

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STROJNÍ**



**TEZE  
DISERTAČNÍ  
PRÁCE**



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

ÚSTAV AUTOMOBILŮ, SPALOVACÍCH MOTORŮ A KOLEJOVÝCH VOZIDEL

Teze disertační práce

## **Potenciál vznětového dvoupalivového motoru z hlediska snižování emisí skleníkových plynů**

***Ing. Ivan Bortel***

Doktorský studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Dopravní stroje a zařízení

Školitel: *Prof. Ing. Michal Takáts, CSc.*

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

**Název anglicky: Potential of dual fuel compression ignition engine to decrease global warming emissions**

Disertační práce byla vypracována v prezenční formě doktorského studia na Ústavu automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel, Fakulty strojní ČVUT v Praze.

Disertant: Ing. Ivan Bortel

Ústav 12120, Fakulta strojní ČVUT v Praze  
Technická 4, Praha 6

Školitel: Prof. Ing. Michal Takáts, CSc.

Ústav 12120, Fakulta strojní ČVUT v Praze  
Technická 4, Praha 6

Školitel-specialista: Ing. Jiří Vávra, Ph.D.

Ústav 12120, Fakulta strojní ČVUT v Praze  
Technická 4, Praha 6

Oponenti:

Teze byly rozeslány dne: .....

Obhajoba disertace se koná dne ..... v ..... hod.

v zasedací místnosti č. 17 (v přízemí) Fakulty strojní ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6, před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Dopravní stroje a zařízení.

S disertací je možno se seznámit na oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojní ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6.

doc. Ing. Oldřich Vítek, Ph.D.

předseda oborové rady oboru Dopravní stroje a zařízení

Fakulta strojní ČVUT v Praze

## Anotace

### Potenciál vznětového dvoupalivového motoru z hlediska snižování emisí skleníkových plynů

Předmětem práce je analýza přístupů, které mohou snížit produkci oxidu uhličitého emitovaného při provozu vznětového motoru osobního vozidla. Na problém je nazíráno ze dvou pohledů. První pohled zahrnuje požadavky legislativy, které zohledňují pouze CO<sub>2</sub> detekované ve výfuku, zatímco druhý pohled se snaží vzít v úvahu také reálnou uhlíkovou stopu z hlediska tzv. „well to wheel“ emisí CO<sub>2</sub>. Hlavními nástroji analýzy jsou výzkumný vznětový jednoválec a software pro simulaci jízdy vozidla. Jako nejperspektivnější se s ohledem na současný stav poznání jeví dvoupalivový koncept vznětového motoru zapalující pilotní dávkou kapalného paliva chudou homogenní směs vodíku a vzduchu. Tento koncept má předpoklady splnit současné i budoucí požadavky legislativy z hlediska emisí CO<sub>2</sub> osobních vozidel. Z pohledu snížení celkové uhlíkové stopy je třeba dbát na vhodnou technologii výroby tohoto paliva. To může částečně řešit zájem energetických společností používat vodík jako akumulátor energie z nestabilních obnovitelných zdrojů. Koncept také pomáhá překlenout problémy s neexistující vodíkovou infrastrukturou. Vznětový motor konceptu nafta-vodík totiž umožňuje v dvoupalivovém režimu nahradit vodík zemním plynem nebo motor alternativně provozovat pouze na kapalné palivo a tím zajistit nouzový dojezd k vodíkové plnicí stanici. Další zlepšení parametrů tohoto konceptu umožní náhrada motorové nafty hydrogenovaným rostlinným olejem. Toto palivo označované jako HVO přináší benefity jak v dvoupalivovém, tak čistě vznětovém provozu agregátu a navíc dále snižuje uhlíkovou stopu konceptu díky výrobě pomocí obnovitelných technologií.

**Klíčová slova:** vznětový motor, dvoupalivový motor, vodík, hydrogenovaný rostlinný olej, zemní plyn, oxid uhličitý (CO<sub>2</sub>)

## Abstract

### Potential of dual fuel compression ignition engine to decrease global warming emissions

The presented work deals with the reduction of carbon dioxide, which is attainable with a dual fuel compression ignition engine of size of passenger car. There are two points of view. The first view, as a representation of regulation requirements, takes into account only the concentration of CO<sub>2</sub> in exhaust gases. The second one takes into account the “Well to Wheel” emissions of CO<sub>2</sub>, as a representation of the real effect to global warming. This work has been executed primarily on single cylinder compression ignition engine and by tools for the simulation of vehicle driving. The dual fuel-hydrogen compression ignition engine is dedicated as the most perspective concept. This concept uses the combustion of the lean homogenous mixture of air and hydrogen, which is ignited by pilot injection of diesel fuel. Diesel-hydrogen concept seems to fulfil future requirements for CO<sub>2</sub> emissions of passenger cars. “Well to Wheel” balance depends on origin of hydrogen. Low „Well to Wheel“ emissions of combustion of hydrogen can be allowed by the intention of energy companies, which is to use hydrogen as an energy carrier for storage of the excess of electricity from unstable renewable sources. This concept also can help with development of hydrogen infrastructure because it can be used while the infrastructure of hydrogen is being developed. The reason is the possibility to operate with CNG instead of hydrogen or as a pure diesel engine, when the hydrogen filling station is not available. The substitution of standard diesel fuel by the hydrotreated vegetable oil leads to further benefits of dual fuel combustion and also improves pure diesel operation. In addition, HVO further improves the carbon footprint because the HVO is produced by renewable technologies.

**Keywords:** compression ignition engine, dual fuel engine, hydrogen, hydrotreated vegetable oil (HVO), compressed nature gas (CNG), carbon dioxide (CO<sub>2</sub>)

# Obsah

Obsah.....	3
1 Úvod .....	4
2 Současný stav problematiky .....	5
2.1 Legislativní pozadí.....	5
3 Cíle disertační práce .....	8
4 Metody zpracování.....	9
4.1 Stanoviště výzkumného jednoválce .....	9
4.1.1 Zpracování experimentálních dat.....	10
4.1.2 Metodiky experimentů.....	10
4.2 Postupy simulační části.....	11
5 Výsledky.....	11
5.1 Náhrada motorové nafty HVO.....	11
5.2 Mapování možností dvoupalivového vznětového motoru nafta-zemní plyn.....	13
5.2.1 Stechiometrický koncept nafta-zemní plyn.....	14
5.2.2 Chudý koncept nafta-zemní plyn.....	14
5.3 Mapování možností dvoupalivového vznětového motoru nafta-vodík.....	17
5.4 Simulace jízdy vozidla s palivově flexibilním pohonem nafta-vodík-zemní plyn.....	20
5.5 Náhrada motorové nafty HVO u dvoupalivového vznětového motoru nafta-vodík.....	25
6 Závěr .....	27
6.1 Náměty na další práci .....	28
Seznam použité literatury v tezích .....	29
Publikace související s tématem disertace .....	32
Ostatní související výsledky .....	33

# 1 Úvod

V současnosti hojně diskutovaným problémem je vliv člověka na globální klima. Obzvláště se pak v této souvislosti veřejná diskuze zaměřuje na vliv CO<sub>2</sub> pocházející z osobní dopravy. Provoz osobních vozidel zaujímá 5.5 % produkce CO<sub>2</sub> pocházející z lidské činnosti, což odpovídá cca 0.2 % celkové světové produkce CO<sub>2</sub> [5].

Posuzovat emise CO<sub>2</sub> generované provozem vozidel lze více způsoby. První, a z hlediska efektu na globální oteplování přinejmenším diskutabilní, je zjištění množství CO<sub>2</sub> ve výfukových plynech. Tento přístup používá aktuální evropská legislativa k nátlaku na automobily z hlediska snížení emisí CO<sub>2</sub> [6], [7], [8]. Je nasnadě, že s tímto přístupem dosahují elektromobily formálně nulových emisí CO<sub>2</sub>, legislativa totiž neuvažuje produkci této emise při výrobě elektrické energie. Díky tomu je legislativně z hlediska globálního oteplování preferován několikátunový elektromobil oproti městskému vozítku litrové kategorie s hmotností kolem jedné tuny.

Je-li cílem reálné snížení emisí přispívajících ke globálnímu oteplování, je třeba uvažovat úroveň daných emisí v celém řetězci výroby a distribuce paliva. Pro tento přístup se vžil termín „Well to Wheel“ (WTW), tedy „od zdroje na kola“. Ještě zodpovědnější přístup pak zohledňuje veškeré kvantum daných emisí generovaných v souvislosti s existencí daného vozidla po jeho celý životní cyklus a nazývá se „cradle to grave“ (CTG), tedy od „kolébky do hrobu“. Takové přístupy je však daleko složitější zakotvit legislativně. Proto je úkolem inženýrů a především vědců uvažovat v tomto komplexním rámci a hledat řešení, které splňuje požadavky dané legislativou a zároveň minimalizuje reálné negativní dopady osobní dopravy. To vyžaduje nechat mezi sebou jednotlivá řešení při vhodně určených kritériích volně soutěžit a pro jednotlivé aplikace volit to v současnosti nejlepší.

Z tohoto hlediska se jeví jako stále žádoucí zabývat se spalovacími motory. Především pro větší dopravní vzdálenosti se stále jeví jako nenahraditelný vznětový spalovací motor. Navíc, díky důsledkům aféry zvané „Dieselgate“, máme v současnosti dostupné technologie k velmi úspěšné likvidaci toxických složek výfukových plynů [11]

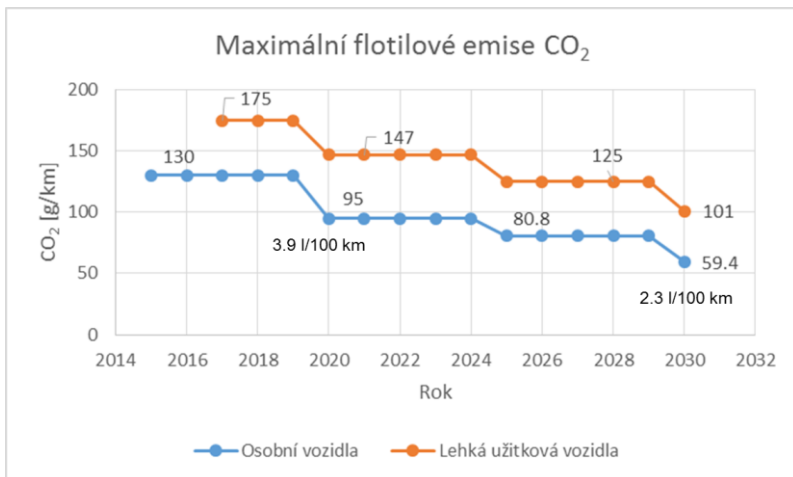


a není nerozumné předpokládat další pozitivní vývoj v této oblasti. Proto se překládaná práce zabývá právě vznětovým spalovacím motorem, byť dvoupalivovým, a klade si za cíl prošetřit jeho potenciál z hlediska splnění příštích legislativních limitů na emise CO<sub>2</sub> s přihlédnutím ke snížení reálného dopadu na globální oteplování a to za použití alternativním paliv.

