **Biopaliva:** Syntetická paliva vyráběna z biologických materiálů, jako jsou rostlinné oleje, živočišné tuky, nebo odpadní produkty. Příkladem biopaliv je bionafta, bioethanol a bioplyn. [1].

- **Vodíková paliva:** Syntetická paliva vyráběná reakcí vodíku s dalšími molekulami, obvykle oxidem uhličitým. Stěžejní vstupní surovinou vodíkových paliv je vždy vodík. V této skupině lze zahrnout paliva jako je methanol, DME, syntetický plyn nebo čistý vodík (bez příměsí) [1].

- **Paliva z obnovitelné elektřiny (Power to Liquid, PtL):** Syntetická paliva vyráběna využitím elektřiny z obnovitelných zdrojů k přeměně vody a oxidu uhličitého na kapalinu. Mezi PtL paliva lze zařadit syntetický benzín, syntetickou naftu, syntetickou motorovou naftu a syntetické letecké palivo. Protože výchozí surovinou těchto paliv může

být vodík vyrobený hydrolyzou vody za využití obnovitelné elektřiny, mohou se překrývat s vodíkovými palivy [1].

1.1 Biopaliva

Biopaliva jsou syntetická paliva vyráběná z rostlinných olejů, živočišných tuků a další dostupné biomasy, kterou může být i rostlinný a živočišný odpad. Surovinou pro výrobu paliv je tak rozkládající se rostlinný či živočišný materiál produkující plyn. Na rozdíl od fosilních paliv jsou biopaliva obnovitelným zdrojem energie, jelikož jejich surovinu lze pěstovat a vyrábět opakovaně. Protože jsou biopaliva vyráběna převážně z rostlinných materiálů, nezvyšuje se jejich spalováním hladina oxidu uhličitého v atmosféře, což je v tomto případě cesta uhlíkové neutrality. Zároveň jejich podobnost s fosilními palivy umožňuje využití jako alternativní palivo v odvětvích, kde se v současnosti fosilní paliva používají, např. spalovací motory [1].

V závislosti na typu použité vstupní suroviny se biopaliva dělí do čtyř kategorií, tzv. generací. Biopaliva první generace se vyrábějí ze speciálních kultur (např. sóji, palmy, řepky), které dodávají olej, cukr nebo škrob. Většina těchto paliv je již komerčně využívána. Druhá generace je získávána z lignocelulózy (např. slámy, lesních zbytků) nebo z odpadu, jako je použitý kuchyňský olej nebo živočišný tuk. Třetí generace biopaliv se zpracovává z mikrořas pěstovaných ve speciálních zařízeních [30].

Čtvrtá a nejnovější generace se vyrábí pomocí pokročilých biochemických procesů v sofistikovaných laboratořích, nicméně v tuto chvíli je spíše experimentální a komerční využití je v tuto chvíli pouze věcí budoucnosti [1].

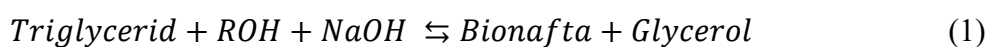
Mezi významná biopaliva patří bionafta, hydrogenovaný rostlinný olej (hydrotreated vegetable oil, HVO), bioethanol, biomethanol, bioplyn, biovodík, bio ethylterc-butyléter (ETBE) a bio methyl terc butyléter (MTBE). Výhodami těchto paliv jsou biologická rozložitelnost, nízká toxicita, bezpečnost, vysoká účinnost spalování, vysoké cetanové číslo, nižší emise a obnovitelnost. Naproti tomu nevýhodami mohou být nízká výhřevnost, emise oxidů dusíku, špatná skladovatelnost, opotřebení motoru [1].

Biopaliva mohou být používána jak v čisté formě, tak i míchána s fosilními palivy. Názvosloví směsí bionafty se označuje jako Bxx, kde „xx“ představuje procentuální podíl biopaliva ve směsi. Například B20 značí směs 20 % biopaliva a 80 % fosilního paliva, kterou lze používat ve stávajících spalovacích motorech bez jakýchkoli konstrukčních

změn. Od roku 2022 je největším producentem biopaliv Evropská unie. V následujících podkapitolách jsou podrobněji rozebrána běžně vyráběná biopaliva [1].

1.1.1 Bionafta

FAME (fatty acid methyl ester) bionafta se sestává z alkylesterů mastných kyselin a je považována za nízkouhlíkovou alternativu fosilní nafty, zejména v odvětví dopravy. Bionaftu lze vyrábět čtyřmi hlavními způsoby: směsí olejů, mikroemulzí, pyrolýzou a transesterifikací. Transesterifikace je vzhledem ke kvalitě vyráběného paliva nejpreferovanější. Obecnou reakci transesterifikace znázorňuje následující rovnice [1]:



Transesterifikace je chemický proces, při kterém se lipidy, například rostlinné a živočišné tuky, přeměňují na alkylestery mastných kyselin. Reakcí esterifikace dochází k interakci alkoholu a FAA (alkyl mastné kyseliny) za vzniku FAAE (alkylester mastné kyseliny) a vody. K tomu, aby se získal jeden mol glycerolu a tři moly FAAE (bionafty), je zapotřebí jeden mol triglyceridu a tři moly alkoholu. Transesterifikace, známá také jako alkoholýza, je srovnatelná s hydrolýzou, ale používá alkohol jako náhradu vody. Transesterifikaci považujeme za optimální volbu díky své jednoduchosti a nákladové efektivitě ve srovnání s jinými metodami. Reakce probíhá ve třech krocích, triglyceridy se nejprve přemění na diglyceridy, které dále měníme na monoglyceridy a nakonec na glycerol. V každé fázi vzniká z každého glyceridu jedna molekula methylesteru. Nakonec bionafta plave na povrchu a může být odčerpána, glycerol klesá ke dnu. Glycerol je cenný vedlejší produkt, který lze použít jako výchozí složku v jiných průmyslových odvětvích [24].

Výroba bionafty je poměrně jednoduchý a přímočarý proces, který lze provádět v malém i velkém měřítku za použití různých vstupních surovin. Bionafta představuje širokospektrální univerzální palivo nabízející snížení emisí skleníkových plynů, a tudíž i lepší kvalitu ovzduší. Naproti tomu jejímu širokému komerčnímu rozšíření brání vysoká cena vstupních surovin [1].

Jednou z hlavních výhod bionafty je její kompatibilita se stávajícími vznětovými motory, která umožňuje přímé použití nebo mísení s ropnou naftou bez větších úprav infrastruktury a motoru. Kromě toho dochází při spalovacím procesu bionafty ke snížení množství uvolňovaných pevných částic, oxidu uhelnatého, oxidu dusíku a oxidu siřičitého. Obecně bionafta vykazuje slušné olejové vlastnosti, jako vyšší cetanové číslo,

vyšší účinnost spalování a minimální emise. To z ní činí atraktivní možnost pro snížení uhlíkové stopy v odvětvích, jako doprava a průmysl. Kromě toho biologická odbouratelnost bionafty a její nízká toxicita zvyšují ekologickou udržitelnost. Výroba bionafty navíc přispívá k diverzifikaci zdrojů energie a může podporovat venkovské hospodářství tím, že poskytuje využití vedlejších zemědělských produktů a odpadních materiálů. Podíl bionafty míchaný v palivech přesto není příliš vysoký a k její výrobě je nutné rozsáhlé množství půdy [27].

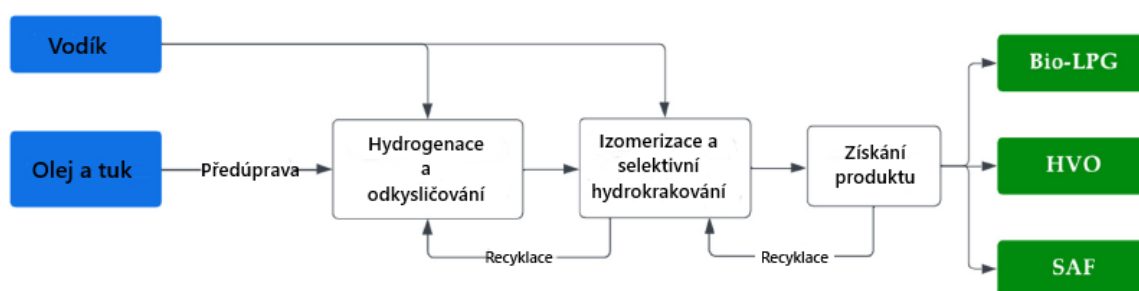
1.1.2 Hydrogenovaný rostlinný olej (HVO)

HVO, nebo také hydro-zpracované estery a mastné kyseliny nebo obnovitelná či zelená nafta, vzniká hydrogenací a hydrokrakováním, což je katalytické štěpení uhlovodíků za přítomnosti vodíku. Při nich se rostlinné oleje přeměňují na řetězce n-parafinů v rozmezí C₁₅-C₂₀. Tyto procesy odstraňují kyslík z molekul oleje a produkují kapalné uhlovodíky, propan, CO₂, CO a vodu v různých poměrech [34].

HVO se vyrábí z rostlinných olejů, odpadního kuchyňského oleje, lignocelulózového materiálu, lipidů z řas a zbytkových tuků pocházejících z potravinářského průmyslu, zpracování ryb a jatek. HVO lze míchat s naftou a používat ve vznětových motorech bez větších úprav, což umožňuje přímé snížení emisí CO₂ u stávajících i nových vozidel. HVO má vyšší výhřevnost (43,86 MJ/kg) ve srovnání s naftou (42,60 MJ/kg). To znamená, že hmotnostní spotřeba paliva při spalování HVO je nižší než při spalování motorové nafty [28].

HVO má také vysoké cetanové číslo a neobsahuje síru, kyslík a aromatické uhlovodíky. Její chemické vlastnosti jsou srovnatelné s fosilní naftou, ale oproti ní má nižší hustotu a energetický obsah. S ohledem na cetanové číslo a další vlastnosti kapaliny se rovněž vyrovná syntetické naftě. K její výrobě je však oproti syntetické a bionaftě potřebný vyšší kapitál. V současnosti se stává druhou nejrozšířenější alternativou obnovitelné nafty a mísí se s fosilní naftou, která je nabízená na čerpacích stanicích. Schéma výroby HVO je znázorněno na následujícím obrázku. Obecná reakce pro výrobu HVO je znázorněna v rovnici [1]:



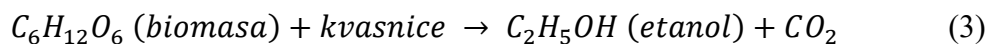


Obrázek 1: Proces výroby HVO [1].

Výroba HVO je složitý vícestupňový proces, který vyžaduje specializované vybavení a odborné znalosti. V procesu uvedeném rovnici se mastné kyseliny v rostlinném oleji nebo živočišném tuku nejprve přemění na parafin, olefiny a naften pomocí řady chemických reakcí, po nichž následuje spojení těchto chemických látek za vzniku paliva HVO [1].

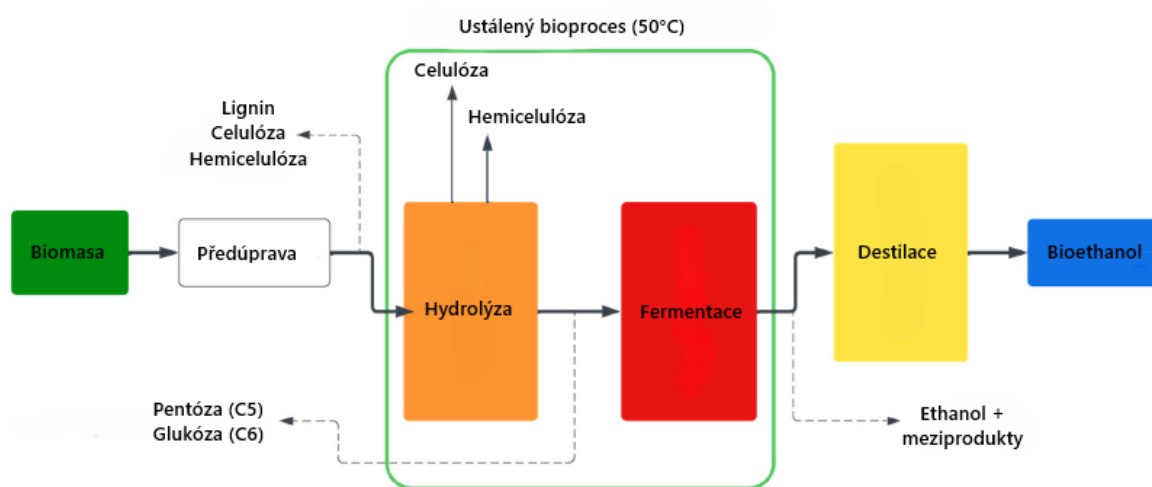
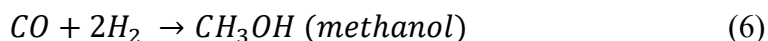
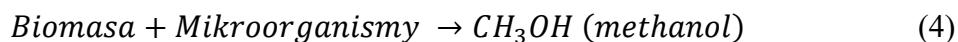
1.1.3 Bio-methanol a bio-ethanol

Bioethanol je druh paliva vyráběný fermentováním biomasy, jako je například kukuřice a cukrová třtina, s kvasinkami. Vzniklou kapalinu lze míchat s benzínem a vytvořit tak palivo, které lze využít v běžných benzínových motorech. Palivo E10 značí směs bioethanolu (10 %) a benzínu (90 %) běžně používané v čerpacích stanicích. Oproti běžnému benzínu bioethanol přispívá ke snížení emisí skleníkových plynů, a tak i zlepšení kvality ovzduší. Z chemického hlediska mezi ethanolem a bioethanolem není žádný rozdíl. Výroba bioethanolu zahrnuje několik kroků, počínaje sklizní biomasy, mletí, smíchání s vodou a kvasnicemi, čímž vznikne kaše, která následně fermentuje. Obvykle se k fermentaci používá druh kvasinek *Saccharomyces cerevisiae*, které mění sacharidy v biomase na alkohol. Alkohol se posléze oddělí od celku a vyčistí [1].



Výroba bio-methanolu je obdobná výrobě bioethanolu, tudíž fermentací biomasy jako dřevo nebo zemědělský odpad, pomocí mikroorganismů schopných produkovat methanol. Hlavní rozdíl oproti výrobě bioethanolu spočívá v typu mikroorganismů. Methanol se ve světě běžně vyrábí i katalytickou přeměnou syntetického plynu, což je směs oxidu uhelnatého a vodíku, která vzniká zplyňováním biomasy. Vzhledem k tomu, že většina metod výroby methanolu/ethanolu zahrnuje využití biomasy, pevného odpadu a technologií zachycování uhlíku, je výroba bioethanolu a biomethanolu dlouhodobě udržitelná. Obecná

rovnice pro výrobu biomethanolu z biomasy a reakce pro výrobu methanolu ze syntetického plynu je znázorněna v následujících rovnicích [1]:



Obrázek 2: Proces výroby bioethanolu [1].

