

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Technická fakulta**

**Katedra vozidel a pozemní dopravy**



## **Diplomová práce**

**Vliv plynu HHO na emise výfukových plynů vznětového motoru**

**Vedoucí práce: Ing. Petr Jindra, Ph.D.**

**Autor práce: Bc. Václav Kroupa**

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Václav Kroupa

Technika a technologie v dopravě a spojích  
Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

**Vliv plynu HHO na emise výfukových plynů vznětového motoru**

Název anglicky

**Influence of HHO gas on exhaust gas emissions in the compression ignition engine**

---

### Cíle práce

Cílem práce je zjistit vliv směsi plynu HHO (oxyhydrogen, Brownův plyn) na produkci škodlivých emisí ve vznětovém motoru.

### Metodika

Úvod

Cíl práce

Metodika práce

Přehled řešené problematiky

Praktická část práce

Výsledky a diskuse

Závěr

Seznam použitých zdrojů

Přílohy

## Doporučený rozsah práce

45 – 55

## Klíčová slova

měrná spotřeba paliva, účinnost motoru, CO<sub>2</sub>, CO, HC, NO<sub>x</sub>, PM

---

## Doporučené zdroje informací

HROMÁDKO, J. *Spalovací motory : komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. Praha: Grada, 2011. ISBN 978-80-247-3475-0.

PECHOUT, Martin, Martin KOTEK, Petr JINDRA, David MACOUN, Jan HART a Michal VOJTISEK-LOM.

Comparison of hydrogenated vegetable oil and biodiesel effects on combustion, unregulated and regulated gaseous pollutants and DPF regeneration procedure in a Euro6 car. *Science of The Total Environment* [online]. 2019, 696, 133748. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2019.133748

---

## Předběžný termín obhajoby

2021/2022 LS – TF

## Vedoucí práce

Ing. Petr Jindra, Ph.D.

## Garantující pracoviště

Katedra vozidel a pozemní dopravy

## Konzultant

Ing. Martin Pechout, Ph.D.

Elektronicky schváleno dne 30. 1. 2021

**Ing. Martin Kotek, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 10. 2. 2021

**doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.**

Děkan

V Praze dne 28. 03. 2022

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Vliv plynu HHO na emise výfukových plynů vznětového motoru“ vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jsem si vědom, že moje diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.

Jsem si vědom, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

V Praze dne \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_



## **Poděkování**

Tímto by rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Petrovi Jindrovi, Ph.D. za poskytnuté rady, čas a připomínky k této práci. Dále je mou milou povinností poděkovat své rodině a blízkým za morální a materiální podporu, které se mi dostávalo po celou dobu studia.

**Abstrakt:** Cílem práce je zjištění vlivu směsi plynu HHO (oxyhydrogen, Brownův plyn) na produkci škodlivých emisí ve vznětovém motoru.

Rešeršní část práce začíná stručným popisem činnosti spalovacích motorů. Dále je již tato část práce zaměřena na samotný vodík, od jeho výroby, přes distribuci, až po využití v dopravě. Druhá polovina rešeršní části je věnována především popisu jednotlivých emisních složek vznětových motorů, jejich vzniku a měření homologačních jízdních cyklů.

Praktická část práce popisuje použité měřicí vybavení a samotnou instalaci generátoru na testovací vozidlo. Dále uvádí srovnání konvenčního vznětového motoru s použitím HHO generátoru v závislosti na spotřebě paliva, produkci emisí a výkon motoru.

**Klíčová slova:** měrná spotřeba paliva, účinnost motoru, CO<sub>2</sub>, CO, HC, NO<sub>x</sub>, PM

**Influence of HHO gas on exhaust gas emissions in the compression ignition engine**

**Abstract:** The aim of the work is to determine the effect of the HHO gas mixture (oxyhydrogen, Brown gas) on the production of harmful emissions in the diesel engine.

The research part of the work begins with a brief description of the operation of internal combustion engines. Furthermore, this part of the work is already focused on hydrogen itself, from its production, through distribution, to its use in transport. The second half of the research section is mainly devoted to describing the individual emission components of diesel engines, their formation and measuring the homologation driving cycles.

The practical part of the work describes the measuring equipment used and the actual installation of the generator on the test vehicle. It also provides a comparison of a conventional diesel engine with the use of an HHO generator depending on fuel consumption, emissions production and engine power.

**Keywords:** specific fuel consumption, engine efficiency, CO<sub>2</sub>, CO, HC, NO<sub>x</sub>, PM

## Obsah

1	Úvod.....	9
2	Cíl práce .....	10
3	Metodika práce.....	11
4	Přehled řešené problematiky .....	12
4.1	Pístový spalovací motor.....	12
4.2	Vodík .....	13
4.2.1	Výroba vodíku .....	14
4.2.2	Skladování a transport vodíku .....	18
4.2.3	Čerpací stanice na vodík .....	24
4.2.4	Vodík v dopravě.....	25
4.3	HHO generátor.....	27
4.3.1	Výběr vhodného HHO zařízení .....	28
4.4	Emise .....	30
4.4.1	Druhy emisí produkované vznětovými motory .....	30
4.4.2	Systémy pro řízení emisí vozidel se vznětovým motorem .....	34
4.4.3	Měření vozidlových emisí .....	36
5	Praktická část práce.....	37
5.1	Použitý typ automobilu a generátor HHO plynu .....	37
5.1.1	Typ automobilu.....	37
5.1.2	HHO generátor.....	37
5.2	Použité přístroje, příslušenství a software .....	38
5.2.1	Válcová zkušebna .....	38
5.2.2	Částicový analyzátor TSI EEPS 3090.....	40
5.2.3	Spektrální analyzátor Matrix MG-5.....	41
5.2.4	Náporový ventilátor .....	42

5.2.5	Diagnostický systém vozidla .....	42
5.3	Instalace generátoru HHO na vozidlo.....	43
5.4	Vypracování tvorby plyných emisí.....	43
5.5	Vypracování tvorby pevných částic.....	44
5.6	Vypracování spotřeby paliva vozidla.....	45
5.7	Vypracování vnější výkonové charakteristiky .....	46
6	Výsledky.....	48
6.1	Výsledky jízdního cyklu WLTC3 .....	48
6.1.1	Spotřeba paliva .....	48
6.1.2	Produkce plyných emisí .....	49
6.1.3	Naměřené hodnoty vnější otáčkové charakteristiky .....	52
7	Diskuse .....	53
8	Závěr.....	54
9	Seznam použitých zdrojů .....	55
10	Seznam obrázků .....	60
11	Seznam tabulek .....	61
12	Seznam zkratk .....	62

# 1 Úvod

Nárůst populace a rapidní technologický pokrok v posledních dekáдах, má celosvětově významný podíl na postupném zhoršování kvality ovzduší. Právě technologický pokrok, velký nárůst populace a snaha pohodlnějšího života vede ke značnému čerpání přírodního bohatství a zanechávání takzvané uhlíkové stopy. Tímto postupným čerpáním z neobnovitelných zdrojů a zhoršováním kvality ovzduší vypouštěním exhalací, nejen že dochází k postupnému vyčerpání zdrojů energie, ale také ke změně klimatických podmínek.

V souvislosti se stále rostoucí poptávkou po energii, která dle předpovědí do roku 2035 vzroste až o 53 % a klesající ekologickou stabilitou, se v posledních desetiletích zintenzivnila snaha o využívání alternativních, takzvaných zelených paliv. Přesto je v současné době až 80 % světové poptávky po energii pokryto fosilními palivy, jako je ropa, uhlí a zemní plyn. Hlavním cílem udržitelných strategií se proto stalo neustálé zvyšování rozvoje a účinnosti energetických systémů, které nevyužívají fosilní paliva. [43] [44]

Jedním z hlavních producentů škodlivých emisí a konzumentů neobnovitelných zdrojů je automobilová doprava. Vzhledem ke zrychlujícímu se vyčerpávání fosilních paliv, se stalo nutností zkoumat alternativní paliva, která zajistí hladký přechod od konvenčních technologií založených na fosilních palivech k technologiím obnovitelným s minimálním dopadem na životní prostředí. Existuje již řada způsobů a technologií pro snižování ekologické náročnosti způsobenou automobilovou dopravou, od drobných konstrukčních zásahů spalovacích motorů, až po přechod na elektromobilitu. Současným spalovacím motorům předcházela dlouhý vývoj, proto ho nelze snadno a rychle nahradit. Jednou z možných variant pro snižování produkce škodlivých emisí je přídavný HHO generátor, který pomocí elektrické energie z akumulátoru rozkládá vodu na vodík a kyslík, které jsou následně využity pro obohacení palivové směsi. Jelikož je vodík prakticky nevyčerpatelný zdroj energie, je vysoce hořlavý a přítomný kyslík hoření podporuje, mohlo by mít jeho použití v automobilové dopravě značný potenciál.

## 2 Cíl práce

Cílem práce je zjistit vliv směsi plynu HHO na produkci škodlivých emisí ve vznětovém motoru.

V současné době je řada ozkoušených a funkčních technologií na snižování produkce škodlivých emisí spalovacími motory. Cílem této práce je praktické otestování jedné z několika nových a zdaleka ne tak dobře zaběhlých metod, která je mnohými diskutována.

Ve snaze získat vlastní podložené informace o možném využití a funkčnosti HHO generátoru ve vozidlech se spalovacím motorem jako prostředku pro snižování emisí a případně získání vyššího výkonu, byly provedeny tyto kroky:

- Navržení postupu měření
- Příprava HHO plynu
- Montáž HHO systému na testovací vozidlo
- Měření a následné vyhodnocení použití HHO generátoru na:
  - Produkci jednotlivých emisí
  - Spotřebu paliva
  - Výkon motoru

### **3 Metodika práce**

Práce se skládá ze dvou hlavních částí. V první části je provedena literární rešerše dané problematiky, kde je pozornost věnována hlavně vodíku včetně jeho výroby, skladování, transportu a využití v dopravě. Dále je uvedeno stručné seznámení s HHO generátorem, který je pro tuto práci nezbytnou součástí a popisem jednotlivých emisních složek, společně se systémy pro jejich regulaci a měření.

V druhé části se práce věnuje měření vlivu plynu HHO na emise výfukových plynů. Je zde podrobně rozpracována metodika samotného experimentu, použité měřicí zařízení a metody. Dále jsou zde zhodnoceny a popsány výsledky jednotlivých naměřených hodnot.

## 4 Přehled řešené problematiky

### 4.1 Pístový spalovací motor

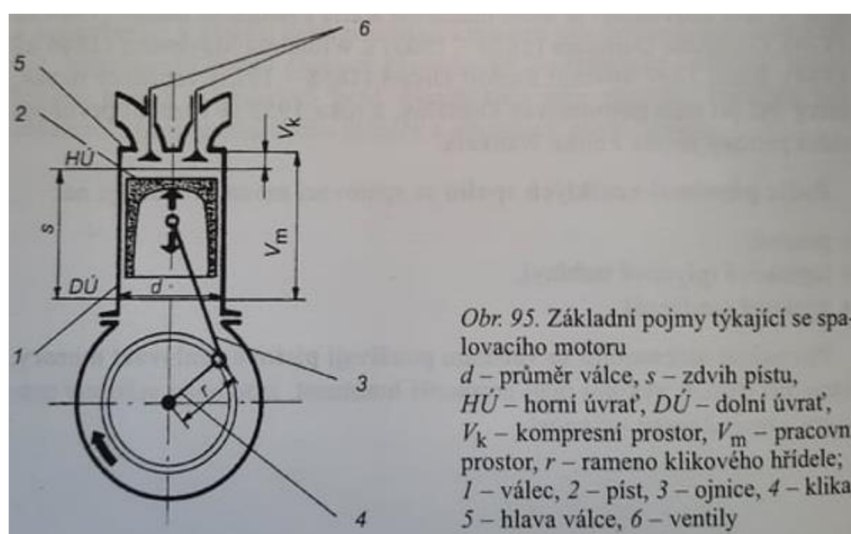
Definice: Pístový spalovací motor je tepelný motor, kde se část tepelné energie vzniklé spálením směsi paliva se vzduchem mění na tlakovou energii a ta prostřednictvím klikového mechanismu na mechanickou práci.

Pístové spalovací motory přeměňují chemickou energii uhlovodíkového paliva na mechanickou práci. V motoru se nejprve spalováním přemění chemická energie paliva na teplo, tím se zvyšuje teplota, měrný objem a tlak.

Ve válci pístového spalovacího motoru je spalována vhodná směs (co nejvíce homogenní) paliva se vzduchem v takovém poměru, aby po zapálení (případně vznícení) rychle a v ideálním případě beze zbytku shořela. Vlivem uvolněné tepelné energie náhle rapidně stoupne tlak a objem plynů ve válci motoru. Tento vzniklý tlak plynů tlačí na píst, který je pohyblivě uložen ve válci motoru.

Posuvný pohyb pístu je pomocí klikového mechanismu přeměněn na otáčivý pohyb, který je přenesen přes další komponenty hnací soustavy na kola a následně kinetickou energii automobilu.

Princip pístového spalovacího motoru je přenášení tlakové energie spalin na píst ve válci, který je v horní části uzavřen hlavou válců. V hlavě válců jsou umístěny ventily, zapalovací svíčka či vstřikovač paliva a kanály pro přívod vzduchu nebo směsi a odvod spalin.



Obrázek 1: Princip pístového spalovacího motoru [1]



Kyslík je přiváděný vzduchem přímo do spalovacího prostoru motoru. Jak již bylo řečeno, pro správnou funkci spalovacího motoru, je důležitý správný poměr paliva a nasávaného vzduchu. Tento ideální poměr se nazývá stechiometrický směšovací poměr. O stechiometrický směšovací poměr se jedná tehdy, je-li poměr mezi palivem a vzduchem 1:14,7 u zážehových a 1:14,5 u vznětových motorů. Tedy na jeden kilogram benzínu je potřeba dostat do válce 14,7 kg vzduchu. Hustota automobilového benzínu se pohybuje od 0,71 do 0,77 g/cm<sup>3</sup>, tedy pro spálení 1,3 litru benzínu je potřeba zhruba 11,5 m<sup>3</sup> vzduchu. Stechiometrickému poměru se nejvíce přiblížíme při volnoběžných otáčkách a zahřátém motoru. Během rozjezdu nebo prudké akcelerace je směs bohatší, v rozmezí 1:10 – 1:14. Naopak při sjíždění dlouhých svahů je směs chudší a pohybuje se v rozmezí 1:15 – 1:19. Výjimkou jsou vznětové motory, ty dokážou pracovat s chudší směsí než motory zážehové, to vede k nižší spotřebě paliva, ale zvýšení produkce oxidů dusíku (NO<sub>x</sub>). Pro zjednodušení popisu jednotlivých režimů byl zaveden vzduchový součinitel neboli součinitel přebytku vzduchu – Lambda (λ). Při stechiometrickém ideálním poměru je λ = 1. Hodnoty větší než 1 označují chudé směsi (přebytek vzduchu), hodnoty menší než 1 směs bohatou (dodáno méně vzduchu). Vzduchový součinitel se získá ze vztahu  $\lambda = \frac{L}{D}$ , kde L (mm) = zdvih pístu a D (mm) = průměr pístu. Hodnota lambda vyjadřuje tedy podíl vzduchu a paliva (nafta, benzín, vodík...) určené k následnému spalování. U vznětových motorů je součinitel lambda větší než jedna (v rozmezí 1,3 – 2), pokud tomu tak není, dochází ke zvýšené tvorbě pevných částic.

Tvar pracovního prostoru válce je určen parametrem vrtání a zdvihem motoru. Zde se rozlišují motory nadčtvercové (zdvih > vrtání), čtvercové (vrtání = zdvih) a podčtvercové (zdvih < vrtání). Nadčtvercové motory mají zpravidla vyšší účinnost (nižší spotřebu) a nižší maximální otáčky (výrazné u vznětových motorů), naopak podčtvercové motory mají vyšší maximální otáčky a zpravidla disponují vyšší hodnotou maximálního měrného výkonu (zavodní automobily, formule jasně podčtvercové). [1]

## 4.2 Vodík

Vodík je nejjednodušším a nejlehčím plynným chemickým prvkem (tvořen jedním protonem a jedním elektronem), tvořící až dvě třetiny celkové vesmírné hmoty a odhaduje se, že tvoří 30 % z celkové hmotnosti Slunce. Ačkoli se téměř vůbec nevyskytuje jako samostatná molekula, jelikož okamžitě tvoří sloučeniny a je vysoce reaktivní, patří mezi nejrozšířenější prvky na Zemi (třetí nejrozšířenější). Vodík je všudypřítomný plynný chemický prvek, který se vyskytuje ve formě zemního plynu, vody, či metalonu. Jelikož se jedná o nejlehčí a

nejjednodušší prvek, tak se při úniku velmi rychle rozptyluje do vzduchu. Při jeho úniku nedochází jakýmkoliv způsobem ke znečištění životního prostředí, nezpůsobuje kyselé deště, ani nepoškozuje ozónovou vrstvu. Vodík je bezemisní netoxickou látkou bez zápachu a chuti, a ačkoliv je hořlavý, samotné hoření nepodporuje a hoří bezbarvým (lehce namodralým) plamenem. Teplo vede 7krát lépe než vzduch a je přibližně 14,4krát lehčí. Díky nízké molekulové hmotnosti je těžko stlačitelný a se vzduchem vytváří výbušnou směs (ovšem nutná inicializace například jiskrou nebo plamenem). Ve vodě je špatně rozpustný, některé kovy jako například palladium ho pohlcují.