## 2 Současný stav problematiky

### 2.1 Legislativní pozadí

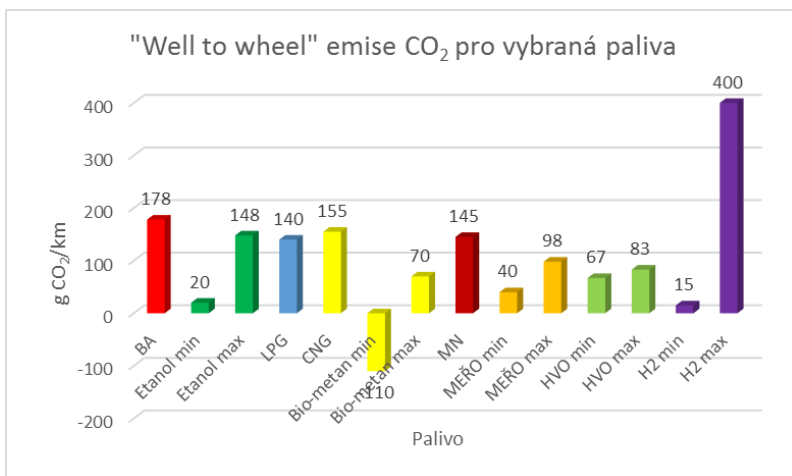
K regulaci flotilových emisí CO<sub>2</sub> dochází od roku 2015 a v případě lehkých užitkových vozidel od roku 2017 [13]. Situaci graficky znázorňuje Obr. 2-1 sestrojený na základě podkladů [5], [8] a [13].



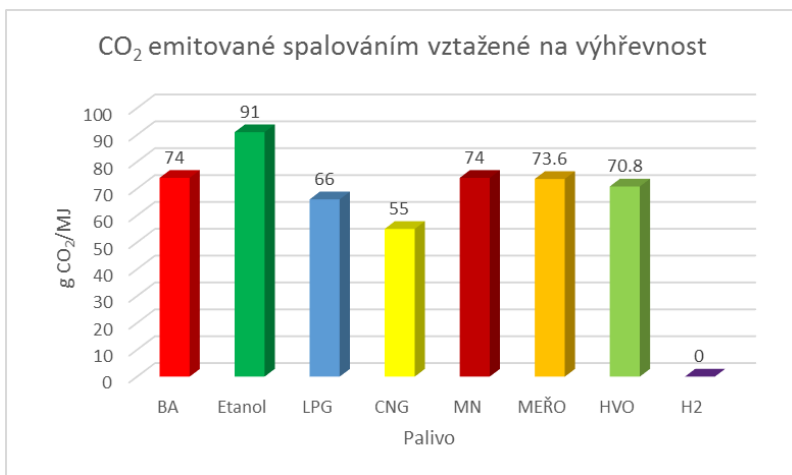
Obr. 2-1 Současné a plánované limity průměrných specifických flotilových emisí CO<sub>2</sub>

Při pohledu na limit pro osobní vozidla je patrné, že tento je nedosažitelný, protože v podstatě vyžaduje účinnost hnacího řetězce ve vozidle blízkou elektrické trakci (spotřeba cca 21 kWh/100 km). To by jistě nebylo nic špatného, pokud by tato situace byla podobná i v případě WTW či CTG emisích CO<sub>2</sub>. Nicméně při současném energetickém mixu EU je reálná WTW uhlíková stopa obou variant porovnatelná [9], [10]. Jelikož nelze očekávat růst účinnosti spalovacích motorů odpovídající požadavkům legislativy, nezbyvá než

snížit výfukové emise CO<sub>2</sub> použitím paliv s nižším obsahem uhlíku a reálnou uhlíkovou stopu pak vhodným užíváním obnovitelných paliv.



Obr. 2-2 Well to Wheel emise CO<sub>2</sub> (rok 2010) kompilované z [19] a [20]

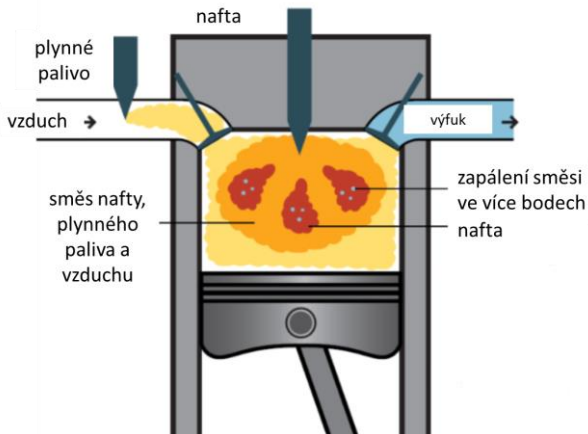


Obr. 2-3 Množství CO<sub>2</sub> emitované spalováním daného paliva vztažené na výhřevnost.

Z hlediska WTW emisí CO<sub>2</sub> i z hlediska spalování se jeví jako velmi vhodným palivem pro vznětový motor hydrogenovaný rostlinný olej

(Obr. 2-2), který ale bohužel nevyhovuje z hlediska emisí  $\text{CO}_2$  ve výfukových plynech (Obr. 2-3). Více může snížit výfukové emise  $\text{CO}_2$  (cca 25 %) bio-metan (potažmo zemní plyn) a ještě výrazněji vodík. U obou je však z hlediska WTW emisí  $\text{CO}_2$  nutné volit vhodnou obnovitelnou technologii výroby (Obr. 2-2).

Obě tato paliva jsou však nevhodná pro spalování ve vznětovém motoru a vyžadují tak jeho přestavbu na tzv. dvoupalivový vznětový motor. Zde se palivo vhodné pro spalování připravené směsi dopravuje do sacího potrubí a ve válci je pak tato směs zapálena vznětem pilotní dávky kapalného paliva, jak ilustruje Obr. 2-4. Výhodou zapalování pilotním vstříkem je výrazně vyšší dostupná energie vzníceného paliva k zapálení připravené směsi oproti zapalování zapalovací svíčkou a také zapálení této zbylé směsi ve více bodech. Obojí dohromady pak umožňuje jednak rychlejší spalování než u klasického zážehového motoru a jednak také umožňuje spalovat chudší homogenní směs.



*Obr. 2-4 Zapalování homogenní směsi pilotní dávkou paliva [81]*

Zemní plyn vyniká vysokou odolností vůči klepání, což zjednodušuje přestavbu vznětového motoru na dvoupalivový, neboť nemusí být nutně snižován kompresní poměr motoru. Dalším benefitem v porovnání s automobilovými benzínami je posunutí meze zapalitelnosti dále do chudé směsi. Účinnost motoru se ve vysokém zatížení a při vysokém stupni substituce kapalného paliva může blížit

účinnosti čistě vznětového motoru [93], [94], [95], zatímco v nízkém a středním zatížení je nižší [83], [93].

Vodík naopak vykazuje nízkou odolnost proti klepání, sklon k předzápalům a výšlehům plamene do sacího pléna [12]. Pravděpodobnost výskytu těchto nežádoucích jevů výrazně narůstá pro úroveň energetické substituce vyšší než 50 % [42]. Většina výzkumů se tak zabývá případy s nízkou úrovní energetické substituce kapalného paliva vodíkem [38] a [39] a nepřepřítvanými motory [41], [40], [42], [43], [44], [45]. Oproti uhlovodíkovým palivům vodík ve směsi vzduchem hoří velice rychle [12], čímž se spalování více blíží izochorickému ideálu [41]. Iniciační energie nutná k započetí spalování je velmi nízká a zapálit lze směsi velmi chudé [12] i v porovnání se zemním plynem.

### 3 Cíle disertační práce

Hlavním cílem je prozkoumat potenciál vznětového dvoupalivového motoru ve vztahu ke snížení koncentrace CO<sub>2</sub> ve výfukových plynech s ohledem na požadavky současné a budoucí evropské legislativy a zároveň neztrácet ze zřetele reálný celkový dopad na globální oteplování, tedy takzvané „Well to Wheel“ emise CO<sub>2</sub>. Současně je třeba posuzovat i úroveň jinak škodlivých složek výfukových plynů sledovaných legislativou. Na základě provedené rešerše současného stavu se jeví jako vhodný průzkum použití alternativních paliv s nižším obsahem uhlíku, která vedou na snížení koncentrace CO<sub>2</sub> ve výfukových plynech, přičemž je žádoucí, aby tato paliva mohla být zároveň produkována s velkou mírou obnovitelnosti a tím splnila i požadavek na reálný pokles produkce CO<sub>2</sub> z osobní dopravy. Na podkladu této úvahy byly vytyčeny následující dílčí cíle.

- Zhodnocení potenciálu náhrady motorové nafty hydrogenovaným rostlinným olejem (HVO) ve vznětovém motoru
- Zhodnocení možností dvoupalivového vznětového motoru nafta-zemní plyn
- Zhodnocení možností dvoupalivového vznětového motoru nafta-vodík
- Zhodnocení potenciálu náhrady motorové nafty HVO za účelem zlepšení parametrů dvoupalivového vznětového motoru

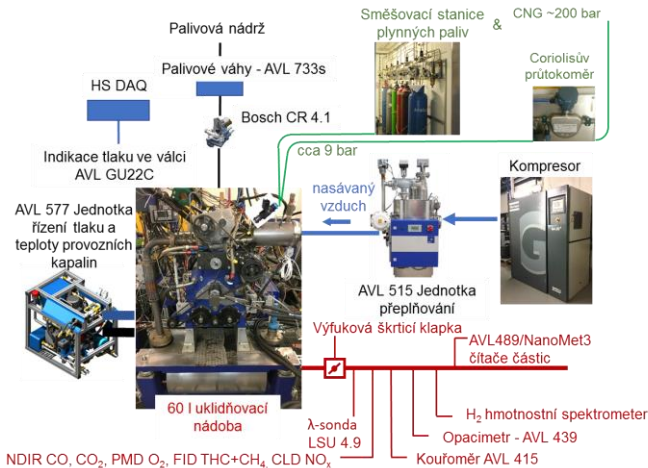
- Určení potenciálu vhodných koncepcí ke snížení produkce výfukových emisí CO<sub>2</sub> v reálném nasazení ve vozidle pomocí simulačních nástrojů.

