



Bakalářská práce

Vodík jako palivo – využití v různých typech dopravních prostředků

Studijní program:

B0715A270008 Strojírenství

Autor práce:

Vladimír Baraník

Vedoucí práce:

Ing. Aleš Dittrich, Ph.D., Ing.Paed.IGIP
Katedra vozidel a motorů

Liberec 2024



Zadání bakalářské práce

Vodík jako palivo – využití v různých typech dopravních prostředků

<i>Jméno a příjmení:</i>	Vladimír Baraník
<i>Osobní číslo:</i>	S22000358
<i>Studijní program:</i>	B0715A270008 Strojírenství
<i>Zadávající katedra:</i>	Katedra vozidel a motorů
<i>Akademický rok:</i>	2022/2023

Zásady pro vypracování:

- Zpracujte rešerši aktuálních trendů využití vodíku jako paliva pro různé dopravní prostředky. Zaměřte se především na řešení problematiky v rámci EU.
- Vyberte vhodné technické koncepty, které by bylo možné zkusit a vyvíjet (s ohledem na výzkumnou infrastrukturu) v rámci prostředí TUL.
- Výsledky budou využity interně na TUL.

Rozsah grafických prací: –
Rozsah pracovní zprávy: cca 40 stran textu
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: čeština

Seznam odborné literatury:

podklady zveřejněné Evropskou komisí / Evropským parlamentem
podklady firem AVL, Horiba,
běžně dostupné materiály – odborné časopisy, veletrhy, konference, internet.

Vedoucí práce: Ing. Aleš Dittrich, Ph.D., Ing.Paed.IGIP
Katedra vozidel a motorů

Datum zadání práce: 9. listopadu 2022

Předpokládaný termín odevzdání: 9. května 2024

L.S.

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
děkan

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
garant studijního programu

V Liberci dne 9. listopadu 2022

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

Vodík jako palivo

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá výzkumem využití a potenciálu vodíku jako paliva. Práce se zaměřuje na vlastnosti, formy výroby, skladování vodíku a způsoby využití vodíku jako paliva. Součástí práce je pevnostní a tepelná analýza pístu přestavěného z dieselového pohonu na vodíkový, který by mohl umožnit konverzi starších dieselových motorů nákladních automobilů nebo dieselových generátorů poháněných fosilním palivem na bezemisní palivo. Cílem této práce je poskytnout komplexní přehled o současném stavu a budoucích perspektivách využití vodíku jako nosiče energie se zvláštním zaměřením na jeho praktické využití a na výzvy, které je třeba překonat, aby se vodík stal klíčovým prvkem udržitelné energetické infrastruktury.

Klíčová slova

Vodík, vodíkový motor, Creo Simulate, MKP, palivo, automobily, píst

Hydrogen as a fuel

Abstract

This bachelor thesis deals with research into the use and potential of hydrogen as a fuel. The thesis focuses on the properties, forms of hydrogen production, hydrogen storage and ways of using hydrogen as a fuel. The thesis includes strength and thermal analysis of a piston converted from diesel to hydrogen propulsion, which could enable the conversion of older diesel truck engines or diesel generators powered by fossil fuel to an emission-free fuel. The aim of this thesis is to provide a comprehensive overview of the current status and future prospects for the use of hydrogen as an energy carrier, with a particular focus on its practical applications and the challenges that need to be overcome to make hydrogen a key element of a sustainable energy infrastructure.

Keywords

Hydrogen, hydrogen engine, Creo Simulate, FEM, fuel, cars, piston

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu závěrečné práce za vedení a rodině za podporu.

Obsah

1	Úvod	10
2	Teoretická část	11
2.1	Vlastnosti vodíku jako nositele energie.....	11
2.2	Způsoby získání a komplikace s tím spojené.....	12
2.2.1	Čistý x špinavý	13
2.3	Parní reformace zemního plynu.....	14
2.3.1	Elektrolýza vody	15
2.3.2	Přírodní naleziště.....	19
2.4	Skladování vodíku.....	19
2.4.1	Strategie skladování vodíku.....	19
2.4.2	Skladování stlačeného plynného vodíku	20
2.4.3	Skladování kapalného vodíku	20
2.4.4	Skladování vodíku na materiálové bázi	20
2.4.5	Budoucí směry v oblasti skladování vodíku	20
3	Vodík a EU	20
3.1.1	Legislativa a finanční podpora.....	21
3.2	Směr Evropské unie a aktuální postoj k využití vodíku v dopravě	21
3.2.1	Postoj České republiky k zavádění vodíku v dopravě	22
3.2.2	Green Deal	23
3.2.3	Vodíkové potrubí a skladování	23
3.2.4	Vodíková strategie České republiky	24
3.3	Předpokládaná cena nízkouhlíkového vodíku	24
4	Aktuální využití spalování vodíku	24
4.1	Mobilita.....	25
4.1.1	Osobní automobily	26
4.1.2	Silniční nákladní doprava.....	27
4.1.3	HICE – Hydrogen Internal Combustion Engine, neboli vodíkové spalovací motory.....	29
4.2	Energetika a zálohování energie	31
4.3	Průmysl	32
4.4	Domácnosti.....	34
5	Rozdíly mezi spalováním vodíku a konvenčních paliv	37
5.1	Porovnání spalování vodíku s fosilními palivy.....	37
6	Budoucí směry vývoje a výzkumu.....	38
7	Konverze pístu pro použití vodíku jako paliva v rámci ICE.....	39

7.1	Zavazbení, síťování a síly na pístu	44
7.2	Tepelné zatížení pístu	46
7.3	Výsledky simulace tlaku a teploty.....	48
7.4	Simulace kombinace tlaku a teploty	51
8	Vyhodnocení.....	54
9	Závěr	54
	Použitá literatura	56
	Obrázky	56
	Citace.....	57

1 Úvod

Otázka energetické bezpečnosti a udržitelnosti je v posledních letech jedním z nejdiskutovanějších témat v oblasti vědy, techniky a politiky. S rostoucími obavami ze změny klimatu a vyčerpání fosilních paliv roste zájem o alternativní zdroje energie. Jedním z nejslibnějších kandidátů je vodík, který může hrát klíčovou roli při přechodu k čistší a udržitelnější energetické budoucnosti. Tato práce se zaměřuje na vodík jako nosič energie, jeho vlastnosti, metody získávání, skladování a současné využití. Vodík má potenciál stát se čistým a účinným zdrojem energie, ale jeho výroba, skladování a distribuce čelí mnoha technickým a ekonomickým výzvám. Práce se zabývá také legislativními a ekonomickými aspekty využívání vodíku v Evropské unii a České republice. Teoretická část popisuje základní vlastnosti vodíku, různé metody jeho výroby, včetně parního reformingu zemního plynu a elektrolýzy vody, a komplikace spojené s těmito procesy. Následuje podrobný přehled metod skladování vodíku, včetně skladování stlačeného plynného vodíku, kapalného vodíku a vodíku na bázi materiálů. Práce rovněž analyzuje současný legislativní rámec a finanční podporu využívání vodíku v Evropské unii se zaměřením na odvětví dopravy, Zelenou dohodu a pojednává o strategii České republiky v této oblasti. Dále zkoumá současné využití vodíku ve spalovacích procesech, včetně mobility, energetiky, průmyslu a domácností. Porovnává spalování vodíku s konvenčními palivy z hlediska emisí, účinnosti a výkonu. V následující části dokumentu jsou nastíněny budoucí směry výzkumu a vývoje, které se zaměřují na předpokládané technologické inovace v oblasti vodíkových paliv. Závěrečná část práce se zabývá pístovou konverzí pro použití vodíkového paliva ve spalovacím motoru, zahrnující simulace tlaku a teploty, a vyhodnocuje výsledky těchto simulací. Cílem této práce je poskytnout komplexní přehled o současném stavu a budoucích perspektivách využití vodíku jako nosiče energie se zvláštním zaměřením na jeho praktické využití a na výzvy, které je třeba překonat, aby se vodík stal klíčovým prvkem udržitelné energetické infrastruktury.

2 Teoretická část

2.1 Vlastnosti vodíku jako nositele energie

Co je vodík a proč je pro nás tak důležitý? Vodík je chemický element označovaný symbolem „H“, který se nachází na prvním místě v periodické tabulce prvků. Má atomové číslo 1 a atomovou hmotnost přibližně 1,008 atomové hmotnostní jednotky, díky čemuž je nejmenším a nejjednodušším elementem aktuálně se nacházejícím v periodické tabulce prvků. Je tvořen jedním protonem a jedním elektronem. Zároveň je nejběžnější elementem ve vesmíru, tvoří neuvěřitelných 70 % objemu celého vesmíru. Za standardních podmínek (0 °C a tlaku 1 baru) je vodík plynného skupenství. Jeho plynné skupenství je dáno velmi nízkým bodem varu, který je hluboko pod typickými teplotami prostředí. Bod varu kapalného vodíku za běžného tlaku je 23 K neboli -250 °C. Plynný vodík je bezbarvý, díky čemuž je ve vzduchu neviditelný. Je také bez zápachu a bez chuti, což představuje problém pro detekci v případě úniku. Tyto vlastnosti vyžadují použití speciálních senzorů pro detekci v průmyslových a komerčních aplikacích. Hustota vodíku při 0 °C a jedné atmosféře je přibližně 0,08988 gramů na litr (g/l), což je výrazně méně než hustota vzduchu (přibližně 1,225 g/l). Tato nízká hustota přispívá ke vzniku vodíku, který při uvolnění rychle stoupá v atmosféře. Toto významně ovlivňuje jeho skladování a přepravu. Aby mohl být vodík používán jako praktický nosič energie, musí být buď stlačen pod vysokým tlakem, nebo zkapalněn při extrémně nízkých teplotách, aby se dosáhlo zvýšení jeho hustoty a docílilo možnosti jeho přepravy. Navzdory vysokému hmotnostnímu obsahu energie představuje nízká objemová hustota energie vodíku (v důsledku jeho nízké hustoty) problém. Například objemová hustota energie zkapalněného vodíku je přibližně 8 491 kJ/l, což je méně než u benzínu (přibližně 34 200 kJ/l). [4][5][18]

Molekulová struktura

Vodík se nejčastěji vyskytuje ve dvou atomární molekule H_2 . V této molekulové formě sdílejí dva atomy vodíku dvojici elektronů v kovalentní vazbě, která je jedním z nejjednodušších a nezákladnějších typů chemických vazeb. Sdílené elektrony poskytují každému atomu vodíku stabilní elektronovou konfiguraci, která se podobá konfiguraci nejbližšího vzácného plynu, helia. Tato krátká délka vazby přispívá ke stabilitě molekuly a také ovlivňuje vibrační frekvenci vazby, která následně ovlivňuje vlastnosti vodíku, včetně jeho infračervené absorpce. Vliv délky vazby na fyzikální vlastnosti je takový, že délka vazby má vliv na velikost molekul a Van der Waalovy síly mezi molekulami vodíku, které následně ovlivňují vlastnosti, jako je teplota varu a tání. Kratší délka vazby má obvykle za následek nižší mezimolekulární síly, což přispívá k extrémně nízkým teplotám varu a tání vodíku ve srovnání s jinými molekulami. [11]

Energetický obsah

Vodík je palivo s nejvyšším obsahem energie na hmotnost mezi běžně používanými palivy, poskytuje přibližně 120–142 megajoulů na kilogram (MJ/kg). To je téměř třikrát více energie na hmotnost než u uhlovodíkových paliv, jako jsou benzin a nafta. To činí vodík obzvláště atraktivním pro aplikace s vysokou energetickou náročností, jako je letectví, kosmický a hlubinný průzkum, kde hmotnost paliva významně ovlivňuje výkon a efektivitu. Pro představu o energetickém obsahu vodíku je dobré si uvědomit, že 1 kg vodíku má přibližně stejný energetický obsah jako 2,1 kg zemního plynu nebo 2,8 kg benzínu. Tato vysoká hustota energie na jednotku hmotnosti umožňuje delší dobu provozu

v aplikacích, jako jsou palivové články a spalovací motory, kde je nezbytné doplňovat palivo. Dolní výhřevnost vodíku (LHV) je přibližně 120 megajoulů na kilogram (MJ/kg), což představuje energii, která je skutečně k dispozici při spalování vodíku, přičemž vzniklá voda zůstává v parním stavu. V aplikacích pro vytápění a motory, kde se latentní výparné teplo vody nevyužívá, se běžně používá LHV. Vyšší výhřevnost (HHV) vodíku je přibližně 142 MJ/kg, což zahrnuje celkovou dostupnou chemickou energii včetně latentního tepla, tak i kondenzace vodní páry. Tento ukazatel má zvláštní význam při výpočtech chemických procesů a hodnocení účinnosti, kde lze kondenzační teplo využít. V palivových článcích se často uvádí vyšší výhřevnost vodíku, protože vyrobená voda obvykle kondenzuje a uvolňuje další teplo, které lze využít ke zvýšení účinnosti systému. Ačkoli má vodík vysokou gravimetrickou hustotu energie, jeho objemová hustota energie je relativně nízká. Tento rozdíl vzniká proto, že vodík jako plyn zaujímá větší objem než kapaliny, jako je například benzin. Pro praktické použití musí být vodík buď stlačen na vysoký tlak (přibližně 700 barů), nebo zkapalněn při extrémně nízkých teplotách (přibližně $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$), aby se zvýšila jeho objemová hustota. Teoretická maximální účinnost přeměny vodíku na práci (např. v tepelném motoru nebo palivovém článku) je dána jeho termodynamickými vlastnostmi a Carnotovou účinností. Nicméně praktické účinnosti jsou často nižší než teoretická maxima v důsledku přítomnosti ztrát v součástech systému, jako jsou palivové články nebo turbíny. [4][6]

Termodynamické vlastnosti

Teplota varu vodíku je $-252,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, což je jedna z nejnižších hodnot ze všech látek. Díky této vlastnosti patří mezi látky, které zůstávají v plynném stavu při většině přírodně dosažitelných teplot. Tento nízký bod varu vyžaduje speciální techniky manipulace a skladování, zejména kryogenní skladování, pokud je zapotřebí kapalný vodík. Pro skladování a přepravu kapalného vodíku je vhodné používat kryogenní nádrže, které jsou izolované, aby minimalizovaly absorpci tepla a zabránily odpařování vodíku a zvyšování jeho tlaku. Bod tání vodíku je $-259,16\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tato vlastnost má zásadní význam při zvažování aplikací v extrémně chladném prostředí, jako jsou vesmírné mise, kde by vodík mohl být potenciálně používán jako palivo nebo chladicí kapalina. Vodík má měrnou tepelnou kapacitu přibližně $14,304\text{ J/(g}\cdot\text{K)}$ při konstantním tlaku. Tato vysoká měrná tepelná kapacita znamená, že vodík může absorbovat více tepla při daném nárůstu teploty, což jej dělá efektivním pro aplikace, kde je tepelný management klíčový. Při cestování do vesmíru se vodík díky těmto vlastnostem používá jednak jako palivo, jednak i jako chladicí kapalina. Tepelná vodivost vodíku je také výrazně vyšší než u většiny ostatních plynů, což usnadňuje účinný přenos tepla. Tato vlastnost umožňuje navrhovat systémy, které mohou rychle vyrovnávat teplotní nárůst, což pomáhá předcházet vzniku horkých míst, které by mohly vést k poruše zařízení nebo snížení účinnosti. Latentní vypařovací teplo vodíku je přibližně 446 kJ/kg , což je energie potřebná k přeměně vodíku z kapaliny na plyn. [12]

2.2 Způsoby získání a komplikace s tím spojené

Snaha o získání jakéhokoli zdroje vodíku, ať už přírodního nebo umělého, je spojena s řadou problémů a komplikací, které je třeba zvládnout. I když objev přírodních ložisek vodíku není zcela vyloučen, zůstává vzácným úkazem. Proto je nutné vyvinout alternativní zdroje výroby vodíku. Je pozoruhodné, že přibližně až 73 % [18] hmoty viditelného vesmíru je ve formě vodíku. Avšak v současné době neexistuje žádné řešení, jak tento vodík získat a dopravit jej na povrch Země. To podporuje význam vývoje spolehlivých a ekologických alternativ pro výrobu vodíku z různých zdrojů. Existují čtyři hlavní metody

výroby vodíku, přičemž hlavní rozdíl spočívá v dopadu na životní prostředí. Na základě právě tohoto dopadu lze klasifikovat vodík jako čistý nebo špinavý. Hlavním důvodem pro prosazování vodíku je dopad na životní prostředí, který je neoddělitelně spojen s používáním čistého vodíku. V opačném případě by nemělo smysl se touto cestou vydávat. Nahlédněme hlouběji do těchto dvou kategorií a čtyř hlavních procesů výroby vodíku. [7][9]

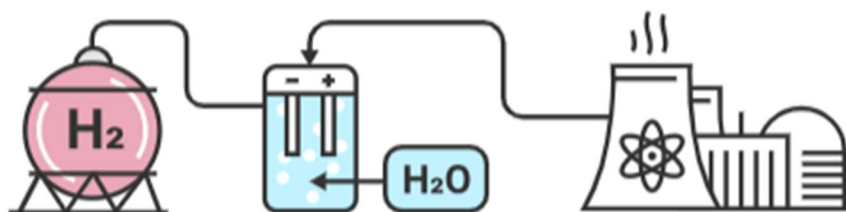
2.2.1 Čistý x špinavý

Jak jsme si již přiblížili, vodík není vždy získáván stejným způsobem. Některé metody zanechávají větší uhlíkovou stopu než ostatní. Díky tomu vodík, jakožto alternativní zdroj energie, dále dělíme do čtyř podkategorií právě na základě způsobu jeho získání. Toto rozdělení je spojené s množstvím produkovaných emisí skleníkových plynů. Standardně odlišujeme „čistý“ a „špinavý“ vodík. Také se můžeme setkat s pojmy „zelený“, „růžový“, „modrý“, „šedý“. [7]



Obrázek 1 Zelený vodík [60]

Zelený, nebo také bezemisní vodík se získává z vody pomocí elektrolýzy. Podmínkou výroby zeleného vodíku je získání potřebné energie z obnovitelných zdrojů.



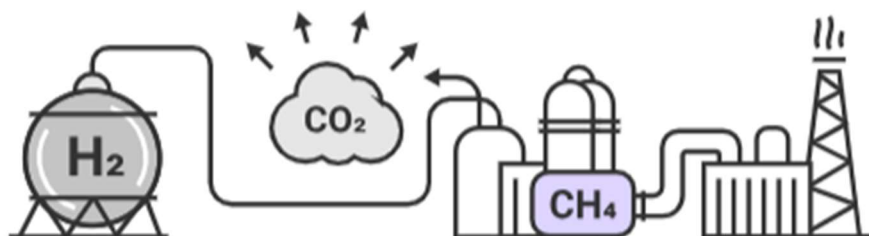
Obrázek 2 Růžový vodík [60]

Růžový vodík se také získává elektrolýzou vody, ale pomocí přebytečného tepla a elektřiny z jaderných elektráren.



Obrázek 3 Modrý vodík [60]

Modrý vodík se získává ze zemního plynu, bohužel jsou s tímto procesem spojeny emise CO₂. Podmínkou produkce modrého vodíku je zachycení, následné uskladnění uniklého CO₂ a jeho případné využití (tzv. CCS).



Obrázek 4 Šedý vodík [60]

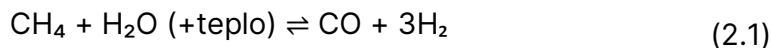
Šedý vodík se také vyrábí ze zemního plynu, avšak při výrobě nejsou zachycovány emise CO₂. V současnosti je tento druh vodíku nejrozšířenější.

2.3 Parní reformace zemního plynu

Jedná se o nejběžnější metodu výroby vodíku v technologickém průmyslu. Metan (CH₄) získaný ze zemního plynu se smísí s vodní párou při velmi vysokých teplotách (obvykle od 700 až do 1 000 °C) a při velmi vysokých tlacích (od 20 do 30 barů) a dochází k následujícím reakcím.

Primárními reakcemi jsou:

Reakce parního reformingu:



Reakce posunu vody a plynu



Podporu produkce vodíku můžeme docílit zvýšením teploty, ale i to má své meze. Pokud zvýšíme teplotu příliš, může dojít k deaktivaci katalyzátoru. [8][10]

Katalyzátory:

V procesu parní reformace se obvykle používají katalyzátory na bázi niklu, které podporují disociaci (proces, při kterém dochází ke štěpení molekul či komplexů na dvě nebo více molekul) metanu a vodní páry.