Srovnání nejpodstatnějších výhod/nevýhod methanolu a ethanolu:

- Methanol reaguje s vodní parou při nižších teplotách a díky přítomnosti pouze jednoho atomu uhlíku je jeho proces výroby jednodušší [1].
- Methanol je produkčně levnější [1].
- Methanol je vhodnější pro výrobu dalších syntetických paliv, jako je bionafta procesem transesterifikace [1].
- Ethanol na rozdíl od methanolu není tak toxický [1].
- Ethanol má ve srovnání s methanolem v příměsi s benzínem lepší spalovací vlastnosti a nižší korozivní účinek [1].
- Ethanol uchovává více energie [1].

- Jak ethanol, tak i methanol jsou vhodným palivem lihových palivových článků. V závislosti na parametrech jako jsou teplota či použité katalyzátory, se pak navzájem liší [1].

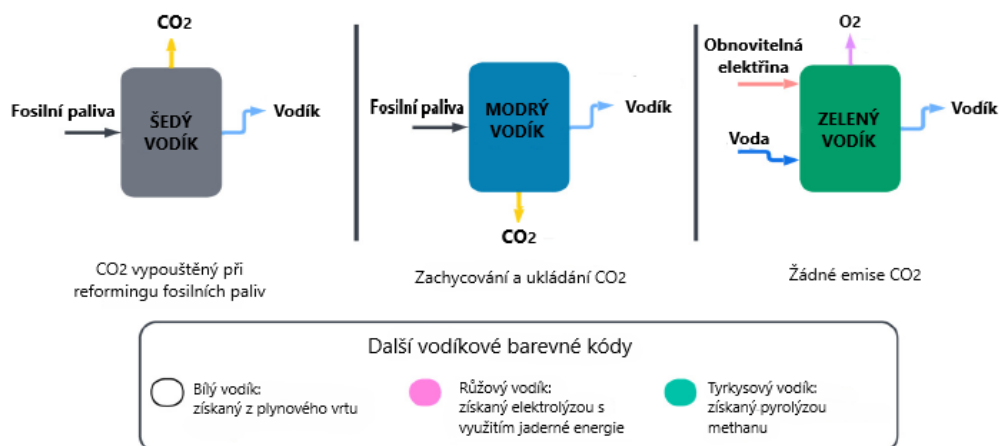
Přestože riziko investic do výzkumu a vývoje, dostupnost surovin a chybějící infrastruktura brzdí rozšíření používání těchto paliv po celém světě, země s nízkými náklady na elektřinu, jako je Island, dosahují výroby methanolu v měřítku konkurenceschopném benzínu. Paliva na bázi methanolu jsou slibnou alternativou k současným benzínovým palivům [1].

1.2 Vodíková paliva

Dostupnost a ekologicky příznivé vedlejší produkty vodíku z něj činí jeden z nejatraktivnějších kandidátů na obnovitelné palivo. Na rozdíl od fosilních paliv, která při spalování emitují nebezpečné a znečišťující látky jako oxid uhličitý, vodík uvolňuje pouze vodní páru. Je tedy ideální volbou pro snížení emisí skleníkových plynů a zlepšení kvality ovzduší. Další výhodou vodíku je jeho přizpůsobivost, díky níž může být používán jako palivo pro mnoho různých účelů včetně výroby elektřiny v elektrárnách, pohonu vozidel a průmyslové výrobě. K výrobě vodíku lze navíc využít řadu zdrojů, včetně obnovitelných energií. Výsledkem je skutečně udržitelná energetická alternativa, která dokáže uspokojit rostoucí energetickou poptávku a zároveň snížit závislost na fosilních palivech [9].

Navzdory svým četným výhodám je třeba překonat ještě řadu překážek, než bude možné plně využít potenciál vodíku jako čistého paliva. Jednou z hlavních nevýhod představuje jeho vysoká hořlavost a cena výroby a skladování. V současné době bývá vodík nejčastěji vyráběn přeměnou methanu, což je proces spotřebovávající velké množství energie a jako vedlejší produkt produkuje oxid uhličitý. Existují však moderní metody, které umožňují vyrábět vodík efektivněji a udržitelněji, včetně elektrolýzy a biologických metod. Další překážkou bude nedostatečná infrastruktura pro doplňování vodíku. Navzdory rozšiřování existuje stále málo vodíkových čerpacích stanic. Z tohoto důvodu je poptávka po vodíkovém palivu nižší a vodíkové automobily se příliš nepoužívají [9].

Vodík se v závislosti na způsobu výroby řadí do barevných kategorií. Pro obnovitelnost pak největší smysl dává zelený vodík, který je vyráběn elektrolýzou vody za využití obnovitelné elektřiny. Barevné kategorie znázorňuje následující obrázek [1].



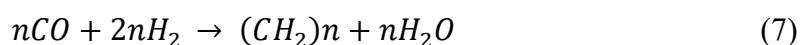
Obrázek 3: Zobrazení barevných druhů vodíku [1].

Za účelem skladování vodíku v současnosti převládá jeho stlačování, zkapalnění a chemické navázání. Skladování stlačeného vodíku je široce využíváno díky své jednoduchosti a relativně nízkým nákladům. Vodík se obvykle skladuje při tlaku mezi 350 a 700 barů ve speciálních lahvích vyrobených z oceli nebo hliníku. Skladování pod vysokým tlakem však způsobuje mechanické namáhání, které zvyšuje riziko únavy materiálu a jeho selhání v průběhu času. Je proto nezbytné volit materiály s vysokou trvanlivostí a odolností. Kryogenní skladování spočívá v ochlazení vodíku pod $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ za účelem skladování v kapalně formě, čímž se výrazně zvyšuje energetická hustota. Kryogenní nádrže jsou však nákladné a vyžadují speciální izolaci, aby se snížily tepelné ztráty a zabránilo se odpařování. Chemické skladování využívá materiály jako hydridy kovů a sorbenty k zachycování a následnému uvolňování vodíku. Tyto materiály poskytují vyšší objemovou skladovací hustotu než stlačený nebo kapalný vodík, což je činí slibnými pro stacionární a mobilní použití. Hydridy kovů, včetně sloučenin na bázi hořčíku a lithia, účinně skladují vodík při mírných teplotách a tlacích. Nevýhodou jsou ale jejich vysoké náklady a pomalé uvolnění vodíku zpět [9].

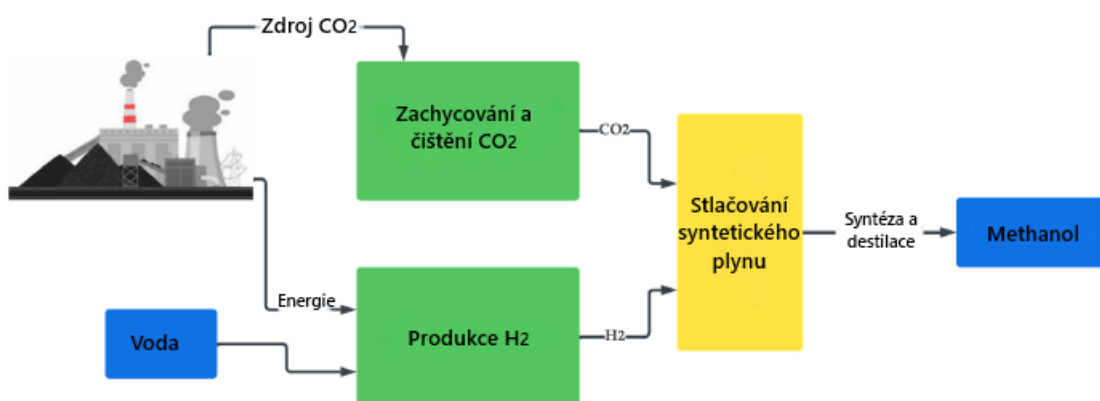
Klíčovým bodem se stává proces přepravy vodíku z místa výroby na místo využití. Mezi běžné způsoby přepravy patří potrubí, kryogenní nádrže a tlakové kontejnery. Vzhledem k tomu, že vodík je vysoce hořlavý, nelze jej přepravovat jako jiná plynná paliva. Ke skladování a přepravě jsou zapotřebí speciální a nákladné technologie. V současné fázi potřebujeme řešit zejména standardizaci, bezpečnost, cenovou konkurenceschopnost, informovanost a přijetí veřejností a podpůrné politiky vodíku [9].

Vodík (H_2) je zásadní pro vývoj syntetických paliv. Zelený H_2 lze skladovat v CO_2 neutrálních syntetických kapalných palivech a bude výhodný pro dekarbonizaci dopravního sektoru, protože je vyráběn z obnovitelných zdrojů. Molekulární H_2 slouží jako zdroj protonů a redukčních ekvivalentů v různých chemických procesech, jako je Haber-Boschův proces a Fischer-Tropschova syntéza [10].

Fischer-Tropschova syntéza (FT/FTS) je katalytická reakce pro syntetickou výrobu uhlovodíkových paliv a chemikálií ze syntetického plynu a obvykle se provádí na katalyzátorech na bázi železa nebo kobaltu. Obecnou reakci této syntézy znázorňuje následující rovnice [10].



Haber-Boschův (HB) proces zahrnuje vstřikování H_2 do dusíku za vzniku amoniaku. Tato reakce probíhá za přítomnosti katalyzátorů na bázi železa při vysoké teplotě ($400\text{ }^{\circ}\text{C} - 500\text{ }^{\circ}\text{C}$) a tlaku ($100 - 450\text{ bar}$) za podmínek, kdy molární poměr H_2 k dusíku bývá mezi 2:1 a 3:1. Obecnou Haber-Bosch reakci znázorňuje následující rovnice [10].



Obrázek 4: Proces výroby syntetických paliv zachycováním CO_2 a produkcí H_2 [1].

1.2.1 Vodík

Vodík lze v dopravě použít k výrobě syntetických paliv (e-paliv) nebo jej přímo spotřebovat. Jakmile je vodík vyroben, přepraven, skladován a distribuován, může být využit v palivovém článku nebo spalovacím motoru [3].

Palivové články PEM (proton výměnná membrána) využívají jako vstupní látky vodík a kyslík a jako výstupní látky vodu a elektřinu. Jednotlivé palivové články produkují malé napětí (0,5 – 1,0 V), proto jsou zapojeny do série a tvoří jeden celek. Článek je pak kombinován s pomocným zařízením (např. chladicím okruhem, vzduchovým kompresorem, měničem stejnosměrného proudu) a tvoří palivový systém; celý systém se však často označuje pouze jako palivový článek [3].

V silničních vozidlech mají PEM palivové články (včetně vodíku a zásobníku vodíku) energetickou hustotu přibližně 300 Wh/kg (oproti 200 Wh/kg u lithium-iontových baterií), což je výhodné pro aplikace s dlouhým dojezdem. Palivové články však poskytují výrazně nižší výkon než baterie, což vede mnoho výrobců vozidel na palivové články k tomu, že přidávají samostatné baterie pro dodatečný výkon. Stejně jako u baterií klesá účinnost PEM palivových článků v chladném počasí v důsledku pomalejších elektrochemických reakcí a elektrického ohřevu potřebného pro provoz palivového článku [3].

Vodík lze také spalovat ve spalovacích motorech, včetně pístových motorů používaných v silničních vozidlech, železničních soupravách, lodích a v leteckých motorech. Vzhledem k tomu, že vlastnosti vodíku se liší od vlastností uhlovodíkových paliv (např. vyšší rychlost hoření, širší mezní hodnoty hořlavosti, vyšší reaktivita a difuzivita), je nutné motory konstruovat speciálně pro spalování vodíku. Naopak e-paliva odvozená od vodíku by mohla být náhradou, která by nevyžadovala žádné nebo jen minimální změny stávajících motorů [3].

Ve srovnání s palivovými články mohou mít spalovací motory na vodík cenovou výhodu, protože nevyžadují vodík vysoké čistoty, což umožňuje snížit náklady na výrobu vodíku. Stejně jako palivové články na vodík mají i spalovací motory na vodík potenciál snížit emise skleníkových plynů, protože spalování vodíku vede k minimálním emisím CO₂ z výfuku. Na rozdíl od palivových článků však spalovací motory na vodík a e-paliva emitují oxidy dusíku, a proto vyžadují čištění výfukových plynů za účelem omezení emisí NO_x. V silniční dopravě jsou přesto spalovací motory na vodík méně účinné než palivové články. Přímé spalování vodíku v motorech může hrát roli v některých specializovaných aplikacích, nicméně ve většině silničních a železničních aplikací baterie a palivové články poskytují vyšší účinnost a efektivitu. [3].

1.2.2 E-methanol

Methanol byl popsán už v kapitole o biopalivech, protože jej lze poměrně snadno vyrábět z biomasy, která nabízí nízké náklady, ale vyžaduje značné množství půdy. Oproti tomu syntetický e-methanol lze vyrábět udržitelně zachycováním CO_2 ze vzduchu v kombinaci s vodíkem, například Fischer-Tropschovou syntézou za využití syntetického plynu [23].

Methanol, známý jako methylalkohol, je jedním z nejjednodušších alkoholů, který se při výrobě z CO_2 jeví jako čisté palivo. V současné době je primárním trhem pro methanol chemický průmysl, i když se vynakládá značné úsilí na jeho využití jako automobilového paliva. Při standardní pokojové teplotě a tlaku existuje methanol v kapalném stavu, což usnadňuje jeho manipulaci a distribuci. V současné době se vyrábí převážně katalytickou konverzí oxidu uhelnatého a vodíku ze zemního plynu nebo zplyňováním uhlí. Aby mohl být v budoucnu použit v dekarbonizovaném energetickém systému, musí se výrobní proces přesunout k čistším řešením, jako jsou syntetická e-paliva, která zahrnují technologie zachycování CO_2 a elektrolýzu vody. Pokud bude zajištěna udržitelná a nákladově efektivní výroba, neexistují žádné další technické překážky pro větší využití methanolu jako paliva, zejména v odvětví lodní dopravy [11].