S výjimkou vzácných plynů vytváří vodík sloučeniny se všemi prvky periodické tabulky, zejména s kyslíkem, uhlíkem, dusíkem a sírou, které jsou základní stavební jednotky života na Zemi. Ve sloučeninách je schopen vodík tvořit chemickou vazbu, nazývanou vodíková vazba neboli vodíkový můstek. Vázaný atom vodíku zde vykazuje afinitu i k jiným atomům, s kterými není poután klasickou chemickou vazbou. Výjimečně silná je vodíková vazba s atomy kyslíku, zapříčiňuje výjimečné fyzikální vlastnosti vody jako je vysoký bod varu, tání atd.

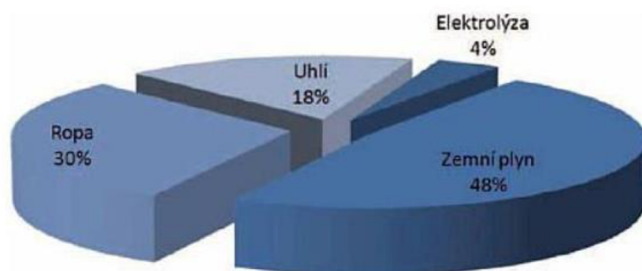
Vodík objevil v roce 1766 Angličan Henry Cavendish během rozpouštění neušlechtilých kovů v kyselinách. Zjistil také, že během exploze vodíku v kyslíku vzniká voda (voda není prvek a je složena z vodíku a kyslíku). V době jeho objevu ovšem nenašel vodík v průmyslu širšího uplatnění, zejména kvůli tehdejšímu nástupu levnějších fosilních paliv v 19. a 20. století.

Ačkoliv je vodík základním stavebním prvkem celého vesmíru, v přírodě se základní vodík (H) vyskytuje ojediněle, a to pouze v okolí sopek. V přírodě se častěji vyskytuje plynný vodík (H<sub>2</sub>), který je přítomen ve všech organických sloučeninách, jako je například zemní plyn. Společně s kyslíkem, uhlíkem a dusíkem je také významným biogenním prvkem (prvkem nezbytným pro život). [2] [3] [4]

#### **4.2.1 Výroba vodíku**

Za rok se produkce vodíku celosvětově přibližuje 60 milionům tun. V porovnání se vzduchem, který je čtrnáctkrát těžší se jedná o obrovské číslo (1 m<sup>3</sup> vodíku váží 89 g, 1 m<sup>3</sup> vzduchu váží 1,28 kg), více než 670 mld. m<sup>3</sup> ročně. Přesto že je vodík čistým zdrojem energie, v současné době pochází valná většina světové výroby vodíku z fosilních paliv takzvaným parním reformingem zemního plynu (uvádí se až 95 %). Ačkoliv tato metoda není ekologicky nejšetrnější, je zdaleka tou nejlevnější. Mezi další významné oblasti získávání vodíku patří

parciální oxidace z ropy (přibližně 30 %) a zplyňování uhlí (přibližně 18 %). Pouhá 4 % světové výroby vodíku je uskutečněna elektrolýzou vody, což je společně s vysokoteplotním rozkladem vody nebo zplyňováním či pyrolýzou biomasy nejekologičtější cesta pro jeho získání. V následujících letech by se tento poměr měl obrátit a většina vyrobeného vodíku by měla pocházet z bezemisní technologie pomocí elektrolýzy vody z obnovitelných zdrojů, kterými jsou například větrné, vodní, sluneční elektrárny nebo biologické procesy, které využívají biomasu.



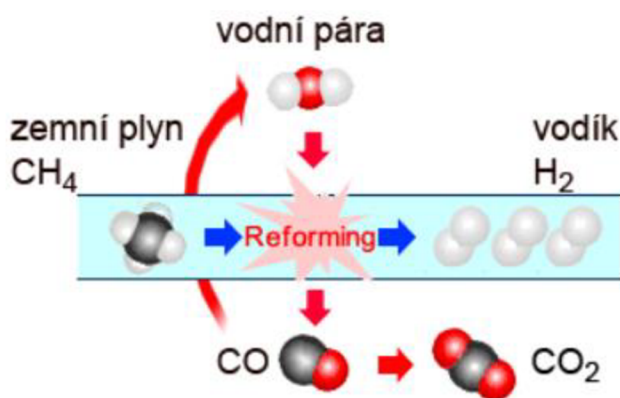
Obrázek 2: Zastoupení hlavních zdrojů výroby vodíku [5]

Existuje řada dalších využívaných metod, například výroba vodíku z koksárenského plynu, termolýzou vody, rozkladem vodní páry železem, výroba z vody pomocí bakterií, rozkladem methanolu nebo amoniaku, S-I cyklus, Westinghouse proces a další. Mezi moderní způsoby výroby se řadí například autotermní reformování nebo suché reformování. V současné době automobilka Toyota společně s producentem průmyslových plynů Iwatani a konstrukční skupina JGC Holdings pracuje na výrobě vodíku použitím odpadního plastu z průmyslu a domácností, což by bylo výrazným posunem v japonské strategii zaměřené na dekarbonizaci. Plastový odpad se nejdříve rozmělní a následně za nízkých i vysokých teplot spaluje ve zplyňovacích pecích. Dochází tak k přeměně v syntetický plyn obsahující oxid uhelnatý a vodík. Následně dojde k přidávání vodní páry pro zvýšení koncentrace  $H_2$  a na závěr se pomocí absorpčního činidla páry odstraní. Tato metoda by měla být levnější, než využívání obnovitelných zdrojů a nepředstavovala by problém se záběrem půdy pro výstavbu větrných nebo fotovoltaických elektráren a spotřebou fosilních paliv. [5] [6] [7]

#### 4.2.1.1 Výroba vodíku parním reformingem zemního plynu

Parní reformace zemního plynu je nejlevnější a nejrozšířenější cesta k výrobě vodíku. Jedná se o chemický proces, během kterého se do vodní páry o teplotě 500–950 °C a tlaku 0,3 – 2,5MPa za přítomnosti katalyzátoru k převládající části zemního plynu přivádí metan. Tato směs páry a metanu následně reaguje za vzniku vodíku, menšího podílu oxidu uhličitého ( $CO_2$ ) a oxidu uhelnatého v reforméru při výše zmíněných teplotách a tlaku. Následuje reakce oxidu

uhelnatého s další vodní párou za vzniku vodíku a oxidu uhličitého. Celková účinnost procesu parní reformace závisí na poměru páry a uhlíku ve směsi, pohybuje se kolem 75-80 %. Negativním dopadem parní reformace je velké množství vzniklého CO<sub>2</sub>, kdy na 1 kg vyrobeného vodíku dochází k vyprodukování 5,5-12 kg CO<sub>2</sub>. Vodík vyrobený touto cestou se nazývá šedý. [7]



Obrázek 3: Proces parního reformování [8]

#### 4.2.1.2 Výroba vodíku klasickou elektrolýzou vody

Získávání vodíku elektrolýzou vody patří do budoucna k jedné z nejpodporovanějších variant díky jeho nízké ekologické náročnosti využíváním elektrické energie z obnovitelných zdrojů. Vodík vyroben touto metodou je označován jako zelený vodík, jelikož je získán bezemisí cestou a má velký potenciál v současně velmi řešené problematice omezování emisí skleníkových plynů. Použitá voda musí být demineralizovaná (zbavená všech nečistot a rozpuštěných látek). Během elektrolýzy vody dochází ke štěpení chemické vazby v roztoku mezi kyslíkem a vodíkem za vzniku plynného kyslíku a vodíku. Tento proces je popsán obecnou rovnicí 4.2.1.2.1.

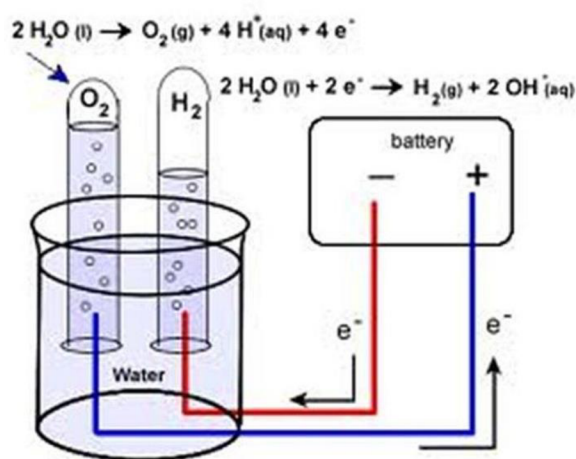


Poté reaguje H<sup>+</sup> na katodě během současného vzniku plynu, který je odebírán a skladován. Proces se uskutečňuje za pokojových teplot a pro jeho uskutečnění je potřeba pouze elektrická energie.

Výsledkem elektrolýzy je jako výstupní medium kyslík a velice čistý vodíkový plyn, který ve většině případů není potřeba dodatečně dočišťovat. Celková účinnost se v současnosti

pohybuje v rozmezí 50-60 % v závislosti na použité technologii elektrolýzy. Na výrobu 1 kilogramu vodíku se spotřebuje okolo 9 litrů vody a přibližně 50-60 kWh elektrické energie.

Tato výroba vodíku je jedním z ekologicky přívětivých způsobů, jak ukládat přebytečnou elektřinu v dobách, kdy elektrárny na obnovitelné zdroje pracují pořád na stejný (maximální) výkon, ale její odběr uživateli není zrovna plně využíván. Do budoucna se počítá se spojením elektrolýzy s jadernými reaktory, čímž dojde ke snížení nákladů na výrobu vodíku.

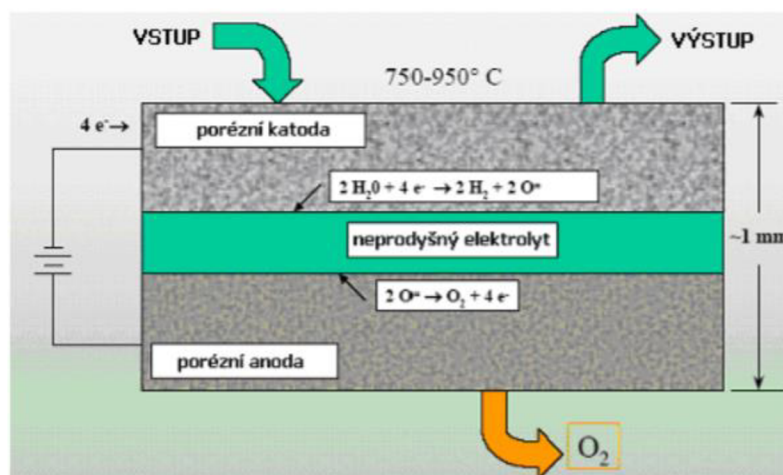


Obrázek 4: Princip elektrolýzy vody [9]

Postupů výroby vodíku pomocí elektrolýzy je několik, mezi nejvýznamnější patří například alkalická elektrolýza, elektrolýza využívající polymerní membránu a vysokoteplotní (parní) elektrolýza. [7]

#### 4.2.1.3 Výroba vodíku vysokoteplotní elektrolýzou

Charakteristickým znakem vysokoteplotní (parní) elektrolýzy je, že část dodávané energie je tvořena elektrickou energií a část je přivedena ve formě tepla. Na vstupu do elektrolýzéry je poměru 50:50 přiváděná pára a vodík. Na výstupu z elektrolýzéry je již obohacená směs tvořící 75 % vodíku a 25 % páry. Na anodě je z této směsi následně oddělen iont kyslíku procházející skrz membránu. Od zbytku páry se pak vodík odděluje v kondenzační jednotce.



Obrázek 5: Vysokoteplotní elektrolýza [7]

Hlavní výhodou je zvýšení účinnosti celého procesu, díky nižší spotřebě elektrické energie než u klasické elektrolýzy. Další výhodou je odstranění problémů s korozí díky cirkulaci samotných  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$  bez dalších chemických látek. [7]

#### 4.2.2 Skladování a transport vodíku

Jelikož je vodík velice hořlavý, může tvořit výbušnou směs, navíc ze všech paliv disponuje nejmenší hustotou a nejnižším bodem varu, což znamená, že buď jeho vlivem dochází k poškození nádrží, ve kterých je skladován (tzv. vodíkové křehnutí a vodíková koroze), uniká z nich, a pro uskladnění je potřeba využít velké množství energie. Proto je velice důležitou problematikou jeho skladování a přeprava. Pro jeho skladování je nutno používat speciální nádoby a nádrže pro to určené, ať už tlakové nádoby při plynném skupenství, či tepelně izolované zásobníky v kapalně fázi. Jelikož se jedná o velice lehký plyn s malou hustotou, tak už jeho malé množství zabere velký objem. Požadavkem je tedy také z těchto důvodů zvýšení jeho objemové hustoty. V současné době je nejvíce využíváné skladování vodíku jejím stlačováním v plynném skupenství. Vzhledem k jeho velmi malé molekulové hmotnosti má tendenci unikat, proto jsou moderní zásobníky vyrobeny z velice pevných a neprodyšných materiálů, které zajišťují bezpečné skladování s minimálními ztrátami skladovaného vodíku. V porovnání s nádržemi pro naftu či benzín jsou zásobníky na vodík značně rozměrnější a těžší.

Pro stacionární skladování vodíku v plynném skupenství se využívají velkoobjemové ocelové tlakové nádrže. Například pro stlačení vodíku na 350 barů je zapotřebí přibližně 15–20 % energie v palivu (někde se uvádí až 30 %). Vodík disponuje největší měrnou výhřevností ze všech komerčně užívaných paliv. Důležitým parametrem pro většinu aplikací je zmiňovaná



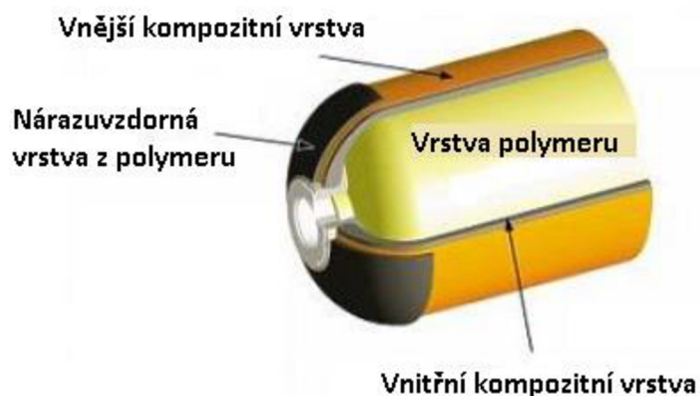
hustota energie, která vyjadřuje množství energie pro příslušný objem paliva a je přímo úměrná výhřevnosti. Jelikož má kapalný vodík zhruba desetinásobně větší měrnou hustotu a čtvrtinovou hustotu energie v porovnání s benzínem, je pro mobilní aplikace technologicky daleko jednodušší použít pouze stlačený vodík. U současně používaných tlaků (nejčastěji 350,700, případně 1000 bar) je hustota energie nižší přibližně dvanáctinásobně (u 350 barů) až sedminásobně (u 750 barů) než u benzínu. [7]

Palivo	T	Hustota	Měrný Objem	Násobek M.O. vztahené k benzínu	Výhřevnost MJ/kg	Hustota Energie MJ/litr	Násobek H.E. vztahené k benzínu
Druh/skupenství	[°C]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[l/kg]				
Vodík 1 bar	20	0,084	11939	8354,7	119	0,01	0,0003
Vodík 250 bar	20,00	17	58,8	41,15	119	2,024	0,065
Vodík 350 bar	20,00	22,2	45,2	31,6	119	2,64	0,085
Vodík 700 bar	20,00	39	25,9	18,14	119	4,6	0,15
Vodík kapalný	-253,0	71,08	14,1	9,85	119	8,46	0,27
Propan kapalný	20,00	498	2	1,4	46,3	23,08	0,74
Benzín kapalný	20,00	700	1,43	1	44,5	31,15	1

Tabulka 1: Přehled vybraných chemicko-fyzikálních parametrů různých paliv [7]

#### 4.2.2.1 Skladování vodíku v plynné fázi

Skladování stlačeného vodíku v plynné fázi se řadí mezi konvenční a zároveň nejjednodušší způsoby skladování, neboť nedochází k žádným fázovým přeměnám. Stlačování vodíku do vysokotlakých nádob je jednoduchou, již vyspělou a řadou let v provozu ověřenou technologií. Na trhu existuje mnoho distributorů a výrobců, ovšem jejich principy se mohou lehce lišit. Existují proto bezpečnostní analýzy a legislativní rámec, který musí všichni splňovat. Pro použití ve statických aplikacích, kde není důležitá hmotnost či rozměry, se většinou využívají ocelové bezešvé láhve z nízkouhlíkaté nebo legované oceli. Pro použití v mobilních aplikacích, kde je omezením rozměr a hmotnost skladovací nádrže, se obvykle využívají tlakové nádoby z kompozitních materiálů. [10]