Účinnost parní reformace se obvykle pohybuje v rozmezí 65 % až 75 %. Což znamená, že pouze toto procento metanu se konvertuje na vodík, zbytek zůstává nedotčený. Jedna z výzev je ukládání uhlíku na povrchu katalyzátoru tzv. koksování, což snižuje účinnost procesu. Obtíž v tomto procesu je řízení tepla a regulování teplotních gradientů.[21]

Ekologický dopad

Bohužel se k tomuto procesu váže velmi negativní vlastnost, a to vysoké emise CO₂ kvůli obsahu uhlíku v použitých surovinách. V roce 2021 tvořily průměrné emise CO₂, během procesu parní reformace přibližně 9 kg CO₂ na výrobu jednoho kilogramu vodíku, nebo 75 g CO₂ na MJ energie vodíku (při použití nízké výhřevnosti vodíku). Kvůli tomuto procesu parní reformaci zařazujeme do kategorie „špinavých“ procesů. [22][23]

2.3.1 Elektrolýza vody

Metoda využití rozkladu vody na kyslík a vodík pomocí elektrického proudu, probíhá v zařízení zvaném elektrolyzátor. Voda, ve které je rozpuštěn elektrolyt, obvykle hydroxid draselný nebo hydroxid sodný, se v prostoru dostává. Metoda využití rozkladu vody na kyslík a vodík pomocí elektrického proudu probíhá v zařízení zvaném elektrolyzátor. Voda, ve které je rozpuštěn elektrolyt, obvykle hydroxid draselný nebo hydroxid sodný, se v prostoru dostává mezi dvě elektrody – kladnou anodu a zápornou katodu. Tato metoda patří mezi způsoby, které jsou v ČR realizovány velmi ojediněle. Pokud v procesu elektrolýzy využijeme elektrickou energii získanou z obnovitelných zdrojů, může tento proces být zcela bezemisní. Bohužel však tato informace neplatí pro ČR, kde vzhledem k energetickému mixu takto vyrobený vodík zanechává vysokou uhlíkovou stopu. V praxi rozlišujeme tři typy elektrolýzy vody. Hlavními rozdíly jsou druhy elektrolytu a teplot, při kterých proces probíhá. Kromě energetických nároků (55 kWh/kg) je také potřeba vysoce čistá voda o objemu 9 litrů na 1 kg H₂. [24]

Alkalická metoda

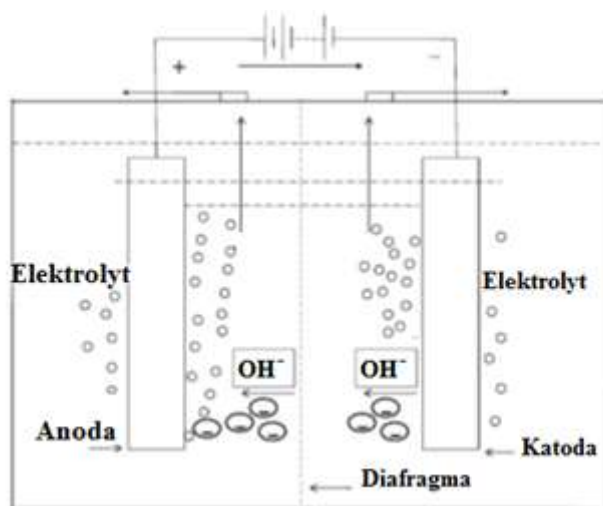
Nejstarším, nejrozšířenějším a průmyslově nejzvládnutějším typem elektrolýzy vody je alkalická elektrolýza. Je levná a poměrně snadná, probíhá za nízkých teplot, konkrétně při 80 °C, a napětí 1,8–2,4 V. [24]

Reakce na katodě



Reakce na anodě





Obrázek 5 Schéma procesu alkalické elektrolýzy vody [24]



Obrázek 6 Alkalická elektrolýza voda [24]

PEM elektrolýza vody

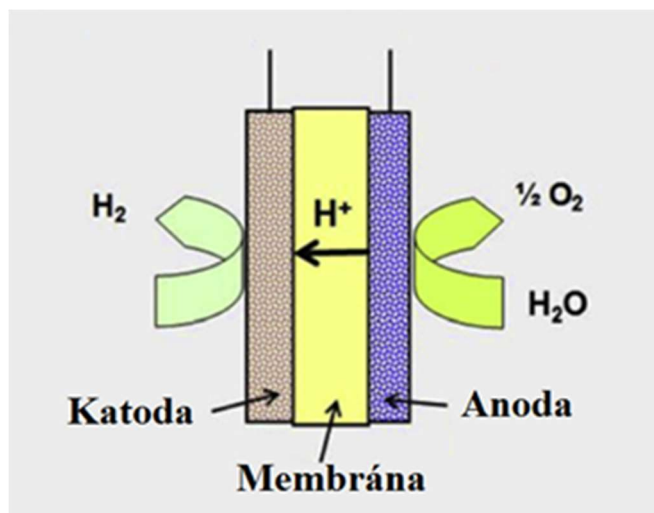
Elektrolýza využívající polymerní membránu (PEM) pracuje při teplotách vody 50–80 °C a tlacích do 3 MPa. Napětí se pohybuje mezi 1,8–2,2V. Jako separátor anodového a katodového prostoru slouží neporézní polymerní membrána, která propouští pouze kladně nabitě ionty. [24]

Anoda



Katoda





Obrázek 7 Schéma zero gap uspořádání PEM elektrolýzy vody [24]



Obrázek 8 PEM elektrolýza vody [24]

Hlavními výhodami PEM jsou vysoká flexibilita procesu, dosahované proudové účinnosti a kompaktnost zařízení.

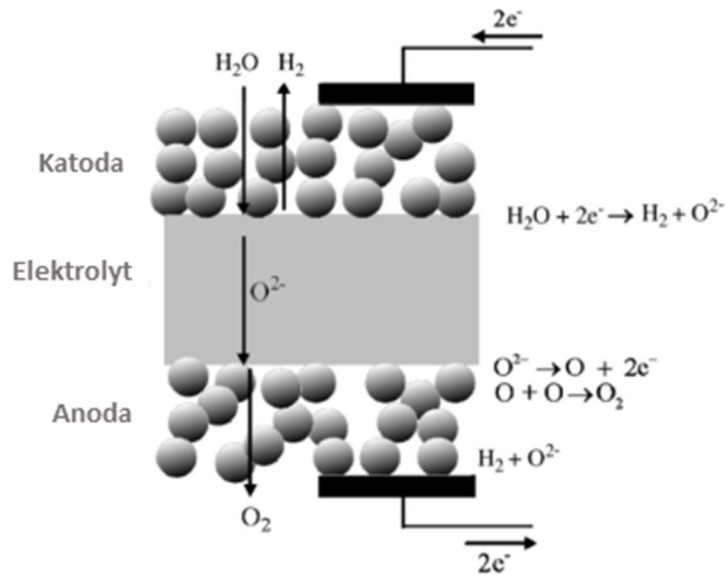
Vysokoteplotní elektrolýza

Vysokoteplotní elektrolýza, také nazývaná parní analýza, je specifická tím, že dodávaná energie je tvořena elektrickou energií a energií přivedenou formou tepla. Pracovní teploty se pohybují okolo 800 °C. Reakce probíhají ve vysokoteplotním elektrolyzátoru, do kterého vstupuje pára a voda. Výstupem je směs obsahující 75 % hmotnostních vodíku a 25 % hmotnostní páry. Z ní je oddělen iont kyslíku, který prochází skrze membránu. Vodík je pak z páry oddělen v kondenzační jednotce. Zatímco při teplotě 100 °C je pro elektrolýzu třeba 207 MJ na získání 1 kg vodíku, při teplotě 850 °C stačí pro výrobu stejného množství vodíku pouze 133 MJ. [24]

Katoda



Anoda



Obrázek 9 Princip vysokoteplotní elektrolýzy vody [24]



Obrázek 10 Vysokoteplotní elektrolýza vody [24]

2.3.2 Přírodní naleziště

Přírodní vodík se nachází v podzemních geologických úložištích v plynné formě H_2 a vzniká různými přírodními procesy. Mezi ně patří například serpentinizace, to je proces, kdy horniny bohaté na olivín reagují s vodou, dále radiolýza vody, při níž záření štěpí vodu na vodík a kyslík. Ve srovnání s šedým vodíkem, který se získává z fosilních paliv, má přírodní vodík výrazně menší emisní stopu, což z něj činí ekologicky šetrnější alternativu. Historie objevu přírodního vodíku sahá až do roku 1987, kdy se při neúspěšném pokusu o vrtání vody v Bourakébougou v Mali nečekaně objevil hořlavý plyn. Tento plyn byl následně identifikován jako přírodní vodík, který poté zásoboval místní vesnici čistým zdrojem energie. Tento náhodný objev povzbudil další zájem a výzkum ložisek přírodního vodíku. Těžba přírodního vodíku představuje řadu významných technických problémů. Tento proces vyžaduje použití specializovaných vrtných technik, které jsou schopny proniknout do hlubokých geologických vrstev. Kromě toho manipulace s vodíkem vyžaduje zavedení přísných bezpečnostních opatření, vzhledem k jeho vysoce hořlavé povaze a možnosti vzniku výbušných směsí se vzduchem. V dlouhodobém horizontu má úspěšný vývoj technologií pro těžbu a využití přírodního vodíku potenciál pomoci dosáhnout cíle uhlíkové neutrality. V hloubce přibližně 1 000 metrů v jednom z albánských dolů bylo objeveno významné ložisko přírodního vodíku (únor 2024). Objev byl učiněn během geologického průzkumu prováděného za účelem identifikace potenciálních přírodních zdrojů. Předpokládá se, že plynný vodík vznikl kombinací geologických procesů, včetně již zmíněné serpentinizace. Geologický význam tohoto objevu v Albánii je dvojnásobný. Zaprvé, pozoruhodný objem zjištěného plynného vodíku, který naznačuje, že taková ložiska mohou být častější a významnější, než se dosud předpokládalo. Zadruhé, objev tohoto ložiska v Albánii doplňuje rostoucí počet důkazů o tom, že přírodní vodík může být významným a rozšířeným zdrojem energie. Geologické prostředí Albánie, které je specifické svým typem hornin, je velice příznivé pro tvorbu přírodního vodíku, a to může vést k dalším objevům v podobných oblastech. Nicméně stále existuje značná míra nejistoty ohledně procesů, které vedou ke vzniku přírodního vodíku, jeho výskytu v Zemi a optimálních metod jeho získávání. [25][26][27]

2.4 Skladování vodíku

Význam skladování vodíku

Již jsme si přiblížili vlastnosti vodíku a metody získávání, nyní je zásadní se pobavit o způsobu skladování, který přímo ovlivňuje jeho účinnost jako paliva. Místo výroby a místo spotřeby nejsou vždy stejné, proto skladování vodíku hraje důležitou roli ve vodíkové technologii, která přináší jedinečné výzvy i příležitosti. Vodík, navzdory své vysoké energetické hmotnosti, představuje problém při skladování kvůli své nízké objemové hustotě energie za okolních podmínek, pokud není stlačený. Z tohoto důvodu je nezbytné maximalizovat praktické využití vodíku jak v dopravě, tak i pro stacionární účely. [7]

2.4.1 Strategie skladování vodíku

Vzhledem k různorodému využití vodíku od pohonu vozidel přes vytápění domácností až po průmyslové využití, musí být způsob skladování zvolen na základě požadavků

konkrétní potřeby. V následující části jsou popsány tři základní metody skladování vodíku, z nichž každá má své výhody a je vhodná pro různé aplikace.

2.4.2 Skladování stlačeného plynného vodíku

V navázání na dříve diskutované chemické vlastnosti vodíku lze dojít k závěru, že nejjednodušší metodou je skladování pod vysokým tlakem. Vodík se obvykle stlačuje pod tlakem 350 až 700 barů neboli 5 000 až 10 000 psi a skladuje se ve válcových nádržích vyrobených z moderních kompozitních materiálů. Tato metoda je oblíbená pro svou jednoduchost a efektivitu nákladů. Nejčastější využití je pro uložení stacionární energie. [28]

2.4.3 Skladování kapalného vodíku

Vodík lze skladovat také v kapalném stavu v kryogenních podmínkách při extrémně nízké teplotě -253 °C . Tento způsob výrazně zvyšuje hustotu vodíku. Kompaktní skladování je vhodné pro aplikace citlivé na prostor, například v letectví a kosmonautice. Energie potřebná ke zkapalnění a udržení vodíku v tomto stavu však představuje ekonomický a ekologický problém. [28]

2.4.4 Skladování vodíku na materiálové bázi

Skladování na bázi materiálů, které zabudovává vodík do pevných látek, vykazuje možnosti zlepšení z hlediska bezpečnosti a energetické náročnosti. Fungování této metody je založeno na fyzikálních a chemických interakcích vodíku a materiálů, kde nejvýraznější funkční vlastnosti vykazují hydridy kovů nebo organické rámce. Obě technologie s největší pravděpodobností prokážou vyšší kapacitu skladování a nižší provozní nebezpečí, ačkoli jsou vzhledem k nákladům, rychlosti uvolňování vodíku a dlouhodobé stabilitě látek ve fázi vývoje. [28]

2.4.5 Budoucí směry v oblasti skladování vodíku

Klíčovým faktorem pro využití potenciálu vodíku jako čistého a udržitelného paliva bude efektivní integrace těchto metod skladování do infrastruktury vodíku. Probíhající výzkum směřuje k zvýšení jeho výkonnosti a snížení nákladů, které budou rozhodujícím faktorem pro dosažení širokého rozšíření vodíku v budoucím energetickém systému, který je založen na obnovitelných zdrojích. [28]

3 Vodík a EU

Evropská unie, dále jen EU, se zavázala dosáhnout k roku 2050 klimatické neutrality, což je cíl, který bude vyžadovat významné změny v několika odvětvích, zejména v dopravě. Vodík, který je uznáván pro svůj potenciál výrazně snížit emise skleníkových plynů, je základním kamenem strategie EU pro udržitelný a integrovaný energetický systém. Tento segment se zabývá otázkou směřování a současného postoje EU k využívání vodíku v dopravě a rozvojem vodíkové infrastruktury a distribuce ve střední Evropě. [54]

3.1.1 Legislativa a finanční podpora

EU poskytuje významnou legislativní a finanční podporu na urychlení zavádění vodíku v dopravě. Iniciativy, jako je Aliance pro čistý vodík a programy financování, jako je Horizont Evropa a Nástroj pro propojení Evropy, mají za cíl podpořit inovace, vybudovat infrastrukturu a vytvořit konkurenceschopný trh s vodíkem. Cílem těchto iniciativ je podpora výzkumu, vývoje, rozšiřování výrobních kapacit a rozvoj nezbytné infrastruktury pro vodíkovou mobilitu. [55]

Z legislativního hlediska přijala EU několik směrnic a nařízení na podporu využívání vodíku v dopravě. Směrnice o obnovitelných zdrojích energie (RED II) obsahuje ustanovení o začlenění vodíku z obnovitelných zdrojů do odvětví dopravy a stanoví konkrétní cíle pro obnovitelná paliva nebiologického původu (RFNBO). Kromě toho směrnice EU o infrastruktuře pro alternativní paliva (AFID) vyžaduje, aby členské státy vypracovaly vnitrostátní politické rámce, které zajistí zavedení odpovídající infrastruktury pro doplňování vodíku. [54]

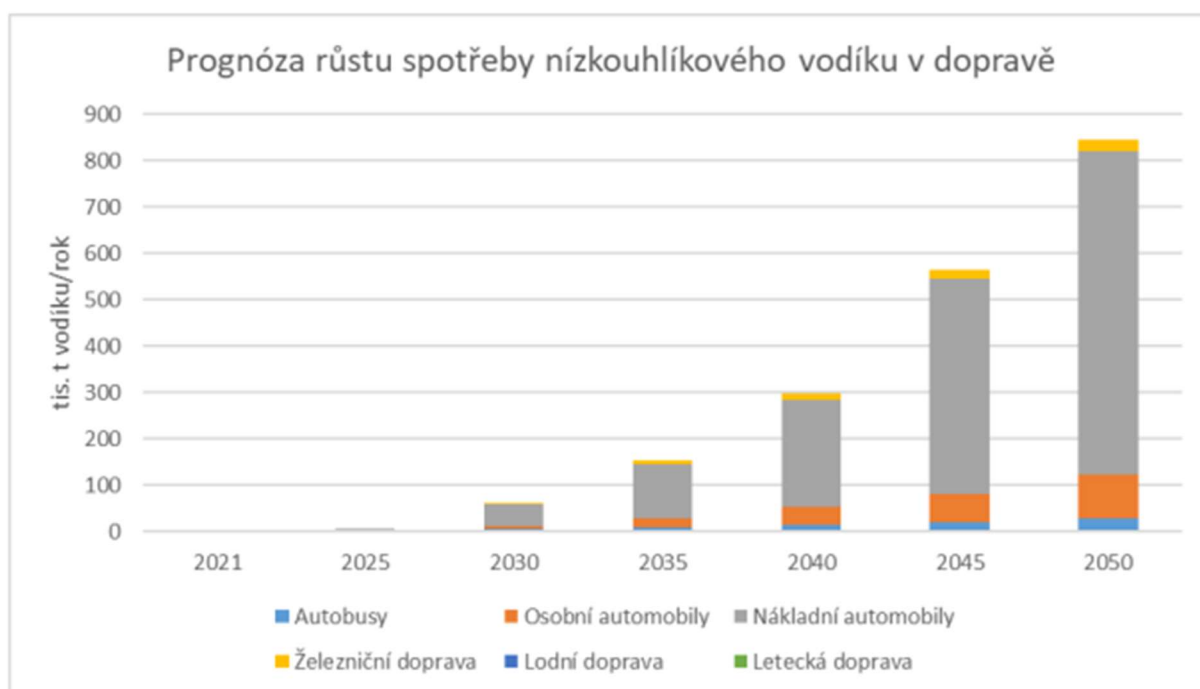
Z finančního hlediska EU vyčlenila značné finanční prostředky na podporu vodíkových projektů prostřednictvím různých nástrojů. Evropská investiční banka (EIB) poskytuje finanční prostředky na projekty vodíkové infrastruktury, zatímco Inovační fond a Evropský fond pro regionální rozvoj (EFRR) nabízejí granty na výzkum, vývoj a zavádění vodíkových technologií. Tato finanční podpora má zásadní význam pro snížení nákladů na vodíkové technologie a jejich konkurenceschopnost s konvenčními fosilními palivy. [55]

3.2 Směr Evropské unie a aktuální postoj k využití vodíku v dopravě

Vodíková strategie Evropské komise zdůrazňuje zásadní roli vodíku při dosažení hluboké dekarbonizace, zejména v odvětvích, kde je elektrifikace náročná. Strategie uvádí postupný přístup, který začíná dekarbonizací stávající výroby vodíku a následně rozšiřováním výroby zeleného vodíku z obnovitelných zdrojů energie. Cílem je do roku 2030 vyrobit 10 milionů tun vodíku z obnovitelných zdrojů, přičemž se zpočátku zaměří na odvětví, kde je využití vodíku již zavedené, jako je rafinérská a chemická výroba, a poté se rozšíří na mobilitu a další odvětví. [55]

Vodík je považován za klíčové řešení pro snížení emisí v odvětví dopravy, zejména v dálkové nákladní dopravě, autobusové dopravě, železniční a lodní dopravě. Tato odvětví vyžadují vysokou energetickou hustotu a dlouhé intervaly pro doplňování paliva, což činí bateriově-elektrická řešení méně proveditelnými. Slibnou alternativou představují vodíkové palivové články, které poskytují potřebný dojezd a výkon bez dlouhých dob nabíjení spojených s bateriovými elektromobily. [55]

Kromě toho EU stanovila ambiciózní cíle pro zvýšení podílu energie z obnovitelných zdrojů v odvětví dopravy a pro podporu zavádění vozidel s vodíkovými palivovými články (FCV) a vodíkových čerpacích stanic (HRS). Do roku 2030 chce EU instalovat nejméně 40 GW elektrolyzátorů a rozsáhlou síť HRS na podporu vozidel FCV. To je součástí širšího cíle, kterým je zajistit, aby do roku 2030 bylo v celé Evropě v provozu nejméně 5 000 vodíkových čerpacích stanic. [54]



Obrázek 11 Prognóza růstu spotřeby nízkouhlíkového vodíku v dopravě, ČR [7]

3.2.1 Postoj České republiky k zavádění vodíku v dopravě

Česká republika se aktivně věnuje integraci vodíku do odvětví dopravy v rámci svého Národního akčního plánu čisté mobility. Plán stanovuje konkrétní cíle pro zavádění vodíkových vozidel, včetně autobusů, osobních a nákladních automobilů, a pro rozvoj infrastruktury pro doplňování vodíku.

Vodíkové autobusy: Očekává se, že počet vodíkových autobusů se zvýší z 1 v roce 2021 na 4600 v roce 2050. Plán počítá s výrazným nárůstem počtu nových registrací, přičemž cílem je dosáhnout 13 % všech nových registrací autobusů do roku 2040. U spotřeby vodíku v tis t/rok u autobusové dopravy se předpokládá zvýšení z aktuální 1 na 15 v roce 2024, při nájezdu 60 000 km/rok a spotřebě 10 kg/100 km. [7][57]

Osobní automobily na vodík: Česká republika si klade za cíl zvýšit počet osobních automobilů na vodík z 2 v roce 2021 na 600 000 v roce 2050. Do roku 2040 se očekává, že vodíkové osobní automobily budou tvořit 9,6 % všech nových registrací automobilů, s předpokládanou spotřebou vodíku 38 tis t/rok. [7][57]

Vodíková nákladní vozidla: Předpokládá se, že počet vodíkových nákladních automobilů vzroste z 0 v roce 2021 na 60 000 v roce 2050 a do roku 2045 budou vodíkové nákladní automobily představovat 13,2 % všech nových registrací nákladních automobilů. [7][57]

Tyto cíle jsou podporovány politikami na zlepšení vodíkové infrastruktury, jako je zvýšení počtu vodíkových čerpacích stanic a integrace kapacit na výrobu vodíku. Přístup České republiky je v souladu s širšími cíli EU v oblasti snižování emisí skleníkových plynů a podpory udržitelných dopravních řešení. [57]

3.2.2 Green Deal

Evropská Zelená dohoda, kterou Evropská komise představila v prosinci 2019, stanovuje plán, jak učinit hospodářství EU udržitelným. Zdůrazňuje potřebu výrazného snížení emisí skleníkových plynů a nastiňuje řadu strategií k dosažení klimatické neutrality do roku 2050. Vodík hraje v této vizi zásadní roli, zejména při dekarbonizaci odvětví dopravy. Jedním z hlavních cílů Zelené dohody je přechod na čistší formy energie a snížení závislosti na fosilních palivech. Podpora vodíkových palivových článků a vytvoření vodíkové infrastruktury jsou nedílnou součástí tohoto přechodu. Zelená dohoda zahrnuje následující klíčové cíle a opatření týkající se vodíku:

Zvýšení podílu obnovitelných zdrojů energie: Cílem Zelené dohody je zvýšit podíl obnovitelné energie v energetickém mixu EU. To zahrnuje využívání obnovitelného vodíku vyráběného elektrolýzou poháněnou obnovitelnými zdroji energie, jako je větrná a solární energie.[55]

Rozvoj vodíkové infrastruktury: Strategie vyzývá k instalaci nejméně 40 GW elektrolyzérů do roku 2030 k výrobě obnovitelného vodíku. Zahrnuje také zavedení sítě vodíkových čerpacích stanic na podporu rostoucího počtu vozidel s vodíkovými palivovými články. [54]

Podpora vozidel na vodíkové palivové články (FCV): Zelená dohoda uvádí konkrétní opatření na podporu zavádění vozidel FCV, včetně dotací, daňových pobídek a financování výzkumu a vývoje.[55]

Vodíková infrastruktura ve střední Evropě je zatím v počáteční fázi, ale několik klíčových projektů a aktivit se již realizuje. Politika EU v oblasti transevropské dopravní sítě zahrnuje plány na integraci vodíkových čerpacích stanic podél hlavních dopravních koridorů, čímž se usnadní přeshraniční vodíková mobilita. Tato síť má zásadní význam pro podporu dálkové dopravy a snížení emisí na celém kontinentu. [54]