Methanol se ve velkém množství přepravuje po celém světě, což podnítilo výzkum jeho využití jako paliva. Nádrže a spalovací motory lze snadno upravit a problém nepředstavuje ani zavedení čerpacích stanic. Hlavní nevýhodou jeho využití bývá toxicita a vysoký korozní potenciál, který je vyšší než u benzínu. Kromě toho je energetická hustota methanolu poloviční ve srovnání s konvenčními lodními palivy, což ho činí nevhodným pro dlouhé plavby. Nižší energetická hustota znamená nutnost opakovaného doplňování nebo instalaci dalších nádrží. Dosud byl methanol v příměsích používán ve stávajících spalovacích motorech, zatímco speciální motory na methanol se vyvíjejí pro menší plavidla a silniční vozy. Methanol lze také využít v palivových článcích, i když produkuje relativně nízké napětí a má nízkou účinnost přeměny. Methanol také zkoumáme jako potenciální nosič vodíku, protože je nejjednodušší formou e-paliv [11].

Výrobu methanolu zachycováním CO_2 a Fischer-Tropschovou syntézou ze syntetického plynu znázorňují následující rovnice [23]:



1.2.3 Dimethylether (DME)

Dimethylether je nejjednodušší ether široce používaný jako prekurzor pro syntézu široké škály organických chemikálií. V poslední době se začalo využívat jeho míchání s fosilními palivy jako zajímavá metoda pro zlepšení spalovacích vlastností v motoru. DME lze vyrábět ve dvoustupňovém procesu, při kterém se nejprve z methanu vyrobí methanol a ten se poté dehydratuje nebo obdobně v katalyzované jednostupňové syntéze. Udržitelné výroby by bylo možné dosáhnout, pokud by byl DME vyráběn za pomoci syntetického plynu a elektrolýzy vody. DME je netoxická a nekarcinogenní sloučenina, to z ní činí ideální náhradu fosilních paliv ve spalovacích motorech. Kromě toho látka hoří viditelným modrým plamenem a má sladkou vůni, což je důležitý bezpečnostní aspekt [11].

DME má nejvyšší výhřevnost z paliv odvozených od alkoholu (~29 MJ/kg) a cetanové číslo podobné dieselovému palivu (55–60), což z něj činí potenciální náhradu za motorový diesel. Hlavní výhody využití DME jako paliva jsou snížené emise NO_x, uhlovodíků, CO a úplná absence emisí sazí a SO_x. Hlavní nevýhodou pro širší použití oproti fosilním palivům je srovnatelně nižší výhřevnost, kvůli které bude nutná instalace větších zásobních nádrží. Kromě toho nižší viskozita způsobuje značné problémy se vstřikováním a úniky, což vyžaduje úpravy motoru [11].

Oxymethylen dimethylethery (OMEx) jsou slibná e-paliva umožňující výrazně snížit tvorbu sazí. Proces jejich výroby zahrnuje několik konverzních kroků, přičemž se běžně získávají z methanolu jako meziproductu. Ten lze, jak už bylo zmíněno, přímo vyrobit reakcí H₂ a CO₂, což odůvodňuje potenciál OMEx jako e-paliva. Nicméně pokud se vezme v úvahu potřeba elektrické energie a účinnost elektrolýzy, OMEx se stále řadí níže než ostatní e-paliva, jako je dimethylether a methanol. Kromě toho má OMEx nižší hodnotu výhřevnosti, což zvyšuje jeho objemovou spotřebu. Nízká hodnota výhřevnosti vyplývá z nízkého obsahu uhlíku a vodíku ve směsi, protože téměř polovinu molekuly tvoří kyslík. V některých případech se k překonání tohoto problému mísí s palivy s vysokým obsahem energie, jako je motorová nafta nebo e-paliva v různých procentech [29].

1.3 Paliva z obnovitelné elektřiny (PtL)

Hledání udržitelných alternativ k fosilním palivům vedlo k rostoucímu zájmu o kapalná paliva vyráběná prostřednictvím Fischer-Tropschovy syntézy (FT) a Haber-Boschovou metodou (HB). Procesy PtL (Power to liquid, tj. paliva z obnovitelné elektřiny) využívají k výrobě zdroje jako CO_2 nebo N_2 a vodík a vyžadují jako hlavní zdroj energie elektřinu. Tím se PtL paliva liší od ostatních syntetických paliv, kde je hlavním substrátem například biomasa, nebo jiný zdroj uhlovodíků. Integrace obnovitelných zdrojů energie jako je sluneční a větrná energie pro elektrolytickou výrobu vodíku navíc zvyšuje udržitelnost procesů PtL. Mezi PtL paliva patří [17]:

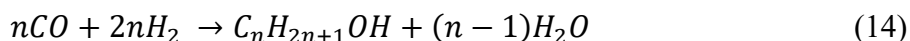
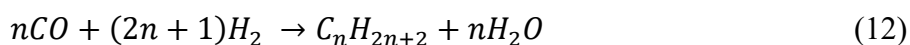
- Vodík: Ten je považován i za palivo PtL, protože může být vyráběn výhradně z obnovitelné elektřiny a vody jako vstupní suroviny [3].
- Methanol, ethanol a DME: Výroba těchto paliv je popsána v předchozích kapitolách. Pokud se vodík potřebný k jejich výrobě získává z čisté energie, považují se za paliva PtL.
- Syntetická nafta: PtL palivo, které lze použít v jakémkoli vznětovém motoru, a to pouze s malými nebo žádnými úpravami [12].
- PtL-petrolej: E-palivo vyráběné z obnovitelných zdrojů pro letecký průmysl [21].
- Amoniak: PtL palivo a nosič vodíku, které lze vyrobit zachycováním N_2 z atmosféry Haber-Boschovým procesem [4].

Jednou z hlavních výhod PtL paliv představuje schopnost uchovat a skladovat přebytečnou elektřinu z obnovitelných zdrojů pro pozdější využití. Tím lze vyrovnat výkyvy v elektrické síti a usnadnit začlenění obnovitelných zdrojů energie do energetického mixu. Rovněž mají potenciál snížit emise skleníkových plynů, protože při výrobě nebo používání neuvolňují žádný další oxid uhličitý. Paliva PtL jsou slibnou technologií, která by mohla pomoci snížit naši závislost na fosilních palivech a redukovat emise skleníkových plynů, zejména v odvětví dopravy [1].

1.3.1 Syntetická nafta (syntetický diesel)

Syntetický PtL diesel je obdoba konvenčního motorového dieselového paliva vyráběná Fischer-Tropschovou (FT) syntézou, jejíž hlavní vstupní surovinu představuje obnovitelná elektřina. Výroba tedy zahrnuje zachycování CO_2 z atmosféry a výrobu vodíku elektrolýzou vody, čímž získáme syntetický plyn, ze kterého lze následně mimo jiné vyrobit PtL diesel [17].

FT výrobu syntetické nafty znázorňují následující rovnice, kde n je číslo uhlíkového řetězce [35]:



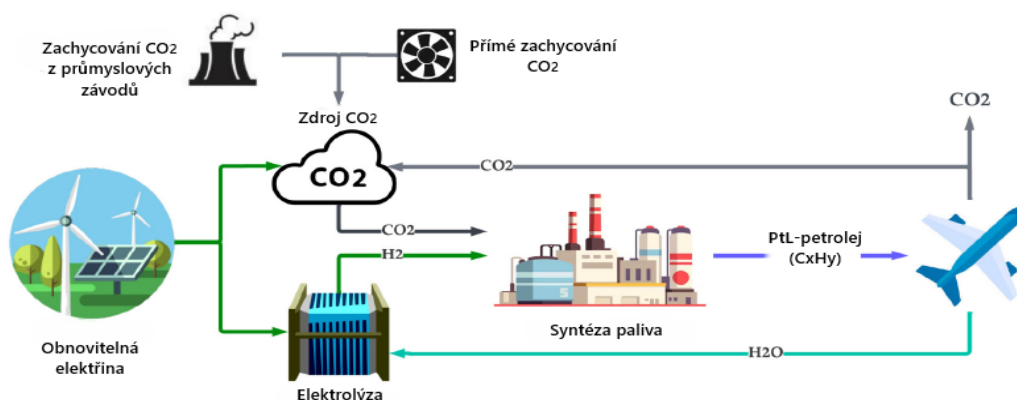
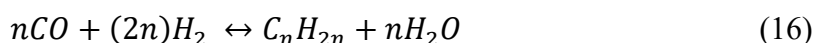
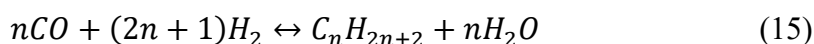
Ačkoli má syntetický FT diesel stále problémy jako jsou vysoké náklady, má také některé jedinečné výhody, jako je vysoká energetická hustota, kompatibilita se stávající infrastrukturou pro skladování a distribuci paliva a přizpůsobivost současným motorům [12].

V porovnání s konvenční ropnou naftou má syntetický diesel vyšší obsah alkanů s přímým řetězcem, nižší obsah síry a aromatických uhlovodíků, vyšší cetanové číslo, lepší hořlavost a může být mísitelný s konvenčním dieselem v jakémkoli poměru. Tyto vlastnosti činí z FT syntetické nafty slibné alternativní palivo pro vznětové motory. Použití FT syntetické nafty rovněž přispívá k optimalizaci spalovacích a emisních charakteristik motorů. Nižší emise sazí u syntetické nafty FT jsou způsobeny především nízkým obsahem aromatických látek, který brání tvorbě jejich prekurzorů. [12].

1.3.2 PtL-petrolej

PtL-petrolej je další syntetické palivo vyráběné Fischer-Tropschovým procesem. Tato výroba obvykle zahrnuje použití elektrolýzy k výrobě vodíku z vody, který se poté spojí s oxidem uhličitým za vzniku syntetického plynu a následně se Fischer-Tropschovou reakcí vyrobí PtL-petrolej. Hlavním cílem studií PtL petroleje je nalezení obnovitelného paliva pro leteckou dopravu [17].

Dvoustupňový výrobní proces spočívá ve výrobě syntetického plynu (CO , H_2) z CO_2 a H_2 , po které produkt reaguje tradiční Fischer-Tropschovou syntézou za vzniku kapalných uhlovodíků. Reakce může probíhat s katalyzátory na bázi Co nebo Fe. Jednokrokový proces naopak zahrnuje přímou přeměnu CO_2 a H_2 na uhlovodíky. Tato syntetická cesta se ukazuje jako složitější a vyžaduje katalyzátory umožňující jak přeměnu CO_2 na CO , tak i reakci FT. Pro tento účel se obecně používá katalyzátor na bázi Fe. FT reakci znázorňují následující rovnice, kde n je číslo uhlíkového řetězce [36]:



Obrázek 5: Použití a výroba PtL-petroleje [1].

Technicky je výroba PtL petroleje proveditelná, i když zatím nebyla komerčně realizována. Hlavním důvodem neexistence komerčně provozovaných velkých výrobních závodů je ekonomická nejistota navzdory zvládnutelným technickým rizikům. V současné době neexistuje žádný zavedený trh s PtL petrolejem, což ztěžuje dlouhodobé prognózy příjmů. Studie navíc uvádějí až desetkrát vyšší výrobní náklady než u petroleje z fosilních paliv a dvakrát až třikrát vyšší náklady než u petroleje z biomasy [21].

1.3.3 Amoniak

Zelený amoniak získává na popularitě jako nosič vodíku a obnovitelné palivo, lze jej uplatnit pro námořní paliva či výrobu a skladování energie, což jsou odvětví, která čelí významným výzvám v oblasti elektrifikace na své cestě k dekarbonizaci. Ačkoli by zelený vodík mohl také hrát klíčovou roli v dekarbonizaci těchto odvětví, mnoho regionů nemá kapitál ani zdroje na jeho výrobu ve velkém měřítku. Zelený vodík má navíc

omezení, která zelený amoniak dokáže dobře překonat. Zelený amoniak není konkurencí elektrifikace a zelenému vodíku, ale doplňuje je tím, že nahrazuje šedý amoniak vyráběný z fosilních paliv, slouží jako nosič vodíku a také jako bezuhlíkové palivo. Díky své vysoké energetické hustotě, širokému použití a bezuhlíkovému složení, může být praktickým řešením pro dekarbonizaci regionů, které mají překážky v produkci obnovitelné elektřiny a zeleného vodíku. Díky vysokému bodu varu je amoniak snadno skladovatelný a manipulovatelný s minimálním rizikem hořlavosti [4].

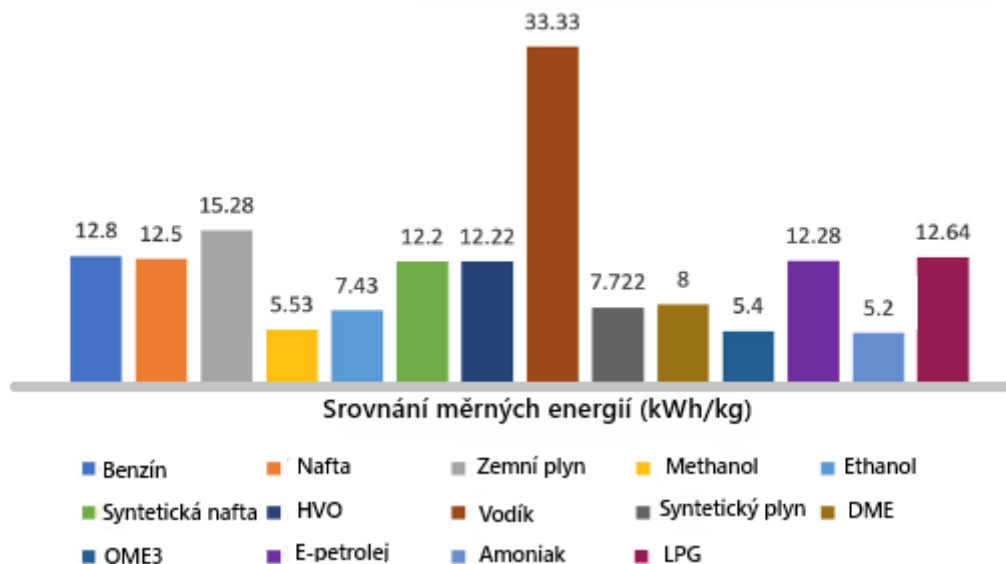
Haber-Boschův proces sloužící k výrobě PtL amoniaku zahrnuje vstřikování H_2 do dusíku za vzniku amoniaku. Tato reakce probíhá za přítomnosti katalyzátorů na bázi železa při vysoké teplotě ($400\text{ }^{\circ}\text{C} - 500\text{ }^{\circ}\text{C}$) a tlaku ($100 - 450\text{ bar}$) za podmínek, kdy molární poměr H_2 k dusíku je mezi 2:1 a 3:1. Obecnou Haber-Bosch reakci znázorňuje následující rovnice [10]:



Přímé využití amoniaku k výrobě elektřiny v turbínách, spalovacích motorech nebo palivových článcích má ale celkovou účinnost těchto procesů mezi 11 % a 19 %, což znamená, že výsledná elektřina je pětikrát až devětkrát dražší než původní obnovitelná energie použitá k jeho výrobě [4].