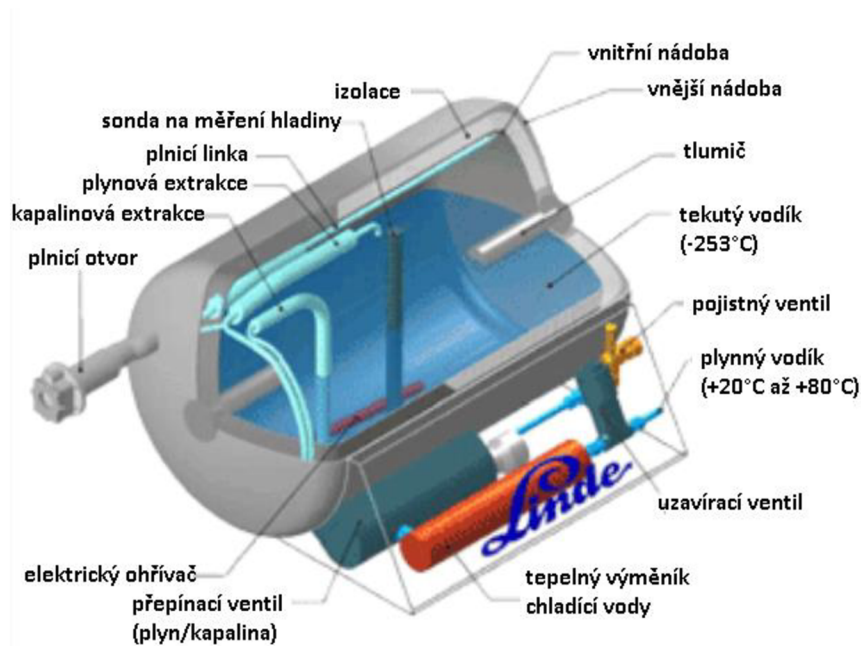
Obrázek 6: Průřez kompozitní láhvi na plynný vodík [11]

#### 4.2.2.2 Skladování vodíku v kapalně fázi

Skldování vodíku v kapalně fázi rovněž patří mezi konvenční způsoby skladování. Pro skladování kapalného vodíku se používají vícevrstvé nádoby s výbornými izolačními vlastnostmi s max. přetlakem 5 barů. Nádoby jsou opatřeny přetlakovým mechanismem, kterým se reguluje maximální přípustný tlak. V kryogenních nádobách, ve kterých je vodík skladován, dochází vlivem přestupu tepla z okolí k postupnému odpařování a tím pádem ke zvyšování tlaku uvnitř nádoby. Aby se zamezilo destrukci nádrže, je potřeba přebytečný tlak regulovat odpouštěním paliva. V nějakých případech se tento unikající vodík zachycuje a opět stlačuje do přidavných tlak. láhvi. U nejčastěji využívaných nádrží dosahuje tato denní ztráta z objemu až 3 %.

Velkou pozornost je třeba věnovat stopovému množství zbytkového kyslíku. Kvůli možnému nebezpečí výbuchu nesmí jeho koncentrace v kapalném vodíku překročit hranici 1 ppm. Stlačování, a zvláště zkapalňování vodíku je energeticky i finančně velice náročný proces. Potřebná energie pro zkapalnění dosahuje až 40 % z LHV vodíku (LHV-low heating value = 119 MJ/kg). Jelikož je samotný proces zkapalnění vodíku vysoce energeticky náročný (pro zkapalnění vodíku je potřeba teplot nižších než  $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), je tímto způsobem upravený vodík využíván pouze v aplikacích, kde ekonomickou stránku celého procesu převyšuje požadavek na jeho vysokou hustotu. Příkladem je využití kapalného vodíku pro raketový pohon, kde se navíc využívá nízké teploty paliva pro chlazení motoru. Dále také pro transport vodíku na velké vzdálenosti pomocí cisteren či nákladních lodí. [10] [12]





Obrázek 7: Průřez kryogenní nádrží na kapalný vodík [13]

#### 4.2.2.3 Alternativní způsoby skladování vodíku

Existuje již řada alternativních metod pro skladování vodíku, mezi které například patří:

- Systémy na bázi hydridů
  - Metalhydridy
  - Komplexní hydridy
    - Borohydridy
    - Alanáty
- Vodík vázaný chemicky ve sloučeninách
- Vodík adsorbovaný na nanostrukturách
- Vodík ve skleněných mikrokuličkách

Obecně všechny systémy skladování vodíku na bázi hydridů jsou principiálně založeny na absorpci vodíku do materiálu na bázi lehkých kovů (Mg, Li, Ca, Na, Al). Během absorpce dochází k vzniku tepla, jedná se tudíž o exotermní reakci. Naopak dodáním tepla dojde k následnému uvolňování vodíku, tedy opačnému ději – desorpci. Hlavní důraz je u těchto systémů kladen především na teplotu, při které se uskutečňuje desorpce vodíku z materiálu, objemovou kapacita, hmotnostní kapacitu absorbátoru, složitost systému a na cenu.

Do dalších alternativních metod skladování vodíku patří vodík adsorbovaný na uhlíkatých nanostrukturách. Sem se řadí například vysokoporézní grafit a uhlíkaté nanotrubičky.

Pro skladování vodíku ve skleněných mikrokuličkách se používají například duté kuličky z křemičitého skla, polyamidu a MgAlSi o rozměrech 25–200  $\mu\text{m}$  a tloušťce stěny 0,5 – 20  $\mu\text{m}$ . Plněné mohou být plynným vodíkem o přetlaku až 100 Mpa. Samotné plnění probíhá difuzí molekul vodíku přes stěnu za zvýšené teploty (200 °C) a vysokém tlaku. Opětovným zvyšováním teploty pak dochází k uvolňování vodíku z kuliček. Tyto skleněné mikrokuličky naplněné vodíkem je možné čerpat do nádrží a láhví podobným způsobem jako klasickou tekutinu. Kuličky je možné opětovně vyprazdňovat a zase plnit. Komerční využití této metody je ovšem zatím ve fázi vývoje.

Dalším alternativním způsobem skladování a přepravy vodíku je ve formě sloučenin, které jsou bohaté na vodík. Paradoxně platí, že v jednom litru vody se nachází více atomů vodíku než v samotném litru kapalného vodíku. Nejvýznamnější skupinou bohatou na vodík jsou uhlovodíky, které mohou být skladovány v tlakových nádobách v kapalném stavu a za nízkých teplot (zemní plyn, propan, butan, atd.). Typickým příkladem směsi vyšších uhlovodíků, které jsou označovány jako primární zdroj uhlovodíků je benzín a nafta a je možné je skladovat za běžné teploty a tlaku. Pokud je pro koncové aplikace potřeba čistý vodík, je zapotřebí zařadit mezi nádrž a palivový článek reformer paliva. [7]

#### **4.2.2.4 Revoluční způsoby skladování vodíku**

Americký startup Kontak vyvinul a nechal si patentovat novou technologii pro bezpečné skladování, přepravu a dávkování vodíku metodou chemické vazby s nosnou kapalinou. V porovnání s konvenčním skladováním stlačeného nebo tekutého vodíku je výhoda této technologie v mnohem nižších nákladech a až třikrát vyšší kapacitě. Principem je zahřívání 320 000 mikrotrubic uspořádaných do jednoho svazku striktně kontrolovanou magnetickou indukcí. Záměrem je každou molekulu nosné kapaliny vystavit zahřátému katalyzátoru na konkrétní teplotu. Součástí patentu je infračervený zobrazovací nástroj, který monitoruje teplotu v jednotlivých mikrotrubicích a přizpůsobuje teplotu v reálném čase. Následuje filtrace vodíku a jeho posílání přímo do palivového článku.

Z technické univerzity v Dánsku (DTU) přišel pětičlenný tým Profesora Vlause Hviida Chritensena na nový způsob uschování vodíku, a to pomocí vodíkových tablet. Jedním z problémů využití vodíku v automobilové dopravě je v jeho zmiňované nízké hustotě, která se v plynné fázi pohybuje od 1,331  $\text{kg}/\text{m}^3$  (při jeho normálním bodě varu: -253 °C) po 0,089  $\text{kg}/\text{m}^3$  (při atmosférických podmínkách: 20 °C, 1 atm.). Tvořeny jsou čpavkem absorbovaným na mořskou sůl. Vysoké množství vodíku obsahují díky jeho vázání v tabletách ve formě amoniaku ( $\text{NH}_3$ ). Z jednotlivých tablet je čpavek uvolňován pomocí katalyzátoru, který z molekuly uvolní

volný vodík. Není ovšem uvedeno, o jaký typ katalyzátoru se jedná. Tablety je údajně možné po jejich vyprázdnění opakovaně použít jednoduchým dobitím. Tyto tablety by měly být bezpečné a levné. Pokud se tato metoda skutečně prokáže tak jednoduchá a účinná, jak tým tvrdí, byl by to významný posun pro vodík jako ekologické palivo a překonání jeho dvou základních problémů, kterými jsou nízká hustota a vysoká bezpečnostní rizika skladování. Na uvedení těchto tablet do komerčního využití se společně s DTU podílí firma Amminex A/S. [14] [15]

#### 4.2.2.5 Transport vodíku

Vodík se přepravuje mnoha klasickými druhy dopravy:

- po silnici v cisternách pro kryogenní kapalinu
- v návěsech s plynovými trubkami
- po železnici nebo na lodích
- nebo přímo z místa výroby do místa určení prostřednictvím potrubí.

Pro přepravu vodíku v plynném stavu se používají bateriové vozy s tlakem nejčastěji v rozmezí 20 – 60MPa.

Pro přepravu vodíku v kapalném stavu se obvykle používají dvouplášťové vakuové zásobníky, kde se klade velký důraz na kvalitu izolace, aby v nich uskladněný vodík vydržel v kapalném stavu několik dní. Objem zásobníků bývá 60 m<sup>3</sup> a jejich vyprazdňování probíhá tlakováním (tzv. řízeným odpařováním).

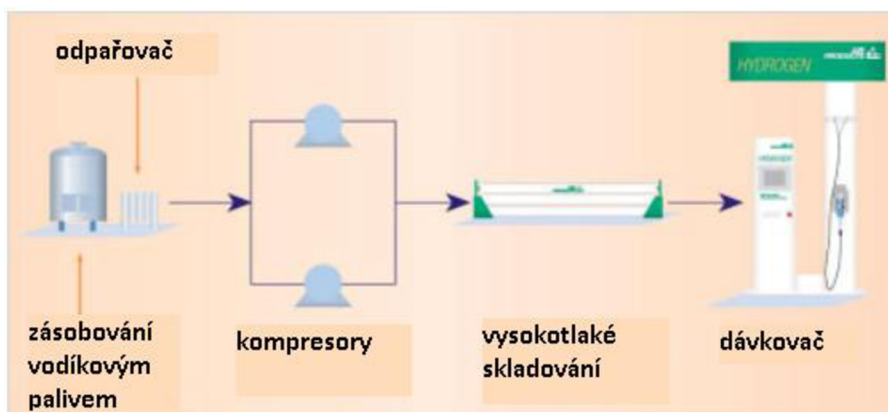
V současnosti se pracuje a probíhají testy na využití stávající infrastruktury plynovodů k přepravě vodíkového paliva jako náhrady zemního plynu pro vytápění domácností s nulovými emisemi.

Vědci z Fraunhoferova institutu přišli s unikátní technologií transportu vodíku pomocí stávajících distribučních sítí zemního plynu pomocí membránové technologie. Tento vodík by ovšem nebyl omezen pouze pro použití vytápění domácností či jako příměs zemního plynu, ale mohl by být plnohodnotně využíván samostatně. Zmiňovaná membránová technologie umožňuje současně vedený zemní plyn a vodík ve společném potrubí od sebe oddělit separováním na konečném místě přepravy, aby mohl být následně každý plyn využit samostatně. Membránová technologie je energeticky vysoce účinná a ekonomicky přívětivá. Pro filtraci zmiňovaných plynů je využíván uhlík (póry uhlíku mají menší průměr než nanometr), který na porézních keramických podkladech vytváří tenkou vrstvu, působí jako membrána a plyny odděluje. Během separace se zemní plyn a vodík tlačí přes trubičkové

moduly, kdy menší vodíkové molekuly jsou protlačovány přes póry v membráně a ven se dostávají ve formě plynu, větší molekuly metanu jsou membránou zadrženy. Vzniká tak vodík s 80% čistotou, následuje druhá separace a jeho čistota se zvýší na hodnotu přes 90 %. [14] [16]

### 4.2.3 Čerpací stanice na vodík

Kromě současně diskutovaných témat výroby, transportu, bezpečnosti a ostatních témat v oblasti zavádění vodíku do běžného života (v našem případě hlavně mobility), je také stále nedostatečná infrastruktura čerpacích stanic. Na území ČR byla první a v současné době stále jediná (únor 2022) vodíková čerpací stanice otevřena v roce 2009 v Neratovicích. Tato čerpací stanice je ovšem neveřejná a natankování u ní je možno uskutečnit pouze po předchozí domluvě a za spolupráce obsluhy. Problémem této čerpací stanice je také tlak. Tato stanice byla stavěna pro plnění autobusů, které využívají maximální plnicí tlak 350 barů. Současné vodíkové osobní automobily ovšem využívají systém s tlakem 700 barů kvůli vyšším nárokům na prostorovou kompaktnost nádrží. To znamená, že u zmiňované čerpací stanice je možné naplnit nádrž osobního automobilu pouze do poloviny. Na obr. je znázorněna obvyklá čerpací stanice na vodík.



Obrázek 8: Schéma obvyklé čerpací stanice na vodík [33]

Stlačený vodík je skladován v čerpací stanici při tlaku přibližně 482 barů. Tento vodík, který je pod vysokým tlakem je následně možno dodávat přímo do vozidel s tlakem 250 nebo 350 barů. Ovšem jak již bylo uvedeno, pro současné osobní automobily, které jsou vybaveny palivovými články je pro doplňování paliva potřeba tlak 700 barů. Pro získání tohoto tlaku není potřeba ve většině případů změnit celou konfiguraci čerpací stanice, ale pouze se použije dodatečný kompresor.

V roce 2021 mělo proběhnout otevření prvních třech veřejných čerpacích stanic na vodík v ČR společností Benzina. Konkrétně v Praze, Brně a Litvínově. Důsledkem covidové

pandemie a omezeným distribučním kapacitám byla plánovaná instalace vodíkových plnicích stojanů odložena na rok 2022. Následně chce společnost vybudovat vodíkové stanice v Plzni, Ústí nad Labem, Ostravě a tou dobou již druhou v Praze. Vize společnosti Benzina je do roku 2030 provozovat 28 plnicích stanic a 2 distribuční vodíková centra (v Neratovicích a Litvínově), kde bude vodík zpřístupněn také pro železniční dopravu. Společnost chce na svých plnicích stanicích nabízet do budoucna především zelený (bezemisní) vodík použitím elektrické energie z obnovitelných zdrojů.

Tankování probíhá obdobně jako u vozidel na CNG. Plnička do nádrže nejprve pustí pouze malou část vodíku a následně přibližně 15 sekund zjišťuje zbytkový tlak v nádrži a těsnost připojení. Pokud je všechno v pořádku, plnička pustí plyn a vyrovnává se tlak v nádržích. Jelikož v prázdné vodíkové nádrži automobilu je nižší tlak než v nádrži plnicí stanice, proudí plyn do nádrže automobilu. Plnění nádrže končí ve chvíli, kdy se vyrovná tlak z nejvyšší tlakové sekce s tlakem v nádrži automobilu (700 barů).

Doba doplnění plné nádrže automobilu je shodná s dobou doplnění CNG, LPG, benzínem či naftou. V porovnání s bateriovými elektromobily se tedy jedná o značnou výhodu.

Z hlediska porovnání prostorových požadavků na infrastrukturu plnicích vodíkových stanic a infrastrukturu dobíjecích stanic pro elektromobily je vše ve prospěch vodíku. Kdy prostorové požadavky plnicí vodíkové infrastruktury pro obsluhu nákladních vozidel jsou 10 – 15krát nižší než u odpovídajících dobíjecích stanic. [7] [17] [18]

#### **4.2.4 Vodík v dopravě**

Primárním důvodem k zavádění vodíku do dopravy a nejen tam, je celosvětový zájem o snižování vzniku emisí skleníkových plynů a využívání obnovitelných zdrojů energie náhradou za fosilní paliva. V případě vodíku jsou jeho zásoby ve vodě prakticky nevyčerpatelné. Jelikož má vysokou hustotu energie (vztaženou na jednotku hmotnosti), dá se skladovat i transportovat, jeho spalování je čistší než spalování fosilních paliv a není nikterak doprovázen skleníkovými plyny nebo toxickými sloučeninami. Představuje tak velký potenciál pro budoucí využití. V současné době většina automobilek hledající řešení k přechodu na čistou mobilitu jde cestou bateriových elektromobilů. Tuto cestu ovšem některé strategické dokumenty Evropské komise a studie neshledávají jako nejčistší světově realizovatelnou cestu, která zároveň nemusí být vhodnou pro všechny druhy dopravy. Z dokumentu Hydrogen Roadmap Europe vypracovaný Společným podnikem pro palivové články a vodík (JU FCH), zveřejněný v roce 2019 vyplývá, že vodíková elektromobilita založená na přeměně vodíku

v palivovém článku na elektrickou energii, představuje nejvhodnější cestu k dekarbonizaci pro širokou škálu druhů silniční dopravy. Konkrétně pro lehká užitková vozidla, těžká nákladní vozidla, autobusy a osobní vozidla. Jedná se o jedinou technologii, která nabízí cestu k plné dekarbonizaci. Ostatní technologie mohou pouze sloužit jako dočasné řešení, zajišťující pozvolný přechod do stádia plného rozvoje vodíkové technologie v dopravě. Významnou roli v přechodu na plně vodíkovou elektromobilitu hraje fakt, že plnění nádrže vozidla pomocí vodíkové plnicí stanice je 15krát rychlejší než dobíjení vozidla pomocí ultrarychlé rychlodobíjecí stanice.