Země jako Německo a Nizozemsko jsou v čele rozsáhlých projektů vodíkové infrastruktury. Německá národní vodíková strategie si klade za cíl vybudovat do roku 2030 kapacitu 5 GW elektrolyzérů a zahrnuje významné investice do infrastruktury pro doplňování vodíku. Podobně ambiciózní plány v oblasti výroby a distribuce vodíku má i Nizozemsko, které se zaměřuje na integraci vodíku do stávající plynové sítě a vytvoření sítě čerpacích stanic. [55]

3.2.3 Vodíkové potrubí a skladování

Spolehlivá vodíková infrastruktura vyžaduje nejen čerpací stanice, ale také potrubí a skladovací kapacity. Iniciativa European Hydrogen Backbone navrhuje vybudování specializované vodíkové potrubní sítě, která by propojila místa výroby vodíku s klíčovými centry odběru, včetně hlavních dopravních uzlů. Cílem této sítě je přeměnit stávající plynovody na potrubí pro přepravu vodíku, což výrazně sníží náklady na infrastrukturu a usnadní distribuci vodíku ve velkém měřítku. [54]

Velký význam pro vyrovnávání nabídky a poptávky mají také skladovací zařízení, zejména s ohledem na nestálou povahu obnovitelných zdrojů energie používaných pro výrobu zeleného vodíku. EU podporuje vývoj rozsáhlých řešení pro skladování vodíku,

včetně podzemního skladování v solných jeskyních a vysokotlakých nádržích, s cílem zajistit stabilní dodávky vodíku. [55]

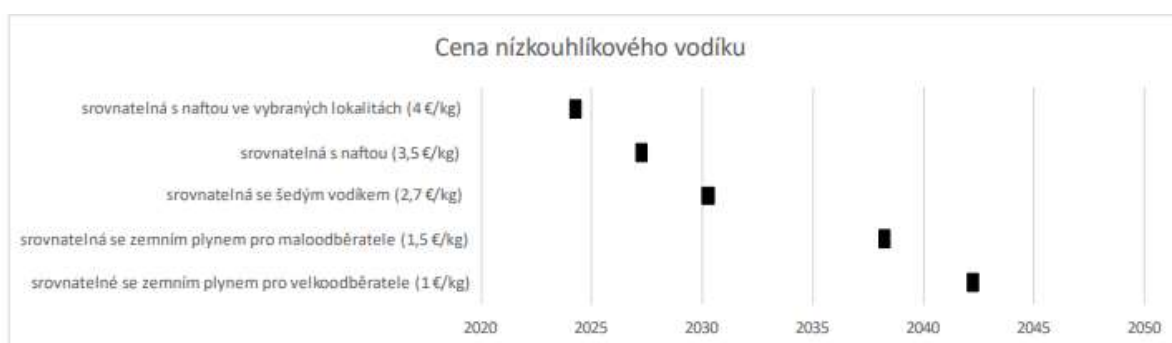
3.2.4 Vodíková strategie České republiky

Česká republika se v rámci své národní vodíkové strategie zabývá rozvojem vodíkové infrastruktury v souladu s širšími cíli EU. Strategie vymezuje následující hlavní cíle a iniciativy:

Výroba vodíku je klíčovým aspektem národní vodíkové strategie. Česká republika si stanovila cíl vyrábět vodík především z obnovitelných zdrojů s využitím stávající průmyslové infrastruktury a potenciálu obnovitelných zdrojů energie. Cílem je dosáhnout do roku 2030 významné kapacity výroby vodíku, a to zejména se zaměřením na výrobu zeleného vodíku elektrolýzou vody. Dalším klíčovým cílem je rozvoj infrastruktury. Strategie představuje plány na zřízení vodíkových čerpacích stanic podél hlavních dálnic a v městských centrech. Cílem je mít do roku 2030 několik desítek funkčních stanic, a tím usnadnit přijetí vozidel s vodíkovými palivovými články ve veřejné i soukromé dopravě. Kromě toho si česká vláda stanovila cíl integrovat vodík do národní energetické sítě, a tím usnadnit využití vodíku pro dopravu i skladování energie. To zahrnuje zkoumání možností přestavby stávajících plynovodů na přepravu vodíku a v případě potřeby i rozvoj nové infrastruktury. Strategie vymezuje opatření, která mají zaručit bezpečnou a efektivní přepravu vodíku a zahrnují regulační úpravy a investice do infrastruktury. [7]

3.3 Předpokládaná cena nízkouhlíkového vodíku

Rozhodujícím faktorem pro vytvoření trhu s vodíkem je cenová konkurenceschopnost nízkouhlíkového vodíku ve srovnání s konvenčními palivy a jinými formami vodíku. Následující graf znázorňuje předpokládaný vývoj ceny nízkouhlíkového vodíku v letech 2020 až 2050:

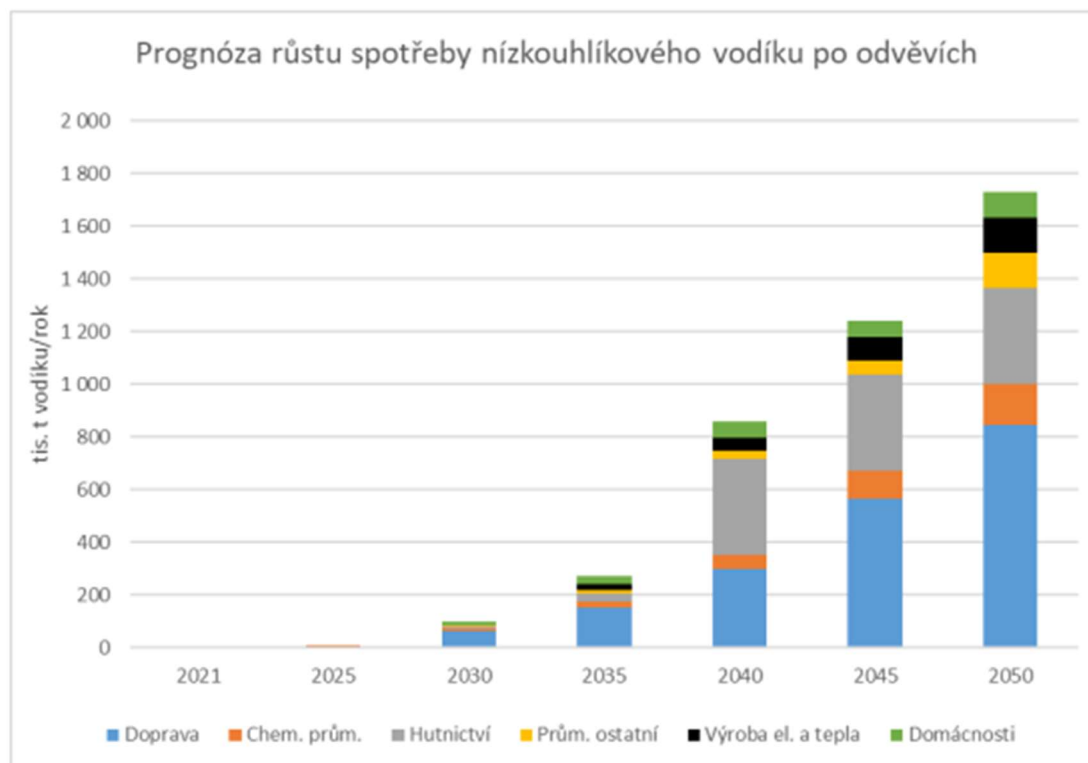


Obrázek 12 Cena nízkouhlíkového vodíku [7]

4 Aktuální využití spalování vodíku

V současné době, kdy celosvětová energetika přechází na udržitelnost, je vodík se svými jedinečnými chemickými a fyzikálními vlastnostmi stále více považován za základní stavební kámen této transformace. Tato část se bude zabývat technickým využitím vodíku jako paliva v různých odvětvích se zaměřením na jeho úlohu při průmyslové dekarbonizaci energeticky náročných odvětví, zvýšení energetické bezpečnosti a bezproblémové

integraci do stávajících i budoucích energetických infrastruktur. O všestrannosti vodíku svědčí široká škála aplikací od mobilních přes stacionární energetická řešení a vysoce energetické průmyslové procesy až po každodenní spotřebu. [7]



Obrázek 13 Prognóza růstu spotřeby nízkouhlíkového vodíku po odvětvích, ČR [7]

4.1 Mobilita

Vodík jako palivo v dopravě nabízí realizovatelnou cestu ke snížení závislosti na fosilních palivech a minimalizaci dopadů na životní prostředí. Tento přístup zahrnuje využití vodíku nejen ve spalovacích motorech, ale také v technologii palivových článků, která přeměňuje vodík přímo na elektřinu. Širší přijetí vodíku jako paliva v dopravě je podmíněno nejen změnou zdroje energie, ale také překonáním různých technologických, infrastrukturních a ekonomických problémů.

Technologické základy vodíkových palivových systémů

Vodík lze v dopravě využívat dvěma základními způsoby: prostřednictvím vodíkových spalovacích motorů a vodíkových palivových článků. Zatímco spalovací motory využívají vodík podobně jako tradiční paliva ve spalovacích motorech (ICE), palivové články představují účinnější a ekologicky šetrnější technologii, která vyrábí elektřinu chemickou reakcí vodíku s kyslíkem, přičemž vzniká pouze vodní pára a teplo.

Výhody vodíku jako paliva

1. Nulové emise uhlíku

Při použití vodíku v palivových člancích nevznikají žádné emise uhlíku, což představuje významný přínos pro životní prostředí oproti běžným fosilním palivům.

2. Energetická účinnost

Palivové články jsou obecně účinnější než spalovací motory, protože přímo přeměňují chemickou energii na elektrickou, optimalizují tím výkon a snižují energetické ztráty obvykle spojené s tepelnými procesy.

3. Flexibilita a škálovatelnost

Vodík lze v dopravě uplatnit v různých měřítcích a aplikacích, od malých osobních vozidel až po velké autobusy a systémy pro nákladní dopravu, a dokonce i v letectví a námořní dopravě.

Výzvy při zavádění vodíkových paliv

1. Požadavky na infrastrukturu

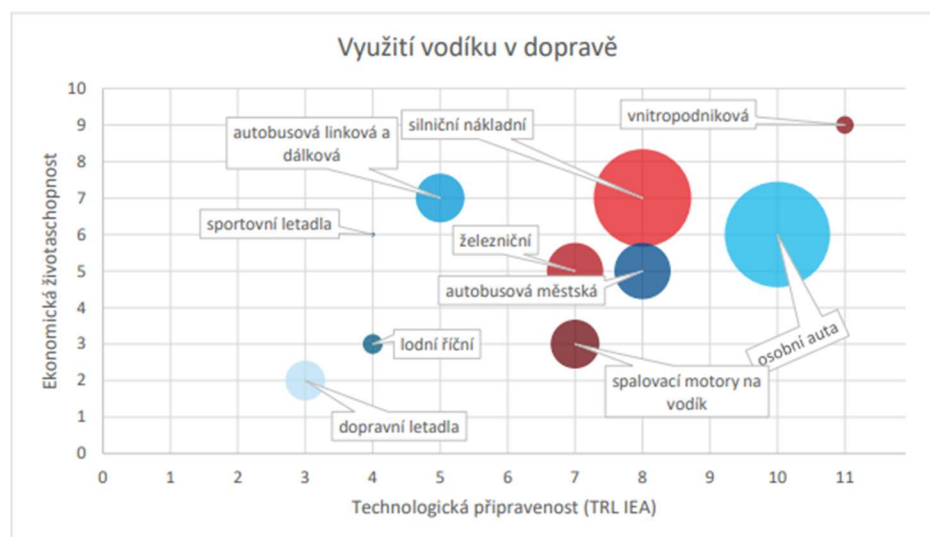
Vývoj potřebné infrastruktury pro tankování vodíku je velkou překážkou. Infrastruktura zahrnuje výrobní zařízení, skladovací jednotky a výdejní stanice, které vyžadují značné kapitálové investice a koordinaci.

2. Výroba a dodávky vodíku

V současné době se většina vodíku vyrábí ze zemního plynu, což s sebou nese emise uhlíku. Rozšíření výroby ekologického vodíku, který se vyrábí z obnovitelných zdrojů energie elektrolýzou vody, má zásadní význam pro skutečné využití přínosů vodíku pro životní prostředí.

3. Ekonomické faktory

Náklady spojené s vodíkovými palivovými technologiemi a infrastrukturou spolu s ekonomickou konkurenceschopností vodíku vůči levnějším fosilním palivům a dalším obnovitelným alternativám zůstávají výzvou.



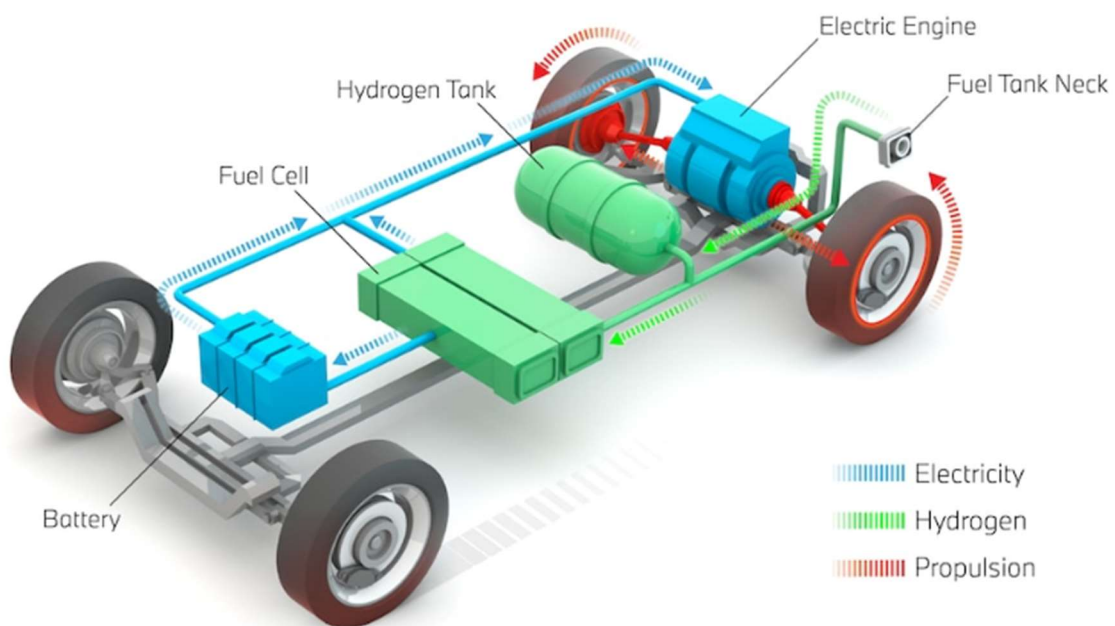
Obrázek 14 Využití vodíku v dopravě, ČR [7]

4.1.1 Osobní automobily

Vodík představuje nadějně řešení pro snížení emisí skleníkových plynů a závislosti na fosilních palivech i v sektoru osobní dopravy. Tato část se zabývá využitím vodíku jako

paliva pro osobní vozidla a zaměřuje se na technologie skladování ve vozidle, problémy infrastruktury a jejich srovnatelné výhody se spalovacími motory a elektrickými vozidly na baterie. Zdůrazňuje potenciální roli, kterou může vodík hrát v ekologičtější a udržitelnější budoucnosti osobní dopravy. V současné době dominují dva způsoby využití vodíku jako paliva, a to technologie palivových článků a spalování vodíku konvekčními způsoby jako jsou zážehové motory. Mohou to být i upravené verze běžných motorů, případně i přestavba vznětového motoru na zážehový se spalováním vodíku.

Technologie vodíkových palivových článků má potenciál přinést převrat v osobní dopravě. Základním principem této technologie je elektrochemická reakce mezi vodíkem a kyslíkem, při níž vzniká elektrická energie. V palivovém článku se vodík uložený ve vozidle přivádí k anodě, kde se štěpí na protony a elektrony. Protony pak putují přes elektrolytovou membránu ke katodě, zatímco elektrony jsou odváděny vnějším obvodem a vytvářejí elektrický proud. Na katodě dochází k rekombinaci protonů a elektronů s kyslíkem za vzniku vodní páry, která je vylučována jako jediná emise. Je velmi důležité zajistit bezpečnost cestujících v případě úniku vodíku, ať už náhodného, nebo v důsledku havárie. Toho lze dosáhnout použitím tlakových vodíkových nádrží vyrobených z kompozitních materiálů. Dle registru vozidel poskytnutého Ministerstvem dopravy bylo k 1.1.2024 registrováno 28 vodíkových osobních vozidel. [7][29][20]



Obrázek 15 Vizualizace palivového článku v osobním voze [20]

4.1.2 Silniční nákladní doprava

Odvětví dopravy v Evropské unii se výrazně podílí na produkci emisí skleníkových plynů, což vyvolává potřebu zabývat se alternativními palivy. Vodík se díky svému potenciálu nulových emisí jeví jako nadějně řešení pro silniční nákladní dopravu. Tato část se zaměřuje na využití vodíku v silniční nákladní dopravě v EU a upozorňuje na inovace společnosti Tatra.

Evropská unie se aktivně snaží využívat vodík jako klíčovou součást své strategie, kterou je dosažení uhlíkové neutrality do roku 2050. Nákladní vozidla na vodíkový pohon nabízí několik výhod, mezi něž patří:

- Nulové emise: Při provozu vodíkových palivových článků vzniká jako vedlejší produkt pouze vodní pára, čímž se výrazně snižují emise skleníkových plynů.
- Vysoká hustota energie: Vodík má vyšší hustotu energie než baterie, což z něj činí optimální volbu pro dálkovou dopravu.
- Proces doplňování paliva: Tento proces je také relativně rychlý. Vodíková nákladní vozidla lze tankovat podobným způsobem jako nákladní vozidla s naftovým motorem, čímž se minimalizují prostoje logistických operací

Vývojem nákladních vozidel na vodíkový pohon se zabývá řada evropských i mimoevropských výrobců automobilů. Výhodou nákladní dopravy je, že s relativně malým počtem vozidel lze dosáhnout výrazného snížení emisí. Zejména ekonomická výhodnost nahrazení nafty vodíkem je zřejmá. Předpokládá se, že cena nízkouhlíkového vodíku dosáhne 4 €/kg a v té chvíli se stane konkurenceschopnou vůči naftě. Aby se usnadnilo široké zavedení vodíku v nákladní dopravě, je nutné vytvořit celoevropskou síť vodíkových čerpacích stanic, které budou schopny doplňovat velké množství vodíku. Kromě vysokých nákladů na pořízení nových vozidel představuje významnou překážku rozvoje vodíkové dopravy neexistence trhu s ojetými vodíkovými nákladními vozidly. [7]

V roce 2019 bylo v České republice celkem přihlášeno 723 678 nákladních automobilů a tahačů. Dle registru vozidel ministerstva dopravy nebylo registrováno jediné vodíkové nákladní vozidlo. [7]

Tabulka 4.1 Prognóza využití vodíku v české republice [7]

Typ spotřeby	2021	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Nákladní vodíkové automobily počet	0	300	400	10 000	20 000	40 000	60 000
Nově registrované nákladní automobily (% z registrací v roce 2019)	0 %	0,2 %	2,4 %	4,0 %	6,6 %	13,2 %	13,2 %
Vodíkové nákladní automobily počet (tis. t /rok)	0	3	46	116	323	464	696

Inovace Tatra Trucks

Společnost Tatra Trucks, český výrobce v oblasti automobilového průmyslu, který má dlouholetou tradici, dosáhl významného pokroku v integraci technologií vodíkových paliv do konstrukce svých vozidel.