Vyšší objemová hustota energie amoniaku ve srovnání se stlačeným a zkapalněným vodíkem z něj činí lepší nosič energie. Díky vysokému bodu varu se amoniak snadno skladuje a převáží s minimálním rizikem zahoření. Jako nosič energie, který lze přepravovat na velké vzdálenosti, má proto oproti vodíku logistické výhody. Obsah vodíku v amoniaku, který činí 17,65 %, je také vyšší než v methanolu a jiných kapalných organických nosičích vodíku. Jeho bezuhlíkové složení a minimální emise skleníkových plynů během životního cyklu mu rovněž poskytují značnou výhodu oproti těmto potenciálním konkurentům. Důvěru v amoniak umožňující budoucí mezinárodní toky energie odráží i skutečnost, že 87 % plánovaných kapacit pro vývoz vodíku má za cíl dodávat vodík ve formě amoniaku. I přes vyšší náklady na zelený amoniak a energetickým ztrátám při přeměně obnovitelné energie na tuto energetickou formu, může být amoniak nezbytnou možností pro přenos obnovitelné energie, a podpořit tak cestu k dekarbonizaci [4].

Srovnání měrných energií paliv (fosilních a syntetických)



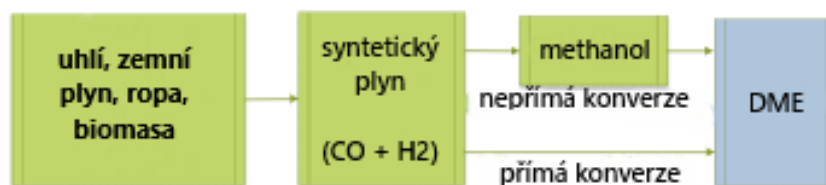
Obrázek 6: Srovnání měrných energií fosilních a syntetických paliv [1].

2 TECHNOLOGIE A START-UPY

Vývoj a implementace technologií hraje zásadní vliv v možném použití syntetických paliv v budoucnosti. K tomu, aby bylo možné tato paliva efektivně využívat, je třeba vybalancovat jejich výrobu a distribuci v závislosti na náročnosti zdrojů, industrializaci a finančních nákladů. V první kapitole této práce jsou jednotlivá paliva představena a stručněji shrnuta jejich možná výroba a zdroj. V druhé kapitole si přiblížíme proces jejich výroby, a to na konkrétních, již zaužívaných či nově vyvinutých technologiích a vědeckých studiích.

2.1 Ekologická výroba DME

Biomasu lze využít k výrobě energeticky bohatého syntetického plynu termochemickým procesem zvaným zplyňování. Složení vznikajícího plynu se liší podle typu použité biomasy, především se skládá z CO , H_2 , CO_2 , CH_4 a N_2 . Čistý syntetický plyn je tvořen převážně z H_2 a CO , které slouží jako základní stavební kameny pro výrobu syntetických paliv. Příkladem chemických produktů jsou amoniak, syntetický benzín a nafta, methanol a DME. Proces zplyňování biomasy pomáhá nejen snižovat množství odpadu, ale také umožňuje produktivní využití materiálů, jako jsou zemědělské a lesní zbytky. Syntetický plyn lze přeměnit na DME dvěma způsoby: přímou konverzí (jednostupňový proces) nebo nepřímou konverzí (dvoustupňový proces), jak je znázorněno na následujícím obrázku [6].



Obrázek 7: Stručný proces výroby DME [6].

Nepřímá konverze je dvoustupňový proces; nejprve se vyrábí methanol ze syntetického plynu v reaktoru s kovovým katalyzátorem. V dalším reaktoru s kyselým katalyzátorem se methanol dehydratuje na DME. Při přímé konverzi se DME vyrábí v jednom kroku; syntetický plyn reaguje přímo na DME v reaktoru s duálním katalyzátorem, který kombinuje obě reakce. Výhodou této metody je, že nedochází k akumulaci methanolu jako meziprojektu, čímž se zvyšuje výtěžek DME. Oba procesy jsou mírně exotermické, proto je důležité kontrolovat teplotu v reaktorech, aby nedocházelo k obrácení rovnovážných reakcí. Výroba DME dehydratací methanolu

na kyselých katalyzátorech, jako je $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, probíhá při teplotách nad $240\text{ }^\circ\text{C}$ a tlacích nad 10 barů. Reakce probíhající při přímé a nepřímé konverzi jsou popsány na následujícím obrázku, kde poslední reakce je hlavní reakcí probíhající při konverzi methanolu na DME a vodu [6].

Reakce:	$\Delta H^\circ 298\text{K} [\text{kJ/mol}]$
$\text{CO} + 2\text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{OH}$	-90.4
$\text{CO}_2 + 3\text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$	-49.4
$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$	-41.1
$2\text{CH}_3\text{OH} \rightleftharpoons (\text{CH}_3)_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$	-23.0

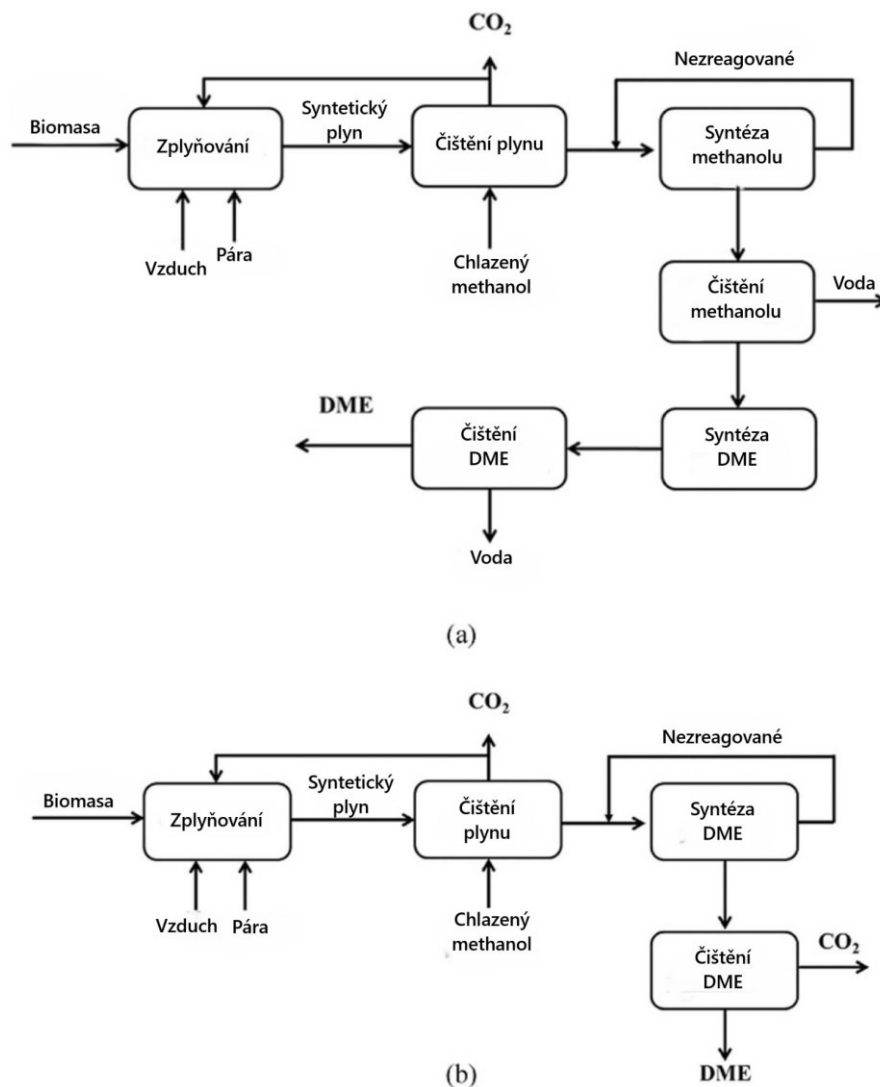
Obrázek 8: Reakce při výrobě DME přímou i nepřímou konverzí [6].

V procesu přímé syntézy DME se používají bifunkční katalyzátory. Kovová část katalyzuje hydrogenaci CO_x , zatímco kyselá část podporuje dehydrataci methanolu. Tyto hybridní katalyzátory se získávají sloučením katalyzátoru syntézy methanolu (MSC) a katalyzátoru dehydratace methanolu (MDC). Obvykle se k tomuto účelu nejčastěji používají směsi $\text{Cu/Zn/Al}_2\text{O}_3$ jako MSC a $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ jako MDC [19].

Jednostupňová syntéza si v poslední době získala pozornost pro svou vyšší účinnost než nepřímá syntéza. To je způsobeno dvěma různými faktory: využití hybridních katalyzátorů částečně zvyšuje konverzi CO a není třeba dvou reaktorů a meziproductů pro čištění, což vede ke snížení nákladů na výrobu. Hlavní nevýhoda jednostupňového procesu se týká konstrukce sekce čištění DME kvůli přítomnosti nezreagovaného syntetického plynu, methanolu a oxidu uhličitého. Tyto problémy a nejistota ve výzkumu silně ovlivňují komercializaci této technologie [19].

Přímá cesta vyžaduje méně chemických procesních jednotek, konkrétně jeden reaktor namísto dvou reaktorů u nepřímé syntézy, a proto je zapotřebí méně zařízení a médií. Před druhým reaktorem také není žádný krok čištění k odstranění nezreagovaného CO_2 a syntetického plynu. Na druhou stranu recyklovaná nezreagovaná surovina může zvýšit výrobní a ekonomickou účinnost nepřímé cesty. Také v případě nedostatku syntetického plynu je možné získat methanol z jiných zdrojů. Vzhledem k tomu, že je třeba připravit dva oddělené katalyzátory, jsou nepřímé katalyzátory levnější a snadno oddělitelné; přímé katalyzátory vyžadují důmyslnější technologii vzhledem k rozdílným optimálním podmínkám prvního a druhého kroku výroby DME.

Na následujícím obrázku jsou znázorněny dva diagramy konvenční výroby DME přímou (b) a nepřímou (a) konverzí. [7].



Obrázek 9: Schéma přímé i nepřímé konverze DME [7].

Za účelem dehydratace methanolu bylo studováno vícero různých katalyzátorů pro zlepšení konverze metanolu na DME. Například γ - Al_2O_3 , některé typy zeolitů, iontoměničové pryskyřice, AlPO (aluminofosfát), SAPO (křemičito-hlinitofosfát), heteropolykyseliny (HPA), Ta/ Al_2O_3 , polymerní/keramická kompozitní membrána, $\text{NbO}_x/\text{TiO}_2$, $\text{Fe}_3\text{O}_4/\gamma$ - χ - Al_2O_3 [7].

Přestože bylo provedeno mnoho studií o katalyzátorech pro přeměnu methanolu na DME, stále existují některé problémy, které vyžadují řešení. Tři hlavní problémy při dehydrataci methanolu jsou kompetitivní adsorpce vody, tvorba vedlejších produktů a usazování koksu. Voda může vznikat třemi reakcemi a je nezbytné zajistit katalyzátor

s méně hydrofilními vlastnostmi. Nejčastěji pozorovanými vedlejšími produkty při dehydrataci methanolu jsou olefinické/parafinické uhlovodíky $C_2 - C_4$, které způsobují vznik koksu. Jako vedlejší produkt při této reakci byl rovněž zaznamenán vznik methanu a formaldehydu. Kromě strukturních vlastností katalyzátoru mohou i vnější podmínky, jako je prostorová rychlost, koncentrace methanolu, teplota, tlak, typ reaktoru, účinně zhoršit nebo zlepšit proces syntézy [7].

2.2 Lignin pro letecké palivo

Možnost výroby velkých objemů udržitelných leteckých paliv (SAF) je nezbytná pro uspokojení poptávky letecké dopravy při současné eliminaci emisí uhlíku. Lignin je vydatný a obnovitelný aromatický biopolymer, který tvoří 15-30 % veškeré lignocelulózové biomasy, ale kvůli své chemické nepoddajnosti zůstává nedostatečně využíván. V této kapitole bude stručně představena metoda konverze ligninu na aromatické uhlovodíky za použití hydrodeoxygenačního katalyzátoru na bázi karbidu molybdenu. Výsledné produkty mají příznivé vlastnosti pro použití v leteckém palivu [2].