Dalším důvodem hledání a postupného zavádění alternativních paliv je kromě výhledového nedostatku současných pohonných hmot a zmírnění ekologické zátěže snaha obejít se na závislosti dodávek paliva z často nestabilních oblastí světa.

V následující tabulce jsou znázorněny základní vlastnosti vodíku jako paliva v porovnání s klasickými druhy fosilních paliv. [19]

Vlastnosti	Diesel	Bezolovnatý benzín	Vodík
Teplota samovznícení (K)	530	533-733	858
Minimální energie zapálení (mJ)	–	0,24	0,02
Limity hořlavosti (% objemu ve vzduchu)	0,7-5	1,4-7,6	4–75
Stechiometrický poměr vzduch-palivo	14,5	14,6	34,3
Mez hořlavosti (poměr ekvivalence)	0,6-2,0	0,7-3,8	0,1-7,1
Hustota při 16 °C a 1,01 baru (kg/m <sup>3</sup> )	833-881	721-785	0,0838
Čistá výhřevnost (MJ/kg)	42,5	43,9	119,93
Rychlost plamene (cm/s)	30	37-43	265-325

Tabulka 2: Vlastnosti vybraných paliv [20]

#### 4.2.4.1 Celosvětové vývojové trendy vodíkové mobility

U osobní automobilové dopravy v současné době stále platí, že výrobě vodíkových osobních automobilů se nejvíce věnují zejména asijské (japonské/ korejské) automobilky. Ačkoli ambice evropských automobilek ve vodíkové mobilitě jsou veliké, zatím se věnují a sází spíše na elektromobilitu bateriovou. Automobilka Toyota již koncem roku 2014 spustila sériovou výrobu vodíkového modelu Mirai. V roce 2019 vyráběla přibližně 300 těchto vozidel měsíčně, a jejím cílem na následujících deset let je nárůst produkce na 30 000 vodíkových vozů ročně. Automobilka Hyundai je další automobilkou zabývající se vodíkem ve svých automobilech. V roce 2016 spustila malosériovou výrobu modelu ix35 FCEV a též roce dosáhla 300 prodaných kusů. V roce 2018 spustila výrobu SUV modelu Hyundai NEXO,

kterých se povedlo předobjednat přes 1000 kusů. Automobilka Hyundai Motor Group si dle plánů FCEV Vision 2030 klade cíl ročního prodeje vodíkových automobilů v roce 2030 na 500 000 prodaných kusů.

Velký potenciál vodíkové mobility vykazuje také autobusová doprava a v řadě světových zemí je již využívána. Do budoucna se počítá také s rozšířením vodíkové mobility v nákladních automobilech a železniční dopravě. [19]

### 4.3 HHO generátor

HHO je zkratka pro oxyhydrogen, Brownův plyn, složený z kyslíku a vodíku. Princip činnosti vodíkového palivového článku (známého také jako elektrolyzátor nebo generátor suchých článků) je v rozdělení vody na jednotlivé atomy vodíku a kyslíku. Z každé molekuly vody jsou procesem elektrolýzy produkovány vždy dva atomy vodíku a jeden atom kyslíku. Tento proces začíná v okamžiku přivedení elektrického proudu, který je naplněný směsí čisté destilované vody a elektrolytu (hydroxidu draselného – KOH) a následně je tento hořlavý plyn dopravován sacím potrubím do motoru, kde se plyn HHO spojí s primárním palivem (benzínem nebo naftou). Tato operace umožňuje teplejší a dokonalejší spálení paliva ve válcích. Přítomností HHO během spalování je možné spálit více paliva (v našem případě motorové nafty). Během vyššího zatížení motoru výrazně klesá měrná spotřeba energie (paliva) v celém rozsahu zvýšením procenta vodíku. To může být způsobeno vysokou difuzivitou vodíkového paliva, díky které dochází k rovnoměrnému míšení vodíku se vzduchem a společně s předmícháním dochází ke zlepšení spalování. Celkovým výsledkem tohoto dvoupalivového procesu jsou nižší (čistší) produkované emise a vzniká méně nespáleného paliva. Po instalaci systému je nutno pouze kontrolovat a pravidelně doplňovat hladinu vody a elektrolytu v nádrži. Instalované systémy se přizpůsobují danému typu a velikosti motoru, obecně však platí úměra, čím větší obsah elektrolytu v článku, tím více proudu je potřeba odebírat (pokud je potřeba více HHO, tím více je potřeba elektrolytu).

Přidáním plynu HHO do směsi palivo/vzduch dosáhneme zvýšení oktanového čísla jakéhokoliv paliva (nafta, benzín). „Oktanové číslo“ zjednodušeně značí, jak moc může být palivo stlačeno předtím, než se vznítí. Čím efektivnější je proces spalování, tím nižší je spotřeba paliva.

V HHO generátoru (vyvíječi) pro výrobu HHO plynu (Brownova plynu) je využita rezervní energie z alternátoru, který je vhodný před samotnou instalací HHO systému kvůli zvýšení jeho zatížení zkontrolovat. Plyn je následně distribuován přes takzvaný bubler

(odlučovací nádrž) do sacího potrubí k motoru, kde je poté jak již bylo řečeno smíchán se vzduchem a nasát do jednotlivých válců. Následně ve válci dojde ke smísení plynu a vzduchu se směsí paliva (nafta, benzín, LPG, CNG). Při zapálení klasické směsi paliva bez plynu HHO dochází k zapálení ve vlnách, takzvaným Dopplerovým jevem, naopak při existenci HHO plynu je vodík navázán na uhlovodíky paliva a dochází tak k objemovému zapálení. Výsledkem je kvalitnější a rychlejší vyhoření paliva, kdy přítomný kyslík navíc čistí motor od karbonů a motor má následně tišší a hladší chod (HHO plyn částečně plní funkci katalyzátoru).

Výhodou této metody je jednoduchost a bezpečnost celého systému, jelikož se vyrobený plyn nikde ve vozidle neskladuje a při atmosférickém tlaku se ihned spotřebovává. Instalace HHO do vozidla je velice jednoduchá s minimálním zásahem do vozidla, spočívá pouze v jednom otvoru do nasávacího potrubí vzduchu s hadicovou koncovkou pro přívod HHO plynu. Před samotnou instalací je ovšem vhodné zkontrolovat stav alternátoru a akumulátoru vozidla. [20] [21] [22]

Výrobci udávané výhody z použití HHO technologie v automobilech:

- snížení spotřeby paliva o 20 – „60“%
- podstatné snížení emisí škodlivých plynů (CO, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, HC)
- delší životnost motoru
- zvýšení točivého momentu (plynulejší a silnější akcelerace)
- zvýšení výkonu
- snížení množství karbonu v motoru → čistší motorový olej

### 4.3.1 Výběr vhodného HHO zařízení

Pro maximalizaci výsledného efektu celého HHO systému je nutná správná kombinace HHO generátoru (generátoru Browanova plynu) s řídicí jednotkou. Senzory v automobilu vysílají elektrické signály řídicí jednotce, která dle potřeby reguluje vefukovaný vodík do sacího potrubí automobilu.

Volba vhodného HHO generátoru je v první řadě určena daným obsahem motoru pro který bude použit. Současná vozidla jsou vybavena množstvím čidel a senzorů, detekující efektivnější spalování dosažené díky existenci HHO a současně korigující směs použitého paliva. Mezi tyto čidla se například řadí:

- lambda sonda
- čidlo teploty nasávaného vzduchu (IAT)



- čidlo teploty chladicí kapaliny (CTS)
- čidlo absolutního tlaku v sacím potrubí (MAP)

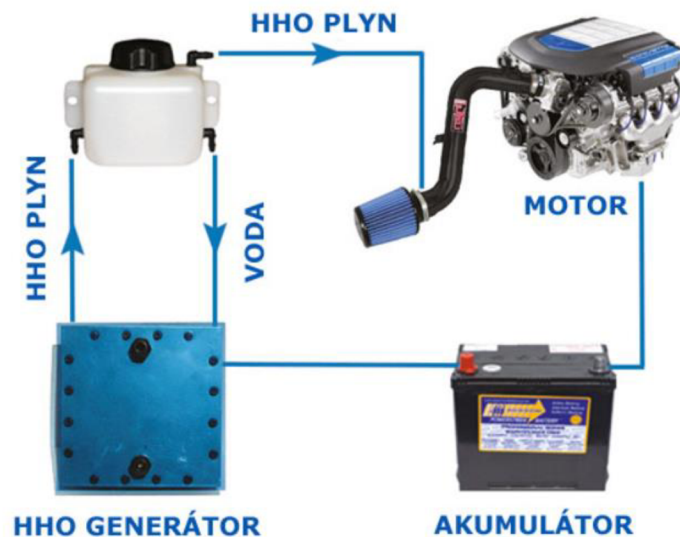
Pro maximalizaci úspory paliva s jakýmkoliv typem HHO generátoru, je potřeba upravit některé, nebo v ideálním případě všechny signály z čidel, které jsou použity v řídicích jednotkách HHO. Například řídicí jednotka Green Source ProTuner navržena pro motory, kde je primárním palivem nafta, benzin, LPG či bioethanol E85 ovládá tato čidla:

- IAT – čidlo teploty nasávaného vzduchu
- MAP – čidlo teploty nasávaného vzduchu
- ECT – čidlo teploty motoru
- DIGITAL EFIE – úprava pro přední lambda sondu
- ANALOG EFIE – zadní lambda sonda

#### Udávané výsledné úspory paliva

- Při použití samotného HHO: 10–25 %
- Při použití HHO + EFIE: 15-35 %
- HHO + EFIE + IAT + MAP + další čidla: 30-60 % (s HHO řídicí jednotkou)

### JAK PRACUJE HHO GENERÁTOR



Obrázek 9: Základní schéma HHO systému [23]

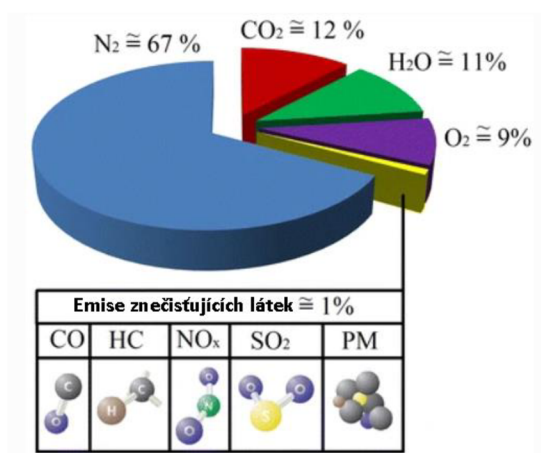
## 4.4 Emise

Pojem emise zahrnuje široké spektrum znečišťujících látek, které jsou produkovány určitým zdrojem a vypouštěny do ovzduší. Jedná se o látky škodlivé pro životní prostředí různého typu, např.: radioaktivní, světelné, pevné částice či plynné emise aj. Množství produkováných emisí se vyjadřuje v objemových nebo hmotnostních jednotkách.

V této práci se budeme zabývat emisemi vycházející z výfukové soustavy spalovacích, konkrétněji vznětových motorů.

### 4.4.1 Druhy emisí produkované vznětovými motory

Při ideální termodynamické rovnováze by se během dokonalého spalování motorové nafty ve spalovací komoře generovalo pouze  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2\text{O}$ . To je ovšem z mnoha důvodů (poměr palivo-vzduch, časování ventilů, turbulence ve spalovací komoře, koncentrace paliva a vzduchu, teplota a forma spalování aj.) není možné a vzniká tak celá řada škodlivých produktů. Mezi ty nejvýznamnější se řadí například  $\text{CO}$ ,  $\text{HC}$ ,  $\text{NO}_x$  a  $\text{PM}$ . Na obrázku 10 je znázorněno procentuální zastoupení vybraných látek. [29]



Obrázek 10: Zastoupení výfukových složek naftových motorů [29]

#### 4.4.1.1 Oxid uhelnatý (CO)

Oxid uhelnatý je produktem nedokonalého spalování. Jeho koncentrace je závislá na poměru směsi vzduch/palivo, kdy jeho největší množství vzniká při bohaté směsi ( $\lambda < 1$ ), zejména během startování nebo prudké akcelerace. Během provozního režimu na bohatou směs se kvůli nedostatku vzduchu a koncentraci reaktantů nedokáže všechen uhlík přeměnit na  $\text{CO}_2$  a vytvořit koncentraci  $\text{CO}$ . Přestože největší množství  $\text{CO}$  vzniká během bohaté směsi, kvůli chemickým kinetickým účinkům dochází k produkci  $\text{CO}$  v malém množství i v režimu provozu

na chudou směs. Jelikož naftové motory pracují převážně s chudou směsí paliva, je tvorba CO minimální.

Oxid uhelnatý je plyn bez barvy a zápachu. Při vdechnutí se přenáší do krevního oběhu, váže se na hemoglobin a zabraňuje přenosu kyslíku, což vede k dušení. Dále může ovlivnit funkci různých orgánů a způsobovat zhoršenou koncentraci, pomalé reflexy nebo zmatenost. [29]

#### **4.4.1.2 Uhlovodíky (HC)**

Produkované uhlovodíky spalovacími motory vznikají z nedokonale spáleného paliva v důsledku nedostatečné teploty v blízkosti stěny válce, kde je teplota směs paliva se vzduchem výrazně nižší než ve středu válce. Skládají se z tisíců druhů, patří mezi ně alkyly, alkeny a aromáty.

U naftových motorů dochází vypouštění nízké hladiny uhlovodíků, a to především při nízkém zatížení. V chudých směsích je vyšší produkce emisí uhlovodíku, jelikož rychlost plamene může být nedostatečná k tomu, aby bylo spalování dokončeno během pracovního zdvihu. Vliv na to má také typ paliva, seřízení a konstrukce motoru. Dále k jejich zvýšení mohou přispět rychlé změny otáček motoru, neseřízené vstřikování, odskoky jehly vstřikovače, které mohou způsobit proniknutí značného množství nespáleného paliva do výfuku. Vyskytovat se mohou nejen ve výfuku, ale také v klikové skříni.

Uhlovodíky jsou škodlivé pro lidské zdraví a životní prostředí. Společně s ostatními znečišťujícími látkami se podílejí na tvorbě přízemního ozonu. Jsou toxické s potenciálem podráždění dýchacích cest a mohou způsobovat nádorová onemocnění. [29]

#### **4.4.1.3 Pevné částice (PM)**

Jedná se o produkty nedokonalého difusního spalování paliva, oleje či vody, převážně vznětových motorů, případně zážehových s přímým vstřikem nebo přeplňováním (dnes naprostá většina). Většina pevných částic vzniká díky nedokonalému spalování uhlovodíků v palivu a mazacím oleji.

Pro pevné částice naftových motorů je typickým tvarem koule o průměru 15-40 nm, kdy více než cca 90 % PM mají průměr menší než 1  $\mu\text{m}$ . Proces jejich tvorby je závislý na mnoha faktorech, je to například proces spalování a expanze, kvalita paliva (obsah síry a popela), teplota spalování, kvalita mazacího oleje a spotřeba nebo chlazení výfukových plynů.

Obecně však platí, že emise pevných částic z naftových motorů jsou vyšší než z motorů benzínových. U naftových motorů je lze rozdělit do tří složek: anorganická frakce, rozpustná organická frakce a saze. Celkové produkce PM, tvoří saze více než 50 %, vizuálně jsou detekovatelné černým kouřem z výfukového potrubí.

Vdechování PM může způsobovat vážné zdravotní problémy, jako je například astma, rakovina plic a kardiovaskulární obtíže. Dále mají vliv na znečištění ovzduší, půdy, vody, globální klimatické změny i produktivitu zemědělství. [29]

#### **4.4.1.4 Oxidy dusíku (NO<sub>x</sub>)**

Vznětové motory pro zapálení směsi používají vysoce stlačený horký vzduch složený převážně z kyslíku a dusíku, který je nasáván do spalovací komory. V ideálních podmínkách by dusík v procesu nijak nereagoval a byl by identicky vypouštěn ven z motoru. Vysoké teploty ve válcích však způsobují reakci dusíku s kyslíkem a dochází k vytváření NO<sub>x</sub>. Hlavním důvodem tvorby NO<sub>x</sub> je tedy vysoká teplota společně s koncentrací kyslíku ve spalování a doba zdržení ve válci.