Společnost Tatra vyvinula elektrická vozidla s vodíkovými palivovými články (FCEV), která využívají palivové články k pohonu elektromotorů. Kromě palivových článků zkoumá společnost Tatra také potenciál vodíkových spalovacích motorů. Tyto motory spalují vodík k výrobě energie obdobným způsobem jako běžné spalovací motory, ale

bez emisí. Ačkoli je tato metoda méně účinná než palivové články, nabízí přechodné řešení, které lze snáze integrovat do stávajících konstrukcí vozidel. V rámci projektu Tatra Force Hydrogen došlo k vývoji modelové řady Tatra Force, která je poháněna vodíkovými palivovými články. Projekt byl zahájen v roce 2021 a je výsledkem spolupráce Technologické agentury ČR a sdružení firem, včetně společnosti DEVINN a Vysoké školy chemicko-technologické v Praze. Cílem projektu je vyvinout prototyp nákladního automobilu s nulovými emisemi, který bude vybaven pokročilými technologiemi určenými pro provoz v náročných podmínkách. [58][59]

Technické specifikace a schopnosti

Vozidlo má následující rozměry: Nákladní vozidla Tatra Force s vodíkovým pohonem jsou schopna dosáhnout dojezdu až 400 kilometrů na jedno naplnění, a to díky zabudovaným vodíkovým palivovým článkům a kompozitním vodíkovým nádržím. Nákladní automobily jsou vybaveny konfigurací podvozku 8x6, který se skládá z přední nápravy a tří zadních náprav, což zlepšuje rozložení hmotnosti a manévrovatelnost. Tato konfigurace je výhodná například v těžebním průmyslu, kde převládá náročné prostředí. Dojezdu 400 km je možné docílit zásluhou použití palubních vodíkových palivových článků a kompozitních vodíkových nádrží. Prototyp se skládá ze šesti kompozitních nádrží s celkovou kapacitou 30 kilogramů vodíku, což poskytuje dostatečnou zásobu pro provoz. [58][59]

Spolupráce a pilotní projekty

Přístup společnosti Tatra zahrnuje rozsáhlou spolupráci s akademickými a průmyslovými partnery s cílem zdokonalit vodíkovou technologii. V celé EU byly realizovány pilotní projekty, jejichž cílem je testovat a optimalizovat výkon vodíkových nákladních vozidel v reálných podmínkách. Tím bylo zajištěno, že vozidla splňují potřebné praktické výkonnostní normy a kritéria provozní spolehlivosti. [58][59]

4.1.3 HICE – Hydrogen Internal Combustion Engine, neboli vodíkové spalovací motory

Tyto motory pracují podobně jako benzinové nebo zážehové motory. Existuje však několik hlavních rozdílů, jako jsou různé teploty spalování, různé poměry vzduchu a paliva a komplikace s velikostí molekul H_2 . Můžeme se setkat se dvěma hlavními typy HICE – vodíkovými spalovacími motory, buď s motory konstruovanými a navrženými s ohledem na využití vodíku, nebo přestavbou stávajících platforem či dokonce modernizací a úpravou starých motorů tak, aby byly schopny pohonu na vodík. Výše uvedené komplikace lze třídit mnoha způsoby, které budou podrobněji rozebrány v následující části této práce, kde se budeme zabývat přestavbou stávajícího motoru Tatra ze vznětového na vodíkový. Ačkoli se zaměříme především na píst, podrobněji probereme i všechny výše zmíněné komplikace. Je důležité zmínit, že tento proces se již nějakou dobu vyvíjí. V roce 1979 spolupracovalo BMW s DFVLR (Německý zkušební a výzkumný ústav pro letectví a kosmické lety), který je dnes známý jako DLR, na přestavbě vozu BMW 520i (E12, rok výroby 1975) na zkušební vozidlo. Zvenčí se jevil podobně jako jeho benzinové protějšky, ale jeho čtyřválcová pohonná jednotka spalovala místo bezolovnatého benzínu vodík. Brzy se ukázalo, že použití vodíku jako paliva ve spalovacích motorech je technicky proveditelné. V roce 1980 se BMW řady 7 stalo prvním vozem v Evropě, který byl poháněn kryogenním kapalným vodíkem. Vodík se však stále získával pomocí ropy nebo zemního plynu, nikoliv pomocí solární vodíkové technologie. Kapalným vodík byl ve voze

přepravován při teplotě $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$, přičemž 93litrová nádrž umožňovala dojezd přibližně 300 km. Vodíkem poháněné BMW řady 7 bylo vybaveno spalovacím motorem, který byl již dříve testován a prokázal svou účinnost. Klíčovým aspektem jeho vývoje byla příprava směsi, na níž BMW úzce spolupracovalo s Německou společností pro letectví a kosmonautiku. Vodík obsahuje méně energie než benzin, ale díky použití gyroskopického plniče byly hodnoty výkonu jen asi o 30 % nižší než u benzinových motorů. BMW se také zapojilo do závodů s využitím HICE. BMW H2R stanovilo celkem devět nových rekordů pro vozidla poháněná vodíkem se spalovacím motorem. Jeho dvanáctiválcový motor se zdvihovým objemem šest litrů dosahoval výkonu přes 210 kW/285 k. Dále na autosalonu v Los Angeles, který se konal od 1. do 10. prosince 2006, se uskutečnila světová premiéra vozu BMW Hydrogen 7. BMW bylo první automobilkou na světě, která představila sériové vozidlo na vodíkový pohon. BMW Hydrogen 7, založené na modelu BMW 760Li, bylo výsledkem vývojové strategie, která se zaměřila na integraci vodíkového spalovacího motoru do vozidla, které by mohlo být používáno v každodenním provozu. Sedan řady 7 byl poháněn dvanáctiválcovým motorem o výkonu 191 kW/260 k a dokázal zrychlit z 0 na 100 km/h za 9,5 sekundy. Případná nespolehlivost vodíkové dodavatelské sítě nebyla problémem, protože dvoupalivový motor v BMW Hydrogen 7 mohl jednoduše přepínat provozní režimy a místo toho jezdit na konvenční bezolovnatý benzin. Další významnou automobilkou je Toyota, jejíž historii zde nebudeme podrobně rozebírat, místo toho se zaměříme na současnost. Hlavní pozornost při vývoji byla věnována nejnovějšímu tříválcovému motoru o objemu 1,6 litru, který byl použit v modelech GR Yaris a Corolla. K nečekanému oznámení došlo 22. dubna 2021, kdy Toyota oznámila, že vyvíjí motor poháněný vodíkem a že se s vozem vybaveným touto technologií zúčastní 3. kola seriálu Super Taikyu 2021, 24hodinového závodu Fuji, který se měl konat o měsíc později. Toyota vyvíjí motor HICE se speciálním zaměřením na motorsport, aby zachovala ducha závodění a dosáhla uhlíkové neutrality závodů při zachování charakteristických vlastností motoru. Přestože konkrétní specifikace motoru zůstávají nezveřejněny, výsledky závodů prokázaly jeho potenciál, což vedlo Toyotu ke spuštění spolupráce s firmami Yamaha a Cummins na motoru 5.0 litru 444 Hp V8 z Lexusu RCF. [13][14][15][16][17]



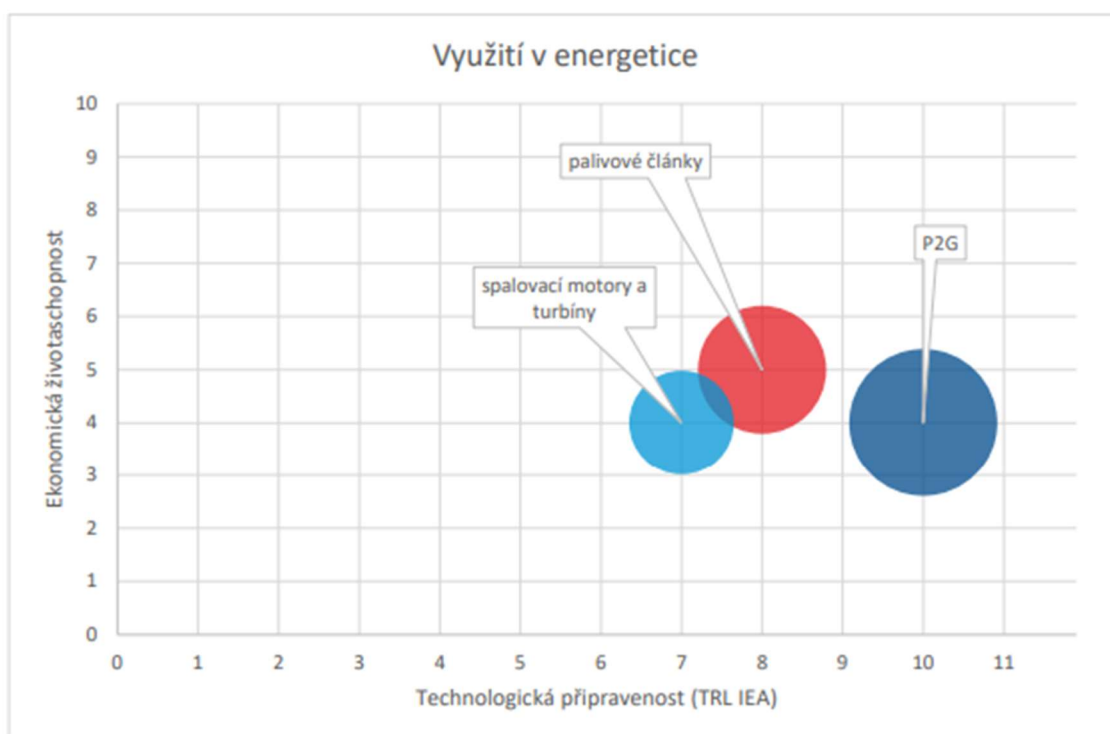
Obrázek 16 Vyvíjený V8 motor Toyota [17]

4.2 Energetika a zálohování energie

Vodík je v energetice předmětem zájmu, zejména jako možnost využití přebytečné elektřiny ze solárních a větrných elektráren. Přebytečnou elektřinu lze účinným způsobem přeměnit na vodík, který se pak může v plynovodech mísit se zemním plynem, aby se snížila uhlíková stopa stávající plynové infrastruktury.

Power-to-Gas

Technologie Power-to-Gas, dále jen P2G, představuje propojení mezi obnovitelnými zdroji energie a stávající energetickou infrastrukturou. Tato technologie poskytuje univerzální metodu přeměny přebytečné obnovitelné elektřiny na vodík, který lze následně skladovat, přímo využívat, nebo dle potřeby přeměnit zpět na elektřinu. V tomto procesu se využívá elektřina, nejlépe získaná z přebytku obnovitelných zdrojů, jako je větrná nebo solární energie, k rozdělení vody H_2O na její základní složky, a to kyslík O_2 a vodík H_2 . Účinnost tohoto procesu je závislá na typu použitého elektrolyzátoru. Vodík vyrobený v procesu elektrolýzy lze buďto stlačovat a skladovat v nádržích, případně vtlačet do sítě zemního plynu (až do určitého procenta bez nutnosti úprav infrastruktury, 2 % v ČR), nebo používat v jiných průmyslových procesech. Schopnost vtlačet vodík do plynárenské sítě je obzvláště výhodné, protože může výrazně snížit uhlíkovou náročnost zemního plynu používaného v domácnostech, podnicích a v průmyslu. Dalším krokem v některých systémech P2G je metanizace, při níž vyrobený vodík reaguje s oxidem uhličitým CO_2 za vzniku metanu CH_4 , primární složky zemního plynu. Tento syntetický zemní plyn lze poté využívat obdobným způsobem jako konvenční zemní plyn, čímž se bez jakýchkoli úprav využije stávající rozsáhlá plynárenská infrastruktura. P2G představuje řešení jednoho z nejvýznamnějších problémů obnovitelných zdrojů energie: nesoulad mezi špičkami výroby a špičkami spotřeby. Přeměna přebytečné elektřiny na vodík umožňuje skladovat energii po delší období, například mezi létem a zimou, což má značný význam pro regiony s výraznými sezónními výkyvy ve výrobě a poptávce po energii. Výroba vodíku prostřednictvím P2G může být rychle zvyšována a snižována, což umožňuje, aby sloužila jako nástroj pro vyrovnávání sítě. Tato flexibilita pomáhá stabilizovat síť v případě výkyvů v dodávkách energie způsobených změnami ve výrobě energie z větru nebo slunce. Další výhodou je cesta k dekarbonizaci plynové sítě. Vstřikování vodíku do sítě zemního plynu vede ke snížení celkových emisí uhlíku spojených se spotřebou zemního plynu. Tento proces přechodu umožňuje postupný přechod k udržitelnějšímu využívání energie bez nutnosti výrazných změn infrastruktury. Na základě výzkumů v zahraničí je možné bez problémů vtlačet vodík až do množství 2 % do zemního plynu. Navzdory svému potenciálu se technologie P2G potýká s několika problémy. Současné systémy elektrolýzy mají účinnost přibližně 60–80 %, což znamená, že během procesu přeměny dochází ke ztrátám značného množství energie. Probíhající výzkumy jsou zaměřeny na zlepšení této účinnosti a zvýšení ekonomické životaschopnosti P2G. Závěrem lze říct, že technologie P2G sice nabízí přesvědčivý způsob propojení výroby energie z obnovitelných zdrojů se stávajícími způsoby využívání energie a infrastrukturou, ale k plnému využití jejího potenciálu je zapotřebí neustálého technologického a tržního pokroku. Budoucnost P2G bude záviset na její integraci do komplexního energetického systému, který zahrnuje výrobu energie z obnovitelných zdrojů, skladování energie a technologie inteligentních sítí. [30][31]



Obrázek 17 Využití vodíku v energetice v rámci ČR [7]

Vodíkové turbíny

Vodíkové turbíny jsou technologií v odvětví výroby energie a nabízejí potenciál k výrazné dekarbonizaci tohoto sektoru. Vodíkové turbíny fungují obdobně jako turbíny na zemní plyn, jsou však navrženy tak, aby vyhovovaly charakteristickým vlastnostem vodíku.

Vodík má ve srovnání se zemním plynem vyšší rychlost plamene a nižší energii vznícení, což ovlivňuje konstrukci spalovacího systému v turbínách. Výrobci turbín upravují spalovací komory tak, aby se přizpůsobily těmto vlastnostem, s cílem zabránit problémům, jako je zpětné vzplanutí, a zajistit stabilní spalování. Některé turbíny jsou schopny spalovat směs vodíku a zemního plynu, což umožňuje postupnou integraci vodíku s rozvojem infrastruktury a dodávek. Kromě toho jsou tyto turbíny schopny přejít na 100 % dodávku vodíkového paliva v závislosti na vývoji systému a tržních podmínkách.

4.3 Průmysl

Tento oddíl podrobně zkoumá různá využití vodíku ve významných průmyslových odvětvích.

Výroba amoniaku

Amoniak neboli čpavek je jednou z nejvíce vyráběných anorganických chemikálií. Vyrábí se v celosvětovém měřítku a jeho roční produkce se odhaduje na 190 milionů tun. Haber-Boschův proces je hlavní metodou výroby. Tento proces zahrnuje kombinaci dusíku ze vzduchu s vodíkem získaným především ze zemního plynu (metanu) za vzniku amoniaku. Reakce je vratná a výroba amoniaku je exotermická, dochází k uvolnění tepla.



Reakce probíhá za vysokých teplot (400–450 °C) a tlaků (200 barů), což vyžaduje značný příkon energie, která se tradičně získává z fosilních paliv. Vodík používaný v tomto procesu se tradičně získává ze zemního plynu nebo z uhlí v procesu parní reformace metanu, což vede ke značným emisím CO₂. Cílem přechodu na používání zeleného vodíku vyráběného elektrolýzou vody poháněnou obnovitelnou energií je dosažení dekarbonizace tohoto procesu. V současné době se výroba čpavku podílí na celosvětových emisích CO₂ přibližně 1 %, zejména v důsledku používání šedého vodíku. V chemickém průmyslu představuje výroba čpavku největší podíl spotřeby vodíku a v dohledné budoucnosti pravděpodobně zůstane dominantním. Účinnost této syntézy dosahuje až 60 %. Nejrozšířenější využití amoniaku je při výrobě hnojiv. Nicméně čpavek může sloužit jako dočasná forma skladování energie, kdy se z něj následným procesem získává opět vodík. Významnou výhodou čpavku je, že vykazuje lepší vlastnosti (menší objem a nižší tlak potřebný ke zkapalnění) pro přepravu. Je rovněž nutné zvážit přímé využití čpavku jako paliva. S jeho přímým spalováním existují historické zkušenosti z druhé světové války. V současné době se objevují čpavkové palivové články pro velké lodě a tankery. [7][32][33]

Výroba methanolu

Methanol se vyrábí spojením vodíku a oxidu uhelnatého v katalytickém procesu.



Při tradiční metodě výroby methanolu se vodík získává ze zemního plynu, což je podobný postup jako při výrobě amoniaku. Při výrobě methanolu působí vodík jako reduktant, reaguje s oxidem uhelnatým a vzniká methanol. Kromě toho je tento proces spojen s emisemi značného množství oxidu uhličitého, pokud se využívá vodík získaný z fosilních zdrojů. Nástup nových výrobních technik umožnil syntézu syntetického plynu částečnou oxidací zemního plynu, což je proces, který nevede k emisím CO₂. Následné kroky, jako je syntéza methanolu a destilace, lze provádět s minimálními úpravami. Aby se zajistilo, že uhlík obsažený v CO₂ se neztratí a může být znovu použit pro syntézu methanolu, je nutné přivést CO₂ zpět na začátek procesu, což vyžaduje další vodík. Přechod na ekologický vodík pro výrobu methanolu by měl významný dopad na životní prostředí a mohl by pomoci průmyslovým odvětvím, která jsou na methanolu závislá (např. automobilový průmysl, stavebnictví a elektronika), snížit jejich emise. Přechod od šedého k zelenému vodíku v chemické výrobě je do značné míry ovlivněn ekonomickými faktory, včetně nákladů na obnovitelnou energii, technologií elektrolyzérů a mechanismů stanovování cen uhlíku. Současné vysoké náklady na výrobu zeleného vodíku představují výzvu. Z hlediska politiky a infrastruktury jsou důležité následující úvahy: Pro usnadnění rozšiřování výroby ekologického vodíku je nezbytné zavést podpůrné politické rámce a investovat do infrastruktury. To zahrnuje finanční podporu výzkumu a vývoje, pobídky pro projekty v oblasti zeleného vodíku a předpisy, které upřednostňují nízkouhlikové technologie. S tím, jak se země a společnosti přizpůsobují mezinárodním cílům v oblasti klimatu, by přechod na zelený vodík v chemické výrobě mohl sloužit jako model pro další odvětví, která se snaží snížit svou závislost na fosilních palivech. [7] [34] [35]

Hutní výroba

Hutnický průmysl je předurčen k růstu v důsledku rostoucí celosvětové poptávky, což dále rozšíří úlohu vodíku ve výrobě oceli. V důsledku toho se očekává, že potřeba vodíku jako redukčního činidla v procesech výroby oceli přetrvá, nebo se dokonce zvýší. Vodík představuje slibnou alternativu ke zdrojům uhlíku, jako je koks, který je v současnosti převažujícím redukčním činidlem při výrobě oceli. V současné době se na mnoha místech, včetně České republiky, vyrábí ocel pomocí koksu z černého uhlí nebo technologií injektáže uhelného prachu (PCI). Kromě toho se v menší míře využívá zemní plyn jako doplňkové palivo. Přímá redukce železné rudy pomocí zemního plynu je v evropských zemích méně rozšířená vzhledem k vysoké spotřebě této suroviny, přičemž tato metoda je typická pro země se značnými zásobami přírodního zemního plynu, například pro země Blízkého východu. Využití vodíku jako redukčního činidla má potenciál výrazně snížit emise CO₂. Například při výrobě jedné tuny oceli tradičními metodami vzniká značné množství emisí CO₂. Využití vodíku však může vést k úspoře nejméně jedné tuny oxidu uhličitého na každou vyrobenou tunu tekutého kovu. V kontextu České republiky, kde se ročně vyrobí přibližně 5 milionů tun oceli, může přechod na vodík vést k roční poptávce po vodíku ve výši přibližně 360 000 tun. Integrace vodíku do výroby oceli představuje životaschopnou cestu k výraznému snížení průmyslových emisí uhlíku. S rozvojem technologií a zvyšováním úspor z rozsahu by vodík mohl stále více nahrazovat tradiční metody intenzivní z hlediska emisí uhlíku, čímž by se podpořily globální cíle v oblasti klimatu a přispělo by se k udržitelnější průmyslové budoucnosti. [35][36][37]

4.4 Domácnosti

V této kapitole se pobavíme o vodíku jako zdroji alternativního paliva v rámci bytových energetických systémů s důrazem na jeho integraci do současných domácích energetických systémů, technologické požadavky na přizpůsobení, bezpečnostní a environmentální aspekty. Zkoumání účinnosti a reálné využitelnosti technologií na bázi vodíku. Cílem této kapitoly je poskytnout podrobné přiblížení proveditelnosti a důsledky využití vodíku pro výrobu elektřiny, vytápění v domácnostech. V rámci přechodu na udržitelné a čisté zdroje energie byl vodík označen za slibnou alternativu díky svému potenciálu vysokého energetického výkonu a minimálního dopadu na životní prostředí v místě použití. Tato úvodní kapitola nastiňuje motivaci pro zkoumání vodíku jako paliva pro domácnosti a představuje cíle, rozsah. [38][39]

Technologie vodíkových palivových článků pro výrobu elektřiny v domácnostech

Systémy vodíkových palivových článků mají zásadní význam při zavádění vodíku jako zdroje energie pro domácnosti, protože umožňují účinnou přeměnu vodíku na elektřinu a zároveň teplo. Z typů palivových článků jsou pro domácí použití nejvhodnější palivové články s protonovou výměnou (PEM) a palivové články s pevnými oxidy (SOFC). Články PEM, které pracují při nižších teplotách a rychle se spouštějí, jsou ideální pro domácí energetické systémy, které vyžadují rychlou odezvu. Naopak články SOFC pracují při vyšších teplotách, čímž zvyšují účinnost a využívají vyrobené teplo pro vytápění domácnosti. Proces integrace těchto palivových článků do domácích energetických systémů zahrnuje připojení jejich výstupu k elektrickému a topnému systému domu, případně pomocí měniče nebo výměníku tepla. Toto uspořádání nejen dodává elektřinu, ale také využívá vedlejší teplo k vytápění domu, čímž se zvyšuje celková energetická účinnost. Zavedení této technologie však naráží na problémy, jako jsou vysoké počáteční náklady a

spotřeba podpůrné infrastruktury. Kromě toho představuje problém životnost a údržba palivových článků. Pro optimální výkon je nutná pravidelná údržba, kde ale potřebné technické znalosti mohou být pro mnoho domácností překážkou. Pokrok v technologii palivových článků a snížení nákladů jsou nezbytné pro jejich širší zavedení v domácnostech. Současný výzkum se zaměřuje na zvýšení životnosti a cenové dostupnosti těchto systémů, aby byly přístupnější širšímu okruhu domácností. [43][44][45]

Využití vodíku pro vytápění domácností

Vodík představuje alternativu pro vytápění obytných prostor díky své potenciální vysoké účinnosti a nízkému dopadu na životní prostředí. Tato kapitola se zabývá využitím vodíku v systémech vytápění domácností, které lze realizovat buď spalováním vodíku ve speciálně navržených kotlích, nebo prostřednictvím vodíkových palivových článků, které poskytují jak teplo, tak elektřinu. Vodíkové kotle jsou konstrukčně podobné kotlům na zemní plyn, ale byly upraveny tak, aby vyhovovaly charakteristickým vlastnostem vodíku, včetně jeho nízké hustoty a vysoké hořlavosti. Tyto kotle mohou spalovat vodík k ohřevu vody a vytápění domácností bez emisí oxidu uhličitého. Přejít na vodíkové kotle vyžaduje zvážit modernizaci stávajících plynovodů a instalaci nových komponentů kompatibilních s vodíkem. Začlenění vodíku do stávajících plynovodů se provádí metodou míchání, při níž se vodík v řízeném poměru začleňuje do proudu zemního plynu. Tento postup umožňuje využití stávající potrubní infrastruktury s minimálními úpravami, čímž se snižují náklady a urychluje přechod na vodíkové palivo. Vodíkové palivové články jsou nejen vhodné pro výrobu elektřiny, ale také pro aplikace kombinované výroby tepla a elektřiny (KVET). Nejvhodnějšími typy palivových článků pro systémy kogenerace v domácnostech jsou opět palivové články s protonovou výměnou (PEM) a palivové články s pevnými oxidy (SOFC). Díky tomu, že SOFC pracují při vyšších teplotách (700 °C až 1 000 °C), mohou účinněji využívat přebytečné teplo pro potřeby vytápění obytných budov. Oba typy lze škálovat tak, aby odpovídaly energetickým nárokům typických domácností. Integrace těchto palivových článků do obytného prostředí zahrnuje připojení výstupu systému k elektrické síti i k topné infrastruktuře domu. Tato konfigurace se dvěma výstupy zvyšuje celkovou energetickou účinnost, přičemž elektrická účinnost dosahuje až 60 % a celková účinnost (včetně rekuperace tepla) se blíží 85–90 %. Mezi praktické výhody využití vodíkových palivových článků pro kombinovanou výrobu tepla a elektřiny (CHP) patří snížení nákladů na energii díky vysoké účinnosti, nižší emisí skleníkových plynů ve srovnání s konvenčními systémy vytápění a zvýšení energetické bezpečnosti a nezávislosti majitelů domů. Kromě toho jsou tyto systémy schopny poskytovat spolehlivou záložní energii, což zvyšuje jejich atraktivitu pro uživatele z řad domácností. Přestože výhody vodíkových palivových článků pro kogeneraci v domácnostech jsou značné, realizace těchto systémů se potýká s problémy. Mezi ně patří vysoké počáteční náklady, potřeba technických znalostí při instalaci a údržbě a současný nedostatek vodíkové distribuční infrastruktury. [45][46]