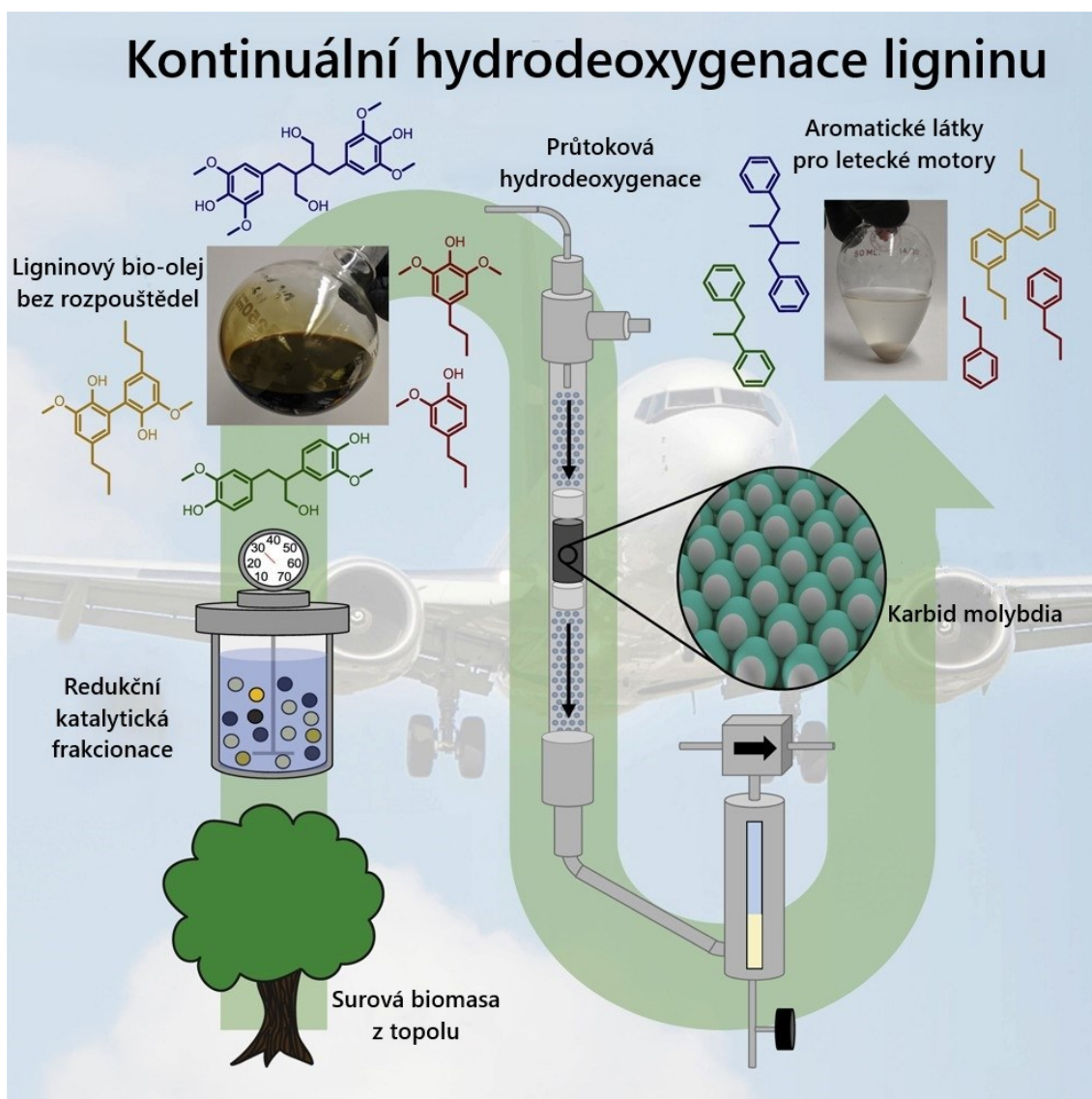
Navzdory svému potenciálu je lignin v současné době buď rozptýlen na poli, nebo určen ke spalování pro výrobu tepla v celulózovém, ethanolovém a papírenském průmyslu. Dosavadní snahy extrakce ligninu produkovaly ligninové oleje mající vysoký obsah kyslíku v rozmezí 27 až 34 % hmotnosti, který musí být pro použití v leteckém palivu snížen na $<0,5\%$. Za tímto účelem bylo dosaženo významného pokroku ve vývoji katalyzátorů pro hydrodeoxygenaci ligninu (HDO). V mnoha studiích byly k deoxygenaci fenolických látek odvozených od ligninu použity bifunkční katalytické systémy kyselina/kov, ale pouze určitá podskupina těchto materiálů prokázala schopnost selektivně štěpit aryl-kyslíkové vazby při zachování aromaticity. Karbid molybdeničitý (Mo_2C) vyniká jako katalyzátor, který je schopen stabilně odstraňovat methoxylové i fenolové skupiny z modelových sloučenin ligninu s více než 90% selektivitou vůči aromatickým látkám. Snahy o využití Mo_2C k modernizaci skutečných ligninových substrátů biologického původu však nebyly tak úspěšné. Obecně lze říci, že převedení slibných katalyzátorů do životaschopných strategií zpracování reálných ligninových surovin brání velké problémy, jako je složité reakční inženýrství, nutné použití drahých katalyzátorů z ušlechtilých kovů, převažující deaktivace katalyzátorů spojená s nízkou účinností deoxygenace při použití skutečných výchozích surovin, nadměrná spotřeba vodíku a nízké výtěžky uhlíku v důsledku kondenzace/koksování [2].

Olej RCF (reduktivní katalytická frakcionace) použitý citované studii byl vyroben zahříváním směsi topolového dřeva, 5 % hmot. katalyzátoru Ru/C a methanolu pod 30 bary plynného vodíku na teplotu 225 °C za rychlého míchání po dobu 3 hodin. Bylo tak dosaženo průměrného stupně delignifikace 68 ± 3 % hmot. Reakční podmínky byly optimalizovány tak, aby bylo dosaženo úplné konverze β -O-4 éterových vazeb a maximalizace výtěžku monomeru oleje. Izolovaný olej RCF obsahoval celkem $52,1 \pm 0,8$ % hmot. monomerů, přičemž hlavní monomerní složky tvořil propylsyringol (PS) ($24,3 \pm 0,8$ % hmot.), propylguaiacol (PG) ($13,2 \pm 0,1$ % hmot.), dihydrosinapylalkohol (PS-OH) ($8,6 \pm 0,7$ % hmot.) a dihydrokoniferylalkohol (PG-OH) ($5,1 \pm 0,5$ % hmot.). Gelová permeační chromatografie (GPC) ukázala, že nemonomerní frakce oleje obsahuje jak dimery, tak vyšší oligomery. Analýza čtyř šarží oleje RCF ukázala $65,44 \pm 0,10$ % C, $7,93 \pm 0,08$ % H, $0,19 \pm 0,02$ % N a $26,53 \pm 0,16$ % O [2].

Reakce HDO s Mo₂C selektivně štěpily vazby C-O, zatímco struktura C-C ligninového substrátu zůstala neporušená. Kromě minimalizace spotřeby vodíku tato selektivita naznačuje, že distribuci produktů HDO lze změnit i úpravou samotné ligninové suroviny. Například by se mohl použít ligninový substrát s vyšším podílem dimerních složek, aby se zvýšil podíl aromatických složek C₁₄-C₂₀ ve výsledném deoxygenovaném produktu. Kromě toho si uhlíková část dimerní a oligomerní frakce zachovává během reakce dostatečnou chemickou funkčnost, aby bylo možné rozlišit typy vazeb mezi ligninovými jednotkami, které jsou přítomny v rostlině. K minimalizaci kondenzace dimerů bude nutná další optimalizace pomocí stabilizace vstupní suroviny nebo snížení pracovních teplot HDO. Tato studie motivuje k vývoji katalyzátorů, které mohou dosáhnout stabilní HDO skutečných ligninových surovin při nízkých teplotách [2].

Až 64 % deoxygenovaných aromatů vzniklých tímto procesem spadá do vhodného rozmezí pro použití v SAF. Nejdůležitější je, že aromatické uhlovodíky s nižší molekulovou hmotností, které byly nalezeny ve vzorku, jsou žádoucí v palivu pro letecké motory. Konkrétně jsou aromáty potřebné k dosažení správné materiálové kompatibility a dielektrické konstanty podobné dielektrické konstantě v běžném palivu. Aromáty jsou naproti tomu také spojeny se zvýšeným výskytem sazí tvořících emise netěkavých částic, které jsou karcinogenní a mohou mít vliv na tvorbu kondenzačních stop. Aromáty s nižší molekulovou hmotností, jsou spojeny s nižším obsahem sazí ve srovnání s aromáty s vyšší molekulovou hmotností. Kromě toho má zde studovaný vzorek ligninového oleje mnoho

podobných vlastností složení jako syntetický aromatický petrolej. Zmíněný proces výroby stručně popisuje následující schéma [2].

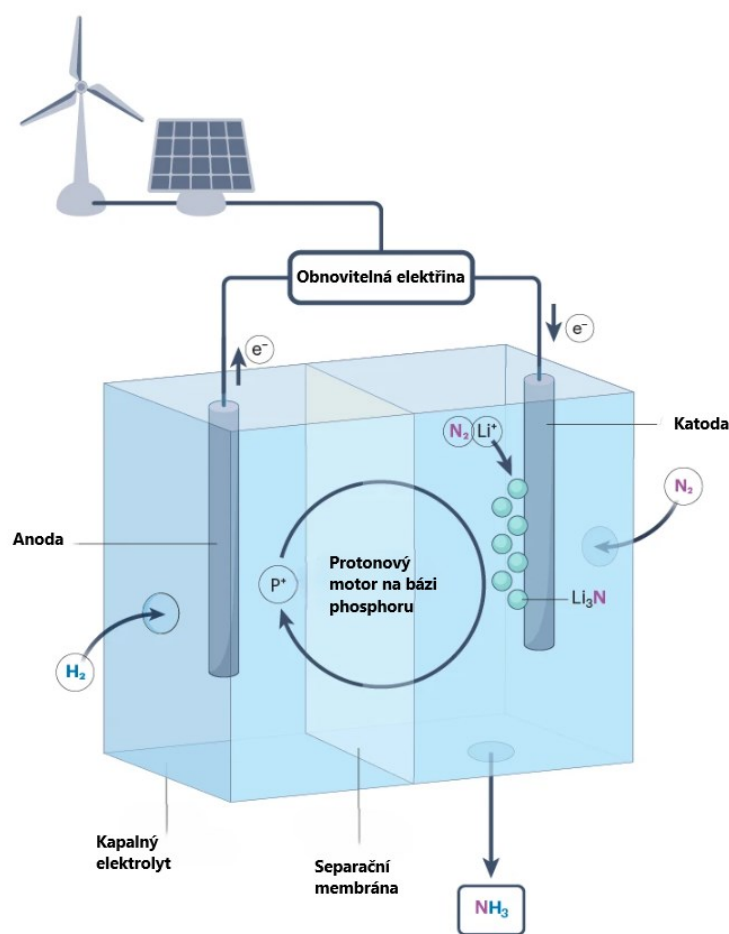


Obrázek 10: Kontinuální hydrodeoxygenace ligninu [2].

2.3 Jupiter Ionics

Jupiter Ionics je australská technologická společnost založená v roce 2021 prof. Douglas MacFarlanem, která si dala za cíl zmírnit změnu klimatu uspokojením rostoucí poptávky po čisté energii a uhlíkové neutrálních hnojivech. Toho se snaží dosáhnout výrobou čistého amoniaku z obnovitelné elektřiny. Společnost přišla s vlastní elektrochemickou technologií výroby ekologického amoniaku skrze jimi patentovaný Amoniakální MacFarlane Simonov článek s velmi vysokou selektivitou a dobrou stabilitou [18].

V článku na anodu přivádíme zelený vodík a na katodu dusík. Atomy vodíku ve formě kladně nabitých protonů jsou přenášeny napříč buňkou a na její druhé straně se spojují s atomy dusíku za vzniku amoniaku. Reakce není spontánní a musí být poháněna zdrojem energie, který by měl pocházet z obnovitelných zdrojů. Za těchto okolností nejsou s výrobou amoniaku spojeny žádné emise CO_2 , a proto je možné jej označit za zelený amoniak. Tento zelený amoniak pak lze skladovat jako kapalinu pod mírným tlakem a použít v řadě aplikací [18].



Obrázek 11: MacFarlane Simonov článek [5]

Potenciální problematika spočívá v potlačení vedlejší reakce, při níž se článek vydává jednodušší cestou slučování páru protonů za vzniku plynného vodíku. Vodík je obvykle převládajícím produktem elektrochemického procesu. Tento problém je znám jako problém selektivity a je popsán metrikou zvanou faradická účinnost (FE), tj. množství vyrobeného amoniaku, který by mohl být vyroben na základě elektrického příkonu. Ještě před několika lety byla uváděna nejvyšší selektivita amoniaku pouze 5-20 % FE [5].

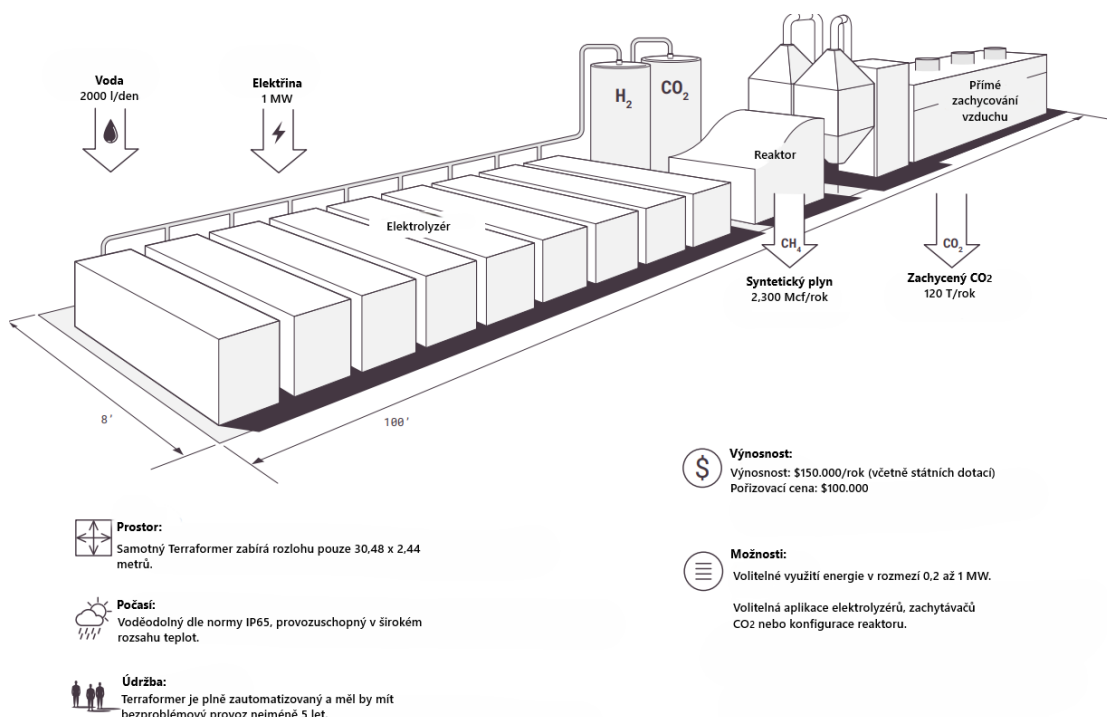
V roce 2019, po prozkoumání několika různých elektrokatalyzátorů, které produkovaly jen málo nebo žádný amoniak, vyzkoušel MacFarlaneův tým prvek lithium. To je pro nás v dnešní době známé především svým využitím v lithiových bateriích. Lithium poměrně dobře reaguje s dusíkem. Klíčový chemický proces zprostředkovaný lithiem se odehrává na katodě elektrochemického článku. Zde lithium (Li^+) a dusík (N_2) reagují za vzniku nitridu lithia (Li_3N). Tento meziprodukt poté reaguje s protony vodíku na anodě za uvolnění amoniaku a regenerace lithia [5].

V roce 2021 MacFarlane a jeho kolegové oznámili, že přidáním protonového motoru na bázi fosforu, který zprostředkovává dodávku atomů do katody, dosáhli 69 % FE. O rok později oznámili, že přechodem na elektrolyt, který lépe podporuje krok štěpení dusíku zprostředkovaný lithiem, dosáhli téměř 100 % FE. Klíčovou výzvou ale stále zůstává prokázání stability a dlouhé životnosti [5].

2.4 Terraform Industries

Terraform Industries je americká technologická společnost zaměřující se na výrobu ekologického syntetického plynu za využití obnovitelné elektřiny ze solárních panelů. Tato společnost má v úmyslu vyrábět zařízení, která, na rozdíl od jiných společností těžících uhlík ve formě fosilních paliv, získávají uhlík z ovzduší. Získaný uhlík pak v reaktoru reaguje s vodíkem vyrobeným elektrolýzou vody za vzniku methanu. Celý proces má být poháněn elektřinou vyráběnou solárními panely [8].