Do oxidů dusíku se řadí mj. oxid dusnatý (NO) a oxid dusičitý (NO<sub>2</sub>). NO tvoří celkově přibližně 85-95 % NO<sub>x</sub> a v atmosférickém vzduchu se postupně přeměňuje na NO<sub>2</sub>. Ačkoliv NO i NO<sub>2</sub> patří společně do NO<sub>x</sub>, je mezi nimi značný rozdíl. Zatímco NO je plyn bezbarvý a bez zápachu, NO<sub>2</sub> je červenohnědý plyn se štiplavým zápachem.

Celosvětově je silniční doprava nejvýznamnějším viníkem ve tvorbě městských emisí NO<sub>x</sub> (40-70 %). Jelikož vznětové motory pro vznícení paliva potřebují vyšší teploty než motory zážehové, jsou zodpovědné za přibližně 85 % celkových emisí NO<sub>x</sub> z mobilních zdrojů (zejména ve formě NO).

Emise oxidů dusíku produkované z vozidel zapříčiňují ekologická i zdravotní rizika. Přispívají k acidifikaci (okyselení půdního nebo vodního prostředí), tvorbě ozonu či smogu.

NO<sub>2</sub> má v porovnání s NO až pětkrát vyšší úroveň toxicity a je současně významným iniciátorem plicních onemocnění. Je schopen dráždit plíce a snižovat odolnost vůči respiračním onemocněním. [29]

## **Oxidy síry (SO<sub>2</sub>)**

Oxidy síry u spalovacích motorů vznikají obsažením sloučenin síry v palivu. Během spalovacího procesu dochází ke vzniku primárně oxidu siřičitého (SO<sub>2</sub>). Jedná se o bezbarvý, štiplavě páchnoucí jedovatý plyn, který má přibližně 2,26x větší hustotu než vzduch. Za normálních podmínek a běžné koncentrace není pro člověka nebezpečný, při jeho zvýšené koncentraci ovšem může způsobovat otoky hrtanu. Společně s vodou tvoří žíravé kyseliny, které u některých kovů urychlují korozi. [30]

V současné době je u prodávané nafty maximální obsah síry 10 mg/kg, jelikož přítomností oxidů síry dochází v automobilech k poškozování filtru pevných částic. Tento obsah síry se ovšem neustále snižuje a problematika oxidů síry jako součásti produkovaných emisí je v porovnání s ostatními druhy produkovaných škodlivých látek takřka zanedbatelná.

Pro člověka je stanovena maximální povolená koncentrace v ovzduší 5 ppm. K vážnému poškození zeleně dochází už při 1-2 ppm. [34] [35]

### **4.4.1.5 Oxid uhličitý (CO<sub>2</sub>)**

Oxid uhličitý patří bezesporu k nejznámějším emisím spalovacích motorů, je také označován za plyn, podílející se z velké části na globálních klimatických změnách. CO<sub>2</sub> zamezuje vyzařování tepla, čímž působí jako radiační clona mezi okolním vesmírem a Zemí. V posledním století vlivem nárůstu produkce spalování fosilních paliv rapidně stoupá produkce oxidu uhličitého, proto je jeho nutné snižování v posledních letech velmi probíraným tématem.

Oxid uhličitý je plyn bezbarvý, bez zápachu (možno lehce nakyslý), není hořlavý a hoření nikterak nepodporuje. Při normálním tlaku a teplotě může ve slabé míře dráždit nosní sliznici. Jelikož je CO<sub>2</sub> podstatně těžší než vzduch, při zplynění kapalného CO<sub>2</sub> se ve volném ovzduší usazuje u země. To platí během sublimace tuhého CO<sub>2</sub>, kdy se během skladování hromadí u země nebo dokonce pod úrovní terénu, odkud následně vytěsňuje vzduch. V kapalném stavu je CO<sub>2</sub> čirá kapalina, která se musí skladovat za snížené teploty, jelikož za normálního tlaku a teploty se velice rychle odpařuje a transformuje v plyn. Při přímém kontaktu s kapalným CO<sub>2</sub> mohou vznikat omrzliny.

Ačkoliv CO<sub>2</sub> není plyn toxický, snižováním parciálního tlaku kyslíku ve vzduchu může způsobovat dušení. Lidské tělo je schopno dýchat několik hodin koncentraci CO<sub>2</sub> ve vzduchu o hodnotě 5 000 ppm bez jakýchkoliv následků. Koncentrace CO<sub>2</sub> kolem 20 000 ppm je již pro lidské tělo hranicí, které se ještě dokáže přizpůsobit. Kolem 30 000 ppm již začíná stoupat tep, krevní tlak a zvyšovat se frekvence dechu. 50 000 ppm vyvolává zvracení, způsobuje

hypertenzi, dezorientaci a při delším působení dochází k překyselení organismu a následnému bezvědomí. Při koncentraci  $\text{CO}_2$  70 000 – 100 000 ppm způsobuje bezvědomí a vyšší koncentrace nebo delší působení může způsobit usmrcení. Ke stavu bezvědomí ovšem normálně nedochází a pokud ano, postižený se velmi rychle zotaví a následky brzy odezní. [34] [36]

#### **4.4.2 Systémy pro řízení emisí vozidel se vznětovým motorem**

Existuje mnoho zdánlivě banálních řešení pro snížení výše uvedených emisí. Patří mezi ně například: hmotnost vozidla, odpor valení nebo aerodynamický odpor vozidla. Trendem a snahou v současné době je také snižovat objemy motorů (downsizing), což je kompenzováno přeplňováním a úpravou řídicí jednotky. Tím dokážeme docílit provozu na chudší směs a snížit produkci oxidu uhelnatého, ovšem na úkor nárůstu jiných emisí. Dalším pomocným řešením snížení produkce emisí nebo snížení uhlíkové stopy, je použití vhodných aditiv, které napomáhají palivu lépe prohořet, sníží kouřivost a zamezují případnému zanášení filtru pevných částic.

Všechny tyto zmíněné metody ovšem nejsou v současné době dostačující pro splňování požadovaných emisních norem. Pro splnění těchto norem a výraznějšího snížení škodlivých emisí, je nutno použít dalších regulačních systémů, které tyto znečišťující látky dostatečně eliminují poté, co opustí motor a těsně předtím, než dojde k jejich vypuštění do ovzduší.

Ze všech systémů řízení emisí u vznětových motorů, je hlavní pozornost věnována snížení emisí  $\text{NO}_x$ , jelikož právě  $\text{NO}_x$  má ve výfukových plynech vznětových motorů nejvyšší zastoupení. Mezi hlavní systémy pro řízení a regulaci emisí vznětových motorů patří: vnější recirkulace výfukových plynů (EGR ventilem), oxidační katalyzátor, filtr pevných částic (DPF), záchytný katalyzátor (LNT) a selektivní katalytická redukce (katalyzátor SCR).

##### **4.4.2.1 Vnější recirkulace výfukových plynů**

Pro tuto technologii se využívá EGR ventil (Exhaust Gas Recirculation) sloužící k recirkulaci spalin. Principem je odvod části výfukových spalin do chladiče vnější recirkulace a zbylá část je odvedena výfukovým potrubím. Plyny, které prošly EGR ventilem jsou ochlazeny a opětovně nasávány, aby následně mohly znovu projít spalovacím procesem. Tím se výrazně sníží teplota spalování, jelikož je v nasávané směsi méně kyslíku a tak dojde ke snížení celkové produkce oxidu dusíku ( $\text{NO}_x$ ). Negativním dopadem této technologie je zvýšení nespálených uhlovodíků. [37]

#### **4.4.2.2 Oxidační katalyzátor**

Úkolem oxidačního katalyzátoru je přeměnit pomocí oxidační reakce nespálené uhlovodíky a oxid uhelnatý na oxid uhličitý a vodu. Dále slouží k dodatečnému spalování pevných částic obsažených ve výfukových plynech. Umístěn je ve výfukovém potrubí vozidla. [38]

#### **4.4.2.3 Filtr pevných částic**

Filtr pevných částic (DPF – Diesel Particulate Filter) je umístěn za oxidačním katalyzátorem a slouží k zachycení a odstranění pevných částic z výfukových plynů vznětových motorů. Konstrukce je na principu klasického síta s porézní strukturou, která je tvořena oxidem křemičitým. Filtr je potřeba pravidelně čistit (regenerovat). Regenerace je prováděna zvýšením teploty ve filtru a následným spálením zachycených sazí (PM). Probíhá to dvěma způsoby, a to zásahem řídicí jednotky (aktivní regulace), nebo během jízdy při vyšším zatížení, například na dálnicích (pasivní regulace). [39]

#### **4.4.2.4 Záchytný katalyzátor (LNT)**

Záchytný katalyzátor (LNT – Lean NO<sub>x</sub> Trap) slouží k dalšímu snížení oxidů dusíku (NO<sub>x</sub>) u vznětových motorů. LNT na sebe váže oxidy dusíku tzv. měkkou chemickou vazbou (podobné přilepení). Po nahromadění jejich dostatečného množství, vyvolá zvýšená dávka paliva nárůst teploty a přísun oxidu uhelnatého se kterým následně oxidy dusíku zreagují na oxid uhličitý (CO<sub>2</sub>) a vzdušný dusík (N<sub>2</sub>). [40]

#### **4.4.2.5 Selektivní katalytická redukce (katalyzátor SCR)**

Katalyzátor SCR je umístěn mezi oxidačním katalyzátorem a filtrem pevných částic. Pomocí teplotních čidel je sledována teplota před a za oxidačním katalyzátorem. Dosažením pracovní teploty katalyzátoru SCR (přibližně 180 °C) začne do výfukových plynů vstřikovač rozprašovat redukční činidlo (nejčastěji AdBlue – roztok demineralizované vody a močoviny) přes vířidlo. Z močoviny se oddělí čpavek a jedovaté oxidy dusíku (NO<sub>x</sub>) se začnou redukovat na dusík a vodu. Spotřeba AdBlue se mj. odvíjí od stylu jízdy, kdy během jízdy ustálenou nízkou rychlostí nemusí dojít k aktivaci jeho vstřikování. [32]

#### **4.4.2.6 Současné trendy pro snižování emisí**

Mezi tyto trendy jsou řazeny zejména hybridní pohony automobilů, které se v současné době dostávají do popředí automobilového průmyslu. Hybridním pohonem se rozumí

kombinace několika zdrojů energie, jako je například spojení spalovacího motoru s akumulátorem nebo palivovým článkem.

Mezi tyto trendy například patří:

- Full hybrid – pouze elektrický pohon
- Power assist hybrid – primární pohon spalovacím motorem + elektromotor
- Micro hybrid – spalovací motor + pokročilý „start-stop systém

#### 4.4.2.7 Dodatečné úpravy konvenčních vozidel

Jedná se o dodatečné úpravy vozidel s klasickým pohonem vznětovým nebo zážehovým spalovacím motorem. Patří sem softwarové úpravy řídicích jednotek, které například upravují tvorbu směsi. U zážehových motorů se může jednat o přestavbu na plyn CNG nebo LPG. U vznětových motorů to může být právě instalace HHO generátoru pro dodatečné přimíchávání vodíku, čímž se v této práci budeme zabývat.

#### 4.4.3 Měření vozidlových emisí

Měření emisí produkovaných automobily je pro všechny státy Evropské unie jednotné a probíhá dle stanovených zkušebních cyklů, během kterých se zaznamenává produkce jednotlivých emisí. Všechny tyto emise mají přesně dané maximální hodnoty, které nesmí být překročeny a musí splňovat platnou emisní normu (v současné době normu Euro 6). Od 1.9.2017 do současnosti je používán celosvětově harmonizovaný cyklus WLTP pro osobní a lehká užitková vozidla, který nahradil dříve využívaný jízdní cyklus NEDC. Přehled emisní normy Euro 6 je znázorněn v následující tabulce. [41] [42]

		CO	HC+NO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	PM	PN
Norma	Rok zavedení	g/km				#/km
Euro 6 b-d	2014 →	0,5	0,17	0,08	0,0045	6·10 <sup>11</sup>

Tabulka 3: Emisní norma Euro 6 pro dieselové motory [41]

##### 4.4.3.1 Homologační cyklus WLTP

WLTP (Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure) cyklus je rozdělen na čtyři části s různými průměrnými rychlostmi (nízká, střední, vysoká, extra vysoká) a každá část obsahuje různé jízdní režimy (stání – volnoběh, akcelerace, brzdění). Je definován také několika jízdními cykly dle poměru hmotnosti a výkonu daného vozidla (PMR = power-to-mass ratio). Součástí WLTP jsou tzv. RDE (Real Driving Emissions) testy, tedy měření emisí v reálném provozu. [42]



## 5 Praktická část práce

### 5.1 Použitý typ automobilu a generátor HHO plynu

Měření se uskutečňovalo v dílenských prostorách Katedry vozidel a pozemní dopravy. Všechny potřebné prostředky pro měření včetně automobilu a HHO generátoru byly použity ze školního vybavení České zemědělské univerzity v Praze.

#### 5.1.1 Typ automobilu

Použitým automobilem byla Škoda Rapid 1.6 TDi. Automobil je osazen řadovým čtyřválcovým vznětovým motorem s přímým vysokotlakým vstříkovaním paliva systémem common-rail (2xOHC), který je přepřňovaný turbodmychadlem s proměnnou geometrií lopatek.

Technické údaje	Škoda Rapid 1.6 TDI CR
Motor	Vznětový čtyřválec
Zdvihový objem motoru	1596 cm <sup>3</sup>
Maximální výkon/otáčky	85 kW při 3 500 – 4 000 min <sup>-1</sup>
Maximální točivý moment/otáčky	250 Nm při 1 500 – 3 000 min <sup>-1</sup>
Exhalační norma	Euro 6
Řízení emisí	Filtr pevných částic (DPF)
Emise CO <sub>2</sub>	109 g/km
Kombinovaná spotřeba paliva	4,2 l na 100 km
Převodový poměr IV. rychl. stupně	0,86
Stálý převod	3,158

Tabulka 4: Základní parametry vozidla

#### 5.1.2 HHO generátor

Na trhu je řada HHO generátorů různých vlastností, převážně se lišícím napájecím napětím, výkonem a produkcí HHO plynu. V našem případě byl použit generátor HHO plynu DCT212. V následující tabulce jsou uvedeny základní údaje o použitém generátoru, který je znázorněn na obrázku 11.

##### Technické údaje:

Parametr	Hodnota
Napájecí napětí	2x 12 V
Rozměry	200x200x110 mm
Elektrody	316L 0,8 mm
Výroba plynu při	24 V/30 A 180 l/hod

Tabulka 5: Technické údaje HHO generátoru



Obrázek 11: Použitý HHO generátor

Generátor je schopen produkovat 1–7 litrů plynu za minutu. Rozvody vedení plynu jsou u tohoto generátoru uskutečněny fitinkami o rozměru 3/8 palce. Napájení 12 V je uskutečněno přes napájecí přípojné místa pro šrouby M5 (viz. obr.).

## 5.2 Použité přístroje, příslušenství a software

### 5.2.1 Válcová zkušebna

Jedná se o homologační válcovou zkušebnu Schenck 3604/GS56, která byla primárně určena k provádění homologačních měření vozidel do 3,5t. Na válcové zkušebně je možné kromě jízdních zkoušek měřit také výkonové parametry vozidel. Na obrázku 12 je znázorněna válcová zkušebna společně s testovacím vozidlem Škoda Rapid.