## 4 Metody zpracování

### 4.1 Stanoviště výzkumného jednoválce

Jako zdroj experimentálních dat byl zvolen výzkumný vznětový jednoválec AVL Typ 5402.088 instalovaný v sestavě „AVL Compact Single Cylinder Test Bed“. Tato sestava obsahuje dynamometr se základním řízením, samotný experimentální motor, externí jednotku přeplňování a udržování teploty nasávaného vzduchu a nezávislé jednotky na řízení teploty a tlaku chladicí kapaliny a motorového oleje. Konfigurace stanoviště umožňuje měření stacionárních režimů a je nevhodná pro režimy přechodové. Řídicí systém stanoviště a sběr dat pomalu proměnných a průměrovaných veličin je postaven na platformách od National instruments a je průběžně přizpůsobován aktuálním potřebám výzkumu. Pro sběr rychle proměnných veličin, jako je například tlak ve válci a tlaky v periferiích motoru pro účely třítlakové analýzy je používána sestava AVL Indicom s příslušenstvím. Měřicí stanoviště bylo postupně doplněno o infrastrukturu umožňující provoz na zemní plyn, vodík a případně jiná zvolená paliva [137]. Průtok všech paliv je samozřejmě měřen a zaznamenáván.

Samotný motor velikostí válcové jednotky o vrtání 85 mm a zdvihu 90 mm odpovídá běžnému osobnímu automobilu. Je vybaven vstřikováním typu common rail a otevřenou řídicí jednotkou Ricardo rCube2 [113 a [114]. Jednotka umožňuje řízené vefukování plynného paliva do jednoho ze tří sacích portů motoru pro účely dvoupalivového provozu. Dvoupalivový provoz si také vyžádal pasivní chlazení vstřikovače v podobě měděného prstence na jeho trysce [84]. K měření koncentrací plynných složek ve spalínách (CO, CO<sub>2</sub>, HC, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>, O<sub>2</sub>) byla použita měřicí sestava AVL AMA i60, pro gravimetrické měření pevných částic (PM) byl použit přístroj AVL 472 a k měření počtu částic (PN) přístroj AVL 489 či alternativně Testo Nanomet3. Emise nespáleného vodíku byly měřeny vodíkovým spektrometrem.



Obr. 4-1 Schéma měřicího stanoviště

#### 4.1.1 Zpracování experimentálních dat

Naměřená data jak rychle, tak pomalu proměnných veličin, byla synchronizována a zpracovávána nástrojem vyvinutým v prostředí Matlab Ing. Jiřím Vávrou Ph.D., který nástroj průběžně vyvíjel tak, jak experimenty vyžadovaly. Jelikož měření probíhají na jednoválci, jehož mechanické ztráty neodpovídají případnému reálnému vozidlovému motoru, posuzují se naměřené veličiny ve vztahu k indikovanému tlaku, tedy bez uvažování pasivních odporů.

#### 4.1.2 Metodiky experimentů

V průběhu měření má obsluha stanoviště v reálném čase k dispozici průběh tlaku ve válci a vybrané veličiny odvozené z tohoto průběhu. Dále jsou sledovány teploty a tlaky v periferiích motoru a koncentrace jednotlivých složek ve výfukových plynech. Na podkladu těchto dat pak obsluha nastavuje řídicí prvky motoru a stanoviště za účelem splnění zadání měření. Měření probíhala v ustálených režimech. Většina experimentů se zabývá vlivem náhrady jednoho paliva druhým, při čemž se používají dva přístupy. V prvním případě nastavení řídicí jednotky zůstává stejné a pozoruje se vliv změny paliva na parametry spalování a emise. Tento postup

Lze použít, když mají paliva relativně podobné vlastnosti (záměna kapalného paliva). V druhém případě se přizpůsobuje nastavení řídicí jednotky tak, aby byly dosaženy podobné parametry spalování, především poloha padesátiprocentního vývinu tepla (CA50). To je postup v podstatě nutný pro experimenty s dvoupalivovým konceptem kombinujícím spalování tvořící se a připravené směsi. Protitlak ve výfuku byl nastavován tak, aby účinnost fiktivního turbodmychadla dosahovala 50 %. Pro posouzení celkového vlivu substituce motorové nafty palivem HVO pak posloužil stacionární test vycházející WHSC testu, v případě dvoupalivového konceptu pak níže popisovaná simulace jízdy vozidla.

## 4.2 Postupy simulační části

Na základě experimentálních dat byly sestaveny stacionární charakteristiky fiktivních plně rozměrových motorů používající vybrané koncepty. Tyto charakteristiky pak následně posloužily pro simulaci jízdy vozidla v prostředí GT-Suite. Výsledkem simulace je hodnota emisí CO<sub>2</sub> v g/km pro jednotlivé koncepty podobně, jako se uvádí u osobních vozů a lehkých užitkových vozidel. Jako referenční výsledky pro porovnání alternativních konceptů jsou uvažovány výsledky dosažené čistě vznětovým konceptem pohonu.

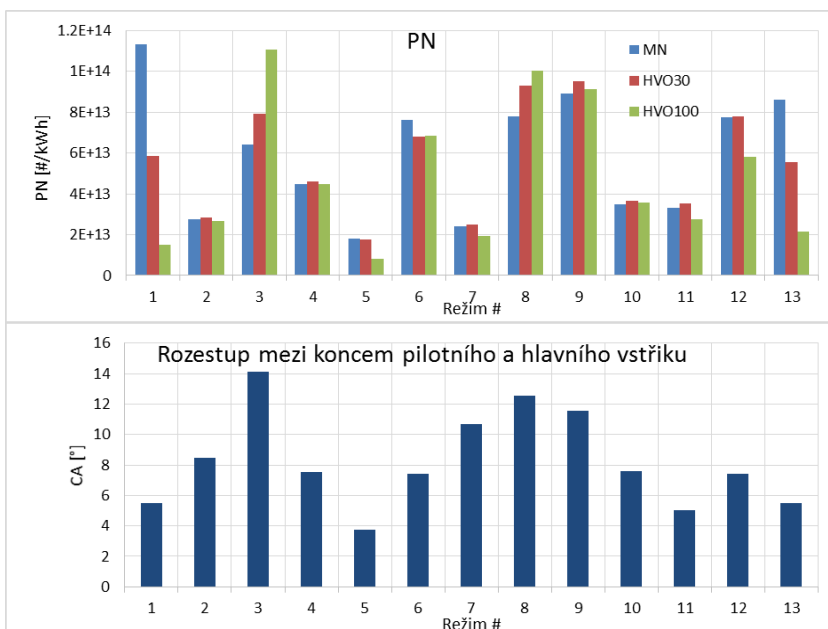
# 5 Výsledky

V této kapitole budou prezentovány vybrané klíčové výsledky z provedených experimentů a simulačních výpočtů, které dokladují potenciál ke snížení emisí CO<sub>2</sub>.

## 5.1 Náhrada motorové nafty HVO

Pro tento účel byla stanovena motorová nafta dle ČSN EN 590 bez biosložek jako referenční palivo a posuzoval se vliv směsi 70 % motorové nafty a 30 % HVO a čistého HVO. Použitý test je parafrází na třináctibodový normalizovaný test WHSC, tedy test, který vybírá třináct reprezentativních režimů daného motoru dle jeho vnější charakteristiky. Celkový výsledek testu je vážený průměr jednotlivých režimů pro dané škodliviny, nicméně byl zvažován i vliv v jednotlivých režimech. Váhy pro jednotlivé režimy jsou v testu WHSC voleny vhodně dle frekvence jejich využití v běžném provozu [115], [116].

Na rozdíl od testu WHSC dle normy jsou výsledky vztaženy k indikovanému výkonu a to z důvodů nereprezentativních pasivních odporů jednoválcového motoru. Experimentální výzkumný jednoválec měl při tomto měření nastavený kompresní poměr 16:1. Jednotlivé režimy motoru byly definovány stejným nastavením fiktivního pedálu akcelérátoru a tedy totožným nastavením doby a časování vstříků.

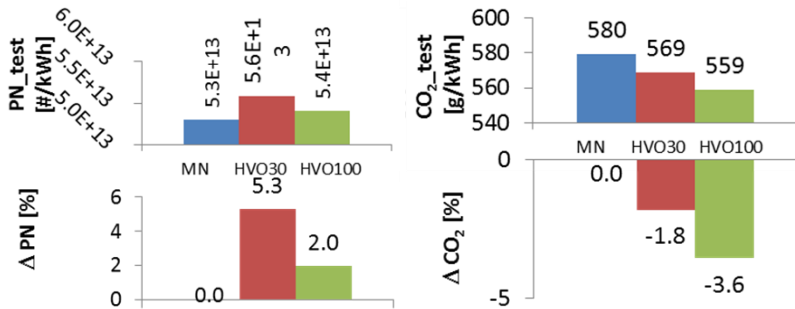


Obr. 5-1 Specifické emise počtu částic (PN) v jednotlivých bodech testu a rozstup mezi koncem pilotního a začátkem hlavního vstříku paliva ve stupních klikového hřídele

Podíl HVO v motorové naftě vede ke zvýšení indikovaného výkonu motoru v jednotkách procent. Efekt je nejvýraznější v nižších zatíženích. Vliv HVO na specifickou spotřebu energie a tedy i účinnost motoru je rovněž mírně pozitivní. Výrazně pozitivně se HVO projevuje u emisí CO a HC, kdy čisté HVO má za následek redukci těchto emisí o více než 60 %. Dopad na emise NO<sub>x</sub> je nezatelný, nebo mírně pozitivní (jednotky procent). Byla pozorována výrazná redukce hmotnosti emitovaných částic PM a to až ve výši 80 % v případech



čistého HVO. Vliv HVO na množství emitovaných částic PN je značně závislý na rozestupu mezi jednotlivými vstřiky, viz Obr. 5-1. Při větším rozestupu mezi pilotním a hlavním vstřikem se negativně projeví vyšší cetanové číslo HVO tím, že pilotní vstřik hoří příliš rychle a hlavní vstřik se na něj nedostatečně naváže a dávky tak hoří v podstatě odděleně.



Obr. 5-2 Specifické emise PN a CO<sub>2</sub> - průměr za test

Ukazuje se tedy, že HVO prakticky nemá negativních efektů a snižuje emise většiny škodlivých látek. Pokud bude řídicí jednotka optimalizována pro čisté HVO, pak lze předpokládat i snížení emisí PN. Nicméně zjištěný potenciál k redukci CO<sub>2</sub> dosahuje hodnoty cca 3.5 % (Obr. 5-2), což je z hlediska legislativních požadavků nedostatečné a odpovídá předpokladu z Obr. 2-3. Nicméně viděno optikou reálného dopadu, dosahuje úspora „Well to Wheel“ emisí CO<sub>2</sub> 40–54 % ve srovnání s fosilní motorovou naftou [19] a [20]. Problematika HVO je autorem diskutována v [118], [119], [120], [121], [122] a [127].