Společnost tak v roce 2023 představila vlastní uhlíkově neutrální zařízení zvané Terraformer. Terraformer v peaku vyprodukuje 1000 m^3 zemního plynu za hodinu provozu. Je ale optimalizován pro 25 % výkon, který je kompatibilní s dodávkou elektřiny vyráběné soustavou solárních panelů. V této konfiguraci zařízení produkuje 6000 m^3 za den. Následující schéma znázorňuje představený Terraformer přímo z produktového listu společnosti [8].

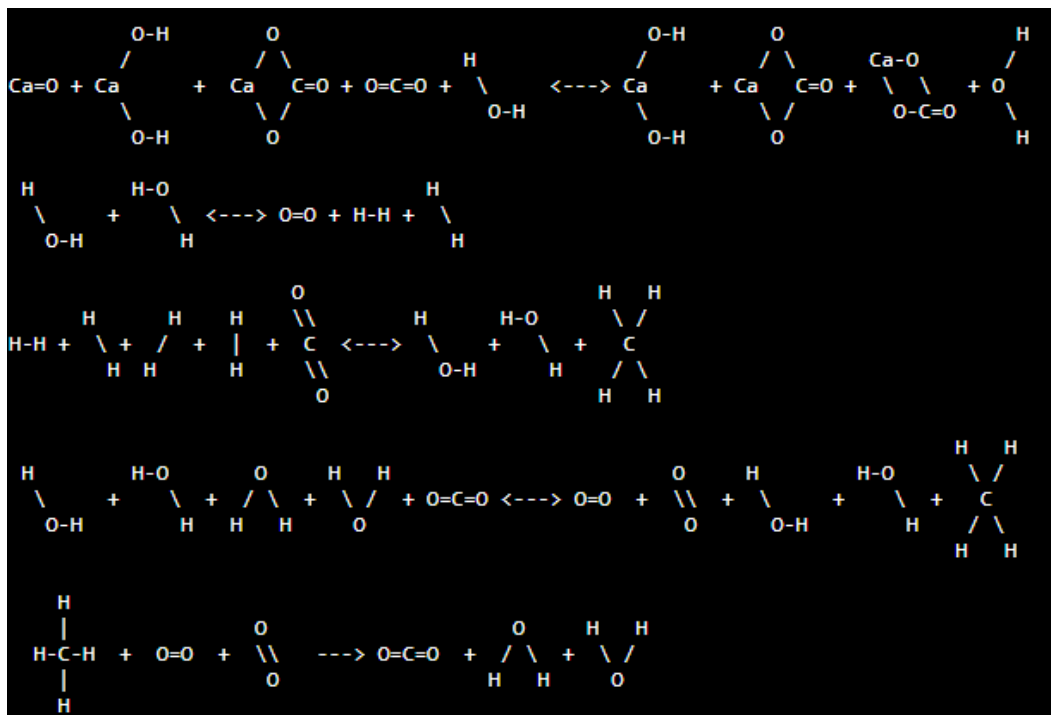


Obrázek 12: Terraformer [8].

Nejprve elektrolyzér přeměňuje levnou solární energii na vodík, přičemž současné výrobní náklady jsou nižší než 2,50 USD za kg H_2 . V dalším kroku patentovaný systém přímého zachycování vzduchu (DAC) koncentruje CO_2 z atmosféry za méně než 250 USD za tunu. Na konec vyvinutý vícestupňový chemický reaktor Sabatier zpracuje vodík a CO_2 a vyrobí syntetický plyn, který obsahuje více než 97 % methanu (CH_4). Reaktor nepoužívá žádné vzácné nebo drahé katalyzátory a v ustáleném stavu pracuje bez problémů celé hodiny. Terraformer spojuje tyto tři subsystémy do jednoho modulárního chemického zařízení a je možné jej umístit vedle solárního fotovoltaického pole [8].

Terraformer tak představuje možnou budoucnost výroby environmentálně udržitelných paliv. Přesto ještě nějaký čas potrvá průmyslová implementace a vývoj bude záviset i na aktuálním politickém naladění USA.

Chemický postup Terraform Industries znázorňují následující rovnice:



Obrázek 13: Terraform Industries chemický průběh [25].

2.5 NANO Advanced

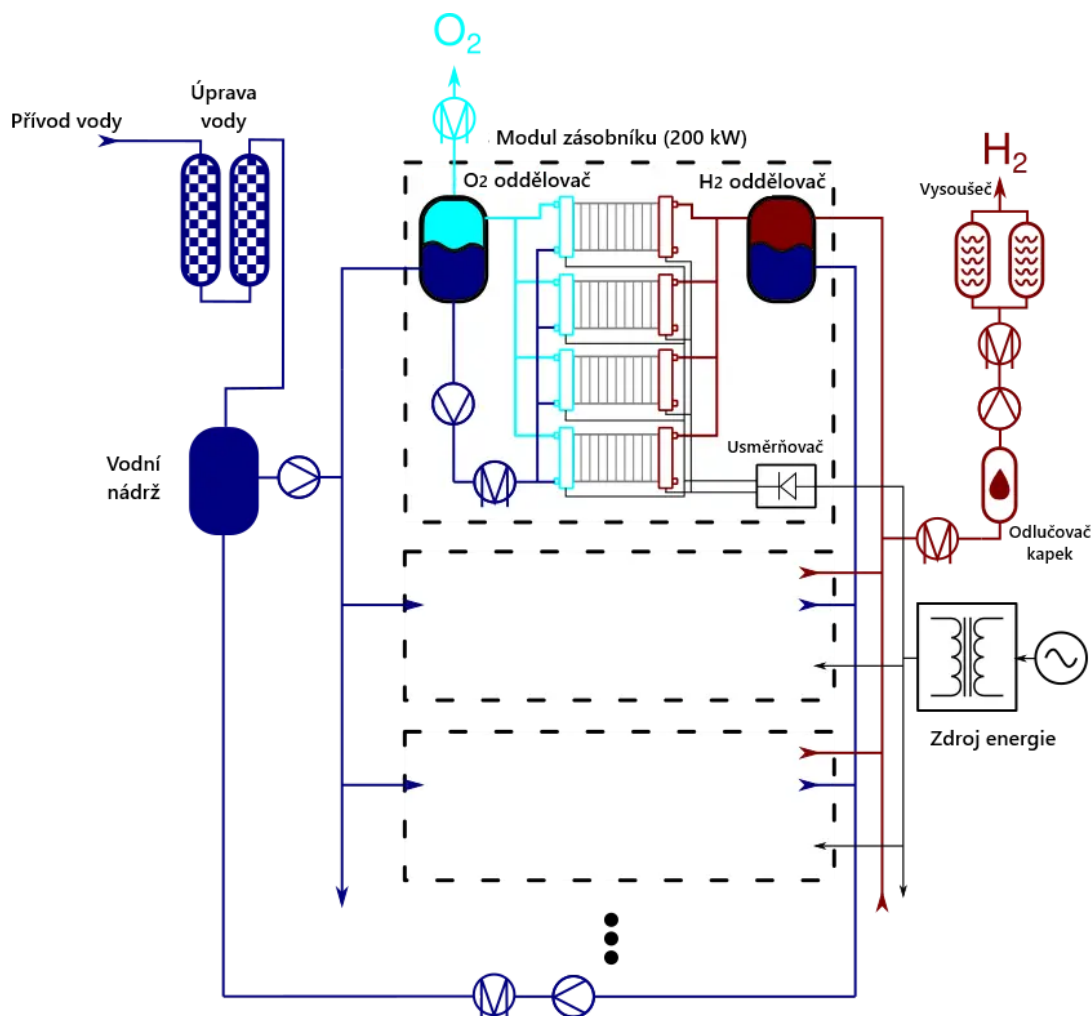
Za krátkou zmínku stojí i český brněnský start-up NANO Advanced, Ten se rozhodl propojit vlastní PEM generátor vodíku s AI technologií (umělá inteligence). AI má v tomto případě pomoci s optimalizací výroby a vyhlazováním nerovnoměrného přísunu energie z obnovitelných zdrojů.

Společnost NANO Advanced vyvíjí koncept velkého, snadno přizpůsobitelného vodíkového elektrolyzér PEM (Proton-výměnná membrána). Škálovatelná technologie s výkonem od 0,05 do 1 MW umožní splnit konkrétní požadavky zákazníků z hlediska velikosti, příkonu a skladování. Největšími výhodami inovace mají být plynulý průběh výroby při různých výkonech a pokročilý poměr OPEX/výroba (náklady na provoz). Zakladateli jsou Jakub Drnec, PhD a Pavel Srbecký, Ing. [20].

NANO Advanced tvrdí, že rozvoj vodíkové ekonomiky brzdí neefektivnost procesu. S tím má pomoci využití komponenty NANO advanced el. a navazujícího vlastního PEM

elektrolyzáru. Tím by se měla snížit ztráta energie při procesu výroby až o 10–15 %, což je srovnatelné se ztrátami při vedení elektřiny. [26].

Společnost prozatím nezveřejnila příliš informací ani dat, víceméně bez komentáře ponechala i následující schéma jimi vyvíjeného systému.



Obrázek 14: NANO Advanced PEM elektrolyzér [20].

2.6 Synhelion

Ve švýcarské společnosti Synhelion využívají solární energii k výrobě udržitelných kapalných paliv. Jejich patentovaná technologie přeměňuje obnovitelnou energii a biogenní odpad na syntetická paliva. Tato paliva bezproblémově spolupracují se stávajícími motory a infrastrukturou, což z nich dělá nadějnou změnu v oblasti udržitelné dopravy [16].

Synhelion používá jako zdroj uhlíku udržitelný biogenní odpad. Tento nákladově efektivní převážně zemědělský odpad prochází přirozeným procesem zvaným anaerobní

rozklad, při kterém se biogenní odpad mění na surový bioplyn. Surový bioplyn, směs biogenního metanu a CO_2 , slouží jako ideální surovina pro výrobu paliva. Ke zpracování surového bioplynu na palivo dále potřebují vysoké teplo. Buď používají obnovitelnou elektřinu z fotovoltaického pole k pohonu vlastního elektrického plynového ohřívače, nebo vlastní systém koncentrované sluneční energie (heliostaty a solární přijímač) k výrobě obnovitelné sluneční tepelné energie o teplotě nad $1\,100\text{ }^\circ\text{C}$ k napájení procesu chemické přeměny. Získané teplo pohání patentovaný termochemický reaktor. V tomto reaktoru dochází k přeskupení molekul bioplynu a vody za vzniku syntetického plynu, směsi vodíku (H_2) a oxidu uhelnatého (CO). Proces ukládá sluneční energii do chemických vazeb syntetického plynu a umožňuje její pozdější využití [16].

Syntetický plyn je univerzálním klíčem k výrobě kapalných paliv. Ke zkapalnění syntetického plynu používají standardní průmyslové metody, které nakonec umožňují získat solární kapalná paliva, jako je obnovitelné letecké palivo, syntetická motorová nafta a benzin. Tato paliva jsou připravena k použití v dnešních motorech a infrastruktuře. Kombinací cenově dostupných surovin, vlastní obnovitelné energie a efektivního skladování tepelné energie efektivně vyrábí udržitelná paliva ve dne i v noci, čímž pomáhají vytvářet čistší a udržitelnější budoucnost globální dopravy [16].

2.7 Paliva z plastu

Paliva získaná z plastového odpadu, konkrétně plasto-paliva (PF), si získávají značnou celosvětovou pozornost kvůli kritickým ekologickým katastrofám, přísným normám pro likvidaci plastového odpadu a přínosům pro využití zdrojů. Plastová paliva by mohla být použita jako alternativní paliva pro různá odvětví, jako je doprava, výroba elektřiny, průmyslové vytápění atd.. Surová PF se obvykle vyrábějí ze všech druhů primárních plastových odpadů, jako je polypropylen (PP), polystyren (PS), polyethylen o nízké hustotě (LDPE), polyethylen o vysoké hustotě (HDPE), polyethylentereftalát (PET), a to termochemickou cestou. Dále by se surová PF mohly frakční destilací upravit na paliva podobná benzínu (syntetický benzin), která se nazývají plasto-benzin (PPL, plasto petrol liquid) [14].

Předzpracovaná surovina MLMPW (Municipality landfill mixed plastic waste = obecná směs smíšeného plastového odpadu) je přiváděna do reaktoru, kde se nachází katalyzátor ZSM-5 (zeolit ve formě Brønstedovy kyseliny) v množství 0,2 % hmot. Tato surovina se zahřívá na teplotu v rozmezí $350 - 450\text{ }^\circ\text{C}$ za nepřítomnosti kyslíku uvnitř

reaktoru. Tepelná energie je dodávána prostřednictvím dvoupalivového hořáku spalováním kapalného nebo plynného paliva. Zahřátá surovina prochází termochemickými depolymerizačními reakcemi za přítomnosti katalyzátoru a produkuje uhlovodíkové páry. Tyto páry procházejí parní kolonou/bubnem a poté kondenzátorem, kde se maximální množství par kondenzuje chladicí vodou protékající kondenzátorem. Zkondenzované páry jsou přeměněny na kapalný olej, který se také označuje jako surový PF, a toto palivo se skladuje v nádrži na olej. Určité množství par v kondenzátoru nemůže zkondenzovat, tyto nezkondenzovatelné páry nazýváme plasto-plyn a procházejí čistící a filtrační jednotkou plynu za účelem vyčištění. Plynový kompresor nasává přefiltrovaný plasto-plyn a ukládá jej do zásobníku plynu pod vysokým tlakem. Vysokotlaký plasto-plyn je recirkulován do dvoupalivového hořáku prostřednictvím systému plynového palivového potrubí. Stejně tak se vyrobený surový PF používá jako kapalné palivo v hořáku na dvě paliva. Je tedy třeba poznamenat, že během výrobního procesu se využívá přibližně 12-15 % vyrobených paliv, tj. surového PF a plasto-plynu, což umožňuje ekonomickou rentabilitu celého výrobního systému [14].

Celkově se dospělo k závěru, že zážehový motor by mohl být poháněn 100 % plasto-benzínem (PPL) s téměř stejným výkonem a emisními aspekty jako u komerčně dostupného fosilního paliva. Pro nasazení PPL v automobilovém průmyslu je nutné provést zkoušky životnosti motoru s palivem PPL pro hodnocení různých parametrů, jako je opotřebení součástí motoru, kompatibilita palivového potrubí, ředění mazacího oleje atd. [14].