Obrázek 12: Válcová zkušebna

Válcová zkušebna se skládá ze dvou válců, které jsou propojeny řetězem. Pro zlepšení adhezních podmínek je jeden válec opatřen protiskluzovým povrchem pro získání lepších adhezních podmínek. Součástí válců je také na jedné straně sada připojitelných setrvačnicků, které simulují setrvačnou hmotnost testovacího vozidla a na straně druhé jsou k válcům připojeny brzdové systémy. Na hlavní hřídel zkušebny je připojen stejnosměrný elektrický motor o výkonu 56 kW, který simuluje odpor vzduchu. Pro účely statického měření výkonu byla k druhému válci dodatečně připojena vířivá brzda o výkonu 125 kW. Konstrukční uspořádání celé válcové zkušebny je zobrazeno na obrázku 13 a její technické parametry shrnuje následující tabulka. [24]

Technické parametry válcové zkušebny	
DC motorgenerátor	Maximální brzdňý výkon 56kW Maximální brzdňý moment 305 Nm Maximální otáčky 3000 min <sup>-1</sup>
Vířivý dynamometr	Maximální brzdňý výkon 125 kW Maximální brzdňý moment 478 Nm Maximální otáčky 8000 min <sup>-1</sup>
Válce zkušebny	Dva válce umístěny v páru, sloužící k přenosu energie zkušebnou a koly vozidla Obvod válců 1145 mm
Setrvačnický zkušebny	Základní simulovaná hmotnost 680 kg Přídavné hmotnosti: 112,5 kg, 120 kg, 225 kg, 450 kg, 900 kg

Tabulka 6: Parametry válcové zkušebny [24]



Obrázek 13: Konstrukční uspořádání válcové zkušebny [24]

Tato válcová zkušebna je ovládána pomocí vstupně-výstupního el. systému Datalab firmy Moravské přístroje a.s. ovládacím programem, vytvořeném v grafickém programovacím prostředí Control Web. [24]

### 5.2.2 Částicový analyzátor TSI EEPS 3090

Částicový analyzátor od firmy TSI slouží k měření pevných složek výfukových plynů. Analyzátor odebírá surový vzorek produkovaných výfukových plynů, který následně ředí stavitelným ředícím poměrem v rotační ředičce. Měří velikosti emisí výfukových částic motoru v rozmezí 5,6 – 560 nm s nejrychlejším současně dostupným časovým rozlišením 10 Hz. Umožňuje vizualizaci a průběžné pozorování dynamického chování emisních částic, vzniklých během přechodných testovacích cyklů (jak při prvních sekundách studeného startu, tak během regenerace filtru pevných částic DPF). Výsledkem je zjišťování a shromažďování dat o vzniklých částicích v závislosti na změně otáček motoru, točivém momentu nebo zatížení motoru. Na následujícím obrázku 14 je znázorněn analyzátor a v tabulce 7 jsou shrnuty jeho základní technické parametry. [25] [26]



Obrázek 14: Částicový analyzátor TSI EEPS 3090 [25]

### Technické parametry:

Parametr	Hodnota
Rozsah velikosti měřených částic	5,6 – 560 mm
Rozlišení	32 kanálů (16 kanálů na dekádu)
Počet elektroměrů	22
Režim nabíjení částic	Unipolární difuzní nabíječka
Vzorkovací frekvence	10 Hz
Průtok vzorku	10 l/min
Teplota vzorku	10-52 °C
Provozní teplota	0-40 °C
Pracovní tlak (automatická korekce přístrojem)	70-103 kPa

Tabulka 7: Technické parametry částicového analyzátoru TSI EESP 3090 [25]

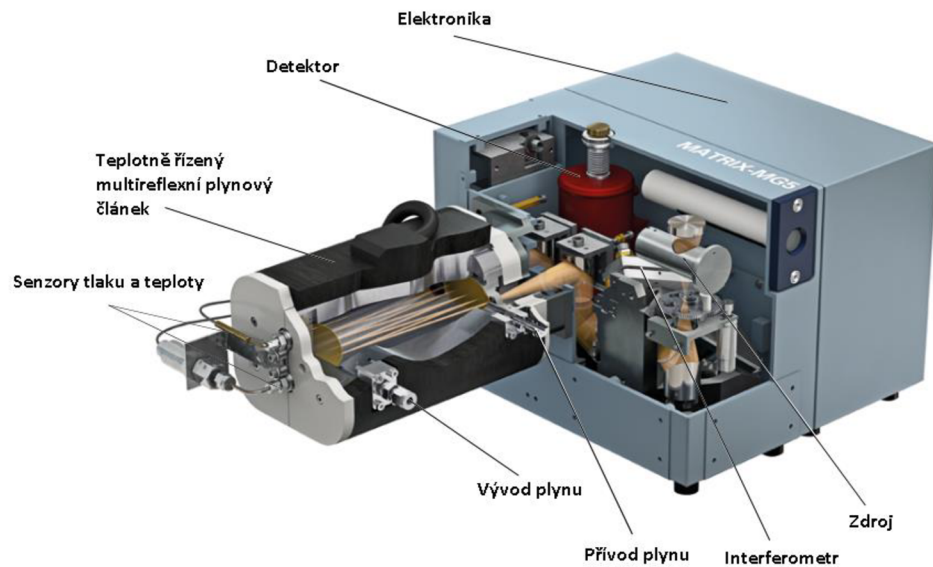
### 5.2.3 Spektrální analyzátor Matrix MG-5

Spektrální analyzátor slouží k měření koncentrace plynných složek výfukových plynů, mezi které patří CO, CO<sub>2</sub>, HC, NO<sub>x</sub>, CH<sub>4</sub>. Součástí přístroje je 5 m multireflexní plynová buňka a jako celek dokáže velice přesně kvantifikovat sloučeniny plynů od nízkých koncentrací na úrovni ppb (parts per billion – jedna miliardtina z celku) až po 100 %. Umožňuje rychlou výměnu plynů a také měření korozivních plynů. [25] [28]

Technické parametry spektrálního analyzátoru Matrix MG-5 jsou uvedeny v následující tabulce.

Parametr	Hodnota
Rychlost skenování	až 32 spekter/s
Spektrální rozsah	650–5000 cm <sup>-1</sup>
Rozlišení	lepší než 1 cm <sup>-1</sup>
Přesnost měření vlnové délky	lepší než 0,01 cm <sup>-1</sup>
Fotometrická přesnost	lepší než 0,1 % T
Délka měřící cely	2 m
Příkon pro vyhřívání cely	220 W
Příkon spektrometru	65 W
Interface	Ethernet

Tabulka 8: Technické parametry spektrálního analyzátoru Matrix MG-5 [25]



Obrázek 15: Spektrální analyzátor Matrix MG-5 [27]

### 5.2.4 Náporový ventilátor

Jelikož během měření vnější výkonové charakteristiky vozidla není primární ventilátor chladicí soustavy vozu schopný uchládit vozidlo stojící na válcové zkušebně, je nutné k měření před vozidlo zařadit náporový ventilátor simulující jízdu v reálném provozu. V našem případě byl použit upravený náporový ventilátor Filcar AL-1500/C. Parametry ventilátoru jsou znázorněny v tabulce 8.

Parametr	Hodnota
Výkon motoru	11 kW (15 HP)
Otáčky motoru	2 800 ot./min.
Maximální výkon sání	12 000 m <sup>3</sup> /h
Napájení	230/400 V
Hlučnost	89 dB
Hmotnost	203 kg

Tabulka 9: Parametry náporového ventilátoru Filcar AL-1500/C

### 5.2.5 Diagnostický systém vozidla

Použit byl diagnostický software VAG-COM VCDS, který sloužil pro komunikaci s řídicí jednotkou vozu. Program jsme použili zejména pro čtení naměřených hodnot a průběžné sledování funkce jednotlivých akčních členů. V průběhu měření na válcové zkušebně diagnostický systém zaznamenává otáčky motoru v závislosti na čase společně s hodnotou průtoku vzduchu snímané čidlem MAF.



### 5.3 Instalace generátoru HHO na vozidlo

Instalace generátoru HHO na vozidlo obecně není složitá záležitost v porovnání například s instalací (přestavbou) vozidla na LPG. V našem případě byla instalace zjednodušena tím, že byl generátor umístěn na námi vyrobené konstrukci mimo vozidlo, která může být v budoucnu využita pro další měření na jiných vozidlech. Pro testování na válcové zkušebně bylo toto zjednodušené řešení naprosto dostačující. Připojení výstupní hadičky s HHO plynem do vozidla se uskutečnilo vyvrtáním otvoru do plastové příruby sání motoru. Vrtání otvoru probíhalo po demontáži příruby z vozidla, aby se zamezilo znečištění sacího prostoru, případně motoru od plastových špon vzniklých během vrtání. Kvůli zjednodušení výpočtů byl otvor vytvořen nad váhou vzduchu, abychom mohli zanedbat jeho hmotnost a objem a plyn pouze obohacoval přiváděnou směs. Do plastu byla hadička připojena pomocí šroubové mosazné spojky a utěsněna v místě spoje epoxidovou pryskyřicí. Po odinstalování generátoru je možné vyvrtaný otvor s mosaznou spojkou jednoduše zaslepit záslepkou pro zamezení nasávání nechtěného vzduchu. Generátor byl napájen z palubního akumulátoru testovaného vozidla. Jako roztok elektrolytu byl použit hydroxid draselný (KOH), naředěný v poměru 6 g hydroxidu draselného na 1 dm<sup>3</sup> destilované vody. Tento poměr se po předchozích pokusech během přípravy měření zdál jako nejvhodnější.

### 5.4 Vypracování tvorby plynných emisí

Tvorba plynných emisí je zpracována přepočtem z množství nasávaného vzduchu. Množství nasávaného vzduchu je získáno pomocí diagnostického softwaru (viz kapitola 5.2.5) v závislosti na koncentraci plynných částic výfukové soustavy vozidla (spektrálním analyzátozem – kapitola 5.2.3).

$$m_{xyz} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \frac{MAF}{M_{mol}} \cdot C_{xyz} \cdot dt \cdot M_{xyz}}{s} \quad 5.4.1$$

Kde:

- $m_{xyz}$ : Hmotnostní tok škodlivé látky za 1 km [g · km<sup>-1</sup>]
- $t_1$ : Čas počátku měřicího cyklu = 0 [s]
- $t_2$ : Čas konce cyklu = 1800 [s]
- MAF: Okamžitá hmotnost nasávaného vzduchu [g · s<sup>-1</sup>]
- $M_{mol}$ : Molární hmotnost vzduchu = 28,96 [g · mol<sup>-1</sup>]

- $C_{xy_z}$ : Koncentrace škodlivé látky ve výfm. plynech [%]
- $M_{xy_z}$ : Molární hmotnost škodlivé látky [ $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ]
- $s$ : Ujetá vzdálenost během jízdního cyklu = 23,266 [km]

Pro kontrolu hlavního výpočtu lze provést následující výpočet objemu vzduchu nasátého do válce a následný přepočít z ppm na g v dané objemové jednotce dle vzorce 5.4.2. Pouze jako kontrolní ho lze použít z důvodu možné drobné nepřesnosti, jelikož během převodu z hmotnosti vzduchu na objem a současně vynásobení hodnotou hmotnosti 1ppm v literatuře není dostatek desetinných míst pro přesný výpočet.

$$XY_z = \frac{\int_{t_1}^{t_2} V_{MAF} \cdot C_{xy} \cdot \delta}{s} \quad 5.4.2$$

Kde:

- $XY_z$ : Produkce emisní složky ve výpočtu [ $\text{g} \cdot \text{km}^{-1}$ ]
- $t_1$ : Čas počátku měřícího cyklu = 0 [s]
- $t_2$ : Čas konce cyklu = 1800 [s]
- $V_{MAF}$ : Objem nasátého vzduchu [ $\text{m}^3$ ]
- $C_{XY}$ : Koncentrace škodlivé látky ve výfukových plynech [ppm]
- $\delta$ : Koeficient přepočtu z ppm [ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
- $s$ : Ujetá vzdálenost během jízdního cyklu = 23,266 [km]

## 5.5 Vypracování tvorby pevných částic

Tvorba pevných částic byla naměřena jako absolutní množství ve zředěné dávce výfukových plynů. Měření probíhá pomocí výše uvedeného částicového analyzátoru TSI EESP 3090, který byl po dobu měření nastaven na ředící poměr 1:200. Na závěr je zapotřebí výsledné hodnoty vynásobit ředícím poměrem. Výpočet je proveden pomocí vzorce 5.5.1.

$$X = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \frac{MAF}{M_{mol}} \cdot V_{mol} \cdot dt \cdot C_{pm} \cdot 200}{s} \quad 5.5.1$$



Kde:

- X: Množství pevných částic vyprodukovaných na 1 km [ks.]
- $t_1$ : Čas počátku měřicího cyklu = 0 [s]
- $t_2$ : Čas konce cyklu = 1800 [s]
- MAF: Okamžitá hmotnost nasávaného vzduchu [ $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
- $M_{\text{mol}}$ : Molární hmotnost vzduchu = 28,96 [ $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ]
- $V_{\text{mol}}$ : Molární objem vzduchu = 22,4 [ $\text{dm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ ]
- $C_{\text{pm}}$ : Množství částic v měřeném vzorku [ $\text{X} \cdot \text{cm}^{-3}$ ]
- s: Ujetá vzdálenost během jízdního cyklu = 23,266 [km]

## 5.6 Vypracování spotřeby paliva vozidla

Spotřeba paliva je měřena nepřímou metodou přepočtem plynných emisí v poměru na objem nasávaného vzduchu v závislosti na přítomnosti obsahu uhlíku v palivu.

$$m_{\text{paliva}} = \int_{t_1}^{t_2} \frac{MAF}{M_{\text{mol}}} \cdot C_{\text{CO}_2} \cdot dt \cdot \frac{M_c}{m_{cp}} \quad 5.6.1$$

Kde:

- $m_{\text{paliva}}$ : Hmotnostní spotřeba paliva za jeden cyklus [g]
- $t_1$ : Čas počátku měřicího cyklu = 0 [s]
- $t_2$ : Čas konce cyklu = 1800 [s]
- MAF: Okamžitá hmotnost nasávaného vzduchu [ $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
- $M_{\text{mol}}$ : Molární hmotnost vzduchu = 28,96 [ $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ]
- $C_{\text{CO}_2}$ : Koncentrace oxidu uhličitého ve výf. Plynech [%]
- $m_{cp}$ : Hmotnostní podíl uhlíku v palivu = 0,863 [-]

Všechny použité výpočty v kapitolách 5.4–5.6 jsou integrovány podle času, kdy „dt“ se rovná jedné sekundě. Veškerá numerická integrace byla provedena pomocí programu MS Excel, kde proběhlo vypočtení pro daný řádek v rámci jedné sekundy. Kvůli rozdílné vzorkovací frekvenci použitých analyzátorů bylo zapotřebí v programu MS Excel převést data do tabulky s jednotným časovým rozlišením rovné jedné sekundě. Použitím aproximace datových bodů pomocí lineární interpolace bylo dosaženo normalizované datové sady.

## 5.7 Vypracování vnější výkonové charakteristiky

Vnější výkonová charakteristika se skládá z více stupňů měření, kdy v první části měření se zařadí jeden zvolený rychlostní stupeň. Zohledněním přenosu točivého momentu na válce zkušebny je vhodné volit vyšší převodový stupeň, aby bylo dosaženo vyšších otáček a nižšího točivého momentu. Na tento zvolený převodový stupeň se vozidlo rozjede na maximální dosažitelnou rychlost převodu až do omezovače otáček a následně je postupně zvyšována zátěž pomocí navyšování točivého momentu na vířivém dynamometru zkušebny. Současně se zvyšováním točivého momentu na vířivém dynamometru postupně klesají otáčky, ideálně až do hodnoty volnoběžných otáček, kdy dojde k ukončení měření. Tato získaná data, která udávají hodnotu maximálního točivého momentu v závislosti na otáčkách válců zkušebny, je zapotřebí přepočítat převodovým poměrem mezi koly vozidla a válci zkušebny. Potřeba je také přepočítat samotný převodový poměr v souvislosti se zařazeným rychlostním stupněm a převodovým poměrem diferenciálu.

Tyto přepočítané výsledné hodnoty redukované na převodový poměr je potřeba dopočítat takzvaný ztrátový moment, jelikož válcová zkušebna měří pouze výkonové parametry na kolech vozidla. K tomuto výkonu je tedy nutné přičíst zmiňovaný ztrátový moment v převodovém ústrojí a mezi koly vozidla pomocí vzorce 5.7.1. Získání tohoto ztrátového momentu se provede vyřazením převodového stupně a roztočením válců zkušebny pomocí DC motorgenerátoru. Vždy pro danou rychlost je při konstantním režimu odečten potřebný moment pro pohon (měření se při různých rychlostech opakuje minimálně pro pět bodů). Následně je z těchto bodů možné vytvořit závislost pasivních ztrát na rychlosti vozu. Dále je možné tyto změřené body proložit křivkou, vytvořit rovnici trendu a pomocí výpočtu data interpolovat a extrapolovat pro vnější výkonovou charakteristiku. Dle vzorce 5.7.2 a 5.7.3 lze poté uskutečnit přepočet na úhlovou rychlost a dopočítat výkon motoru podle přepočítaného točivého momentu a aktuální hodnoty otáček klikové hřídele.

$$M_{\text{motoru}} = \int_{t_1}^{t_2} \frac{M_{\text{ztrátový}} + M_{\text{válců}}}{i} \quad 5.7.1$$

$$P_{\text{motoru}} = \int_{t_1}^{t_2} M_{\text{motoru}} \cdot \omega \quad 5.7.2$$

Kde:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad 5.7.3$$

Kde:

- $M_{\text{motoru}}$ : Točivý moment motoru [Nm]
- $t_1$ : Počátek měření [s]
- $t_2$ : Konec měření [s]
- $M_{\text{ztrátový}}$ : Ztrátový moment [Nm]
- $M_{\text{válců}}$ : Točivý moment změřený na válcích zkušebny [Nm]
- $i$ : Převodový poměr [-]
- $P_{\text{motoru}}$ : Výkon motoru [kW]
- $\omega$ : Úhlová rychlost klikové hřídele vozidla [ $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
- $f$ : Frekvence otáček klikové hřídele [ $\text{s}^{-1}$ ]

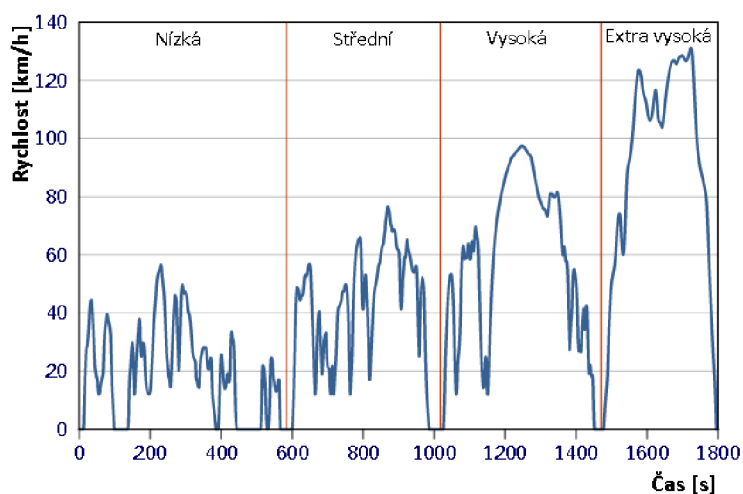
## 6 Výsledky

### 6.1 Výsledky jízdního cyklu WLTC3

Zpracování výsledků proběhlo následujícím způsobem:

- Průměrná spotřeba paliva za jeden jízdní cyklus
- Průměrná produkce plynných emisí na ujetý 1 km cyklu
- Průměrná produkce pevných částic na ujetý 1 km cyklu

Průměrný WLTC3 cyklus na válcové zkušební je prezentován na následujícím obr. 17.