Bezpečnostní požadavky a požadavky na infrastrukturu pro vodíkové vytápění v obytných budovách

Zavedení vodíku jako zdroje paliva pro vytápění obytných budov přináší významné bezpečnostní aspekty a požadavky na infrastrukturu. To zahrnuje instalaci pokročilých systémů detekce úniků, které mohou rychle identifikovat úniky vodíku při velmi nízkých koncentracích a zahájit preventivní opatření. Kromě toho musí být navrženy nebo modernizovány ventilační systémy, aby bylo zajištěno rychlé rozptýlení uniklého vodíku, čímž se sníží riziko jeho hromadění a možného vznícení. Stávající obytná infrastruktura je obvykle

určena pro vytápění zemním plynem nebo elektřinou. Přizpůsobení této infrastruktury pro vodík vyžaduje významné změny. Potrubí, ventily a konektory používané ve vodíkových systémech musí být schopny odolat náchylnosti malých molekul ke křehnutí kovů a úniku z malých otvorů. Pro přepravu a rozvod vodíku v domácnosti se často doporučují materiály, jako je polyamid nebo pokročilé kompozity. Vodíkové systémy pro domácnosti musí splňovat místní, národní a mezinárodní bezpečnostní normy a předpisy. Ty mohou zahrnovat normy pro instalaci a údržbu vodíkových zařízení, bezpečnostní protokoly a nouzové postupy. Dodržování předpisů zajišťuje nejen bezpečnost, ale také pomáhá budovat důvěru veřejnosti ve vodíkové technologie a jejich přijetí. Je nezbytné, aby technici, kteří instalují a udržují vodíkové topné systémy, byli řádně vyškoleni. Kromě toho může vzdělávání majitelů domů o provozu a bezpečnostních prvcích vodíkových systémů dále zlepšit výsledky v oblasti bezpečnosti. Programy zvyšování povědomí veřejnosti mohou demystifikovat tuto technologii a podpořit její přijetí tím, že názorně ukáží její bezpečnost a účinnost. [47][48]

Ekonomické a environmentální aspekty vodíku pro vytápění obytných budov

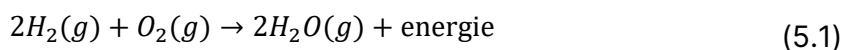
Integrace vodíku do systémů vytápění obytných budov představuje transformační změnu s významnými ekonomickými a environmentálními důsledky. Tato část se hlouběji zabývá náklady, úsporami a přínosy pro životní prostředí a zároveň zkoumá problémy a širší důsledky zavádění vodíkové technologie vytápění v obytných budovách. Přechod na vodíkové vytápěcí systémy vyžaduje značné počáteční investice. Ty zahrnují náklady na kotle nebo palivové články kompatibilní s vodíkovým systémem a také infrastrukturu pro skladování a dodávku vodíku. Specializovaná instalace a počáteční stádium vodíkových technologií přispívají k vyšším nákladům ve srovnání s tradičními systémy. Dále vznikají provozní náklady, které zahrnují samotné palivo a údržbu. Ačkoli jsou ceny vodíku v současné době ovlivněny omezenou dostupností a výrobními metodami, očekává se, že tyto náklady se s technologickým pokrokem a zvýšením výrobní kapacity sníží. Kromě toho může ke snížení nákladů časem přispět i provozní efektivita, zejména u technologie palivových článků. Navzdory vyšším počátečním nákladům nabízejí vodíkové systémy potenciál úspor díky vyšší účinnosti a nižším provozním nákladům v dlouhodobém horizontu. Domácnosti by navíc mohly využívat vládních nabídek, jako jsou daňové úlevy, dotace na technologie čisté energie a slevy, které pomáhají kompenzovat počáteční investice a podporují zavádění. Využití vodíku jako zdroje vytápění může vést k významnému snížení emisí skleníkových plynů, zejména pokud je vodík vyráběn z obnovitelných zdrojů, zeleného vodíku, jako je větrná nebo solární energie. To je v souladu s celosvětovým snažením v boji proti změně klimatu a podporuje dekarbonizaci obytných sektorů. Při spalování vodíku nevznikají žádné škodlivé emise – pouze vodní pára. To vede ke zlepšení kvality ovzduší a přispívá ke zdravějšímu životnímu prostředí, čímž se potenciálně snižují náklady na zdravotní péči související s nemocemi způsobenými znečištěním ovzduší. Stále přetrvávají významné technologické výzvy, jako je zlepšení účinnosti a životnosti vodíkových spotřebičů a robustnost infrastruktury potřebné pro zacházení se specifickými vlastnostmi vodíku. Vyřešení těchto výzev je nezbytné pro bezpečnou a účinnou integraci vodíku do obytného prostředí. Očekává se, že s rozvojem vodíkového hospodářství a vyspělostí souvisejících technologií budou náklady klesat, čímž se vodík stane konkurenceschopnější volbou. Významným faktorem pro rozvoj trhu s vodíkovým vytápěním jsou také politické a regulační podmínky. Předpisy, které zajišťují bezpečnost, ve spojení s politikami, které podporují vývoj technologií a jejich přijetí spotřebiteli, mohou významně ovlivnit tempo, kterým se vodík stane hlavním zdrojem energie pro vytápění domácností. Integrace výroby vodíku s obnovitelnými zdroji energie

nabízí cestu k udržitelnému vytápění domácností s nulovými emisemi. S rostoucím celosvětovým úsilím o dekarbonizaci je vodík připraven sehrát klíčovou roli v energetickém přechodu. [49][50]

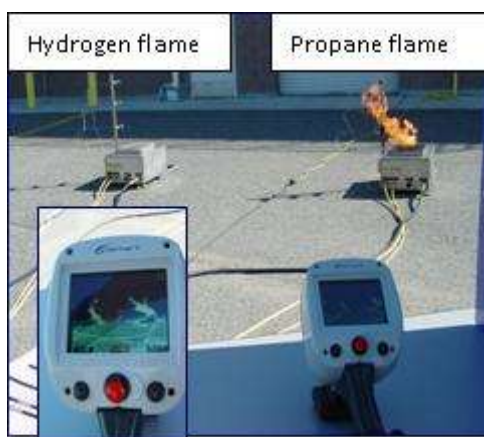
5 Rozdíly mezi spalováním vodíku a konvenčních paliv

5.1 Porovnání spalování vodíku s fosilními palivy

Spalování vodíku v přítomnosti kyslíku je prostá, ale silná chemická reakce. Přeměna plynného vodíku (H_2) a plynného kyslíku (O_2) na vodní páru (H_2O) je doprovázena uvolněním značného množství energie. Reakci lze stručně znázornit chemickou rovnicí:



Reakce mezi dvěma molekulami vodíku a dvěma molekulami kyslíku vede ke vzniku dvou molekul vody a uvolnění energie. Je to reakce nejen vysoce exotermická, při níž vzniká značné množství tepla, ale také vysoce účinná. Jedinou emisí vznikající při přímém spalování vodíku je vodní pára. To je v ostrém kontrastu s emisemi z fosilních paliv, které zahrnují oxid uhličitý, oxidy síry, oxidy dusíku a pevné částice, které mají významné dopady na životní prostředí a zdraví. Čistý emisní profil vodíku z něj dělá mimořádně atraktivní možnost paliva z hlediska udržitelnosti životního prostředí, zejména v aplikacích, kde je kvalita ovzduší primárním problémem. Vodík hoří při výrazně vyšší teplotě než většina běžných paliv, dosahuje až 2 000 °C. Tato vysoká teplota spalování umožňuje efektivní provoz turbín a motorů, což z něj činí optimální volbu pro integraci do pokročilých technologií výroby energie. Vysoké teploty však také vyžadují použití specializovaných materiálů a technologií, které těmto podmínkám odolávají, což má následně dopad na konstrukci a náklady systémů na bázi vodíku. Co se týče viditelnosti a bezpečnosti, je důležité poznamenat, že plameny vodíku jsou na denním světle téměř neviditelné, což může představovat významné bezpečnostní riziko, zejména v průmyslovém prostředí. Proto je nutné přijmout zvláštní bezpečnostní opatření, jako je použití ultrafialových detektorů nebo detektorů plamene, aby byl zajištěn bezpečný provoz. [51][52][53]



Obrázek 18 Vizualizace hoření vodíku [52]



Obrázek 19 Vizualizace hoření vodíku 2 [52]

6 Budoucí směry vývoje a výzkumu

Výzkum a vývoj hrají zásadní roli při rozvoji vodíkových technologií a snižování nákladů. EU podporuje řadu iniciativ v oblasti výzkumu a vývoje zaměřených na zlepšení účinnosti a rozšiřitelnosti technologií výroby, skladování a využití vodíku. Horizon Europe, stěžejní program EU pro výzkum a inovace, vyčleňuje značné finanční prostředky na projekty související s vodíkem a zaměřuje se na průlomové objevy v oblasti účinnosti elektrolyzérů, výkonnosti palivových článků a udržitelných metod výroby vodíku. [55]

Účinnost elektrolyzérů a inovace:

Elektrolyzéry mají zásadní význam pro výrobu ekologického vodíku štěpením vody na vodík a kyslík s využitím obnovitelné elektrické energie. Zlepšení účinnosti a snížení nákladů na elektrolyzéry je hlavním předmětem výzkumu financovaného EU. Pokrok ve vědě o materiálech, jako je vývoj nových katalyzátorů a membránových technologií, má klíčový význam pro zvýšení výkonu a životnosti elektrolyzérů. Cílem investic EU do těchto technologií je zvýšit konkurenceschopnost zeleného vodíku vůči vodíku z fosilních zdrojů.

Vývoj palivových článků:

Palivové články přeměňující vodík na elektřinu jsou nedílnou součástí vozidel na vodíkový pohon a dalších aplikací. Výzkum v této oblasti se zaměřuje na zvyšování účinnosti, životnosti a hustoty výkonu palivových článků při současném snižování nákladů. Očekává se, že inovace v konstrukci palivových článků, včetně použití pokročilých materiálů a nových technických přístupů, budou hrát významnou roli při vytváření životaschopné vodíkové varianty pro širokou škálu aplikací, od dopravy po stacionární výrobu energie. [54]

Udržitelná výroba vodíku:

Kromě elektrolyzérů zkoumá EU různé metody udržitelné výroby vodíku. Patří sem výzkum biologických metod, jako je mikrobiální elektrolyza a fotobiologické štěpení vody,

a také termochemické procesy využívající sluneční energii. Tyto metody mají potenciál vyrábět vodík s minimálním dopadem na životní prostředí, což dále podporuje cíle EU v oblasti udržitelnosti. [54]

Technologie skladování a distribuce:

Účinné skladování a distribuce jsou pro začlenění vodíku do energetického systému klíčové. EU podporuje výzkum a vývoj v oblasti pokročilých řešení skladování, jako jsou vysokotlaké nádrže, skladování kapalného vodíku a inovativní materiály, jako jsou hydridy kovů. Výzkum se rovněž zaměřuje na vývoj účinných a bezpečných metod přepravy vodíku, včetně potrubí, nákladních vozidel a lodí. Tyto pokroky jsou nezbytné pro vytvoření spolehlivého dodavatelského řetězce vodíku, který může splnit požadavky různých konečných aplikací. [56]

7 Konverze pístu pro použití vodíku jako paliva v rámci ICE

Po komplexním prozkoumání teoretických základů vodíku jako udržitelného alternativního paliva je nezbytné převést tyto poznatky do praktické aplikace. Jednou z cest je přestavba stávajících vznětových motorů na vodíkový pohon. Tato přestavba sice přináší významné ekologické výhody a je v souladu s celosvětovým úsilím o dekarbonizaci, ale představuje značné technické výzvy, které je třeba zvážit. Následující oddíl se bude zabývat technickými úpravami, které jsou nezbytné pro přizpůsobení vznětových pístových motorů pro použití vodíku. Prozkoumá specifické požadavky, výzvy a možná řešení pro účinné využití potenciálu vodíku v odvětví dopravy. Nejprve se bude zabývat otázkou, proč by bylo užitečné upravit stávající pístové motory a jaké jsou nezbytné kroky či překážky, které je třeba překonat.

Tato část se zaměří na píst z nákladních automobilů Tatra, specificky na typ Tatra T815. Přestavba starých nákladních automobilů nebo autobusů se vznětovým motorem může být vzhledem k dostupnému prostoru na šasi nejefektivnějším přístupem k řešení tohoto projektu přestavby HICE. Je třeba vybudovat potřebné zásobníky na stlačený vodík nebo kapalný kryogenní vodík, které budou samy o sobě zabírat velké množství místa. Tento postup by mohl také být použit k přestavbě průmyslových záložních nebo off-the-grid generátorů, aby mohly pracovat zcela bezemisně. Níže je uveden přehled kroků, které jsou součástí tohoto procesu konverze. Začneme počáteční fází procesu, a to zavedením vodíku do spalovací komory. Existují dva základní způsoby, jak toho dosáhnout: přímé vstřikování a nepřímé vstřikování do sacího potrubí. Obě metody mají své výhody a nevýhody, což však není předmětem této práce. V našem případě budeme používat přímé vstřikování, protože náš teoretický experimentální motor je vznětový s přímým vstřikováním. V návaznosti na to je naším počátečním problémem nekompatibilita vstříků. Společnosti, jako je Bosch, v současné době vyvíjejí řešení pro dodatečnou montáž použitelných vstříků. Dalším zásadním aspektem je spalování. Vzhledem k tomu, že vznětové motory jsou při spalování závislé na tlaku, mohla by přítomnost vodíku potenciálně vést k předzážehu a klepání. Jedním z řešení je odstranění žhavicích svíček a namísto nich montáž zapalovacích svíček, což usnadní řízenější spalování. Dalším klíčovým aspektem je úprava kompresního poměru, aby se zabránilo svévolnému předzážehu a klepání. Vodík hoří při výrazně vyšší teplotě než nafta, což by mohlo představovat problém, pokud by nebylo zajištěno dostatečné chlazení. Při hoření vodíku se uvolňuje

voda a přítomnost vody, která by mohla obejít kroužky válců a proniknout do oleje, by mohla způsobit značné poškození motoru nebo zkrátit cyklus výměny oleje. Tomu však lze snadno zabránit – stačí, aby olej překročil teplotu varu vody, která je 100 °C, a docílit dostatečného odvětrání klikové skříně i hlavy válců pomocí systémů PCV nebo odvětrávacích systémů s odlučovačem oleje.

Nyní obraťme pozornost k hlavnímu tématu, a to k přestavbě pístu.

Veškeré níže uvedené a použité hodnoty tlaku a teplot vychází z poskytnutého souboru s výsledky simulace v softwaru GT-Power.

V počáteční fázi byla vytvořena trojrozměrná (3D) reprezentace pístu. Tento píst vychází z fyzického dílu, použitého v motoru nákladního vozu Tatra T815. Veškerá následná práce a simulace byla prováděna pomocí softwaru společnosti PTC, CREO 9.

Technické specifikace pístu:

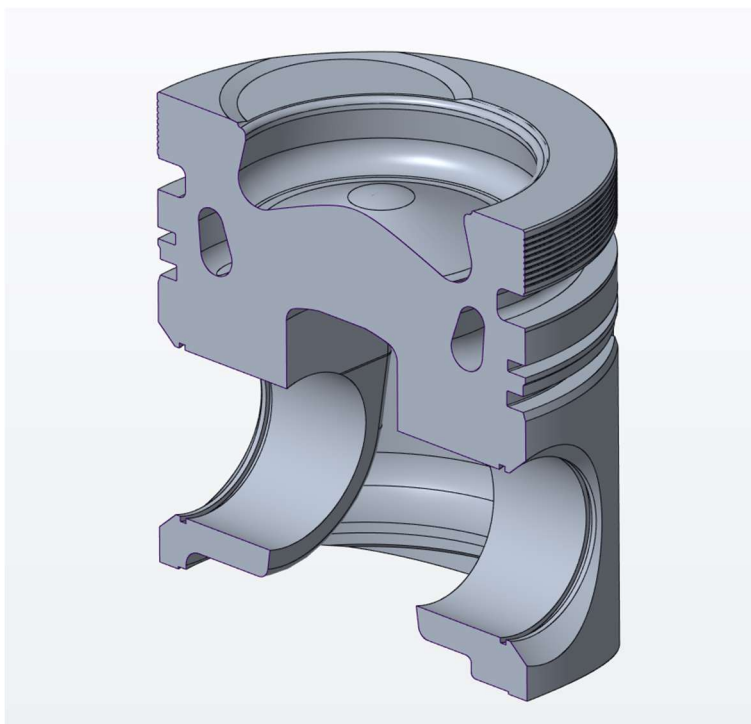
Tabulka 7.1 Technické specifikace pístu

Jmenovitý průměr – normálního pístu	120 mm
Zdvih pístu	140 mm
Materiál	Hliník Al2024
Hustota	2,78e-06 kg/mm ³
Teplotní kapacita	875 J/(Kg K)
Teplotní vodivost	171 W/(m K)
Poissonovo číslo	0,33
Youngův Modul	73100 MPa
Mez kluzu v tahu	75,8 MPa
Mez pevnosti v tahu	186 MPa



Obrázek 20 Píst Tatra T815

Jednou z klíčových výhod tohoto pístu je jeho velikost – vrtání 120 mm, které zajišťuje vysokou tepelnou kapacitu. Píst je navíc vybaven vnitřním olejovým kanálem, který usnadňuje chlazení.



Obrázek 21 Píst Tatra T815, poloviční řez

Základním krokem v procesu konverze je úprava spalovací komory. V tomto případě je nutné zvětšit objem spalovacího prostoru a snížit kompresní poměr ze stávajících 16,5:1 na žádaných 13:1. Tato úprava by umožnila bezpečný provoz motoru bez obav z předzápalů či klepání. Z technických specifikací je známo, že původní píst má kompresní

poměr 16,5:1. Dále známe objem spalovacího prostoru hlavy válce, vrtání a zdvih pístu, které jsou pevně dané a nebudou se měnit. Navzdory diskusi o výměně žhavicí svíčky za zapalovací svíčku, nebude tato změna objemu brána v úvahu. Pomocí jednoduchých vzorců lze nyní vypočítat objem komory, který je třeba zvětšit. Toho bude dosaženo opatrným odebráním materiálu z horní části pístu. Metoda odstraňování materiálu byla navržena s ohledem na proveditelnost výroby a možnost její realizace na stávajícím pístu. Existuje mnoho tvarů a možností a každá z nich má potenciál ovlivnit průběh nebo účinnost spalování.

Výpočet kompresního poměru z geometrického hlediska je následující:

$$\frac{V_z + V_k}{V_k} \quad (7.1)$$

Kde V_z je objem mezi dolní a horní úvratí a V_k je objem spalovací komory.

$$V_z = \frac{\pi * \text{jmenovitý průměr}^2}{4} * \text{zdvih} [mm^3] \quad (7.2)$$

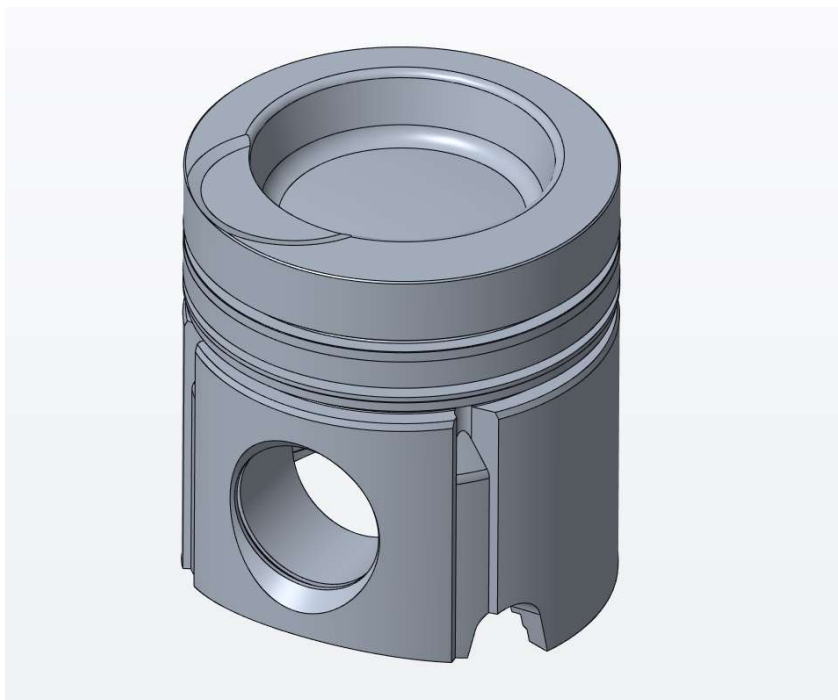
Objem spalovací komory se odvíjí od tvaru spalovacího prostoru a byl vypočítán pomocí rozdílu objemu holého pístu bez spalovací komory a odečtením upraveného pístu s upravenou komorou, přičtení objemu hlavy válce a započtení tloušťky těsnění pod hlavou, zde se počítá s tloušťkou 0,5 mm.

$$V_k = \text{holý píst} - \text{upravený} + \text{objem hlavy válce} + \frac{\pi * 120^2}{4} * 0,5 [mm^3] \quad (7.3)$$

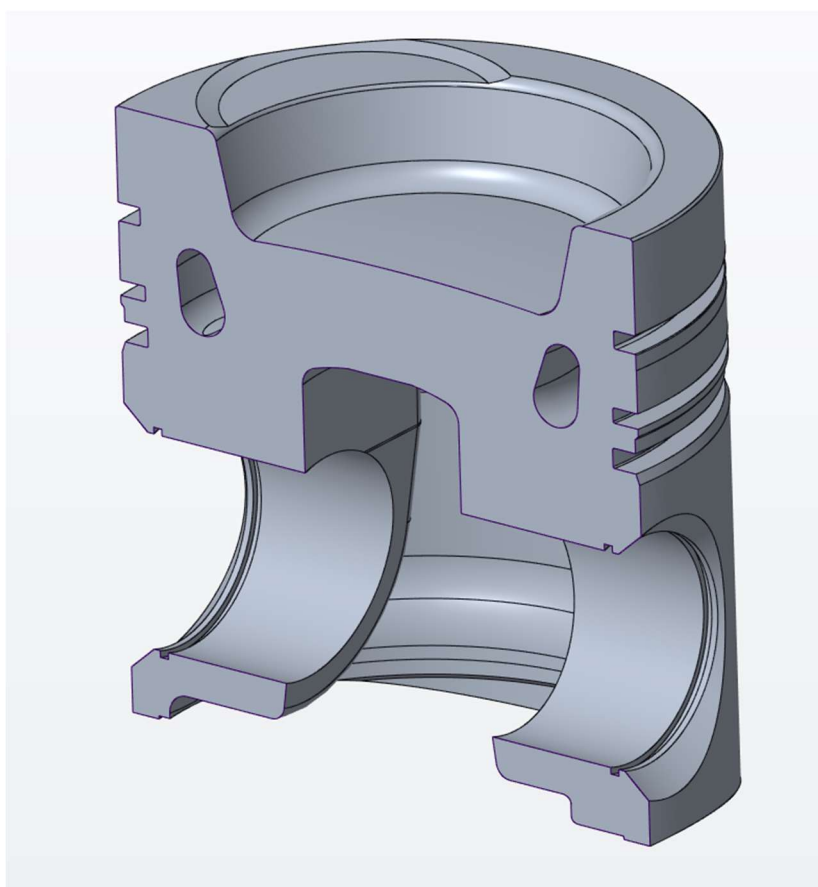
To se rovná konečnému kompresnímu poměru 13,007:1, který je v rozmezí požadovaných kompresních poměrů pro spalovací motory.