2.8 Bio-LPG

Dřívějšími technikami pro syntézu LPG (Liquified Petroleum Gas = zkapalněný petrolejový plyn) byla jeho výroba ze zemního plynu, uhlí a biomasy, proces konverze DME z glycerolu nebo z vedlejšího produktu výroby bionafty a H_2 na bio-methanol, který lze dále převést na bio-DME pomocí komerčně dostupných dehydratačních technologií pro LPG. Další způsoby biosyntézy LPG zahrnují mikrobiální fermentační bioproceny a chemickou přeměnu surovin biologického původu včetně odpadní biomasy, které poskytují ekologickou alternativu k LPG vyráběnému z fosilních zdrojů [15].

Dobře zavedenými syntetickými technikami vývoje bio-LPG jsou metody hydrogenační úpravy a dehydratace. Z několika možných vstupních surovin (např. biooleje, propyleny, butyleny a dimethylethery), které lze použít za účelem syntézy

bio-LPG, jediný, který se nyní komerčně využívá, je právě bioolej. Procesy zahrnující přeměnu biomasy na LPG, přeměnu bioplynu/biomethanu, přeměnu glycerinu na propan, přeměnu obnovitelné energie na plyn a biosyntézu, se však zatím výrazněji nerozšířily. Obecně má výroba bio-LPG z biomasy, bioplynu, nebo z odpadu udržitelný potenciál s nižší uhlíkovou stopou než výroba fosilního LPG [15].

Kromě obecných výhod LPG (bio-LPG), mezi které patří prodloužená životnost motoru díky snížení opotřebení jeho součástí a vysoké oktanové číslo, jsou i nízké emise výfukových plynů. Při spalování dosahuje LPG nízkých emisí oxidu uhličitého (CO_2) ve srovnání s konvenčními palivy. V závislosti na regionu a vstupní surovině se LPG většinou skládá z propanu a butanu v různých poměrech. LPG (bio-LPG) je pro dosažení lepších emisí výfukových plynů vhodný nejen jako alternativa k běžným fosilním palivům v autodopravě, ale i jako náhrada lodního paliva. LPG je považován za vhodný pro skladování a přepravu, dále má nízký obsah síry, snadno se přizpůsobuje výměně motoru nebo paliva, a především je bio-LPG udržitelný [15].

3 SOUČASNÝ STAV DEKARBONIZACE DOPRAVY

3.1 Letecká doprava

V roce 2022 se civilní letectví podílelo 2,4 % na celosvětových emisích oxidu uhličitého souvisejících s energií, přičemž emise skleníkových plynů v tomto odvětví rostly v posledním desetiletí rychleji než v železniční, silniční nebo námořní dopravě. Roční tempo růstu emisí z letecké dopravy se zvýšilo z 2,2 % v letech 1970-2012 na 5 % v letech 2013-2018. Nepočítáme-li období COVID-19, které toto odvětví dočasně uzemnilo, poptávka po letecké dopravě celosvětově roste. Lze očekávat, že růstový trend bude pokračovat až do roku 2050, což vyvolává obavy o klimatickou stopu tohoto odvětví. Mezinárodní klimatické cíle předpokládají, že do té doby bude dosaženo nulových čistých globálních emisí uhlíku [31].

Podle návrhu nařízení ReFuelEU by dosažení minimálního cíle pro odvětví civilního letectví znamenalo pokrýt do roku 2050 alespoň 35 % celkového objemu leteckého paliva e-palivy. Na základě dostupných odhadů budoucí spotřeby by to znamenalo roční objem 17 Mtoe (tuna ropného ekvivalentu, tj. množství energie uvolněné spálením jedné tuny ropy) e-paliv pro letectví, která by se měla buď vyrábět, nebo dovážet. K výrobě těchto e-paliv je zapotřebí téměř 500 TWh elektřiny. Vzhledem k nevyhnutelně vznikajícím vedlejším produktům však bude pro tuto výrobu zapotřebí celkem asi 800 TWh čisté elektřiny. Pro představu, tato spotřeba energie by představovala 73 % současné výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů v EU nebo 128 % současné výroby z větrné a solární energie dohromady. Vezmeme-li v úvahu, že mezi čistými zdroji je i jaderná energie, ačkoli tato otázka zůstává mezi členskými státy velmi diskutovaným tématem, výroba e-paliv by si vyžádala 47 % současné výroby nízkouhlíkové elektřiny [33].

3.2 Lodní doprava

V prosinci 2015 podepsalo 195 států v rámci Rámcové úmluvy OSN o změně klimatu Pařížskou dohodu, podle níž se má v tomto století omezit nárůst globální teploty na 2 °C oproti předindustriální úrovni a pokračovat v úsilí o její omezení na 1,5 °C. Tato dohoda specifikuje nízkouemisní hospodářství pro všechna odvětví. Přestože lodní doprava není součástí žádné mezinárodní dohody o klimatu, je považována za jednoho z významných přispěvatelů ke globálním emisím skleníkových plynů. Přibližně 2,5-3 %

celkových ročních celosvětových emisí oxidu uhličitého lze připsat mezinárodní námořní dopravě [32].

V roce 2021 přepravoval lodní průmysl více než 11 miliard tun zboží ročně, a i nyní tvoří podstatnou část světového obchodu. Vzhledem k tomu, že 99 % (podle dat z roku 2022) celosvětové lodní flotily je v současné době provozováno na fosilní paliva, stává se související znečištění ovzduší a skleníkové plyny stále závažnějším problémem. Mezinárodní námořní organizace uvádí, že průměrná roční spotřeba fosilních paliv v námořní dopravě činí 250-325 milionů tun, což odpovídá 2,89 % celosvětových emisí oxidu uhličitého (CO₂). Očekává se, že bez zavedení vhodných metod zmírňování emisí se emise CO₂ z námořní dopravy v roce 2050 zvýší až o 90-130 %. Opatření ke snížení emisí CO₂ v lodní dopravě mají mnoho podob, za slibnou cestu k nulovým emisím se považuje přijetí nízkouhlíkových a bezuhlíkových alternativních paliv [22].

Při navrhování lodních energetických systémů se často zapomíná na přísná prostorová omezení lodí. K zaplnění této mezery je obvykle navržen dvoustupňový optimalizační model pro navrhování lodních integrovaných energetických systémů využívajících alternativní paliva, který zahrnuje spalovací motory, palivové články, technologie skladování energie a další příslušná zařízení. V úvahu pak přichází čtyři hlavní alternativní paliva, tj. vodík, amoniak, methanol a syntetický plyn. Tato alternativní paliva byla porovnána s konvenčním dieselovým pohonným systémem v souvislosti s emisemi. Výsledky ukazují, že nahrazením konvenčních fosilních paliv alternativními palivy lze snížit emise skleníkových plynů lodní dopravy o více než 60 %. Vzhledem k rostoucí úrovni technologií výroby paliv a palivových článků jsou aplikace alternativních paliv ekonomicky konkurenceschopné ve srovnání s konvenčními dieselovými systémy [22].

3.3 Nákladní doprava

V roce 2016 bylo odvětví dopravy zodpovědné za 33 % veškeré energie spotřebované v Evropské unii (EU). Silniční doprava byla zdaleka nejnákladnějším druhem dopravy s podílem 74 % na celkové poptávce po energii pro dopravní služby v EU. Odvětví dopravy v EU bylo téměř zcela závislé (93 %) na ropných produktech a podílelo se 24 % na celkových emisích skleníkových plynů v Evropské unii (včetně mezinárodní letecké dopravy). Takto vysoký podíl fosilních paliv je třeba snížit, má-li být zachováno současné klima [13].

K dosažení cílů EU v oblasti klimatu bude zapotřebí několika opatření na úsporu CO₂. Důležitým aspektem je zlepšení samotné technologie pohonu. Elektromobily (EV, electric vehicles) s energetickou účinností hnacího ústrojí >65 % jsou slibnou alternativou ke konvenčním vozidlům se spalovacím motorem (ICEV, internal combustion engine vehicles), kde je energetická účinnost hnacího ústrojí 16-22 %. U elektromobilů lze pro skladování elektrické energie použít bateriový systém (EV), nebo pro výrobu elektrické energie na palubě uvést do provozu palivový článek s vodíkem jako potenciálním nosičem energie (FCEV, fuel cell electric vehicles). Přestože elektromobily mají obrovský potenciál pro zmírnění globálního oteplování, emise skleníkových plynů během celého životního cyklu silně závisí na typu využívané elektřiny [13].

Další cestou, jak snížit spotřebu fosilních paliv, je nahrazení alternativními palivy. Moderní alternativní paliva jsou považována za jednu z možností, protože mohou být klimaticky neutrální. Z hlediska tohoto posouzení jsou alternativní paliva založena buď na biomase, nebo na elektřině z obnovitelných zdrojů. Obojí lze využít k výrobě syntetických biopaliv nebo obnovitelného vodíku. Syntetická biopaliva jako náhrada fosilních paliv jsou proto považována za životaschopnou možnost zmírnění emisí skleníkových plynů v odvětví dopravy, jejíž výhodou je snadný proces adaptace, protože využití nevyžaduje zásadní změny motorů automobilů ani infrastruktury pro doplňování paliva [13].

ZÁVĚR

Situace na trhu a v technologickém pokroku je nepředvídatelná a dalo by se říct, že zítra by vše mohlo být jinak. Ať už v důsledku vedené politiky a veřejného mínění k potřebě ochrany životního prostředí, tak i kvůli neustálým objevům a novým technologiím měnícím pravidla hry a umožňujícím nové možnosti, nelze přesně určit, které palivo bude hrát v budoucnosti první housle. Přesto se dá říct, že každé z paliv a energetických zdrojů by mohlo v budoucím palivovém mixu mít svou roli. Spoléhání se pouze na jednu možnost je nejen neefektivní, ale i nevyzpytatelné pro teoretickou nedostupnost základních surovin k výrobě a jejich případnou tržní cenu. Každé palivo má své unikátní vlastnosti a s tím související využití. Z tohoto důvodu se nelze spoléhat ani na elektromobilitu, která je s každým dnem dostupnější. Přestože účinnost elektromotorů je podstatně vyšší než u jiných pohonů, baterie v současnosti nejsou schopné udržet dostatečné množství elektrické energie k dlouhodobému pohonu, a tudíž nenajdou uplatnění v dálkové dopravě.

Protože zásoby fosilních paliv jsou nejen vyčerpitelné, ale i nepříznivě přispívající ke stavu životního prostředí a klimatické situaci, je nezbytné poohlédnout se po palivech dostupnějších a udržitelnějších. Velkou roli by v tomto případě mohl hrát samotný vodík. Vodík sám o sobě sice má vysokou energetickou kapacitu na jednotku hmotnosti, ale v běžných podmínkách se vyskytuje ve formě plynu, který jeho distribuci a skladování podstatně ztěžuje. Uchovávaná energie vztažená na objem je naopak docela nízká. Distribuce, spolu s rizikovou výbušností, je v současnosti hlavní nevýhodou tohoto jinak slibného paliva. Na druhou stranu je zelený vodík relativně dostupný. K jeho samotné výrobě potřebujeme pouze vodu a zelenou elektřinu a díky tomu by neměl být problém jej vyrábět v místě potřeby. Z vodíku ale lze dále vyrábět jiná, lépe distribuovatelná paliva, jako je methanol, ethanol, DME, syntetická nafta, PtL petrolej, amoniak atp... Tím by se mohl vyřešit problém s dopravou a skladováním. Stejně tak by tato paliva mohla znamenat možnost uchovávání elektrické energie v lépe skladovatelné formě. Základem většiny těchto paliv je syntetický plyn vyrobený z vodíku a uhlíku zachyceného ze vzduchu. Z něj jsou pak dříve popsány procesy vyráběna konkrétní paliva. Volba vhodného paliva pak ale může záležet i na spotřební lokalitě a jeho upotřebitelnosti. Velice slibnou možností pro uchování energie se zdá být amoniak, který umožňuje relativně snadné uchování, přepravu a znovuzískání v něm uloženého vodíku. Tato paliva by také mohla znamenat vhodné uložení přebytečné elektrické energie získané

z obnovitelných zdrojů, jejíž potřeba uchování bude se stále vzrůstající poptávkou po obnovitelných zdrojích růst.

Aktuálně se bohužel zelená syntetická paliva cenově stále nemohou rovnat palivům z fosilních zdrojů. Fosilní paliva jsou v současnosti velkým zdrojem levné a dostupné energie, to je dáno například jejich snadnou dostupností a k tomu vytvořenou infrastrukturou. Navzdory tomu však už od minulého století víme, jak závažný negativní dopad má lidská činnost s nimi spojená na klimatickou změnu naší planety. Důležité pro nás proto budou nejen nové efektivnější a levnější technologie, ale i zavádění k nim náležející infrastruktury, a především vlastní uvědomění, zda raději budeme žít levněji a pohodlněji, nebo zda chceme se Zemí a životem na ní počítat i do budoucnosti, a tudíž činit obětavé kroky k tomu vedoucí. Cesta k dekarbonizaci planety bude náročná a dlouhá, mimo technologický pokrok je nutné vzdělávat širokou veřejnost, která svými hlasy může rozhodnout o politickém směřování státu. K čistější planetě však bude nezbytné zapojení celého světa, jelikož snaha malého území ve srovnání s miliardovými znečišťovateli z jiných kontinentů planety, může být marná.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] VISHAL, Ram a SURENDER REDDY, Salkuti. An Overview of Major Synthetic Fuels. Online. *Energies* 2023. 2023, roč. 16, č. 2834, s. 1-35. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/en16062834>. [cit. 2025-04-16]. (Přeloženo autorem.)
- [2] STONE, Michael L.; WEBBER, Matthew S.; MOUNFIELD, William P., III; BELL, David C.; CHRISTENSEN, Earl et al. Continuous hydrodeoxygenation of lignin to jet-range aromatic hydrocarbons. Online. *Joule*. 2022, roč. 2022, č. 6, s. 1-15. ISSN 2542-4785. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.08.005>. [cit. 2025-03-18]. (Přeloženo autorem.)
- [3] WALLINGTON, T. J.; WOODY, M.; LEWIS, G. M.; KEOLEIAN, G. A.; ADLER, E. J. et al. Hydrogen as a sustainable transportation fuel. Online. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2025, roč. 217, č. 115725, s. 1-19. ISSN 1364-0321. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115725>. [cit. 2025-05-04]. (Přeloženo autorem.)
- [4] KAASHYAP BALAJI, Rishi; PREUSS, Nathan a YOU, Fengqi. From fertilizer to fuel: Ammonia's evolution and role in global decarbonization. *Nexus*. 2024, roč. 2024, č. 4, s. 1-3. ISSN 2950-1601. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1016/j.ynexs.2024.100040>. [cit. 2025-03-12]. (Přeloženo autorem.)
- [5] CROW, James Mitchell. A cleaner route to ammonia. Online. In: *Nature.com*. 2023. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/d41586-023-01659-w>. [cit. 2025-03-12]. (Přeloženo autorem.)
- [6] EIKELAND, Marianne; LARSEN, Sebastian; NUMME, Oliver; TRASTI, Eivind Johan a BRÅTHEN, Terje. Green production of dimethyl ether (DME) - indirect conversion of synthesis gas produced from biomass. Online. In: KYPRIANIDIS, Prof. Konstantinos G.; DAHLQUIST, Prof. Erik; ASLANIDOU, Dr. Ioanna; RENUKE, Dr. Avinash; MIRLEKAR, Dr. Gaurav et al. *Proceedings of the 64th International Conference of Scandinavian Simulation Society. SIMS 64. Västerås, Sweden: Linköping University Electronic Press (LiU E-press), Linköping Electronic Conference Proceedings, No 200, 2023, s. 358-364. ISBN 978-91-8075-348-7. ISSN 1650-3686 (print), 1650-3740 (online).* Dostupné z:

<https://doi.org/https://doi.org/10.3384/ecp200045>. [cit. 2025-03-12]. (Přeloženo autorem.)