## 5.2 Mapování možností dvoupalivového vznětového motoru nafta-zemní plyn

Základní mapování probíhalo za konstantních otáček motoru o výši 1500 min<sup>-1</sup> a při atmosférickém plnění motoru. Spočívalo ve zvyšování úrovně náhrady nafty zemním plynem od nulové po maximálně dosažitelnou při konstantním zatížení. Úrovně zatížení jsou charakterizována středním indikovaným tlakem o hodnotě  $p_i = 2, 4, 6, 8$  barů a maximálním dosažitelným  $p_i$ .

Z mapování je patrné, že dvoupalivový vznětový motor na zemní plyn s chudou koncepcí se nevyhne sofistikovanému systému úpravy spalin stejně jako původní vznětová koncepce. Snížená produkce částic ve formě PM i PN stále vyžaduje filtr pevných částic a nároky na redukci NO<sub>x</sub> zůstávají, nebo se mohou i zvýšit. Navíc se neuralgickým bodem konceptu ukazují emise nespáleného metanu. Jejich výše je v tomto případě podpořena nevhodným původním spalovacím prostorem s velkým podílem zhášecích prostor [124], [126] a [128].

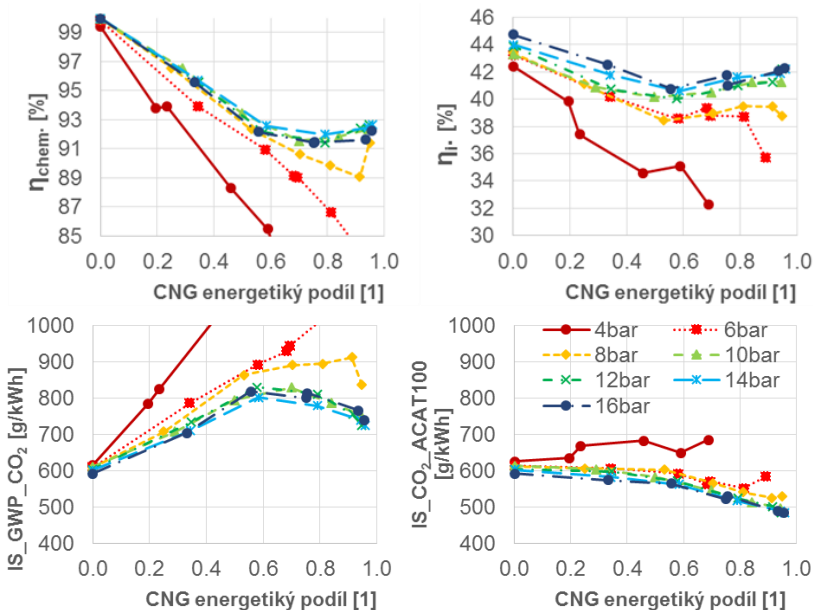
### **5.2.1 Stechiometrický koncept nafta-zemní plyn**

Z výše uvedených důvodů se jevila nadějná stechiometrická koncepce, kde by se o dodatečnou úpravu spalin postaral třícenný katalyzátor. Energetické a emisní charakteristiky stechiometrického dvoupalivového vznětového motoru nafta-zemní plyn byly naměřeny pro kompresní poměr 16:1 a 14:1. Redukce emisí CO<sub>2</sub> pomocí konverze vznětového motoru na stechiometrický dvoupalivový motor nafta-vodík variuje v obou případech přibližně mezi 10–20 % a to v režimech, kde tento koncept lze použít. Emise nespáleného metanu v surových spalinách vůči chudé koncepci poklesly. V nízkém zatížení je limitujícím faktorem míry náhrady motorové nafty zemním plynem nekompletní spalování. Tento limit je v případě nižšího kompresního poměru  $p_i$  o hodnotě 6–8 bar, zatímco pro vyšší kompresní poměr cca 5 bar. V těchto a nižších zatíženích je tak nezbytné motor provozovat v čistě vznětovém režimu a emise NO<sub>x</sub> tak není možné redukovat v třícenném katalyzátoru, koncept by tak vyžadoval přinejmenším regenerační katalyzátor typu LNT. Tím pádem není možné uvažované výrazné zjednodušení emisního systému proti vznětové variantě [125]. Proto se další experimenty zaměřily na chudou koncepci dvoupalivového vznětového motoru.

### **5.2.2 Chudý koncept nafta-zemní plyn**

Chudý koncept byl mapován v mechanické konfiguraci odpovídající níže diskutovanému vodíkovému konceptu. Tento přístup byl implikován myšlenkou zvýšení palivové variability hypotetického motoru, který by umožňoval spalovat vodík i zemní plyn, dle toho, jaké palivo bude dostupné. Tomu odpovídají zvolené

kompresní poměr 14:1 a zvolené úrovně středního indikovaného tlaku. Na podkladě zkušeností ze základního mapování byla zvolena hodnota  $\lambda \approx 1.7$  jako kompromis mezi emisemi nespálených uhlovodíků a účinností spalování na straně jedné a emisemi  $\text{NO}_x$  na straně druhé. Tuto hodnotu se dařilo dodržovat až od výkonové úrovně  $p_i = 10$  bar. Pro nižší výkonové úrovně pak součinitel přebytku vzduchu postupně stoupal a zároveň se plynule snižoval plnicí tlak až k mírnému škrčení pro výkonovou úroveň  $p_i = 4$  bar.



Obr. 5-3 Chemická a indikovaná účinnost, potenciál ke globálnímu oteplování v přepočtu na  $\text{CO}_2$  ( $\text{IS\_GWP\_CO}_2$ ) a emise  $\text{CO}_2$  při předpokladu dokonalé oxidace nespáleného metanu v katalyzátoru ( $\text{IS\_CO}_2\text{\_ACAT100}$ ) jako funkce energetického podílu zemního plynu při  $n = 2000 \text{ min}^{-1}$

Obr. 5-3 ukazuje průběh mapování pro otáčky  $2000 \text{ min}^{-1}$ . Z horní části je patrné, že za pokles celkové účinnosti dvoupalivového konceptu v podstatě odpovídá míře poklesu účinnosti chemické. Ta je dána již dříve diskutovanou emisí nespáleného metanu. Pokles účinnosti je nejvýraznější pro energetické podíly zemního plynu o hodnotě přibližně 0.5. Pro posuzování emisí  $\text{CO}_2$  bylo k naměřeným hodnotám v surových spalínách přičtena emise  $\text{CO}_2$  pocházející

z dodatečné oxidace metanu v oxidačním katalyzátoru, kterým by motor musel být vybaven. Pokud by nedošlo k dodatečné oxidaci metanu, celkový efekt na globální oteplování by byl negativní. To je vyjádřeno veličinou GWP zahrnující sumární efekt CO<sub>2</sub> a metanu v přepočtu na měrnou specifickou emisi ekvivalentního množství CO<sub>2</sub> (Obr. 5-3 vlevo dole). Je tedy zřejmé, že zemní plyn vyžaduje perfektní funkci systémů dodatečné úpravy spalin. Situaci za předpokladu úplné dodatečné oxidace metanu vystihuje Obr. 5-3 vpravo dole. Je patrné, že jak z hlediska emisí CO<sub>2</sub>, tak z hlediska účinnosti, jsou pro dvoupalivový koncept výhodné nejvyšší energetické podíly zemního plynu. Výjimkou jsou nízká zatížení, kde chudá primární směs vede na velmi nízkou chemickou účinnost.

Na základě experimentálního mapování chudého konceptu dvoupalivového vznětového motoru nafta-zemní plyn při otáčkách motoru 1200, 2000, 3200 a 4000 min<sup>-1</sup> byly sestaveny energetické a emisní charakteristiky a z nich získána následující zjištění.

- Kompromisní kompresní poměr a maximální střední indikovaný tlak umožňující, oboje umožňující alternativní spalování vodíku, vede na zhoršené podmínky pro spalování metanu především v nízkém zatížení a nevyužití jeho dobrých antidetonačních vlastností.

- Velkým problémem jsou emise nespáleného metanu. Ke snížení by vedla optimalizace spalovacího prostoru a snížení objemu zhášečích prostorů. I potom by ale motor musel být vybaven vysoce funkčním katalyzátorem, neboť metan je výrazným skleníkovým plynem, jinak by dvoupalivový provoz vykazoval z hlediska globálního oteplování zhoršené parametry vůči původnímu vznětovému motoru.

- Dvoupalivový koncept nelze použít pro  $p_i = 6$  bar a méně, což je dáno především nízkou indikovanou a chemickou účinností v těchto režimech, která vede ke zvýšení měrných emisí CO<sub>2</sub>. Zlepšení můžou přinést pokročilé spalovací koncepty jako RCCI.

- Pokles emisí CO<sub>2</sub> v režimech o  $p_i \geq 8$  bar variuje mezi 12 a 20 %, výjimkou jsou jednak nízká zatížení, kde je pokles méně výrazný a jednak otáčky motoru 1200 min<sup>-1</sup>, kde se naopak pokles pohybuje mezi 18–31 %. Reálný pokles u hypotetického motoru bude nižší kvůli nutnosti zachovat v nižším zatížení čistě vznětový režim.

Reálný přínos z hlediska „Well to Wheel“ se může značně zvýšit při použití obnovitelného bio-metanu.

- Vliv dvoupalivového konceptu na celkovou účinnost motoru je závislý na otáčkách motoru. Při  $n = 2000 \text{ min}^{-1}$  se účinnost mírně snižuje (cca 2 %), zatímco ve vyšších i nižších otáčkách je účinnost dvoupalivového konceptu blízká vznětovému či mírně vyšší.

- Dvoupalivový provoz tak jak byl provozován, vede ke zvýšení emisí  $\text{NO}_x$  o 20–50 %, zatímco množství emitovaných částic PN klesá o jeden až dva řády.

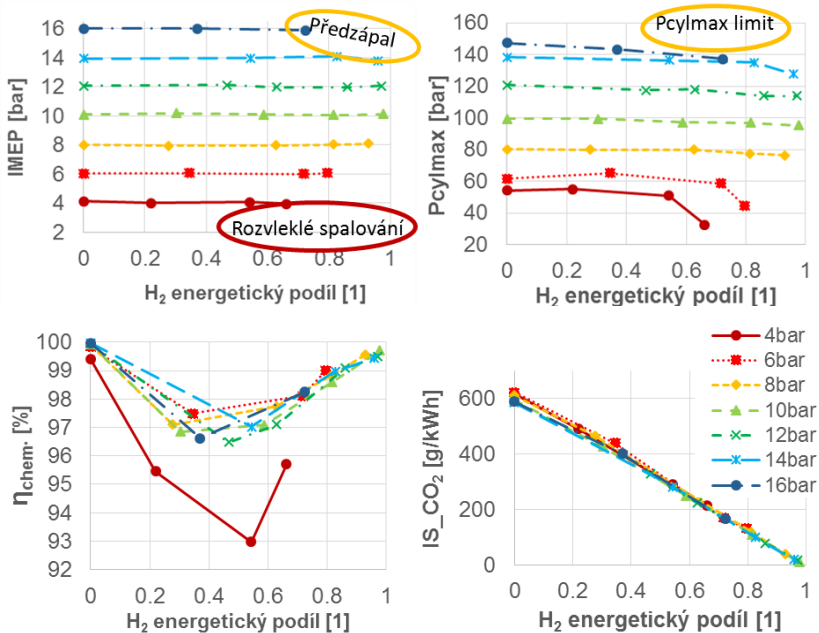
- Obecně lze říci, že dvoupalivový motor nafta-zemní plyn nepřináší vůči čistě zážehové variantě výrazné výhody. Výhodou konceptu je však palivová flexibilita s ohledem na použití vodíku místo zemního plynu a předpoklad vyšší účinnosti při nízkém zatížení.