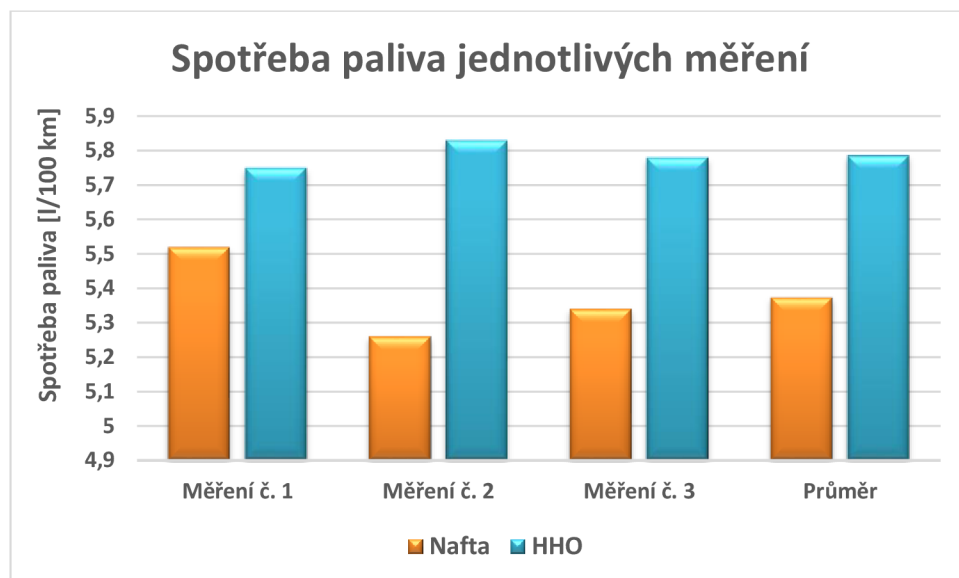
Obrázek 16: Homologační cyklus WLTC3 [31]

#### 6.1.1 Spotřeba paliva

Spotřeba zde byla řešena jako průměrná celková spotřeba paliva. Měřena byla nepřímou metodou, kdy se neprovádělo hmotnostní vážení úbytku paliva v soustavě, ale byla řešena přepočtem z produkce emisí dle vzorce 5.6.1.

Průměrná spotřeba paliva				
	Měření č. 1	Měření č. 2	Měření č. 3	Průměrná hodnota
Nafta [l/100 km]	5,52	5,26	5,34	5,37
HHO [l/100 km]	5,75	5,83	5,78	5,79
Rozdíl [%]	-	-	-	7,82

Tabulka 10: Graf spotřeby paliva vozidla v jednotlivých měřeních



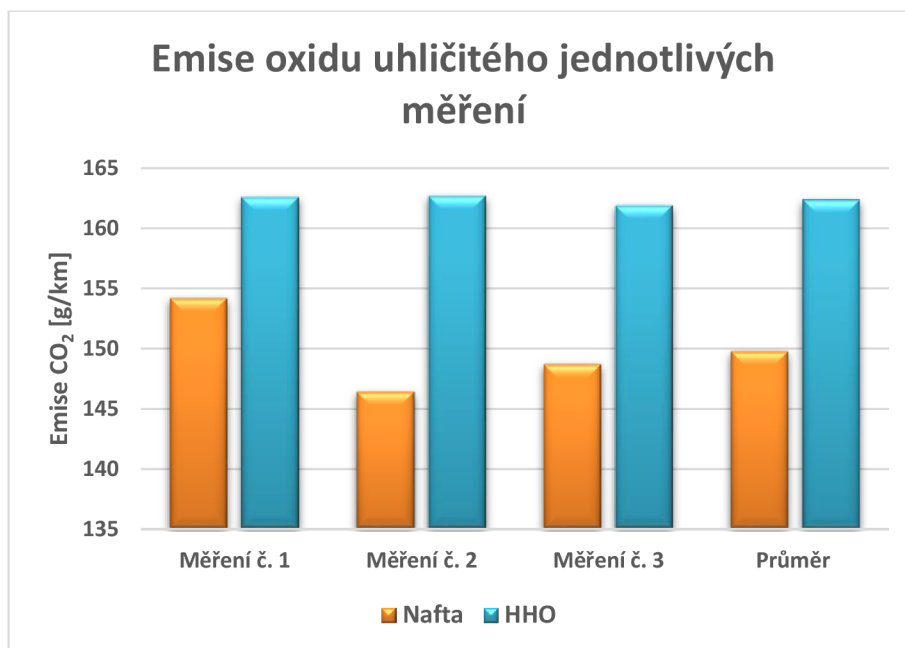
Obrázek 17: Graf spotřeby paliva vozidla v jednotlivých měřeních

### 6.1.2 Produkce plynných emisí

Všechny měřené produkce plynných emisí byly řešeny dle metodiky měření WLTP C3 jako průměrné produkce za 1 km cyklu. K měření byl použit spektrální analyzátor Matrix MG-5 z kapitoly 5.2.3. Výpočet byl proveden pomocí vzorce 5.4.1. Vzorcem 5.4.2 byla poté provedena kontrola.

Průměrná produkce CO <sub>2</sub>				
	Měření č. 1	Měření č. 2	Měření č. 3	Průměrná hodnota
<b>Nafta [g/km]</b>	154,2	146,4	148,7	149,8
<b>HHO [g/km]</b>	162,6	162,7	161,9	162,4
<b>Rozdíl [%]</b>	-	-	-	8,4

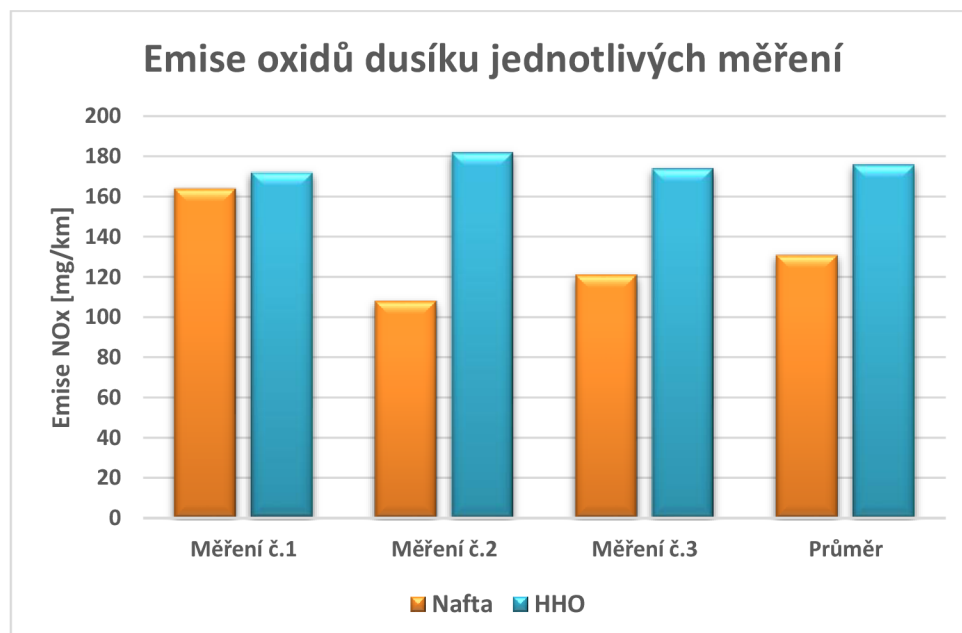
Tabulka 11: Výsledné hodnoty produkce CO<sub>2</sub>



Obrázek 18: Graf produkce emisí oxidu uhličitého

Průměrná produkce NO <sub>x</sub>				
	Měření č. 1	Měření č. 2	Měření č. 3	Průměrná hodnota
<b>Nafta [mg/km]</b>	164	108	121	131
<b>HHO [mg/km]</b>	172	182	174	176
<b>Rozdíl [%]</b>	-	-	-	34

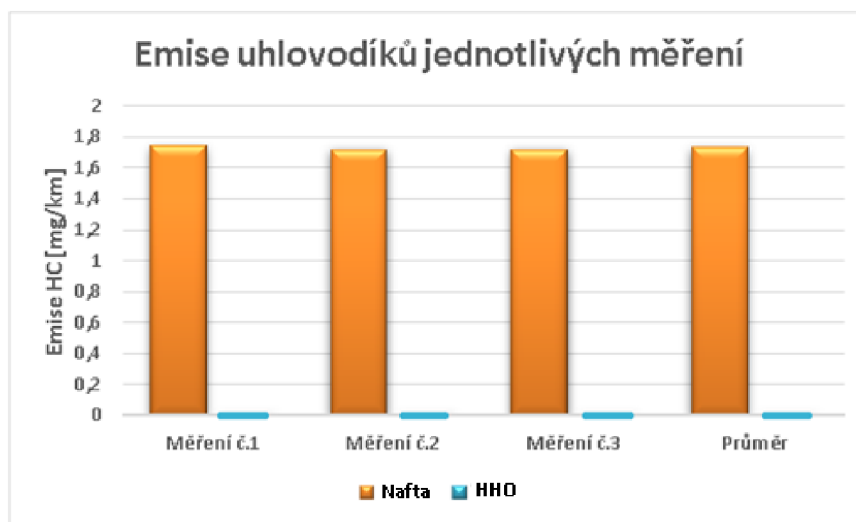
Tabulka 12: Výsledné hodnoty produkce NO<sub>x</sub>



Obrázek 19: Graf produkce emisí oxidů dusíku

Průměrná produkce HC				
	Měření č. 1	Měření č. 2	Měření č. 3	Průměrná hodnota
<b>Nafta [mg/km]</b>	1,74	1,72	1,72	1,73
<b>HHO [mg/km]</b>	0	0	0	0
<b>Rozdíl [%]</b>	-	-	-	100

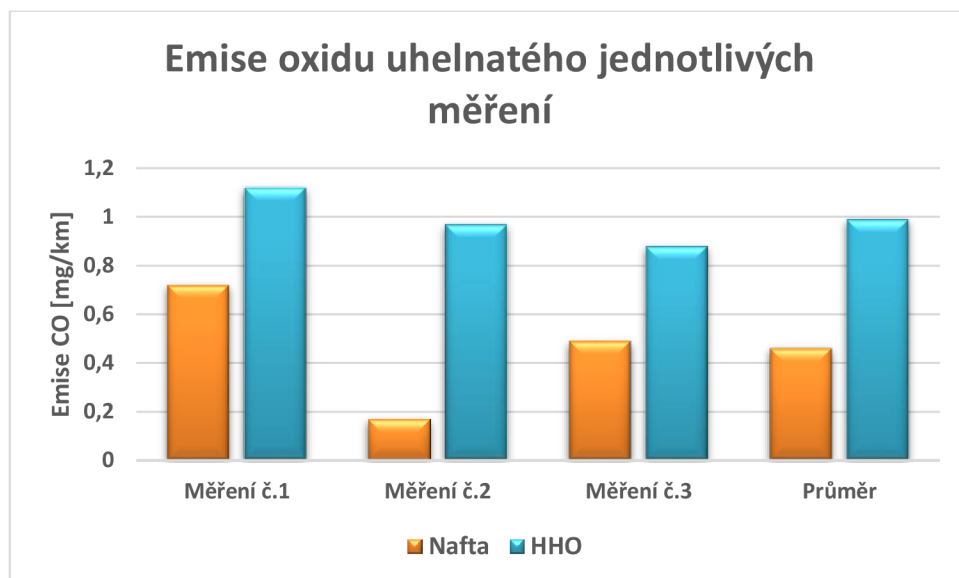
Tabulka 13: Výsledné hodnoty produkce HC



Obrázek 20: Graf produkce emisí uhlovodíků

Průměrná produkce CO				
	Měření č. 1	Měření č. 2	Měření č. 3	Průměrná hodnota
<b>Nafta [mg/km]</b>	0,72	0,17	0,49	0,46
<b>HHO [mg/km]</b>	1,12	0,97	0,88	0,99
<b>Rozdíl [%]</b>	-	-	-	115,2

Tabulka 14: Výsledné hodnoty produkce CO



Obrázek 21: Graf produkce oxidu uhelnatého

### 6.1.3 Naměřené hodnoty vnější otáčkové charakteristiky

Vnější otáčková charakteristika		
	Výkon [kW]	Moment [Nm]
<b>Nafta</b>	89,6	254,7
<b>HHO</b>	86,1	252,4

Tabulka 15: Hodnoty vnější otáčkové charakteristiky



## 7 Diskuse

Výsledky z vnější otáčkové charakteristiky jsou zde znázorněny pouze informativně jako jeden z dalších výsledkových ukazatelů pro porovnání s jinými výzkumy a celkovému zhodnocení prosperity HHO plynu ve spalovacích motorech. Nižší naměřené hodnoty z vnější otáčkové charakteristiky při obohacení směsi o plyn z HHO generátoru můžeme připisovat zvýšení zátěže na palubní síť vozu, kdy alternátor potřebuje odebrat vyšší výkon z klikové hřídele vozidla. Ve valné většině případů uvádí literatura nárůst účinnosti a výkonu motoru při obohacení směsi vodíkem, v těchto experimentech ovšem bylo pro tvorbu plynu využito externích zdrojů, nebo měli plyn předem zvlášť uchovaný. Dalším možným důvodem rozdílných výsledků může být v našem případě absence vstřikovačů pro přesné dávkování plynu do sacího potrubí, které by bylo potřeba získat úpravou vstřikovačů klasických fosilních paliv. [45] [46]

Literatura [47] se s touto prací shoduje ve zvýšení oxidů dusíku ( $\text{NO}_x$ ), odlišuje se ovšem ve snížení oxidu uhelnatého, snížení spotřeby a zvýšení točivého momentu. Stejně jako v předchozím případě se ovšem jednalo o obohacování palivové směsi vodíkem z vnějšího zdroje, které mohlo ovlivnit výsledky ostatních hodnot.

Zajímavým výsledkem bylo naměření nulových hodnot nespálených uhlovodíků (HC) při obohacené směsi paliva HHO plynem ve všech námi provedených měřeních. V již zmiňované literatuře [46] tento pokles nespálených uhlovodíků činil pouhých 50 %. Otázkou však je, zda je to způsobené spotřebou energie HHO generátoru a s tím spojenou zvýšenou spotřebou paliva nebo právě obohacením směsi. Pro toto zjištění by bylo zapotřebí provést nová měření při napájení HHO generátoru z externího zdroje.

## 8 Závěr

Předkládaná práce se věnuje problematice snižování škodlivých emisí vznikajících při spalování fosilních paliv. Jednou z možných cest, jak tyto škodlivé emise omezit je spalování vodíku. Ten se na Zemi nachází vázaný ve sloučeninách. Pro potřeby této práce byl vodík generován z vody a následně smíchán s nasávaným vzduchem v sacím systému vozidla.

Provedený experiment porovnával produkci emisí při spalování čisté fosilní motorové nafty, přičemž do sacího systému byl přiváděn plyn HHO. Pro referenční měření byla použita čistá motorová nafta.

Měřené emise byly zaznamenávány analyzátory pro plynné složky a pevné složky. Byly měřeny primárně regulované složky emisí. Naměřené hodnoty byly zpracovány dle předkládané metodiky a zaneseny do výsledků.

Výsledky jsou zaznamenány v podobě naměřených hodnot v tabulkách, ze kterých jsou vyhotoveny grafy. Z výsledků je patrné, že připojením HHO generátoru na vozidlo a zapojením do jeho palubní sítě, vzrostla měrná spotřeba paliva o 8,4 %. Současně se spotřebou vzrostla také produkce oxidu uhličitého ( $\text{CO}_2$ ), což je produkt dokonalého spalování paliva. Dále byly naměřeny také vyšší hodnoty oxidů dusíku ( $\text{NO}_x$ ) a oxidu uhelnatého (CO). Zajímavým zjištěním byla absolutní eliminace emisí uhlovodíků. Emise pevných částic byly naměřeny, ale ve výsledcích nejsou uvedeny z důvodů přítomnosti funkčního systému DPF ve výfuku měřeného vozidla.