- [7] MOGHADDAM, Alireza Lotfollahzade a HAZLETT, Melanie Jane. Methanol dehydration catalysts in direct and indirect dimethyl ether (DME) production and the beneficial role of DME in energy supply and environmental pollution. Online. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2023, roč. 110307, č. 11, s. 1-27. ISSN 2213-3437. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110307>. [cit. 2025-02-26]. (Přeloženo autorem.)
- [8] TERRAFORM INDUSTRIES. TI Terraform Industries Blog. Online. 2023. Dostupné z: <https://terraformindustries.wordpress.com>. [cit. 2025-02-26]. (Přeloženo autorem.)
- [9] ELGENDI, Mahmoud; HUH, Jeongmoo; SEKAR, Manigandan; MONTASER, Mahmoud; ABDELKAREEM, Mohammad Ali et al. Opportunities and sustainability challenges of hydrogen as a fuel in the transportation sector: A review. Online. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2025, roč. 217, č. 115705, s. 1-27. ISSN 1364-0321. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115705>. [cit. 2025-05-01]. (Přeloženo autorem.)
- [10] ALSUNOUSI, Mohammed a KAYABASI, Erhan. The role of hydrogen in synthetic fuel production strategies. Online. International Journal of Hydrogen Energy. 2024, roč. 54, s. 1-10. ISSN 0360-3199. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.11.359>. [cit. 2025-05-01]. (Přeloženo autorem.)
- [11] STANČIN, H.; MIKULČIĆ, H.; WANG, X. a DUIĆ, N. A review on alternative fuels in future energy system. Online. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020, roč. 128, č. 109927, s. 1-17. ISSN 1364-0321. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109927>. [cit. 2025-05-04]. (Přeloženo autorem.)
- [12] SUN, Wanchen; ZHU, Genan; GUO, Liang; ZHANG, Hao; YAN, Yuying et al. Optical diagnostic study of internal and external EGR combined with oxygenated fuels of n-butanol, PODE3 and DMC to optimize the combustion process of FT synthetic diesel. Online. Fuel. 2024, roč. 355, č. 129390. ISSN 0016-2361. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129390>. [cit. 2025-04-03]. (Přeloženo autorem.)

- [13] ROSENFELD, Daniel C.; LINDORFER, Johannes a FAZENI-FRAISL, Karin. Comparison of advanced fuels—Which technology can win from the life cycle perspective? Online. Journal of Cleaner Production. 2019, roč. 238, č. 117879, s. 1-13. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117879>. [cit. 2025-04-16]. (Přeloženo autorem.)
- [14] VENKATESWARLU, Chintala; SACHIN, Makwana; MUNAVVAR, Pathan a AJAY SATHISH, Kumar Motepalli. Can 100% plasto-petrol be employed as a fuel candidate for spark ignition engines? Online. Fuel. 2025, roč. 395, č. 135231, s. 1-18. ISSN 0016-2361. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.135231>. [cit. 2025-04-16]. (Přeloženo autorem.)
- [15] L. O., Ajuka; R. A., Kazeem; O. A., Kutu; T. C., Jen; A. S., Afolalu et al. Decarbonized automotive fuel: Liquefied petroleum gas biosynthesis, benefits and drawbacks. Online. Results in Engineering. 2024, roč. 21, č. 101889, s. 1-11. ISSN 2590-1230. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101889>. [cit. 2025-04-17]. (Přeloženo autorem.)
- [16] SYNHELION SA. Synhelion: Turning sunlight into fuel. Online. Švýcarsko, 2020, 2025. Dostupné z: <https://synhelion.com>. [cit. 2025-04-20]. (Přeloženo autorem.)
- [17] KRÄMER, Samuel M.; NIELSEN, Anders S.; MAIER, Simon; MUCCI, Simone; HILLESTAD, Magne et al. Power- and biomass-to-liquid processes with fuel-assisted solid oxide electrolysis cells and water gas shift-adjusted systems: A techno-economic analysis. Online. Fuel. 2025, roč. 396, č. 135290, s. 1-19. ISSN 0016-2361. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.135290>. [cit. 2025-05-04]. (Přeloženo autorem.)
- [18] Jupiter Ionics. Online. Monash University, 2021, 2025. Dostupné z: <https://jupiterionics.com>. [cit. 2025-02-26]. (Přeloženo autorem.)
- [19] FEDELI, M.; NEGRI, F.; BORNAZZINI, A.; MONTASTRUC, L.; MANENTI, F. et al. Process design and downstream optimization of the direct synthesis route for cleaner production of dimethyl ether from biogas. Online. Journal of Cleaner Production. 2024, roč. 141060, č. 443, s. 1-11. ISSN 0959-6526. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141060>. [cit. 2025-02-26]. (Přeloženo autorem.)

- [20] NANO ADVANCED. Solutions for hydrogen economy. Online. 2022. Dostupné z: <https://www.nanoadvanced.cz>. [cit. 2025-02-26]
- [21] BUBE, Stefan; VOSS, Steffen; QUANTE, Gunnar a KALTSCHMITT, Martin. Cost analysis of kerosene production from power-based syngas via the Fischer-Tropsch and methanol pathway. Online. Fuel. 2025, roč. 384, č. 133901. ISSN 0016-2361. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.133901>. [cit. 2025-04-03]. (Přeloženo autorem.)
- [22] WENXIAN, Zhang; YUAN, He; NIANYUAN, Wu; FUZHENG, Zhang; DANNI, Lu et al. Assessment of cruise ship decarbonization potential with alternative fuels based on MILP model and cabin space limitation. Online. Journal of Cleaner Production. 2023, roč. 425, č. 138667, s. 1-25. ISSN 0959-6526. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138667>. [cit. 2025-04-16]. (Přeloženo autorem.)
- [23] XUDONG, Zhen a YANG, Wang. An overview of methanol as an internal combustion engine fuel. Online. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015, roč. 52, s. 1-17. ISSN 1364-0321. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.083>. [cit. 2025-05-04]. (Přeloženo autorem.)
- [24] A. ABDELRAHMAN, Asmaa a A. ABO EL-KHAIR, Muhammad. Advanced Biodiesel Production: Feedstocks, Technologies, Catalysts, Challenges, and Environmental Impacts. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2025, roč. 2025, č. 13, s. 1-27. ISSN 2213-3437. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114966>. [cit. 2025-03-12]. (Přeloženo autorem.)
- [25] TERRAFORM INDUSTRIES. *Terraform Industries*. Online. 2021, 2025. Dostupné z: <https://terraformindustries.com>. [cit. 2025-02-26]. (Přeloženo autorem.)
- [26] NANO Advanced. Online. Technologická inkubace. C2024. Dostupné z: <https://technologickainkubace.org/startupy/nano-advanced/>. [cit. 2025-02-26]
- [27] SHAIKH, Abdur Razzak; S. M., Zakir Hossain; USAMA, Ahmed a MOZAHAR HOSSAIN, Mohammad. Cleaner biodiesel production from waste oils (cooking/vegetable/frying): Advances in catalytic strategies. Online. Fuel. 2025, roč. 393, č. 134901, s. 1-2. ISSN 0016-2361. Dostupné z:

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.134901>. [cit. 2025-04-02].
(Přeloženo autorem.)

[28] SO KHUONG, Leang; HASHIMOTO, Nozomu; KONNO, Yusuke; SUGANUMA, Yusuke; NOMURA, Hiroshi et al. Droplet evaporation characteristics of hydrotreated vegetable oil (HVO) under high temperature and pressure conditions. Online. Fuel. 2024, roč. 368, č. 131604, s. 1-2. ISSN 0016-2361. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131604>. [cit. 2025-04-02].
(Přeloženo autorem.)

[29] GARCÍA, Antonio; MONSALVE-SERRANO, Javier; VILLALTA, David; LAGO SARI, Rafael; GORDILLO ZAVALA, Victor et al. Potential of e-Fischer Tropsch diesel and oxymethyl-ether (OMEx) as fuels for the dual-mode dual-fuel concept. Online. Applied Energy. 2019, roč. 253, č. 113622. ISSN 0306-2619. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113622>. [cit. 2025-04-03].
(Přeloženo autorem.)

[30] BARDON, Paul a MASSOL, Olivier. Decarbonizing aviation with sustainable aviation fuels: Myths and realities of the roadmaps to net zero by 2050. Online. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2025, roč. 211, č. 115279, s. 3-13. ISSN 1364-0321. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115279>. [cit. 2025-04-12]. (Přeloženo autorem.)

[31] BARDON, Paul; MASSOL, Olivier a THOMAS, Arthur. Greening aviation with sustainable aviation fuels: Insights from decarbonization scenarios. Online. Journal of Environmental Management. 2025, roč. 374, č. 123943, s. 1-14. ISSN 0301-4797. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123943>. [cit. 2025-04-12]. (Přeloženo autorem.)

[32] KHALED MAHMUD, Kazi; SHEIKH, Wahidul a MOJAHID HOSSAIN CHOWDHURY, Mohammed. Decision framework for sustainability assessment of alternative fuels to achieve shipping decarbonization. Online. Ocean & Coastal Management. 2025, roč. 265, č. 107637, s. 1-21. ISSN 0964-5691. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2025.107637>. [cit. 2025-04-12].
(Přeloženo autorem.)

[33] PRUSSI, M.; NOUSSAN, M.; LAVENEZIANA, L. a CHIARAMONTI, D. The risk of increasing energy demand while pursuing decarbonisation: the case of the e-fuels for

the EU aviation sector. Online. Transport Policy. 2025, roč. 160, s. 1-5. ISSN 0967-070X. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2024.11.007>. [cit. 2025-04-12]. (Přeloženo autorem.)

[34] LORENZI, G.; MIGNINI, L.; VENEZIA, B.; SILVA, C. a SANTARELLI, M. Integration of high-temperature electrolysis in an HVO production process using waste vegetable oil. Online. Energy Procedia. 2019, roč. 158, s. 1-7. ISSN 1876-6102. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.465>. [cit. 2025-05-01]. (Přeloženo autorem.)

[35] CHOE, Changwon; LEE, Boreum a LIM, Hankwon. Sustainable and carbon-neutral green diesel synthesis with thermochemical and electrochemical approach: Techno-economic and environmental assessments. Online. Energy Conversion and Management. 2022, roč. 254, č. 115242, s. 1-10. ISSN 0196-8904. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115242>. [cit. 2025-05-04]. (Přeloženo autorem.)

[36] COLELLI, Leonardo; SEGNERI, Valentina; BASSANO, Claudia a VILARDI, Giorgio. E-fuels, technical and economic analysis of the production of synthetic kerosene precursor as sustainable aviation fuel. Online. Energy Conversion and Management. 2023, roč. 288, č. 117165, s. 1-25. ISSN 0196-8904. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117165>. [cit. 2025-05-04]. (Přeloženo autorem.)

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Proces výroby HVO	17
Obrázek 2: Proces výroby bioethanolu	18
Obrázek 3: Zobrazení barevných druhů vodíku	20
Obrázek 4: Proces výroby syntetických paliv zachycováním CO ₂ a produkcí H ₂	21
Obrázek 5: Použití a výroba PtL-petroleje.	27
Obrázek 6: Srovnání měrných energií fosilních a syntetických paliv	29
Obrázek 7: Stručný proces výroby DME.....	30
Obrázek 8: Reakce při výrobě DME přímou i nepřímou konverzí.....	31
Obrázek 9: Schéma přímé i nepřímé konverze DME	32
Obrázek 10: Kontinuální hydrodeoxygenace ligninu	35
Obrázek 11: MacFarlane Simonov článek.....	36
Obrázek 12: Terraformer	38
Obrázek 13: Terraform Industries chemický průběh.....	39
Obrázek 14: NANO Advanced PEM elektrolyzér.....	40

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

DME	Dimethyleter
PtL	Paliva z obnovitelné elektřiny
HVO	Hydrogenovaný rostlinný olej
ETBE	Ethylterc-buthylether
MTBE	Methylterc-buthylether
Bxx	Procentuální podíl paliva ve směsi
FAME	Methylester mastných kyselin
FAA	Alkyl mastné kyseliny
FAAE	Alkylester mastné kyseliny
HB	Haber-Boschův proces
FT/FTS	Fischer-Tropsch syntéza
PEM	Proton výměnná membrána
OMEx	Oxymethylen dimethylethery
MSC	Katalyzátor syntézy methanolu
MDS	Katalyzátor dehydratace methanolu
AlPO	Aluminofosfát
SAPO	Křemičito-hlinitofosfát
HPA	Heteropolykyseliny
SAF	Udržitelné letecké palivo
RCF	Reduktivní katalytická frakcionace
HDO	Hydrodeoxygenace ligninu
PS	Propylsyringol
PG	Propylguaiacol
PS-OH	Dihydrosinapylalkohol
PG-OH	Dihydrokoniferylalkohol

GPC	Gelová permeační chromatografie
GC-MS	Plynová chromatografie s hmotnostní spektrometrií
FE	Faradická účinnost
DAC	Systém přímého zachycování vzduchu
PF	Plasto palivo
PP	Polypropylen
PS	Polystyren
LDPE	Polyethylen o nízké hustotě
HDPE	Polyethylen o vysoké hustotě
PET	Polyethylentereftalát
PPL	Plasto benzín
MLMPW	Obecná směs smíšeného plastového odpadu
LPG	Zkapalněný petrolejový plyn
EV	Elektromobil
ICEV	Vozidla se spalovacím motorem
FCEV	Elektromobil s palivovým článkem