### 5.3 Mapování možností dvoupalivového vznětového motoru nafta-vodík

Mapování probíhalo analogicky jako v případě chudého konceptu nafta-zemní plyn. Rozdíl byl v hodnotě udržovaného součinitele přebytku vzduchu  $\lambda \approx 2.2$ . Důvodem k tomu bylo omezení rizika výskytu klepání a jiných abnormalit, což bylo dále podpořeno kompresním poměrem sníženým na 14:1. Toto ochuzení se ukázalo jako jediný dosažitelný prostředek, který umožňuje dosahovat přiměřeného výkonu při spalování vodíku, který se vyznačuje velmi nízkým oktanovým číslem (cca 60) [129], [130].

Obr. 5-4 pak ukazuje limity konceptu nafta-vodík. Zatížení je shora omezeno výskytem předzápalů a vzplanutím směsi v sání. Tím je v nejvyšším zatížení o středním indikovaném tlaku 16 barů limitován i maximální energetický podíl vodíku. Zároveň je v tomto zatížení nutno zpožďovat vstřik nafty z důvodu dosažení maxima dovoleného spalovacího tlaku, díky čemuž nemůže být dodržena hodnota polohy padesátiprocentního vývinu tepla CA50. Nízké zatížení dvoupalivového konceptu je opět limitováno nízkou chemickou účinností, která je však vyšší než v případě zemního plynu. Z obrázku je také patrné, že z hlediska účinnosti je stejně jako v případě zemního plynu vhodné používat nejvyšší stupně náhrady. Pokles emisí  $\text{CO}_2$  je pak dle očekávání přibližně lineárně závislý na úrovni

energetické náhrady díky čemuž skýtá značná prostor pro výrazné snížení produkce této emise.



Obr. 5-4 Střední indikovaný efektivní tlak  $p_i$  (IMEP), maximální spalovací tlak ( $P_{cylmax}$ ), chemická účinnost spalování a specifické emise  $CO_2$  ( $IS_{CO_2}$ ) jako funkce energetického podílu vodíku při  $n = 2000 \text{ min}^{-1}$

Na základě experimentálního mapování chudého konceptu dvoupalivového vznětového motoru nafta-vodík při otáčkách motoru 1200, 2000 a 3200  $\text{min}^{-1}$  byly sestaveny energetické a emisní charakteristiky a z nich získána následující zjištění.

- Největší úroveň energetické náhrady nafty vodíkem ve výši cca 98 % je dosažitelná ve středním zatížení ( $p_i = 8\text{--}14 \text{ bar}$ )
- V nízkém zatížení ( $p_i = 4\text{--}6 \text{ bar}$ ) je úroveň energetické náhrady limitována příliš chudou směsí vedoucí na pomalé a nekompletní spalování. Situace je horší ve vyšších otáčkách. Vodík umožňuje použít dvoupalivový koncept v nižších zatíženích než zemní plyn

- V nejnižších zatíženích ( $p_i = 0\text{--}4$  bar) je nutno využít čistě vznětový režim nebo hledat alternativu v konceptech spalování typu RCCI
- V nižších zatíženích by mohlo pomoci lépe vznětlivé palivo, jako je například HVO
- Maximální dosažené zatížení odpovídá  $p_i = 16$  bar při otáčkách motoru  $2000$  a  $3200$   $\text{min}^{-1}$  při stupni náhrady cca 70 %. Další zvyšování zatížení a stupně náhrady bylo znemožněno výskytem vzplanutí vodíku v sání.
- Pokles emise  $\text{CO}_2$  ve výfukových plynech přibližně odpovídá stupni energetické náhrady, což v případě středního zatížení znamená úsporu přes 90 %. Celková redukce v provozu bude záležet na spektru zatížení, neboť v nejnižším zatížení je nutno motor provozovat pouze na kapalné uhlovodíkové palivo. Reálný přínos z hlediska „Well to Wheel“ pak záleží na původu vodíku.
- Emise uhlovodíků jsou obdobné jako u čistě vznětové varianty, zatímco emise CO výrazně klesají
- Počet emitovaných částic klesá až o jeden a půl řádu pro nejvyšší úroveň energetické náhrady
- Emise  $\text{NO}_x$  jsou obdobné jako v případě vznětového motoru
- Indikovaná účinnost vlivem přechodu na dvoupalivový režim s vysokou náhradou většinou poklesne o přibližně 2 %

Ize předpokládat, že dalšího navýšení výkonu při udržení vysokého stupně energetické náhrady je možné dosáhnout optimalizací vefuku vodíku do sání tím, že by každý kanál měl vlastní vyfukovací ventil. Tím by se bohatost směsi v sacím traktu homogenizovala a byl by potlačen výskyt relativně bohatší a lépe zápalné směsi v jednom z portů, která podporuje vzplanutí směsi v sacím traktu. Stejně jako v případě konceptu nafta-zemní plyn lze předpokládat zlepšení parametrů, pokud by se spalovací prostor optimalizoval pro dvoupalivový koncept. Určitý prostor pro optimalizaci pak skýtá také použití proměnného časování ventilů. Celkově koncept skýtá

značný potenciál ke snížení emisí CO<sub>2</sub>. Problematika je zpracovávána v [128], [129], [130] a [131].

#### 5.4 Simulace jízdy vozidla s palivově flexibilním pohonem nafta-vodík-zemní plyn

Dvoupalivové koncepty nelze z výše diskutovaných důvodů využít v nižším zatížení motoru, díky čemuž se špatně odhaduje reálné snížení emisí CO<sub>2</sub>. Proto byla jako vhodná metoda pro kvantifikaci možného snížení těchto emisí zvolena simulace jízdy vozidla využívající stacionární charakteristiky daného konceptu. V daném případě, kdy uspořádání experimentálního motoru téměř neumožňuje měření nestacionárních charakteristik, se jedná v podstatě jeden z mála způsobů, jak interpretaci naměřených dat přiblížit reálnému dopadu a zároveň konfrontovat s požadavky regulátorů. Vzhledem k absenci systému dodatečné úpravy spalín na experimentálním motoru a zaměření této práce, budou předmětem zájmu produkce CO<sub>2</sub> a spotřeba paliva či paliv. Jako reference pro alternativní koncepty budou uvažována data naměřená pro čistě vznětový koncept. Problematikou se zabývají výsledky

Koncept nafta-vodík byl zvolen jako jasně nejvhodnější kandidát, nicméně byl doplněn konceptem nafta-zemní plyn. Lze totiž předpokládat, že při případné reálné aplikaci nebude k dispozici dostatek plnicích stanic na vodík a v takovém případě by zemní plyn, jehož infrastruktura je o něco rozvinutější, mohl posloužit jako alternativní náhrada vodíku pro uvažovaný motor. Spíše než o samostatnou koncepci se tak jedná o rozšíření palivové flexibility vodíkového konceptu. Samozřejmě pak ještě zbývá možnost nouzového dojezdu v čistě vznětovém režimu.

Pro účely simulace byla data naměřená pro jednoválec extrapolována na čtyřválec, čímž se myšlený motor zařadil do oblíbené kategorie vznětových motorů o zdvihovém objemu přibližně 2 dm<sup>3</sup>. Pasivní odpory byly stanoveny modelem Chen-Flynn [135]. Kalibrační koeficienty pro tento model pak byly převzaty z motoru podobné velikosti a stavby z databáze CVUM. To při daném dosaženém středním indikovaném tlaku přináší z hlediska uživatele přijatelný výkon motoru ve výši cca 82 kW při 4000 min<sup>-1</sup> (Obr. 5-5)



a maximální točivý moment 233–247 Nm při 1200–3200 min<sup>-1</sup>. Z charakteristik energetického podílu alternativního paliva (Obr. 5-6 nahoře) je patrné, že vodík vůči zemnímu plynu umožňuje vyšší úroveň náhrady v nižších zatíženích, zatímco blízko vnější charakteristiky a ve vyšších otáčkách je situace opačná. Na Obr. 5-6 dole jsou charakteristiky hodinové produkce CO<sub>2</sub> pro čistě vznětový, vodíkový a zemně-plynový koncept. Opět můžeme pozorovat signifikantní redukci emisí CO<sub>2</sub> ve vybraných bodech charakteristiky vodíkového konceptu.

Pe [kW] čtyřválec

		31	51	78		
	16		27	44	67	82
	14		23	37	57	69
	12		19	31	47	58
	10	13	19	31	47	58
	8	10	15	24	35	45
	6	8	11	18	24	28
	4	5	7	11	13	12
	2	2	3	4	3	-2
	1	1	1	1	-3	-9
		800	1200	2000	3200	4500

Obr. 5-5 Charakteristika efektivního výkonu fiktivního motoru nafta-vodík-zemní plyn

H<sub>2</sub> energetický podíl [%]

		74%	73%	0%		
	16		98%	97%	70%	0%
	14		96%	97%	64%	42%
	12		96%	98%	94%	91%
	10	95%	96%	98%	94%	89%
	8	97%	97%	94%	82%	74%
	6	86%	84%	80%	74%	69%
	4	65%	66%	68%	0%	0%
	2	0%	0%	0%	0%	0%
	1	0%	0%	0%	0%	0%
		800	1200	2000	3200	4500

CNG energetický podíl [%]

		90%	96%	93%		
	16		95%	96%	92%	90%
	14		89%	95%	89%	90%
	12		87%	90%	94%	87%
	10	87%	90%	94%	87%	84%
	8	85%	88%	95%	72%	65%
	6	82%	74%	58%	51%	29%
	4	81%	54%	0%	0%	0%
	2	0%	0%	0%	0%	0%
	1	0%	0%	0%	0%	0%
		800	1200	2000	3200	4500