Hlavní výhodou konečného tvaru, který byl zvolen, je jeho snadná proveditelnost. Všechny součásti by bylo možné vyrobit na tříosém stroji (CNC) nebo dokonce na

soustruhu. Kromě toho byly odstraněny drážky na horní straně pístu, aby se zjednodušila konstrukce, což usnadní následné simulace metodou konečných prvků.



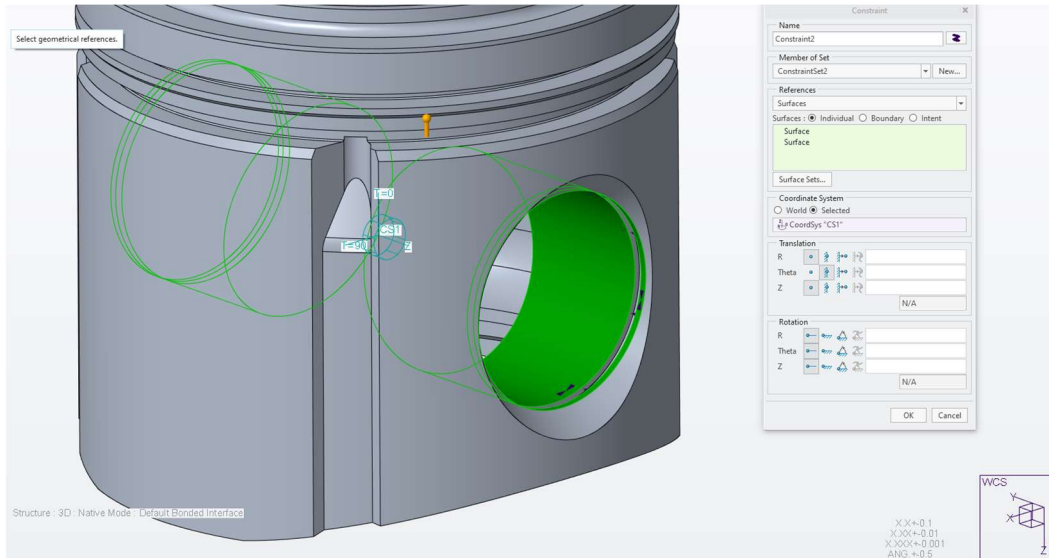
Obrázek 22 Upravený píst



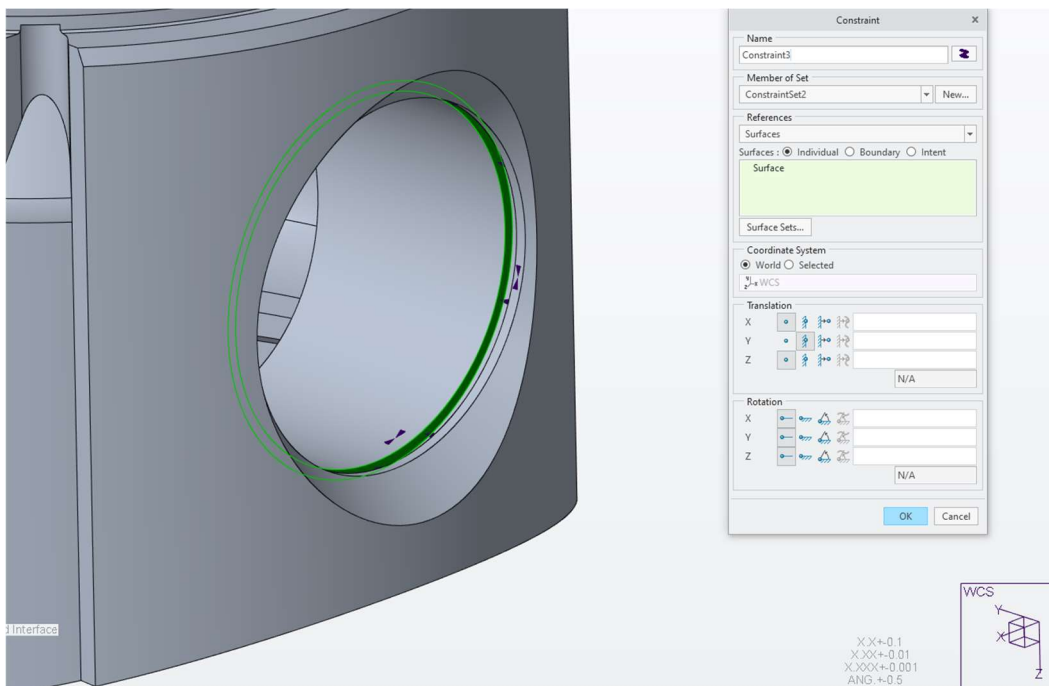
Obrázek 23 Upravený píst poloviční řez

7.1 Zavazbení, síťování a síly na pístu

Píst je opatřen imaginárním pístním čepem, který je pro účely simulace dokonale tuhý. Pokud by tomu tak nebylo, museli bychom simulovat pístní čep, ojnici, klikovou hřídel a veškeré další součásti, čímž by se docílilo komplexního výsledku, který by se nijak výrazně nelišil od prostého uvažování pístního čepu jako dokonale tuhého tělesa. Místo pístního čepu se použije cylindrická vazba (Obrázek 24), která zastaví otáčení kolem osy Y a zastaví pohyb v osách X a Y. Tato vazba slouží k zastavení pohybu v osách X a Y. Pro omezení pohybu v ose Y se použil povrch záchytného kroužku (Obrázek 25).

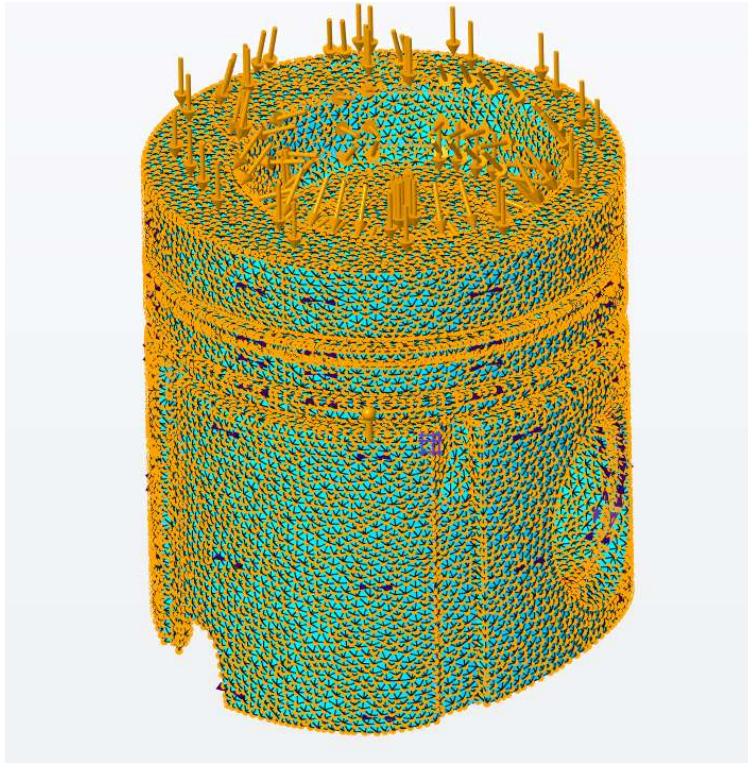


Obrázek 24 Zavedení okrajové podmínky



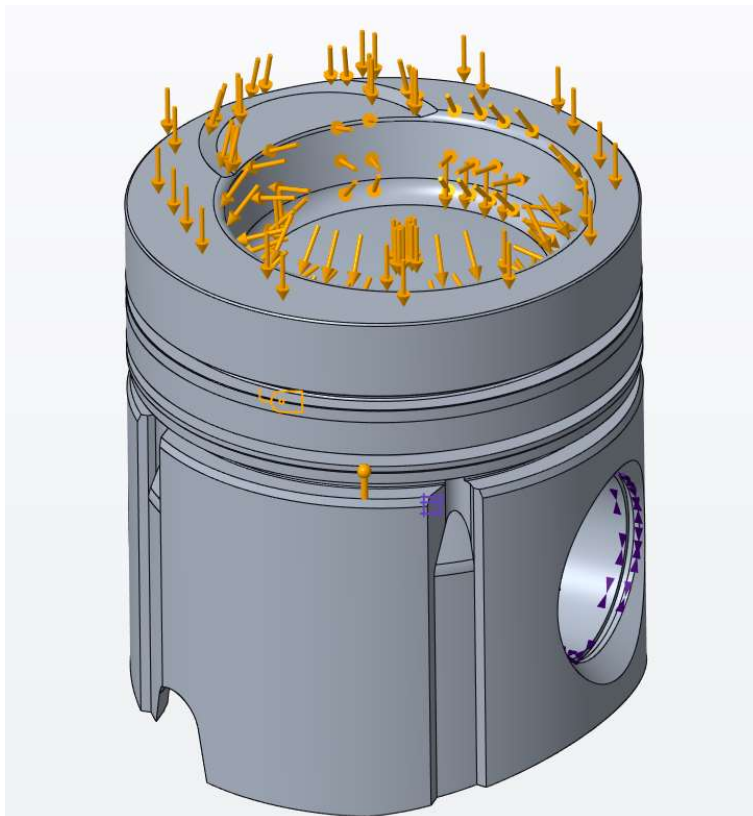
Obrázek 25 Zavedení okrajové podmínky 2

Maximální velikost prvku použitého pro síťování byla stanovena na velikost 3 mm.



Obrázek 26 Generace sítě

Zatížení pístu v důsledku tlaku spalování je definováno funkcí tlakového zatížení na horním povrchu pístu.



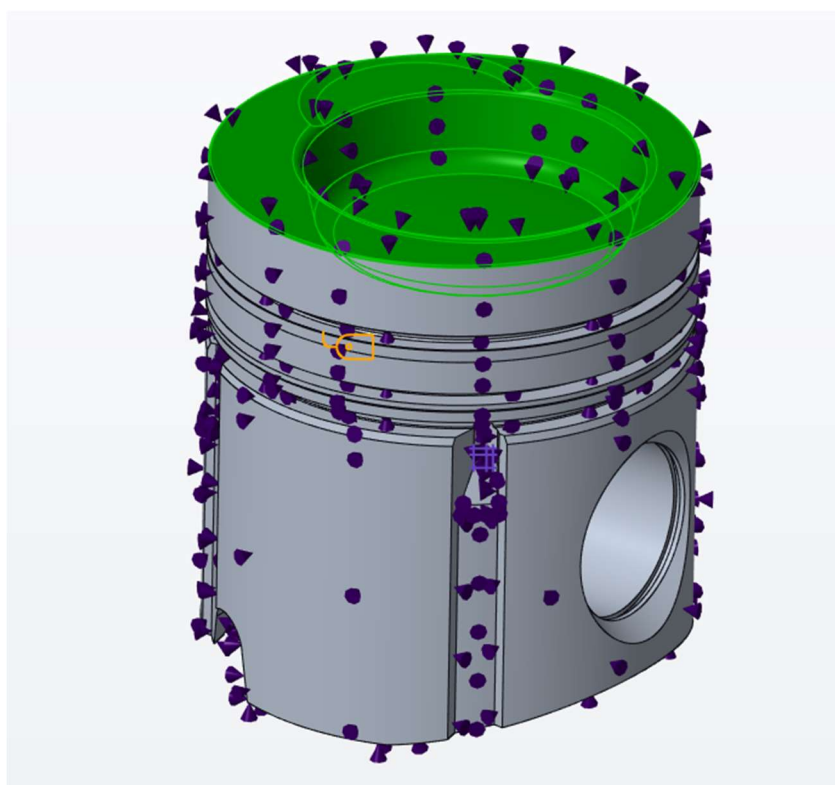
Obrázek 27 Tlakové zatížení pístu

7.2 Tepelné zatížení pístu

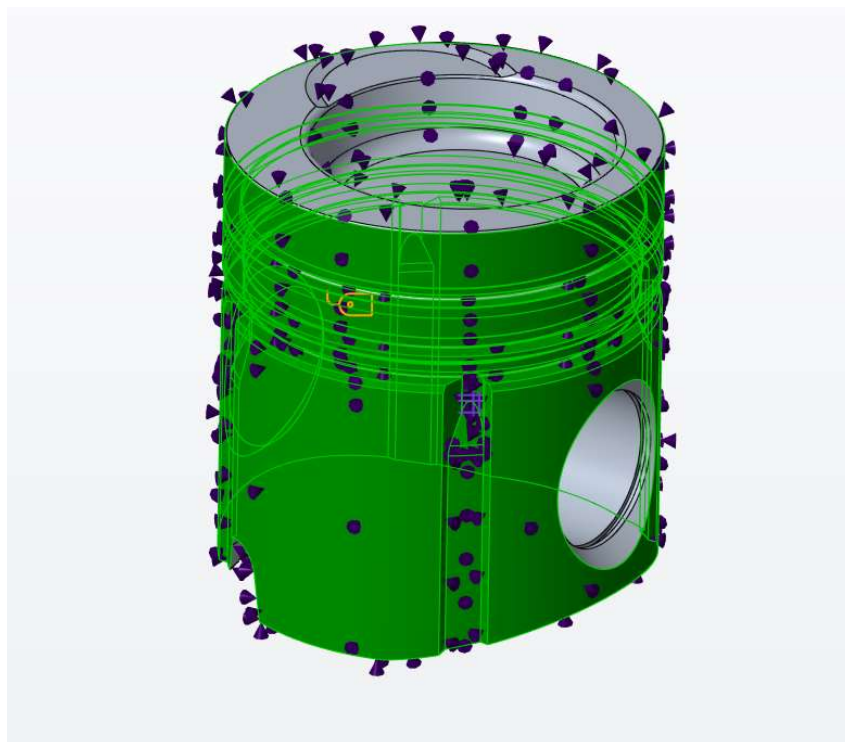
Pro tepelné zatížení bylo použito funkce Convection condition v rámci thermal mode simulace.

Tabulka 7.2 Koeficienty přesunu tepla

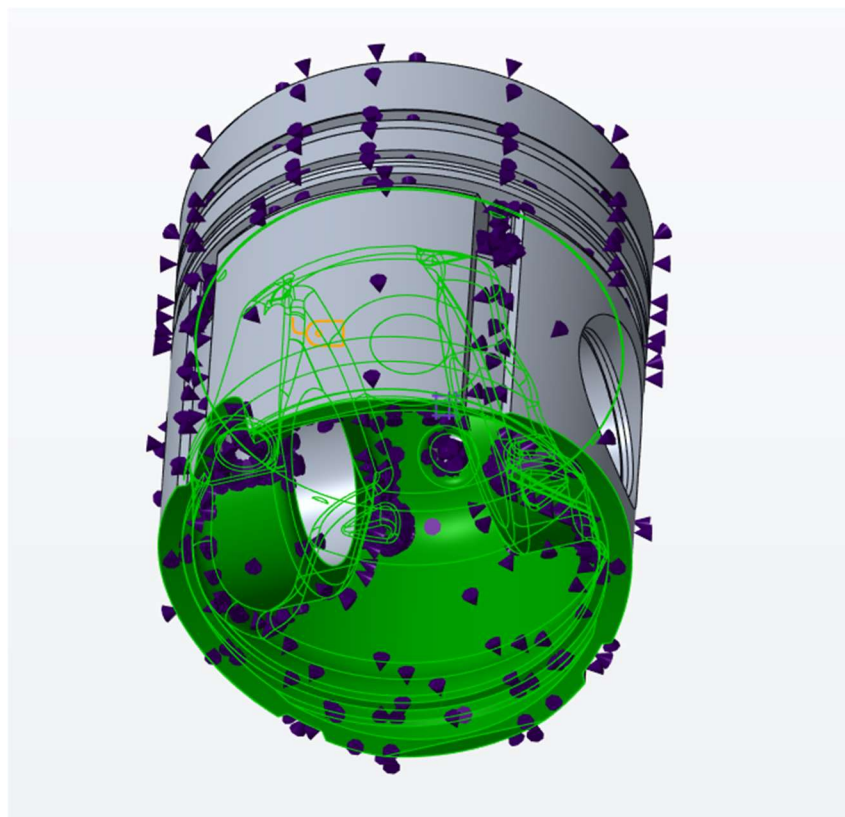
Kontaktní plocha pístu	Lambda [W/m ² *K]	751,07
	t [K]	1246,13
Plášť pístu	Lambda [W/m ² *K]	1000
	t [K]	426,86
Spodní strana pístu	Lambda [W/m ² *K]	2000
	t [K]	390,15
Olejový šnek	Lambda [W/m ² *K]	1500
	t [K]	400,15



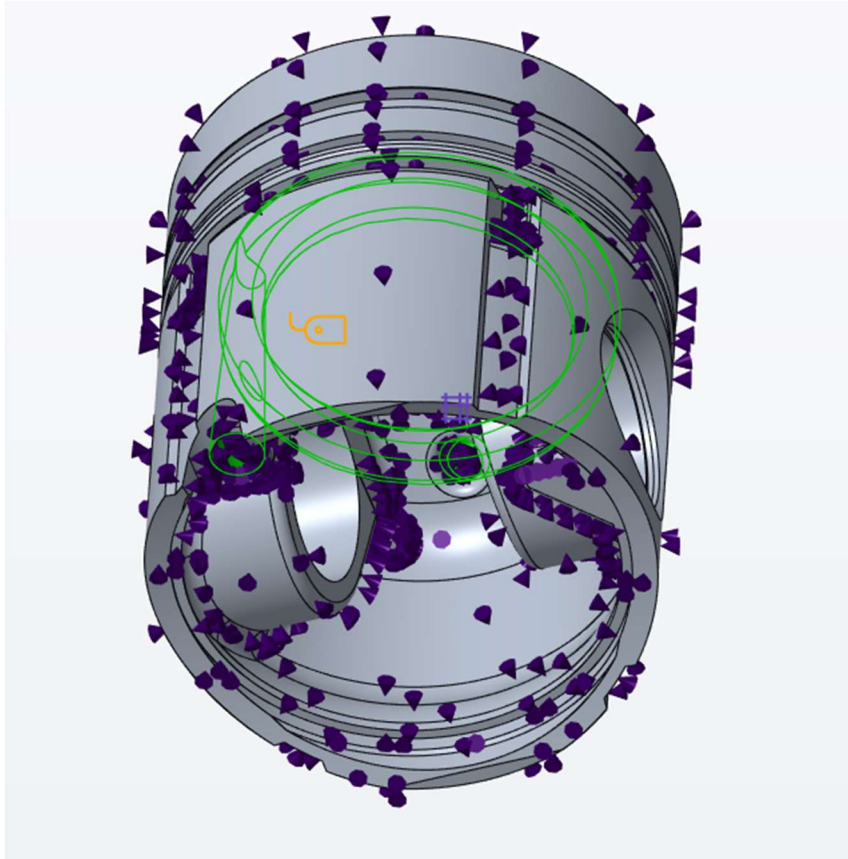
Obrázek 28 Tepelné zatížení, spalovací komora