Ačkoliv většina zahraničních zdrojů uvádí zvýšení výkonu nebo účinnosti motoru, snížení spotřeby a emisí oxidu uhelnatého, námi naměřené hodnoty se s jednou vybranou prací shodovaly pouze ve zvýšení produkce oxidu dusíku.

Vodíková mobilita má zajisté velký potenciál v automobilovém průmyslu. Takřka nulové emise a dobré jízdní vlastnosti čistě vodíkového paliva deklarují vodík jako vhodnou náhradu za fosilní paliva. Výhody pouze obohacením směsi HHO plynem se v tomto případě navzdory slibovaným výsledům, neukázaly jako ideální cesta pro snižování škodlivých emisí produkovaných vznětovými motory. Pro budoucí využití HHO generátoru by tedy bylo vhodné jeho další zkoumání, s ohledem na jeho dodatečné zatěžování palubní sítě, řízené dávkování vodíku a přizpůsobením řídicí jednotky.

## 9 Seznam použitých zdrojů

- [1] PILÁRIK, Milan a Jiří PABST. Automobily II: pro 2. ročník SOU. 2., přeprac. vyd. Praha: Informatorium, 2006. ISBN 80-733-3038-5.
- [2] Základní informace k vodíku. Hytep.cz [online]. [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/o-vodik/ve-zkratce>
- [3] Vodík. Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Vod%C3%ADk>
- [4] H. Cídllová, B. Kohoutková, P. Křivánková, K. Štěpánek, B. Valová. Vodík. Ped.muni [online]. 2011 [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: <https://www.ped.muni.cz/wchem/sm/hc/hist/chemlat/vodik.html>
- [5] Manažeri autoprůmyslu prý věří vodíku. Proč?. Ifleet [online]. 6.1.2017 [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: <http://www.ifleet.cz/aktuality/fleet-manazer/manazeri-autoprumyslu-pry-veri-vodik-proc.html>
- [6] STAVEBNÍK, Pavel. Geniální Japonsko. Autoroad [online]. 1.2.2022 [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: <https://autoroad.cz/eko/102431-genialni-japonsko-vodik-budou-ziskavat-levne-a-jeste-vyresi-velky-problem>
- [7] Strategická výzkumná agenda rozvoje vodíkového hospodářství v ČR [online]. Husinec-Řež č.p. 130: HYTEP, 2010 [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: [https://www.hytep.cz/images/dokumenty-ke-stazeni/SVA\\_HYTEP.pdf](https://www.hytep.cz/images/dokumenty-ke-stazeni/SVA_HYTEP.pdf)
- [8] Vodík: vlastnosti, výroba a využití. Web.vscht [online]. [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: <https://web.vscht.cz/~nadhernl/projektIV/vodik.html>
- [9] PROCHÁZKA, Juraj. Vodík z morskej vody pre lacnejšie palivo: Zásobník „zelenej“ energie. Techbox [online]. 2019 [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: <https://www.techbox.sk/vodik-z-morskej-vody-pre-lacnejšie-palivo/>
- [10] DROBNÝ, Josef. Skladování vodíku. Hydro-race [online]. 10.10.2019 [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: <https://hydro-race.eu/Skladov%C3%A1n%C3%AD-vod%C3%ADku>
- [11] JANÍK, Luděk a Petr DLOUHÝ. Jak se vyrábí palivo budoucnosti. Vodík pro auta i elektroniku. Idnes [online]. 28.1.2008 [cit. 2022-03-09]. Dostupné z:

[https://www.idnes.cz/technet/technika/jak-se-vyrabi-palivo-budoucnosti-vodik-pro-auta-i-elektroniku.A080127\\_234744\\_tec\\_technika\\_vse](https://www.idnes.cz/technet/technika/jak-se-vyrabi-palivo-budoucnosti-vodik-pro-auta-i-elektroniku.A080127_234744_tec_technika_vse)

- [12] DALIBOR, Vojtěch. Zamyšlení nad budoucím rozvojem automobilů poháněných vodíkem. Hytep [online]. 10.3.2009 [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/o-vodiku/clanky/zamysleni-nad-budoucim-rozvojem-automobilu-pohanenych-vodikem>
- [13] Said Al-Hallaj. LH2-Tank System [online]. 2011 [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Linde-liquid-hydrogen-storage-tank-9\\_fig3\\_251104697](https://www.researchgate.net/figure/Linde-liquid-hydrogen-storage-tank-9_fig3_251104697)
- [14] ŠVÁB, Michal. TRENDY VE VÝVOJI VODÍKOVÉHO HOSPODÁŘSTVÍ [online]. 2006 [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: <https://www.mpo-efekt.cz/dokument/01.pdf>
- [15] Kontak oznamuje revoluční způsob skladování vodíku na kapalném nosiči. Hydrogenfuelnews [online]. 17.5.2021 [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: <https://www.hydrogenfuelnews.com/kontak-hydrogen-liquid-carrier/8544962/>
- [16] Jak se vyrábí vodíkové palivo: Jak se plyn H<sub>2</sub> skladuje a distribuuje?. Hydrogenfuelnews [online]. [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: <https://www.hydrogenfuelnews.com/how-is-hydrogen-fuel-made/>
- [17] KOLMAN, Stanislav. První vodíkové čerpačky v ČR mají zpoždění. Otevření se odkládá na příští rok. Auto [online]. 24.11.2021 [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/prvni-vodikove-cerpacky-v-cr-maji-zpozdeni-otevreni-se-odklada-na-pristi-rok-141707>
- [18] BEDNÁŘ, Marek. Jak se tankuje vodík? Princip je jednoduchý, chybí však čerpací stanice. Novinky: AutoMoto [online]. 16.3.2021 [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: <https://www.novinky.cz/auto/clanek/jak-se-tankuje-vodik-princip-je-jednoduchy-chybi-vsak-cerpaci-stance-40354011>
- [19] Technologický foresight a implementační akční plán využití vodíkových technologií pro čistou mobilitu [online]. Husinec-Řež č.p. 130, 2019 [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/images/dokumenty-ke-stazeni/technologicky-forsight-a-implementacni-akcni-plan-vyuziti-vodikovych-technologiei-pro-cistou-mobilitu.pdf>

- [20] CANYILMAZ, Ali, Erinç ULUDAMAR a Kadir AYDIN. Effect of hydroxy (HHO) gas addition on performance and exhaust emissions in compression ignition engines [online]. 2010 [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319910013595>
- [21] HYDROGEN FUEL EDUCATION TABLE OF CONTENTS. Alternativempg [online]. [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: <http://www.alternativempg.com/FrequentlyAskedQuestions.html>
- [22] HHO pro auta, rychlé seznámení: Jak to funguje? [online]. [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: <http://www.forgas.cz/rychle-seznameni-s-hho#top>
- [23] Jak pracuje HHO. Magicacustic [online]. [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: <http://www.magicacustic.cz/wordpress/prestavby-lpg-cng-e85/setrete-palivo-s-prestavbou-hho/jak-pracuje-hho/>
- [24] KOTEK, Martin. Výuková skripta k předmětu Diagnostika motorových vozidel [online]. Praha, 2020 [cit. 2022-03-10]. ISBN 978-80-213-3065-8. Dostupné z: [https://katedry.czu.cz/storage/258/7579\\_skripta-DMV.pdf](https://katedry.czu.cz/storage/258/7579_skripta-DMV.pdf)
- [25] Emise [online]. Praha [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: <https://katedry.czu.cz/kvpd/merici-vybaveni/emise>
- [26] TSI - 3090: PRODUCT DETAILS [online]. 2017 [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: <https://www.atselektronik.com.tr/products/products-library/tsi-3090>
- [27] MATRIX\_MG\_Brochure\_EN: MATRIX-MG5 [online]. [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: [http://bruker.poznan.pl/wp-content/uploads/2018/12/MATRIX\\_MG\\_Brochure\\_EN.pdf](http://bruker.poznan.pl/wp-content/uploads/2018/12/MATRIX_MG_Brochure_EN.pdf)
- [28] MATRIX-MG5. Syntpot [online]. Tähe [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: <https://syntpot.ee/product/matrix-mg5/>
- [29] ALTINISIK, Kemal a Ali KESKIN. The pollutant emissions from diesel-engine vehicles and exhaust aftertreatment systems [online]. 11.6.2014 [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10098-014-0793-9>
- [30] Oxid siřičitý. Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 18.9.2021 [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Oxid\\_si%C5%99i%C4%8Dit%C3%BD](https://cs.wikipedia.org/wiki/Oxid_si%C5%99i%C4%8Dit%C3%BD)

- [31] Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle (WLTC): WLTC Test Cycles. Dieselnet [online]. 1997 [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: <https://dieselnet.com/standards/cycles/wltp.php>
- [32] ČERMÁK, Ladislav. Selektivní katalytická redukce (SCR): Jak funguje systém, který umožňuje dieselům přežít. Autobible.euro [online]. 27.9.2017 [cit. 2022-03-24]. Dostupné z: <https://autobible.euro.cz/selektivni-katalyticka-redukce-scr-kterak-se-zly-nox-stal-hodnym-dusikem/>
- [33] Čerpací stanice: Proces doplňování vodíku [online]. [cit. 2022-03-27]. Dostupné z: <https://www.airproducts.cz/equipment/hydrogen-fueling-stations#/>
- [34] HROMÁDKO, Jan. Spalovací motory: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol. Praha: Grada, 2011. ISBN 978-80-247-3475-0.
- [35] GREENWOOD, N. N. a Alan EARNSHAW. Chemie prvků. Praha: Informatorium, 1993. ISBN 80-854-2738-9.
- [36] Marhold, Josef. Přehled průmyslové toxikologie. Praha: Avicenum, 1980.
- [37] K ČEMU JE EGR VENTIL A JAK FUNGUJE: Princip fungování [online]. [cit. 2022-03-27]. Dostupné z: [https://www.pietro-eshop.cz/clanky-navody/\\_zobraz=k-cemu-je-egr-ventil-a-jak-funguje](https://www.pietro-eshop.cz/clanky-navody/_zobraz=k-cemu-je-egr-ventil-a-jak-funguje)
- [38] Katalyzátor výfukových plynů: Oxidační katalyzátor. Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 19.7.2021 [cit. 2022-03-27]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Katalyz%C3%A1tor\\_v%C3%BDfukov%C3%BDch\\_plyn%C5%AF](https://cs.wikipedia.org/wiki/Katalyz%C3%A1tor_v%C3%BDfukov%C3%BDch_plyn%C5%AF)
- [39] Filtr pevných částic. Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 6.8.2021 [cit. 2022-03-27]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Filtr\\_pevn%C3%BDch\\_%C4%8D%C3%A1stic](https://cs.wikipedia.org/wiki/Filtr_pevn%C3%BDch_%C4%8D%C3%A1stic)
- [40] FREI, Martin. Vše o katalyzátorech: Vite, jaké „bandasky“ máte ve svém autě a proč?: Diesel: Záchytný katalyzátor LNT. Auto [online]. 2001, 27.10.2018 [cit. 2022-03-27]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/vse-o-katalyzatorech-vite-jake-bandasky-mate-ve-svem-aute-a-proc-125474>
- [41] EU: Cars and Light Trucks: Emission Standards. Dieselnet [online]. 1997 [cit. 2022-03-27]. Dostupné z: <https://dieselnet.com/standards/eu/ld.php>

- [42] KOTEK, PH.D., Ing. Martin. Diagnostika motorových vozidel: Homologační cyklus WLTP. Moodle.czu.cz [online]. [cit. 2022-03-27]. Dostupné z: [file:///C:/Users/mskro/OneDrive/Plocha/%C5%A1kola/5.%20ro%C4%8Dn%C3%ADk/Zimn%C3%AD%20semestr/Diagnostika%20motorov%C3%BDch%20vozidel/diagnostika/pdf/pdf24\\_merged.pdf](file:///C:/Users/mskro/OneDrive/Plocha/%C5%A1kola/5.%20ro%C4%8Dn%C3%ADk/Zimn%C3%AD%20semestr/Diagnostika%20motorov%C3%BDch%20vozidel/diagnostika/pdf/pdf24_merged.pdf)
- [43] GÜRBÜZ, Habib. Vliv dvoupalivového spalování nafty a vodíku na výkon a environmentální ekonomické ukazatele v malém proudovém motoru UAV. *Sciencedirect* [online]. 15.12.2021 [cit. 2022-03-29]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236121016161>
- [44] VERMA, Saket. A renewable pathway towards increased utilization of hydrogen in diesel engines. *Sciencedirect* [online]. 14.2.2020 [cit. 2022-03-29]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319919321287>
- [45] GOMES ANTUNES, J.M., R. MIKALSEN a A.P. ROSKILLY. An experimental study of a direct injection compression ignition hydrogen engine. *Sciencedirect* [online]. 2009 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319909008647>
- [46] A. ELDRAINY, Yehia, Mohamed E. KHIDR a Kareen I. KHIDR. Effect of hydroxy (HHO) gas addition on gasoline engine performance and emissions. *Sciencedirect* [online]. 2016 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016815001714>
- [47] OZCANLI, Mustafa, Mustafa ATAKAN AKAR, Ahmed CALIK a Hasan SERIN. Using HHO (Hydroxy) and hydrogen enriched castor oil biodiesel in compression ignition engine. *Sciencedirect* [online]. 7.9.2017 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319917302586>

## 10 Seznam obrázků

Obrázek 1: Princip pístového spalovacího motoru [1] .....	12
Obrázek 2: Zastoupení hlavních zdrojů výroby vodíku [5].....	15
Obrázek 3: Proces parního reformování [8] .....	16
Obrázek 4: Princip elektrolýzy vody [9] .....	17
Obrázek 5: Vysokoteplotní elektrolýza [7] .....	18
Obrázek 6: Průřez kompozitní láhvi na plynný vodík [11] .....	20
Obrázek 7: Průřez kryogenní nádrži na kapalný vodík [13].....	21
Obrázek 8: Schéma obvyklé čerpací stanice na vodík [33].....	24
Obrázek 9: Základní schéma HHO systému [23].....	29
Obrázek 10: Zastoupení výfukových složek naftových motorů [29] .....	30
Obrázek 11: Použitý HHO generátor .....	38
Obrázek 12: Válcová zkušebna .....	38
Obrázek 13: Konstrukční uspořádání válcové zkušebny [24].....	39
Obrázek 14: Částicový analyzátor TSI EESP 3090 [25].....	40
Obrázek 15: Spektrální analyzátor Matrix MG-5 [27] .....	42
Obrázek 16: Homologační cyklus WLTC3 [31] .....	48
Obrázek 17: Graf spotřeby paliva vozidla v jednotlivých měřeních .....	49
Obrázek 18: Graf produkce emisí oxidu uhličitého.....	50
Obrázek 19: Graf produkce emisí oxidů dusíku.....	50
Obrázek 20: Graf produkce emisí uhlovodíků .....	51
Obrázek 21: Graf produkce oxidu uhelnatého.....	52



## 11 Seznam tabulek

Tabulka 1: Přehled vybraných chemicko-fyzikálních parametrů různých paliv [7] ....	19
Tabulka 2: Vlastnosti vybraných paliv [20] .....	26
Tabulka 3: Emisní norma Euro 6 pro dieselové motory [41] .....	36
Tabulka 4: Základní parametry vozidla .....	37
Tabulka 5: Technické údaje HHO generátoru .....	37
Tabulka 6: Parametry válcové zkušebny [24] .....	39
Tabulka 7: Technické parametry částicového analyzátoru TSI EESP 3090 [25].....	41
Tabulka 8: Technické parametry spektrálního analyzátoru Matrix MG-5 [25] .....	41
Tabulka 9: Parametry náporového ventilátoru Filcar AL-1500/C .....	42
Tabulka 10: Graf spotřeby paliva vozidla v jednotlivých měřeních .....	48
Tabulka 11: Výsledné hodnoty produkce CO <sub>2</sub> .....	49
Tabulka 12: Výsledné hodnoty produkce NO <sub>x</sub> .....	50
Tabulka 13: Výsledné hodnoty produkce HC .....	51
Tabulka 14: Výsledné hodnoty produkce CO .....	51
Tabulka 15: Hodnoty vnější otáčkové charakteristiky .....	52

## 12 Seznam zkratek

#	Četnost
ppm	Částice na milion (Parts per million)
LPG	Zkapalněný zemní plyn (Liquefied Petroleum Gas)
CNG	Stlačený zemní plyn (Compressed Natural Gas)
CO	Oxid uhelnatý
CO <sub>2</sub>	Oxid uhličitý
HC	Uhlovodíky
NO	Oxid dusnatý
NO <sub>2</sub>	Oxid dusičitý
NO <sub>x</sub>	Oxidy dusíku
CH <sub>4</sub>	Metan
MAF	Mass air flow
NEDC	New European Driving Cycle
WLTC	Worldwide harmonized light vehicles test cycle
WLTP	Worldwide harmonized Light vehicles test procedure