Diesel mdot CO<sub>2</sub> ACAT100 kg/h

		20.2	32.6	50.4		
	16		17.7	28.6	43.4	57.3
	14		15.2	24.7	38.8	49.3
	12		13.0	21.0	32.8	41.1
	10	8.4	13.0	21.0	32.8	41.1
	8	6.7	10.7	16.7	26.6	34.2
	6	5.0	8.3	12.6	19.9	25.7
	4	3.4	5.0	8.5	13.4	16.8
	2	1.7	2.5	4.2	6.7	8.4
	1	0.8	1.3	2.1	3.4	4.2
		800	1200	2000	3200	4500

H<sub>2</sub> mdot CO<sub>2</sub> ACAT100 kg/h

		5.3	9.0	50.4		
	16		0.3	0.9	13.7	57.3
	14		0.6	0.7	13.6	22.1
	12		0.2	0.3	1.0	4.8
	10	0.6	0.5	0.3	2.0	3.1
	8	0.2	0.3	1.0	4.8	7.4
	6	0.8	1.4	2.7	5.6	7.5
	4	1.7	2.1	2.9	13.4	16.8
	2	1.7	2.5	4.2	6.7	8.4
	1	0.8	1.3	2.1	3.4	4.2
		800	1200	2000	3200	4500

CNG mdot CO<sub>2</sub> ACAT100 kg/h

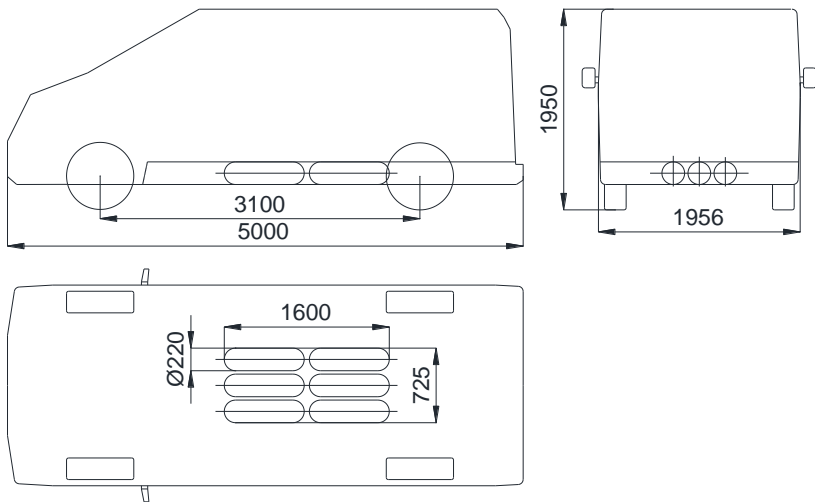
		16.7	26.2	39.0		
	16		13.2	23.2	34.8	47.2
	14		11.3	19.8	30.7	39.9
	12		9.5	17.0	26.5	34.2
	10	5.8	9.5	17.0	26.5	34.2
	8	3.9	7.5	14.7	22.3	28.9
	6	2.3	5.6	12.1	17.6	22.9
	4	2.1	4.3	8.5	13.4	16.8
	2	1.7	2.5	4.2	6.7	8.4
	1	0.8	1.3	2.1	3.4	4.2
		800	1200	2000	3200	4500

Obr. 5-6 Úplná charakteristika hodinové produkce CO<sub>2</sub> fiktivního motoru nafta-vodík-zemní plyn; Situace za dokonalým oxidačním katalyzátorem

Jako vhodné vozidlo pro posouzení zvolených konceptů bylo zvoleno vozidlo kategorie MPV. Z hlediska hmotnostních parametrů a jízdních odporů takové vozidlo odpovídá dnes tolik populární kategorii vozidel SUV a z hlediska simulace by vozidlo této třídy

dosahovalo podobných výsledků. Tyto kategorie vozidel jsou výhodné díky jednoduššímu umístění nádrží na vodík do vozidla.

Pasivní odpory, rozměry pneumatik a odstupňování převodovky, byly opět převzaty z interní databáze CVUM a odpovídají vozidlu dané kategorie. Tyto vlastnosti pak byly implementovány do modelu z databáze CVUM postaveného na platformě GT-Suite. Tento model byl dále upravován tak, aby pracoval s vícepalivovým konceptem.



Obr. 5-7 Ideový návrh umístění tlakových lahví na plyné palivo

	Nafta	Nafta-vodík	Nafta-z. plyn
<b>Provozní hmotnost [kg]</b>	2001	2183	2199
<b>Nádrže kapalně MN [dm<sup>3</sup>]</b>	50	12	12
<b>Dostupné plyné palivo při tlaku 700/200 bar [kg]</b>	0	6.25/2.25	49/24
<b>Specifické emise CO<sub>2</sub> NEDC<sub>Cíl2020</sub> korigovaný [g/km]</b>	113.2	119.1	119.7
<b>Cíl pro specifické emise CO<sub>2</sub> NEDC<sub>Cíl2030</sub> nekorigovaný [g/km]</b>	59.4		
<b>Počet převodových stupňů [1]</b>	6		
<b>Max. rychlost na 5° [km/h]</b>	168		

Tabulka 5-1 Technické údaje zvoleného vozidla

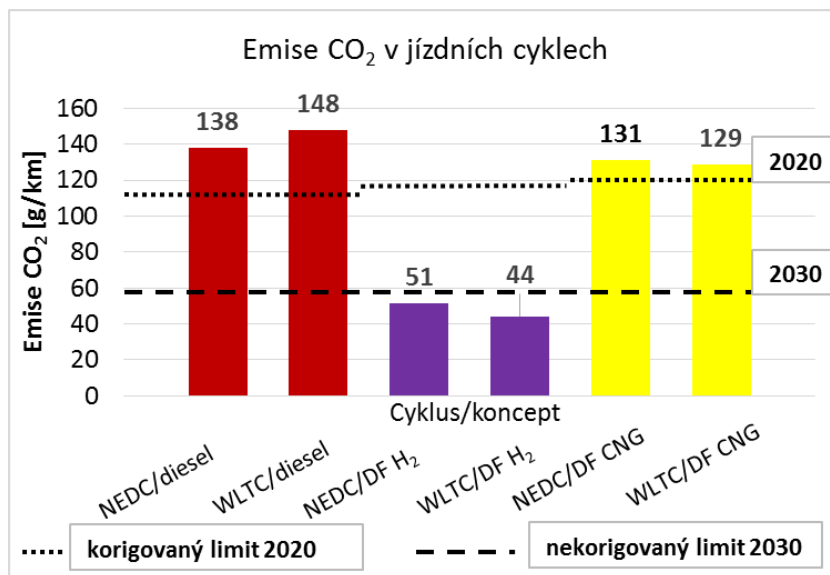
Instalace vodíkové a země-plynové palivové soustavy vede k nárůstu hmotnosti vozidla. Proto je hmotnost palivově flexibilní varianty zvýšena o 5 %, tedy dle údajů prezentovaných v [135]. Objem zvolených nádrží na vodík je 160 dm<sup>3</sup>, což znamená kapacitu 6.3 kg vodíku při tlaku 700 barů. Při výpočtu kapacity nádrží je brán v úvahu kompresibilitní faktor vodíku. Uvažované umístění lahví v podlaze pod posádkou využívá vyšší stavby vozidla. Za zadní nápravou pak zůstává dostatečný prostor pro zmenšenou nádrž na kapalné palivo. Navíc toto umístění příliš nezhorší trakci přední nápravy, což bývá problém při umísťování nádrží kolem zadní nápravy. Ideový návrh umístění lahví prezentuje Obr. 5-7.

Tabulka 5-1 prezentuje další parametry vozidla a korigované limity CO<sub>2</sub> pro dané vozidlo pro rok 2020, pro rok 2030 pak nekorigované, neboť v současnosti nejsou korekce zveřejněné.

Výsledky simulace pro všechny varianty prezentuje Obr. 5-8 a to včetně znázornění legislativně zakotvených limitů. Nejprve se zastavme u výsledků referenčního vznětového konceptu. Specifické emise CO<sub>2</sub> dosahují hodnot 138 g/km v případě méně dynamického cyklu NEDC, dynamičtější cyklus WLTC pak přinese navýšení o cca 7 % na hodnotu 147.8 g/km. Tyto hodnoty odpovídají objemové spotřebě motorové nafty ve výši 5.64 l/100 km a 5.76 l/100 km, což jsou hodnoty odpovídající dané kategorii vozidla.

Výsledky konceptu nafta-vodík reprezentují sloupce NEDC/DF H<sub>2</sub> a WLTC/SF H<sub>2</sub>. Průměrná energetická náhrada motorové nafty vodíkem dosahuje hodnot 59 % pro cyklus NEDC a 69 % pro dynamičtější cyklus WLTC. To je dáno tím, že dvoupalivový motor je v nízkém zatížení nucen pracovat s nižší energetickou náhradou či dokonce v čistě vznětovém režimu a právě tyto režimy jsou typické pro cyklus NEDC. Zavedení cyklu WLTC pro určení výše emisí CO<sub>2</sub> od roku 2021 dále je tedy pro dvoupalivové koncepty výhodné. Dosažená úroveň emisí CO<sub>2</sub>, která pro NEDC činí 51.5 g/km a pro WLTC 44.1 g/km se značnou rezervou splňuje limitní hodnotu nejen pro rok 2020 (119.1 g/km), ale i nekorigovaný limit pro rok 2030 (59.4 g/km). To dává prostor k optimalizaci konceptu z hlediska zvýšení dojezdu větším podílem čistě vznětového provozu motoru. Dojezd, který je v tomto případě omezený kapacitou nádrží

na vodík, dosahuje přijatelných hodnot, konkrétně v cyklu NEDC 531 km a v cyklu WLTC 455 km. Dvoupalivový koncept nafta-vodík se tak jeví jako perspektivní prostředek ke splnění budoucích požadavků na vyšší emisí CO<sub>2</sub>.