Obrázek 29 Tepelné zatížení, plášť pístu



Obrázek 30 Tepelné zatížení, vnitřek pístu

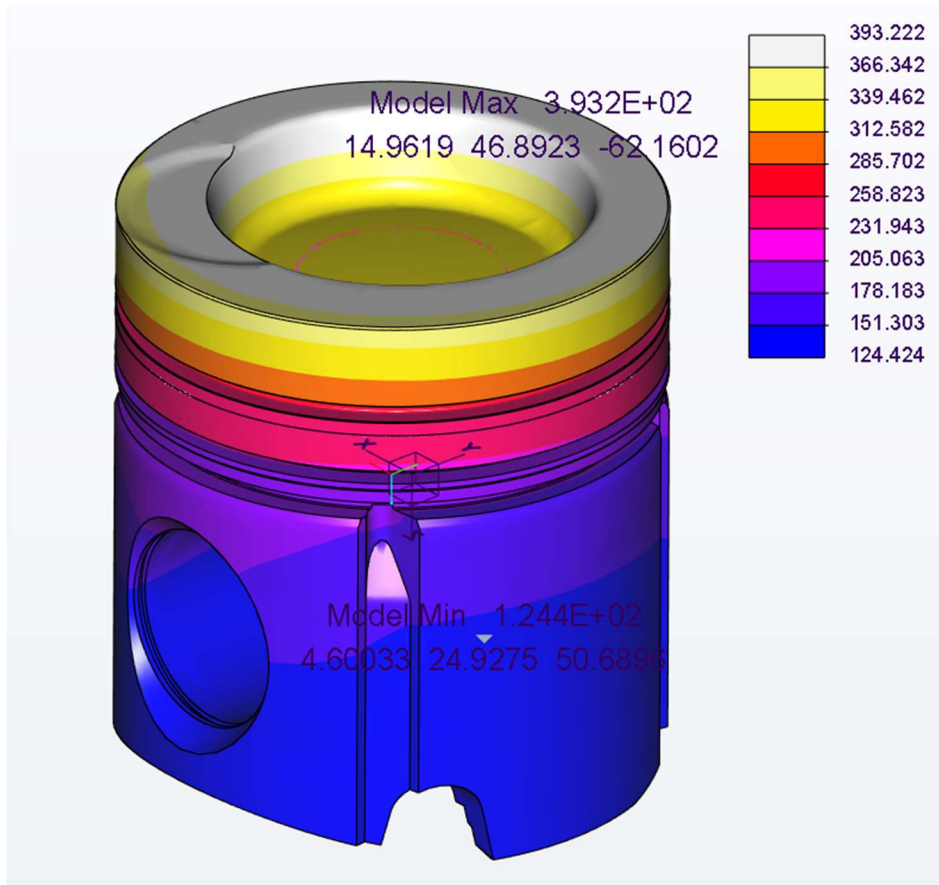


Obrázek 31 Tepelné zatížení, olejový šnek

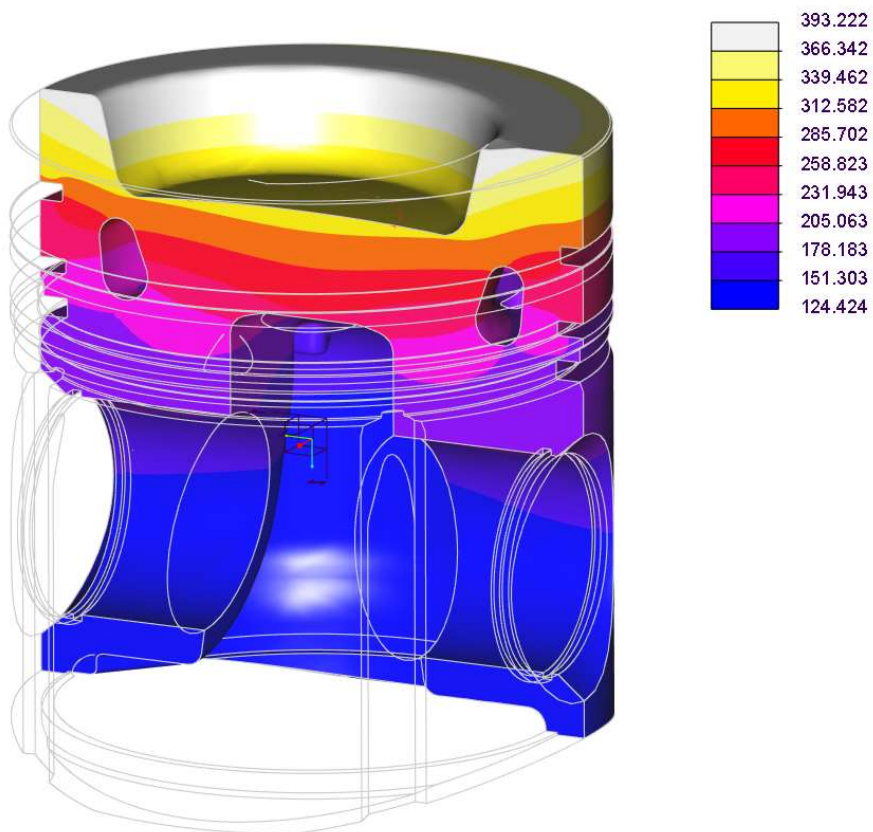
7.3 Výsledky simulace tlaku a teploty

Výsledky simulace ukazují, že teploty přesahují 350 °C, což je bod, kdy se začínají zhoršovat pevnostní vlastnosti materiálu Al2024. Při bližším zkoumání příčného řezu (Obrázek 33) je zřejmé, že zatímco proudění oleje napomáhá chlazení v jádře pístu, přenos tepla na okraje spalovací plochy opracované na CNC je nedostatečný k zajištění dostatečného chlazení. Tyto vyšší teploty by se daly vyřešit extrémnější úpravou geometrie. Pro účely této analýzy je však rozumné považovat tyto scénáře za příznivé.

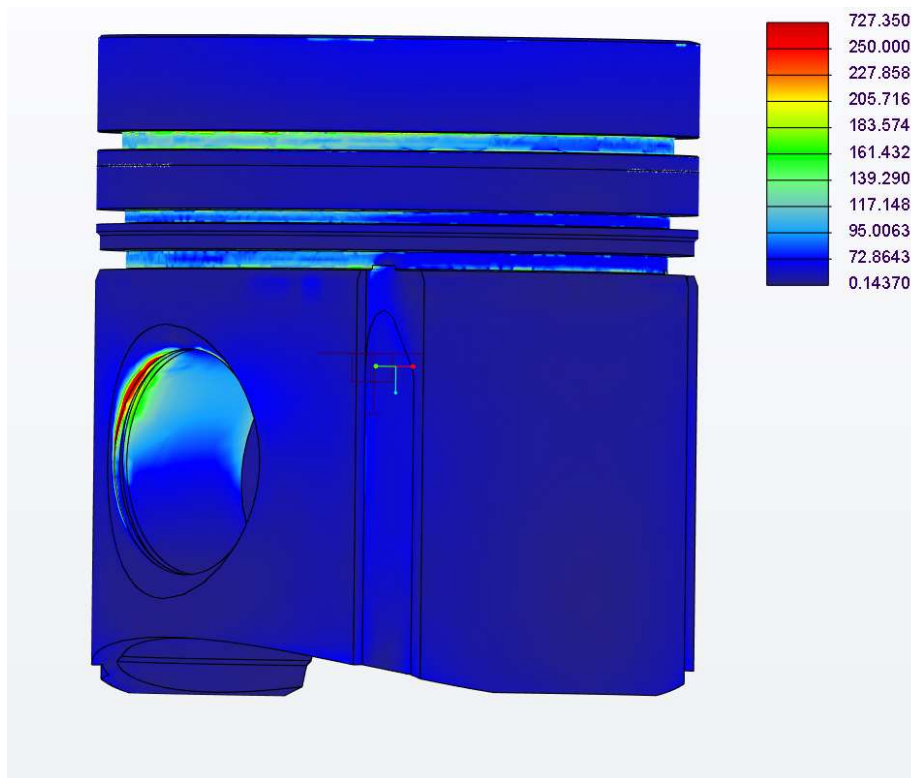
Grafické stupnice zatížení byly upraveny tak, aby kompenzovaly singularitu simulace (chyba, která je viditelná v místech koncentrace napětí v hodnotách až 700 MPa). Protože hrany, kde se nachází koncentrace napětí, jsou pevně uloženy, simuluje se vetknutí a je vázané na okrajovou podmínku. Tuto špičkovou hodnotu lze ignorovat, protože je výsledkem softwarového omezení a chyby.



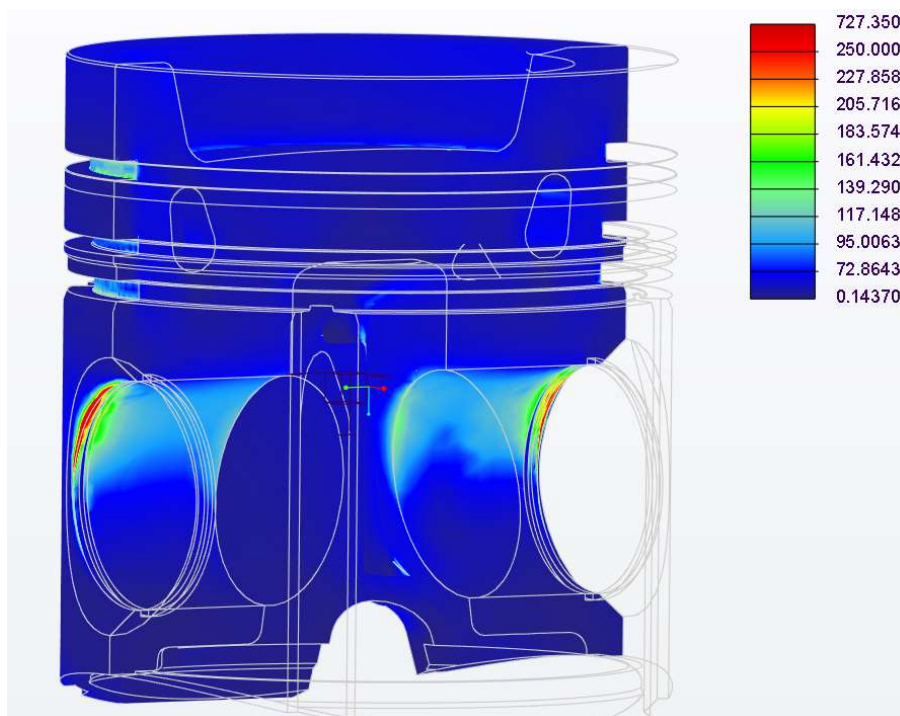
Obrázek 32 Píst, zatížení: teplota [°C]



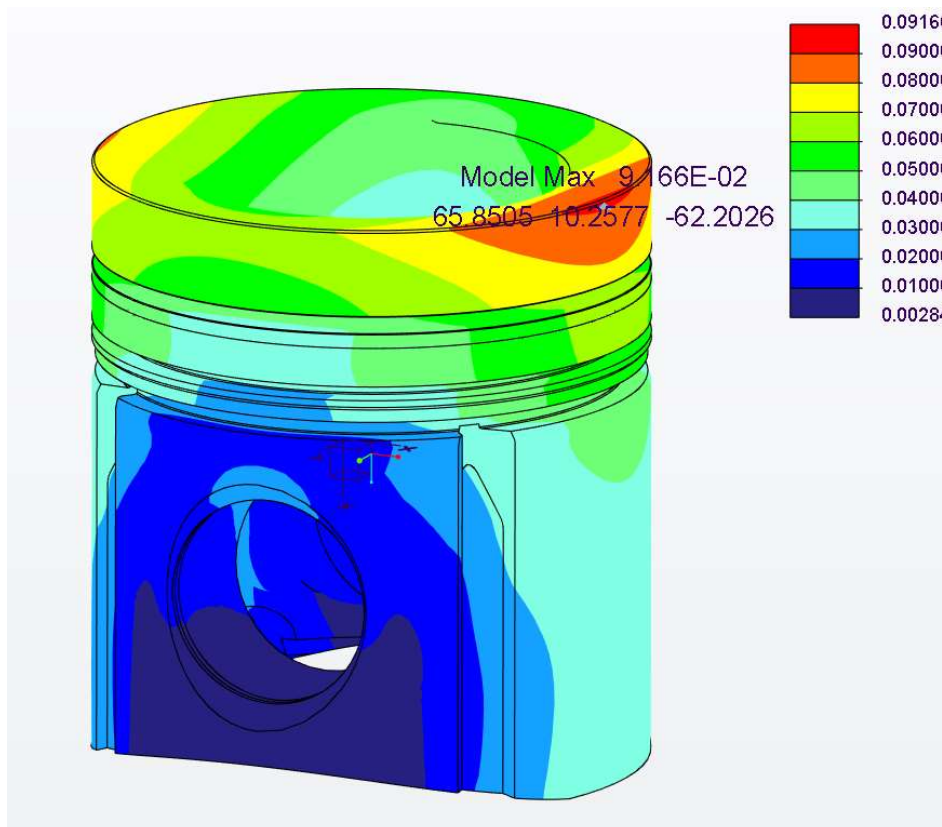
Obrázek 33 Píst, zatížení: teplota, poloviční řez [°C]



Obrázek 34 Píst napětí, zatížení: tlak [MPa]



Obrázek 35 Píst napětí, poloviční řez, zatížení: tlak [MPa]



Obrázek 36 Deformace pístu, zatížení: tlak [mm]

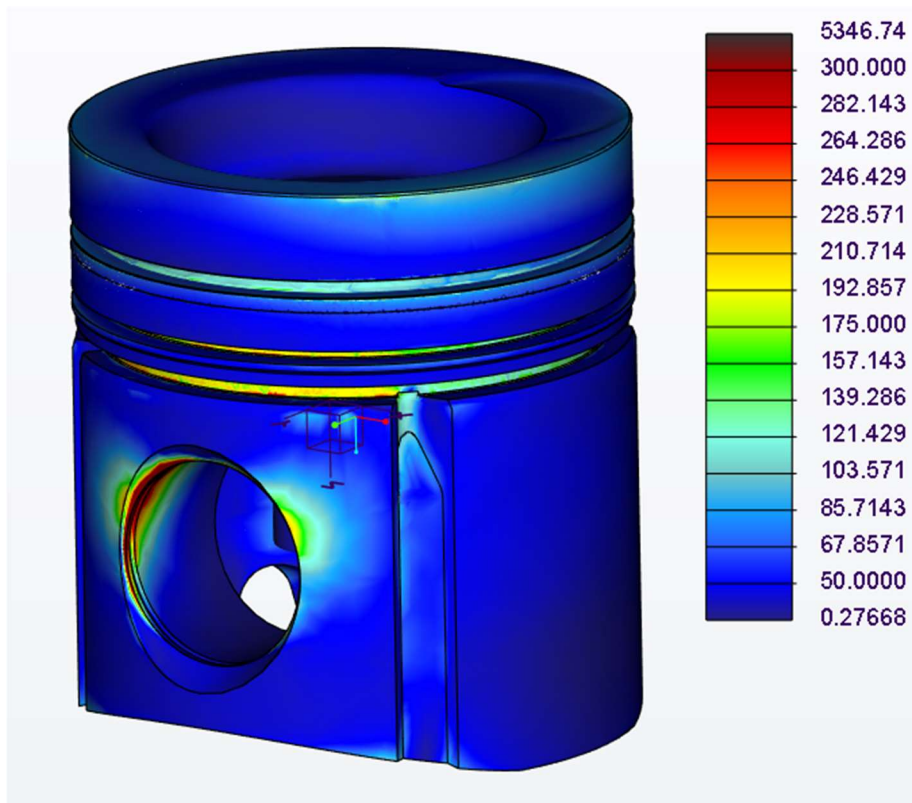
7.4 Simulace kombinace tlaku a teploty

I v tomto případě jsou grafické stupnice posunuty na horní hranu 300 MPa, singularitu lze zanedbat ze stejných důvodů jako v předchozích případech.

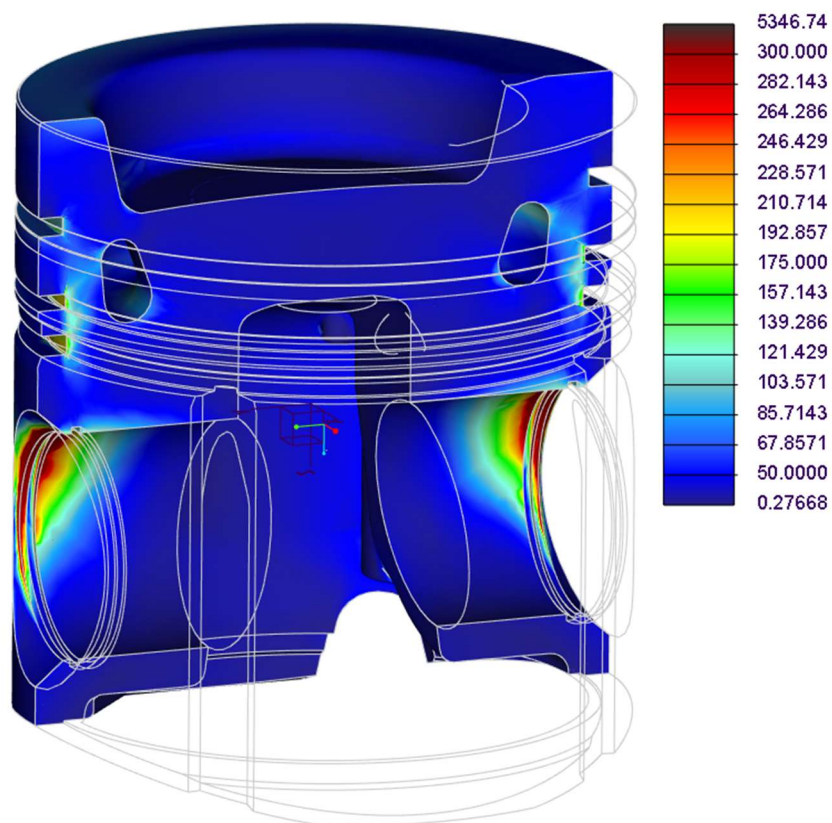
Tabulka 7.3 Mechanické vlastnosti Al2024 při různých teplotách [19]

Teplota (°C)	Mez kluzu (MPa)	Mez pevnosti (MPa)
24	345	50000
100	331	48000
149	310	45000
204	200	31000
260	138	20000
316	62	9000
371	41	6000

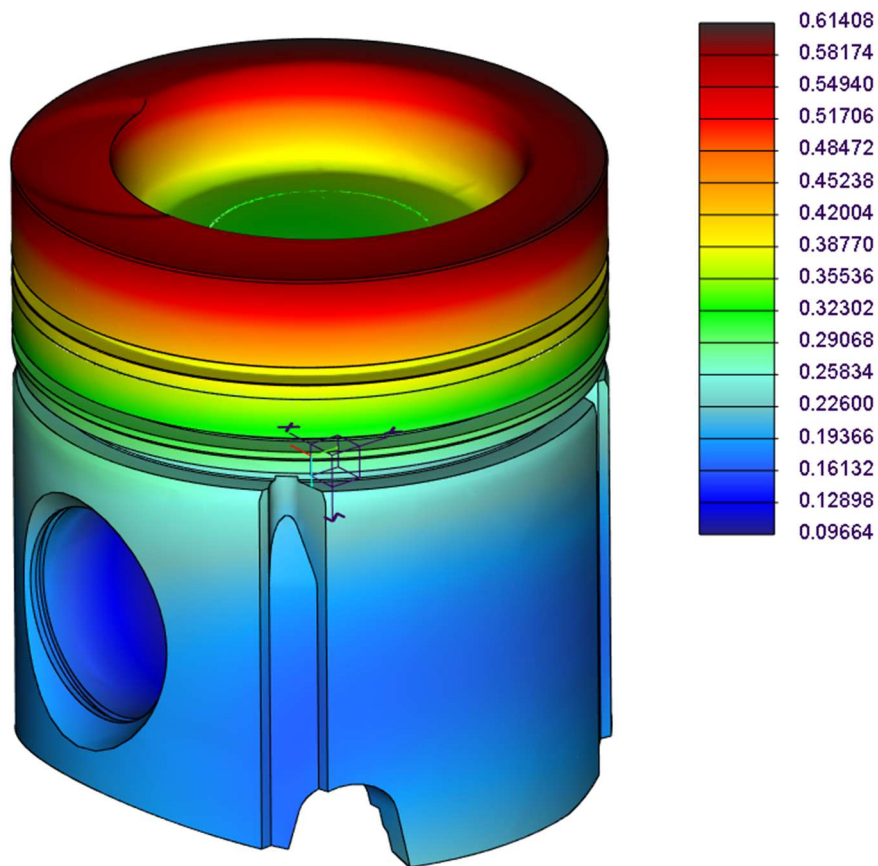
Při pohledu na výsledky simulace a s přihlédnutím k tabulce 7.2 vidíme, že s výjimkou bodů koncentrovaného tlaku je píst v bezpečném rozmezí pod mezí kluzu.



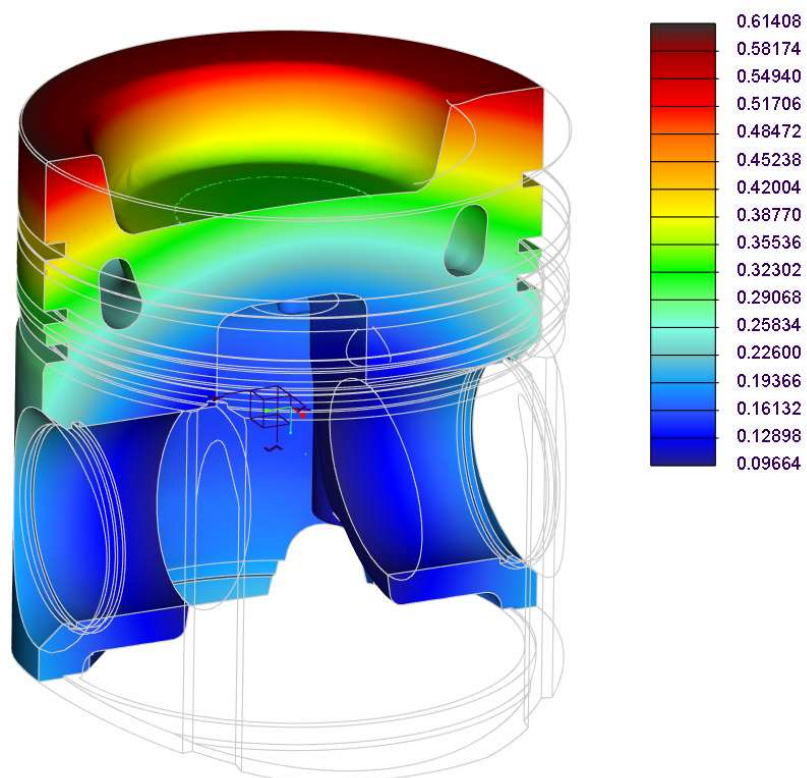
Obrázek 37 Píst napětí, zatížení: tlak + teplota [MPa]



Obrázek 38 Píst napětí, poloviční řez, zatížení: tlak + teplota [MPa]



Obrázek 39 Deformace pístu, zatížení: tlak + teplota [mm]



Obrázek 40 Deformace pístu, poloviční řez, zatížení: tlak + teplota [mm]

8 Vyhodnocení

Využití vodíku jako paliva je slibným způsobem, jak snížit emise skleníkových plynů a přejít na udržitelnější energetický systém. Vodíkové palivo nabízí mnoho výhod, včetně vysoké hustoty energie a možnosti výroby energie s nulovými emisemi. Je však důležité si uvědomit, že ne všechny vodíky je si rovný. Metody výroby vodíku se značně liší svým dopadem na životní prostředí. Většina současné výroby vodíku se opírá o fosilní paliva, což má za následek značné emise CO₂. Tento typ vodíku, často označovaný jako „šedý vodík“, ostře kontrastuje se „zeleným vodíkem“, který se vyrábí převážně elektrolýzou vody s využitím obnovitelných zdrojů energie a má mnohem menší dopad na životní prostředí.