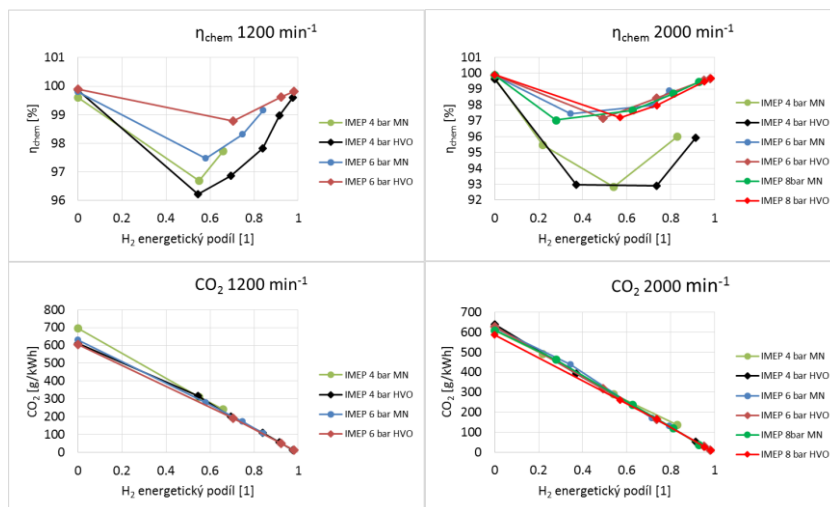


Obr. 5-8 Dráhové emise CO<sub>2</sub> dosažené při simulaci jízdních cyklů

Zemní plyn neumožňuje používat dvoupalivový koncept v tak nízkém zatížení jako vodík, což vede v cyklu NEDC na hodnotu průměrné energetické náhrady kapalného paliva ve výši pouze 46 %. Naopak ve srovnání s vodíkem lepší odolnost zemního plynu vůči klepání a předzápalům umožnila aplikovat vysoké úrovně náhrady ve vyšších zatíženích a otáčkách, díky čemuž energetická náhrada v cyklu WLTC dosahuje hodnoty 71 %. To vede na dráhové emise CO<sub>2</sub> ve výši 128.9 g/km pro cyklus WLTC a 131.1 g/km pro NEDC při dojezdu 771 km a 400 km. Dosažená úspora emisí CO<sub>2</sub> proti vznětové variantě tak dosahuje 13 % pro WLTC a pouze 5 % pro NEDC. Zvláště hodnota 5 % se již blíží úspoře odpovídající technologicky výrazně méně náročnému provozu na kapalnou náhradu motorové nafty HVO. Dvoupalivový koncept nedokáže vyčerpat plný potenciál zemního plynu ke snížení výfukových emisí CO<sub>2</sub>. Z tohoto hlediska se jeví

vhodnější zážehový motor využívající současné technologie ke snížení ztrát škrcením vzduchové cesty a optimalizovaný pro spalování zemního plynu. Dvoupalivový koncept nafta-zemní plyn tak za současné situace může sloužit ke zvýšení palivové flexibility konceptu nafta-vodík, která částečně může, stejně jako čistě vznětový provoz konceptu, pomoci překrýt přechodné období výrazného nedostatku vodíkových čerpacích stanic a v budoucnu využívat to z paliv, které se bude jevit nejpříznivěji jak z hlediska legislativy, tak z hlediska reálného ekologického dopadu.

## 5.5 Náhrada motorové nafty HVO u dvoupalivového vznětového motoru nafta-vodík



Obr. 5-9 Porovnání chemické účinnosti a indikovaných specifických emisí CO<sub>2</sub> konceptu nafta-vodík pro MN a HVO

Na základě výše diskutovaných experimentů s HVO a řešerše k této práci se jeví jako pravděpodobný předpoklad, že použití HVO umožní jednak rozšíření dvoupalivového provozu směrem k nižším zatížením a jednak použití vyššího energetického podílu vodíku. To je dáno především vyšším cetanovým číslem HVO ve srovnání s motorovou naftou a celkově lepšími parametry pro spalování při nižších teplotách a zatíženích. Proto je experiment zaměřen

na otáčky motoru  $1200 \text{ min}^{-1}$  při zatížení daném  $p_i = 4$  a  $6 \text{ bar}$  a  $2000 \text{ min}^{-1}$  při zatížení daném  $p_i = 4, 6$  a  $8 \text{ bar}$ .

Metodika testu je analogická k mapování konceptu nafta-vodík s tím. Výsledky jsou tedy prezentovány v závislosti na energetickém podílu vodíku pro každé dané zatížení a otáčky motoru a to pro motorovou naftu i HVO.

- HVO umožňuje dosáhnout vyšších energetických podílů vodíku než motorová nafta.

- Vyšší dosažitelné energetické podíly vodíku při provozu na HVO vedou na vyšší chemickou účinnost v dvoupalivovém režimu (Obr. 5-9 nahoře) a tím i na nižší produkci nespáleného vodíku.

- HVO vede na nižší indikovanou spotřebu energie a to především v nejnižších zatíženích a otáčkách.

- HVO umožňuje další snížení emisí  $\text{CO}_2$  (Obr. 5-9 dole) jednak díky vyššímu dosažitelnému energetickému podílu vodíku a jednak mírně také nižším obsahem uhlíku v náhradní molekule v porovnání s motorovou naftou.

- Provoz na HVO vykazuje porovnatelnou nebo nižší úroveň emisí  $\text{CO}$  a uhlovodíků. Snížení je nejvýraznější opět v nízkém zatížení

- HVO vede na podobné nebo nižší úrovně emisí  $\text{NO}_x$  v porovnání s motorovou naftou.

- HVO snižuje množství emitovaných částic PN.

Nahrazení motorové nafty palivem HVO dále rozšiřuje možnosti dvoupalivového konceptu vznětového motoru. Umožňuje rozšíření dvoupalivového konceptu do nižších zatížení a tím další snížení koncentrace  $\text{CO}_2$  ve výfukových plynech. Navíc se jedná o obnovitelné biopalivo. Koncentrace škodlivých emisí je při provozu na HVO obdobná nebo nižší než při provozu na motorovou naftu.

## 6 Závěr

Hlavním cílem práce bylo stanovit potenciálu vznětového dvoupalivového motoru ke snížení koncentrace  $\text{CO}_2$  ve výfukových plynech s ohledem na požadavky současné a budoucí evropské legislativy a při tom neztrácet ze zřetele reálný celkový dopad na globální oteplování, tedy „Well to Wheel“ emise  $\text{CO}_2$ . Jako nástroj pro splnění cílů byly zvoleny experimenty na výzkumném dvoupalivovém vznětovém jednoválcovém motoru, na jejichž základu byly identifikovány vhodné koncepty. Reálný potenciál vybraných konceptů z hlediska snížení emise  $\text{CO}_2$  byl dále vyšetřován pomocí simulace jízdního homologačního cyklu v prostředí GT-Suite.

Hlavním přínosem práce je představení nejen konceptu, ale i funkčního vzorku dvoupalivového vznětového motoru pracující s motorovou naftou a vodíkem. Tento koncept umožňuje využívat primárně energii pocházející z vodíku a kapalné palivo používat jen k zapálení chudé směsi vodíku a vzduchu, jejíž spalování vede k nulovým výfukovým emisím  $\text{CO}_2$ . Intenzivní přeplňování pak umožnilo použití dostatečně chudé směsi a tím dosažení přiměřeného výkonu bez výskytu klepání. Tím se prezentovanému konceptu podařilo kompenzovat jeden z velkých nedostatků použití vodíku v motorech s vnitřním spalováním. Důležité také je, že koncept pohonu nafta-vodík nepředstavuje nový problém z hlediska systémů dodatečné úpravy palin a lze na něj aplikovat současnou technologii. Dokonce vykazuje významné snížení počtu emitovaných částic a koncentrací oxidu uhelnatého v surových spalinách a zlepšuje činnost katalytických systému sloužících k redukci  $\text{NO}_x$ .

Režim spalování chudé homogenní směsi vodíku má však svá omezení v nízkém zatížení, kde motor musí pracovat jako čistě vznětový. Přesto však koncept dvoupalivového motoru nafta-vodík vykazuje potenciál ke splnění požadavků Evropské komise z hlediska emisí  $\text{CO}_2$  platných od roku 2030 dále (59.4 g  $\text{CO}_2/\text{km}$ ). Při simulaci jízdy vozidla v cyklu WLTC totiž bylo dosaženo hodnoty 44.1 g  $\text{CO}_2/\text{km}$ . K tomu, aby byla snižená i reálná, tzv. „Well to Wheel“ uhlíková stopa, je nutno vodík produkovat pomocí vhodných technologií. Do karet vodíku v tomto ohledu hraje jeho favorizovaná

pozice mezi kandidáty na vhodné médium pro ukládání přebytků energie z nestabilních obnovitelných zdrojů. Výhodou tohoto konceptu proti palivovým článkům jsou výrazně nižší požadavky na čistotu vodíku.

Koncept dvoupalivového vznětového motoru nafta-vodík navíc pomáhá vystoupit z kruhu, kdy nedostatek plnicích stanic na vodík implikuje nezájem kupujících o vodíková vozidla, jejichž malé množství zase nemotivuje k výstavbě plnicích stanic. Koncept totiž stále umožňuje i čistě vznětový režim či náhradu vodíku zemním plynem, či lépe biometanem, což může posloužit pro nouzový dojezd k vodíkové plničce. Tím tento koncept může pomoci rozvinout vodíkovou infrastrukturu a tím pomoci i k rozšíření konkurenčního konceptu vodíkových palivových článků a přispět tak k žádoucí diverzifikaci konceptů pohonu vozidel. Možnost dalšího snížení množství  $\text{CO}_2$  ve výfukových plynech i celkové bilance této látky přináší náhrada motorové nafty obnovitelným palivem HVO, jak bylo prokázáno experimenty v dvoupalivovém i čistě vznětovém provozu.

## 6.1 Náměty na další práci

Provedené zkoušky a simulace sloužily k určení základního odhadu potenciálu a nejedná se tak o zcela optimalizované varianty. K dalšímu rozvoji konceptu a zlepšení jeho parametrů by například přispěla optimalizace spalovacího prostoru, použití současných technologií variabilních rozvodových mechanismů, či aplikace recirkulace spalin ve vhodných režimech. Dále je žádoucí úprava vstřikovacího systému a sacího potrubí tak, aby vodík nebyl vefukován jen do jednoho sacího kanálu ze tří, což by omezilo riziko vzplanutí směsi v sání motoru a umožnilo navýšení výkonu a udržení vyšší úrovně energetické náhrady vodíkem i při zatížení ve vyšších otáčkách. Tématem důležitým pro případnou reálnou aplikaci je výzkum možností aplikace daného konceptu po startu a při ohřevu motoru. Z hlediska přeplňování je vhodné vyšetřit realističnost požadavků a zjistit, kde případně lze z nároků na přeplňovací soustavu slevit. Představený koncept tak nepředstavuje hotové řešení, ale ukazuje nový směr, jakým je možné se v budoucnu ubírat.