Dříve než bude vodík jako palivo běžně používán, je nezbytné zaměřit se na rozšíření výroby zeleného vodíku. Bez tohoto zásadního kroku by přínosy vodíku jako paliva šetrného k životnímu prostředí mohly být ohroženy pokračující závislostí na výrobních metodách náročných na emise uhlíku. Proto by se při přechodu na energetický systém založený na vodíku mělo v první řadě zaměřit na řízení a rozvoj infrastruktury a technologie pro získávání zeleného vodíku. Zajištění udržitelné a ekologické výroby vodíku maximalizuje pozitivní dopad vodíku jako čistého energetického řešení.

Pokud jde o přestavbu a modernizaci starších dieselových motorů na vodíkové, pro osobní dopravu to nedává smysl jednoduše proto, že skladování vodíku zabírá mnoho místa. Je to tudíž vhodná možnost pro nákladní automobily, autobusy, dieselové generátory a na základě simulací je to možný způsob, jak dát starším platformám další šanci v budoucnosti bez emisí CO₂. Z ekonomického hlediska to v současné době postrádá význam, protože je tato konverze nesmírně nákladná.

9 Závěr

Vodík představuje významný potenciál pro budoucí energetický ekosystém, který každým dnem směřuje blíže a blíže k udržitelnosti a snížení emisí skleníkových plynů. Tato práce podrobně analyzovala různé stránky využití vodíku jako nosiče energie, od jeho fyzikálně-chemických vlastností až po praktické využití v různých odvětvích. Bylo prokázáno, že vodík může hrát klíčovou roli jako hlavní zdroj energie, zejména díky své schopnosti poskytovat při spalování čistou energii, a to v oblasti mobility, průmyslu, energetiky a domácností.

Hlavní poznatky

Jedním z hlavních zjištění této práce je skutečnost, že ačkoli vodík nabízí významné environmentální výhody, jeho výroba a skladování čelí řadě technických a ekonomických problémů. Nejpoužívanější metodou výroby vodíku je parní reformace zemního plynu, při které vzniká značné množství emisí CO₂. Naproti tomu elektrolýza vody nabízí čistší alternativu, ale vyžaduje značné množství elektrické energie, což činí tuto metodu ekonomicky náročnou.

Dalším důležitým bodem je skladování vodíku. Stlačený plyný vodík, kapalný vodík a skladování na bázi materiálů představují odlišné strategie, které mají své konkrétní výhody a nevýhody. Budoucí vývoj v oblasti materiálové vědy a technologií skladování má potenciál výrazně zvýšit účinnost a bezpečnost skladování vodíku.

Z hlediska legislativy je zřejmé, že Evropská unie i Česká republika podnikají kroky směřující k podpoře využívání vodíku jako čistého zdroje energie. Pro vytvoření trhu s

vodíkem a pro podporu výzkumu a vývoje v této oblasti je nezbytný právní základ a finanční podpora, například prostřednictvím Zelené dohody.

Výzkum a inovace

Budoucí směry výzkumu a vývoje se zaměřují na technologické inovace, které mohou přispět k širšímu rozšíření vodíku. Patří mezi ně vývoj nových katalyzátorů pro elektrolýzu vody, pokroky v oblasti skladování a distribuce vodíku a optimalizace vodíkových spalovacích motorů. Simulace tlaku a teplot konverze pístů pro použití vodíkového paliva prokázaly, že lze dosáhnout účinného a čistého spalování i pro existující spalovací motory, čímž se otevírají další možnosti integrace vodíku do stávajících technologií.

Závěrečné hodnocení

Tato práce poskytuje souhrnný přehled současného stavu a budoucích vyhlídek využití vodíku a naznačuje cestu k překonání problémů spojených s tímto nadějným nosičem energie.

Doporučení

Potenciální další kroky v pokroku vodíkové energie:

1. Podpora výzkumu a vývoje: Zaměřit se na inovace v oblasti procesů výroby, skladování a distribuce vodíku.
2. Finanční investice: Zvýšit investice do infrastruktury pro vodíkové hospodářství, včetně výstavby vodíkových stanic a podpory vodíkových projektů.

Výhody vodíkových vozidel oproti čistě elektrickým

Vodíková vozidla mají několik výhod oproti čistě elektrickým vozidlům, která mohou přispět k jejich širšímu přijetí v budoucnosti:

1. Doba tankování: Plnění vodíkových nádrží je rychlejší než nabíjení elektrických baterií. To může být významnou výhodou, zejména pro komerční vozidla, hromadnou dopravu a firemní flotily.
2. Dlouhý dojezd: Vodíková vozidla často nabízejí delší dojezd než elektrická vozidla, což je atraktivní pro uživatele, kteří potřebují cestovat na delší vzdálenosti bez častého zastavování.
3. Menší závislost na těžkých bateriích: Vodíková technologie nevyžaduje tak velké množství baterií jako čistě elektrická vozidla, což může snížit ekologický dopad spojený s těžbou a recyklací baterií.

Správná implementace vodíkových vozidel, má potenciál překonat mnoho současných limitací čistě elektrických vozidel a stát se stavebním kamenem udržitelné energetické budoucnosti. Také je klíčové překonat předsudky a obavy spojené s využitím vodíku.

Použitá literatura

Obrázky

Obrázek 1 Zelený vodík [60]	13
Obrázek 2 Růžový vodík [60].....	13
Obrázek 3 Modrý vodík [60]	14
Obrázek 4 Šedý vodík [60]	14
Obrázek 5 Schéma procesu alkalické elektrolýzy vody [24]	16
Obrázek 6 Alkalická elektrolýza voda [24].....	16
Obrázek 7 Schéma zero gap uspořádání PEM elektrolýzy vody [24].....	17
Obrázek 8 PEM elektrolýza vody [24]	17
Obrázek 9 Princip vysokoteplotní elektrolýzy vody [24].....	18
Obrázek 10 Vysokoteplotní elektrolýza vody [24]	18
Obrázek 11 Prognóza růstu spotřeby nízkouhlíkového vodíku v dopravě, ČR [7]	22
Obrázek 12 Cena nízkouhlíkového vodíku [7]	24
Obrázek 13 Prognóza růstu spotřeby nízkouhlíkového vodíku po odvětvích, ČR [7]	25
Obrázek 14 Využití vodíku v dopravě, ČR [7].....	26
Obrázek 15 Vizualizace palivového článku v osobním voze [20]	27
Obrázek 16 Vyvíjený V8 motor Toyota [17].....	30
Obrázek 17 Využití vodíku v energetice v rámci ČR [7]	32
Obrázek 18 Vizualizace hoření vodíku [52]	37
Obrázek 19 Vizualizace hoření vodíku 2 [52].....	38
Obrázek 20 Píst Tatra T815	41
Obrázek 21 Píst Tatra T815, poloviční řez	41
Obrázek 22 Upravený píst.....	43
Obrázek 23 Upravený píst poloviční řez.....	43
Obrázek 24 Zavedení okrajové podmínky	44
Obrázek 25 Zavedení okrajové podmínky 2.....	44
Obrázek 26 Generace sítě.....	45
Obrázek 27 Tlakové zatížení pístu	45
Obrázek 28 Tepelné zatížení, spalovací komora	46
Obrázek 29 Tepelné zatížení, plášť pístu	47
Obrázek 30 Tepelné zatížení, vnitřek pístu.....	47
Obrázek 31 Tepelné zatížení, olejový šnek	48
Obrázek 32 Píst, zatížení: teplota [°C].....	49
Obrázek 33 Píst, zatížení: teplota, poloviční řez [°C].....	49
Obrázek 34 Píst napětí, zatížení: tlak [MPa]	50
Obrázek 35 Píst napětí, poloviční řez, zatížení: tlak [MPa]	50
Obrázek 36 Deformace pístu, zatížení: tlak [mm]	51
Obrázek 37 Píst napětí, zatížení: tlak + teplota [MPa].....	52
Obrázek 38 Píst napětí, poloviční řez, zatížení: tlak + teplota [MPa].....	52
Obrázek 39 Deformace pístu, zatížení: tlak + teplota [mm].....	53
Obrázek 40 Deformace pístu, poloviční řez, zatížení: tlak + teplota [mm]	53

Citace

- [1] JERÁBEK, Dalibor a KREIBICH, Viktor. *Řízení rizik procesů, zařízení a složitých technických děl zacílené na bezpečnost*. Online. Praha: ČVUT, 2023. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/112301/Prochazkova__Rizeni_rizik_procesu_zarizeni_a_slozitych_technickych_del_zacilene_na_bezpecnost_2023__%282023%29_PUBV_368965.pdf?sequence=1#page=57. [cit. 2024-04-14].
- [2] Hytep. Online. Česká vodíková technologická platforma. 2022. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/o-vodiku/ve-zkratce>. [cit. 2024-04-14].
- [3] *Hydrogen explained*. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.eia.gov/energyexplained/hydrogen/>. [cit. 2024-05-05].
- [4] *Hydrogen, material safety datasheet*. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.yumpu.com/en/document/read/51754270/hydrogen-compressed-gas-msds-linde-gases>. [cit. 2024-05-05].
- [5] *Upněte vodík do svěráku. Že to nejde? To byste koukali*. Online. 2023. Dostupné z: <https://denikn.cz/287981/upnete-vodik-do-sveraku-ze-to-nejde-to-byste-koukali/>. [cit. 2024-05-05].
- [6] *Ballard*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.ballard.com/>. [cit. 2024-05-02].
- [7] *Vodíková strategie České republiky*. Online. *Vodíková strategie České republiky*. 2021, roč. 2021, č. 1, s. 176. Dostupné z: https://www.mpo.cz/assets/cz/prumysl/strategicke-projekty/2021/8/Vodikova-strategie_CZ_G_2021-26-07.pdf. [cit. 2024-04-27].
- [8] *Výroba vodíku*. Online. *Vodíková strategie České republiky*. 2024, s. 176. Dostupné z: <https://www.devinn.cz/blog/vyroba-vodiku>. [cit. 2024-04-27].
- [9] *Hydrogen Production: Natural Gas Reforming*. Online. Energy.gov. 2022. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-natural-gas-reforming>. [cit. 2024-04-21].
- [10] *Steam methane reforming*. Online. Student Energy. 2022. Dostupné z: <https://studentenergy.org/production/steam-methane-reforming/>. [cit. 2024-04-21].
- [11] *Hydrogen*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/hydrogen>. [cit. 2024-05-08].
- [12] *SAFETY DATA SHEET Hydrogen, compressed*. Online. 2020. Dostupné z: https://www.linde-gas.no/no/images/Hydrogen%2C%20compressed_1.1_ENNO_tcm639-445168.pdf. [cit. 2024-05-08].
- [13] SHADIDI, Behdad a YUSAF, Talal. *A Review of Hydrogen as a Fuel in Internal Combustion Engines*. Online. *MDPI*. 2021, roč. 2021, č. 1, s. 19. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/19/6209>. [cit. 2024-05-13].

- [14] *Hydrogen*. Online. BMW Group-classic. 2022. Dostupné z: <https://www.bmwgroup-classic.com/en/history/hydrogen.html>. [cit. 2024-05-13].
- [15] *Liquid Hydrogen-Powered Corolla to Participate in the Super Taikyu Fuji 24 Hours Race*. Online. Toyota. 2023. Dostupné z: <https://global.toyota/en/newsroom/corporate/39234866.html>. [cit. 2024-05-13].
- [16] *Liquid Hydrogen-Powered Corolla and GR86 (Carbon-Neutral Fuel) to Participate in Super Taikyu at Autopolis*. Online. Toyota. 2023. Dostupné z: https://global.toyota/en/newsroom/corporate/39556874.html?_gl=1*pl7x7k*_ga*MTEzMzI2MTM2Mi4xNjkx-MDg1NzI4*_ga_FW87SM9FNZ*MTY5MTA4NTcyNy4xLjAuMTY5MTA4NTcyNy42MC4wLjA.&_ga=2.36622304.1186764438.1691085728-1113261362.1691085728. [cit. 2024-05-13].
- [17] *Why did Toyota Race with a Hydrogen-Powered Engine? A Close Look at the 24 Hours of Intense Development*. Online. Toyota Times. 2021. Dostupné z: https://toyotatimes.jp/en/report/hpe_challenge_2021/189.html. [cit. 2024-05-13].
- [18] *Guide to the Nuclear Wallchart*. Online. 2023. Dostupné z: <https://www2.lbl.gov/abc/wallchart/chapters/10/0.html>. [cit. 2024-05-10].
- [19] *The World Material*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.theworldmaterial.com/2024-aluminum-alloy/>. [cit. 2024-05-12].
- [20] *BMW Fuel cells*. Online. 2024. Dostupné z: [článkem https://www.bmw.com/en/innovation/how-hydrogen-fuel-cell-cars-work.html](https://www.bmw.com/en/innovation/how-hydrogen-fuel-cell-cars-work.html). [cit. 2024-05-12].
- [21] *Disociace*. Online. 2022. Dostupné z: <https://www.products.pcc.eu/cs/academy/disociace/>. [cit. 2024-04-21].
- [22] *Comparison of the emissions intensity of different hydrogen production routes*. Online. 2022. Dostupné z: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/comparison-of-the-emissions-intensity-of-different-hydrogen-production-routes-2021>. [cit. 2024-04-21].
- [23] MAWJI, Omar; MATTEI, Suzanne; WAMSTED, Dennis a SCHLISSEL, David. Reality Check on CO2 Emissions Capture at Hydrogen-From-Gas Plants. *IEFFA.org*. 2022, roč. 2022, č. 1, s. 14.
- [24] DROBNÝ, Josef. *Hydro Race*. Online. Hydro-race.eu. 2019. Dostupné z: <https://hydro-race.eu/V%C3%BDroba-vod%C3%ADku-elektrol%C3%BDzou-vody>. [cit. 2024-04-27].
- [25] ORTMANN, Matyáš. *Po světě se objevuje stále více podzemních nalezišť vodíku*. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/o-vodiku/aktuality/po-svete-se-stale-objevuje-vice-podzemnich-nalezist-vodiku>. [cit. 2024-05-03].
- [26] MESSAD, Paul a FRANCE, Euractiv. *Excitement grows about 'natural hydrogen' as huge reserves found in France*. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.euractiv.com/section/energy-environment/news/excitement-grows-about-natural-hydrogen-as-huge-reserves-found-in-france/>. [cit. 2024-05-03].

- [27] DINNEEN, James. *Huge deposit of natural hydrogen gas detected deep in Albanian mine*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.newscientist.com/article/2416060-huge-deposit-of-natural-hydrogen-gas-detected-deep-in-albanian-mine/>. [cit. 2024-05-03].
- [28] Skladování a přeprava vodíku. Online. *Education in Hydrogen Technologies Area*. 2023, s. 54. Dostupné z: <https://www.copag.cz/file.php?nid=17850&oid=10937274>. [cit. 2024-05-05].
- [29] VOELCKLER, John. *Hydrogen Fuel-Cell Vehicles: Everything You Need to Know*. Online. Car and Driver. 2024. Dostupné z: <https://www.caranddriver.com/features/a41103863/hydrogen-cars-fcev/>. [cit. 2024-04-29].
- [30] *Power-to-gas: Fix for all problems or simply too expensive?* Online. Clean energy wire. 2018. Dostupné z: <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/power-gas-fix-all-problems-or-simply-too-expensive>. [cit. 2024-05-13].
- [31] BALOGH, Ádám. *POWER-TO-GAS - P2G*. Online. 2020. Dostupné z: <file:///E:/Sta%C5%BEen%C3%A9%20soubory/P2G ECS Webinar 25 06 2020.pdf>. [cit. 2024-05-11].
- [32] *Top Industrial Uses of Hydrogen*. Online. 2023. Dostupné z: <https://wha-international.com/hydrogen-in-industry/>. [cit. 2024-05-01].
- [33] CLARK, Jim. *The Haber Proces*. Online. 2020. Dostupné z: [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_\(Physical_and_Theoretical_Chemistry\)/Equilibria/Le_Chateliers_Principle/The_Haber_Process](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Equilibria/Le_Chateliers_Principle/The_Haber_Process). [cit. 2024-05-01].
- [34] *Methanol from CO₂: a technology and outlook overview*. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.digitalrefining.com/article/1002891/methanol-from-co2-a-technology-and-outlook-overview>. [cit. 2024-05-01].
- [35] *The Future of Hydrogen*. Online. 2019. Dostupné z: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>. [cit. 2024-05-01].
- [36] *Global Hydrogen Review 2023*. Online. *Iea*. 2023, roč. 2023, č. NA, s. NA. Dostupné z: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023/executive-summary>. [cit. 2024-05-01].
- [37] *Global Energy Perspective 2022*. Online. McKinsey & Company. 2022. Dostupné z: <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/global-energy-perspective-2022>. [cit. 2024-05-01].
- [38] BRONZO, Charles; CARMELO, Robson; FERNANDES, Milena a ALBERTO CASAZZA, Alessandro. *Use of Hydrogen as Fuel: A Trend of the 21st Century*. Online. *MDPI*. 2022, roč. 2022, č. NA, s. 15. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/1/311>. [cit. 2024-05-01].
- [39] ALBERTO CASAZZA, Alessandro; SNGH, Vineed Kumar a SIGN CHAUHAN, Neha. *FUNDAMENTALS AND USE OF HYDROGEN AS A FUEL*. Online. *ResearchGate*. 2015, roč. 2015, č.

NA, s. 7. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Vineet-Singh-18/publication/279502814_FUNDAMENTALS_AND_USE_OF_HYDROGEN_AS_A_FUEL/links/5593c0d308ae1e9cb429c3a3/FUNDAMENTALS-AND-USE-OF-HYDROGEN-AS-A-FUEL.pdf. [cit. 2024-05-01].

[43] LARMINIE, James. *Fuel Cell Systems Explained*. Research paper. UK: Oxford Brookes University, 2003.

[44] John Wiley & Sons. Staffell, I., Scamman, D., Abad, A. V., Balcombe, P., Dodds, P. E., Ekins, P., ... & Shah, N. (2019). The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. *Energy & Environmental Science*, 12(2), 463-491.

[45] Fuel Cell Technologies Office. Online. 2012, roč. NA, č. NA, s. 378. Dostupné z: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/12/f19/fcto_myrrdd_full_document.pdf. [cit. 2024-05-01].

[45] *Kombinovaná výroba tepla a elektřiny – výroba energie při vytápění*. Online. NA. Dostupné z: <https://www.viessmann.cz/cs/rady-a-tipy/technologie/kombinovana-vyroba.html>. [cit. 2024-05-01].

[46] *Elektřinu společně s teplem si s pomocí palivových článků budeme vyrábět doma*. Online. 2017. Dostupné z: <https://www.energieinfo.cz/2017/02/elektrinu-spolecne-s-teplem-si-s-pomoci-palivovych-clanku-budeme-vyrabet-doma/>. [cit. 2024-05-01].

[47] EKOTO, Issac; HOUF, William; EVANS, Greg; MERILO, Erik a GROETHE, Mark. Experimental investigation of hydrogen release and ignition from fuel cell powered forklifts in enclosed spaces. Online. *Science Direct*. 2012, roč. 2012, č. 22, s. 11. [cit. 2024-05-01].

[48] GROETHE, Mark a MELAINA, M.W. Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks: A Review of Key Issues. Online. *ONREL*. 2013, roč. 2013, č. NA, s. 131. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/51995.pdf>. [cit. 2024-05-01].

[49] DODDS, Paul a MCDOWALL, Will. The future of the UK gas network. Online. *ScienceDirect*. Roč. 2013, č. 60, s. 11. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421513003625>. [cit. 2024-05-01].

[50] Koneczna, Renata & Cader, Justyna. (2021). Hydrogen in the Strategies of the European Union Member States. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*. 37. 53-74. 10.24425/gsm.2021.138660. [cit. 2024-05-01].

[51] Decarbonisation of heavy-duty diesel engines using hydrogen fuel: a review of the potential impact on NOx emissions. Online. *Royal society of chemistry*. 2022, roč. 2022, č. 2, s. 15. Dostupné z: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2022/ea/d2ea00029f>. [cit. 2024-05-03].

[52] *Hydrogen Compared with Other Fuels*. Online. NA. Dostupné z: <https://h2tools.org/bestpractices/hydrogen-compared-other-fuels>. [cit. 2024-05-03].

- [53] *Comparison of the emissions intensity of different hydrogen production routes, 2021*. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/comparison-of-the-emissions-intensity-of-different-hydrogen-production-routes-2021>. [cit. 2024-05-03].
- [54] EVROPSKÁ KOMISE. *Cesta ke klimaticky neutrálnímu hospodářství: Strategie EU pro integraci energetického systému*. Online. Eur-lex.europa.eu. 2020. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0299&from=CS>. [cit. 2024-05-14].
- [55] EVROPSKÁ KOMISE. *Vodíková strategie pro klimaticky neutrální Evropu*. Online. Eur-lex.europa.eu. 2020. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0301&from=EN>. [cit. 2024-05-14].
- [56] EVROPSKÁ KOMISE. *Strategie pro udržitelnou a inteligentní mobilitu – nasměrování evropské dopravy do budoucnosti*. Online. Eur-lex.europa.eu. 2020. Dostupné z: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:5e601657-3b06-11eb-b27b-01aa75ed71a1.0015.02/DOC_1&format=PDF. [cit. 2024-05-14].
- [57] MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU. *Národní akční plán čisté mobility*. Online. Mpo.gov.cz. 2020. Dostupné z: <https://www.mpo.gov.cz/assets/dokumenty/54377/62106/640972/priloha001.pdf>. [cit. 2024-05-14].
- [58] CSG. *Czecho Slovak Group*. Online. 2023. Dostupné z: <https://czechoslovakgroup.com/en/innovations/hydrogen-tatra>. [cit. 2024-05-21].
- [59] TATRA. *Tatra Trucks*. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.tatratrucks.com/about-the-company/press-and-media/news/the-tatra-force-e-drive-was-presented-in-ostrava-for-the-world-premiere-with-hydrogen-fuel-cells-1/>. [cit. 2024-05-21].
- [60] *Fakta o klimatu*. Online. 2024. Dostupné z: <https://faktaoklimatu.cz/studie/2024-re-se-rse-vodik>. [cit. 2024-05-22].