## Seznam použité literatury v tezích

- [5] Hrdlička, Martin. Snižování emisí osobního automobilu a legislativa. In *XLVIII. International Scientific Conference of Czech and Slovak Universities' Departments and Institutions Dealing With the Research of Combustion Engines*. Klášter Hradiště Nad Jizerou, Czech Republic, 2017, s. 92-102.
- [6] NAŘÍZENÍ EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY (ES) 715/2007 ze dne 17. dubna 2019, konsolidované znění [online]. [cit. 2020-09-09]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=CELEX:02007R0715-20121231>.
- [7] Nařízení komise (EU) 2017/1151 ze dne 1. června 2017, konsolidované znění [online]. [cit. 2020-01-09]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32017R1151&from=CS>.
- [8] Nařízení evropského parlamentu a rady (EU) 2019/631 ze dne 20. června 2019, konsolidované znění. [online]. [cit. 2020-09-09]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/ALL/?uri=CELEX:32019R0631>.
- [9] KROMER, Matthew, A. - HEYWOOD, John, B. *Electric Powertrains: Opportunities and Challenges in the U.S. Light-Duty Vehicle Fleet*. Publication No. LFEE 2007-03 RP. Cambridge: May 2007, s. 114-119, 133-136.
- [10] NGVA Europe. *Going beyond Well-to-Wheel: Life Cycle Emissions*. [cit. 2020-09-22]. Dostupné z: <https://www.ngva.eu/medias/going-beyond-well-to-wheel-life-cycle-emissions/>.
- [11] Skácel, J. - Pechout, M. - Vojtíšek, M. Diesel Engine Emissions in Real World Driving: laboratory Limits Achieved on the Road. In *XLVIII. International Scientific Conference of Czech and Slovak Universities' Departments and Institutions Dealing With the Research of Combustion Engines*. Klášter Hradiště Nad Jizerou, Czech Republic: 2017, s. 222-231.
- [12] Tomita, E. - Kawahara, N. - Piao, Z. - Fujita, S. - et al. *Hydrogen Combustion and Exhaust Emissions Ignited with Diesel Oil in a Dual Fuel Engine*. SAE Technical Paper 2001-01-3503. SAE, 2001. <https://doi.org/10.4271/2001-01-3503>.

- [13] *Emission standards: Europe: Cars GHG. Dieselnet* [online]. ECOpoint, 2019 [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://dieselnet.com/standards/eu/ghg.php>.
- [19] Eward, R. - Larivé, J-F. - Beziat, J-C. *Well-to-wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context*. WELL-to-WHEELS Report Version 3c, July 2011. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2011, s.11-31, 33-44, 47-61, 66-70. ISBN 978-9279-21395-3.
- [20] European Commission Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport. *Well-To-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in The European Context, Well-To-Wheels Report*. Version 4.a JEC WELL-TO-WHEELS ANALYSIS. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2014, s. 13-52, 55-57, 62-64, 73-93. ISBN 978-92-79-33887-8. ISSN 1831-9424 (online). doi:10.2790/95533.
- [38] Xiao, F. and Karim, G.A. *An Investigation of the Combustion in an IDI Diesel Engine with Low Concentrations of Added Hydrogen*. SAE Technical Paper 2011-01-0676. SAE, 2011. doi:10.4271/2011-01-0676.
- [39] Xiao, F. - Sohrabi, A. - Galal, M., and Karim, G.A. *The Performance of an IDI Diesel Engine Having Low Concentrations of Hydrogen in the Intake Air*. SAE Technical Paper 2009-01-1830, SAE, 2018. doi:10.4271/2009-01-1830.
- [40] Talibi, M. - Hellier, P. - Balachandran, R. and Ladommatos, N. Effect of Hydrogen-Diesel Fuel Co-Combustion on Exhaust Emissions with Verification Using an In-Cylinder Gas Sampling Technique. *Int. J. Hydrogen Energy* 39(27), 15088-15102, 2014.
- [41] Sandalci, T. and Karagöz, Y., "Experimental Investigation of the Combustion Characteristics, Emissions and Performance of Hydrogen Port Fuel Injection in a Diesel Engine," *Int. J. Hydrogen Energy* 39(32), 18480-18489, 2014.
- [42] Tsujimura, T. and Suzuki, Y. *ScienceDirect The Utilization of Hydrogen in Hydrogen/Diesel Dual Fuel Engine*. *Int. J. Hydrogen Energy* 42(19), 14019-14029, 2017.
- [43] Saravanan, N. - Nagarajan, G. - Dhanasekaran, C. and Kalaiselvan, K.M. *An Experimental Investigation of Hydrogen Fuel Injection in DI Dual Fuel Diesel Engine*. SAE Technical Paper 2008-01-1784, SAE, 2008. doi:10.4271/2008-01-1784.

- [44] Santoso, W.B. - Bakar, R.A. and Nur, A. Combustion Characteristics of Diesel-Hydrogen Dual Fuel Engine at Low Load. *Energy Procedia* 32,3-10, 2013.
- [45] Deb, M. - Sastry, G.R.K. - Bose, P.K. and Banerjee, R. An Experimental Study on Combustion, Performance and Emission Analysis of a Single Cylinder, 4-Stroke DI-Diesel Engine Using Hydrogen in Dual Fuel Mode of Operation. *Int. J. Hydrogen Energy* 40(27), 8586-8598, 2015.
- [81] *Arena Red Engine Management System* [online]. [cit. 2017-10-09]. Dostupné z: <https://www.arenared.nl/home>.
- [83] Königsson F. *Advancing the limits of dual fuel combustion*. Dissertation licitatie. Stockholm: Department of Machine Design Royal Institute of Technology, 2012.
- [84] Königsson F. - Stalhammar P. - Angstrom H.-E. *Controlling the injector tip temperature in a diesel dual fuel engine*. SAE Technical Paper Series (2012-01-0826). SAE, 2012. doi:<http://dx.doi.org/10.4271/2012-01-0826>.
- [93] Papagiannakis, R.G. – Rakopoulos, C.D. – Hountalas, D.T. - Rakopoulos D.C. Emission characteristics of high speed, dual fuel, compression ignition engine operating in a wide range of natural gas/diesel fuel proportions. *Fuel* 2010, 89:1397–406. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2009.11.001>.
- [94] Wei, L. – Geng, P. A review on natural gas/diesel dual fuel combustion, emissions and performance. *Fuel Process Technol* 2016, 142:264–78. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.09.018>.
- [95] Midkiff, K.C. – Wong, W.Y. – Bell, S.R. *Performance and emissions of a natural gas dual-fueled, indirect injected diesel engine*. SAE International Technical Papers. doi:<http://dx.doi.org/10.4271/911766>.
- [115] United Nations,. *Addendum 48: Regulation No. 49, Revision 6: Uniform provisions concerning the measures to be taken against the emission of gaseous and particulate pollutants from compression ignition engines and positive ignition engines for use in vehicles* [online]. [cit.2016-04-16]. Dostupné z: <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2013/R049r6e.pdf>.
- [116] *Akty přijaté institucemi zřízenými mezinárodní dohodou: Předpis č. 49 Evropské hospodářské komise Organizace spojených národů (EHK/OSN) – Jednotná ustanovení o opatřeních proti emisím plyných znečišťujících látek a znečišťujících částic ze vznětových a zážehových*

- motorů vozidel* online]. [cit.2016-04-16]. Dostupné z: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:42013X0624\(01\)&from=CS](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:42013X0624(01)&from=CS).
- [135] Chen, S. K. - Flynn, P. F. *Development of a Single Cylinder Compression Ignition Research Engine*. SAE Technical Paper Nr.650733. SAE, 1965.

## Publikace související s tématem disertace

- [118] Bortel, I. - Vávra, J. - Takáts, M. Effect of HVO Fuel Mixtures on Emissions and Performance of a Passenger Car Size Diesel Engine. In *Renewable Energy*. 2019, 2019(140), 680-691. ISSN 0960-1481.
- [119] Bortel, I. - Vávra, J. - Takáts, M. Emissions and Performance of a Passenger Car Size Diesel Engine Fuelled With HVO -Diesel Fuel Mixtures. In *KOKA 2017 - XLVIII. mezinárodní vědecká konference českých a slovenských univerzít a institucí zabývajících se výzkumem motorových vozidel a spalovacích motorů*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2017. p. 180-190. ISBN 978-80-7494-354-6.
- [120] Bortel, I. - Vávra, J. - Takáts, M. The Extension of Opportunities of Dual Fuel Diesel-Hydrogen Engine by Usage of Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) Instead of Regular Diesel Fuel. In *Proceedings of the L. International Scientific Conference of Czech and Slovak Universities and Institutions Dealing with Motor Vehicles and Internal Combustion Engines Research - KOKA 2019*. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2019. p. 163-175. ISBN 978-80-7509-668-5.
- [124] Vávra, J. - Bortel, I. - Takáts, M. Dual Fuel Combustion of Natural Gas and Diesel on a Single Cylinder Research Engine. In *KOKA 2016 - XLVII. International Scientific Conference of the Czech and Slovak Universities and Institutions Dealing with Research of Internal Combustion Engines*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2016. pp. 211-221. ISBN 978-80-214-5379-1.
- [125] Vávra, J. - Bortel, I. - Takáts, M. - Diviš, M. Emissions and Performance of diesel – Natural Gas Dual-Fuel Engine Operated with Stoichiometric Mixture. In *Fuel 2017, 2017, Volume 208, 722-733*. ISSN 0016-2361.
- [127] Bortel, I. - Takáts, M. - Beránek, V. - Jevič, P. - Pražan, R. Emission and Performance Effects of Dual Fuel Operation on Turbocharged Compression Ignition Tractor Engine. In *Scientific Proceeding KOKA 2018. Nitra: SPU Nitra, 2018*. p. 135-148. ISBN 978-80-552-1880-9.

- [129] Vávra, J. - Bortel, I. - Takáts, M. A Dual Fuel Hydrogen - Diesel Compression Ignition Engine and its Potential Application in Road Transport. In *WCX SAE World Congress Experience*. Warrendale, PA: SAE International, 2019. p. 1-14. ISSN 0148-7191.
- [130] Vávra, J. - Bortel, I. - Takáts, M. Hydrogen Use in a Compression Ignition Engine - Potencial for Road Transport Decarbonization. In *HydrogenDays 2019*. Husinec-Řež: Česká vodíková technologická platforma, 2019. ISBN 978-80-907264-3-7.

## Ostatní související výsledky

- [117] Bortel, I. - Valášek, J. - Beránek, V. - Strapko, M. - Klír, V. *Zjišťování důsledků konverze vznětového přeplňovaného motoru Zetor 1301 na dvoupalivový provoz na kapalné palivo a bio-metan při současném posouzení vlivu směsí obnovitelných paliv založených na HVO a to z hlediska emisních a energetických parametrů při čistě vznětovém i dvoupalivovém provozu*. [Research Report]. J. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2018. Report no. Z18-03.
- [121] Bortel, I. - Vávra, J. - Takáts, M. Emissions and Performance of a Passenger Car Size Diesel Engine Fuelled with HVO Diesel Fuel Mixtures. In *3rd General Meeting and Workshop on SECs in Industry of SMARTCATs Action*. Istituto di Ricerche sulla Combustione – CNR. Prague, 2017.
- [122] Bortel, I. - Vávra, J. *Zjišťování vlivu složení paliva na energetické a emisní parametry automobilového vznětového přeplňovaného motoru*. [Research Report]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2015. Report no. Z15-45.
- [126] Bortel, I. - Vávra, J. - Diviš, M. *Zjišťování vlivu složení kapalného paliva na energetické a emisní parametry automobilového dvoupalivového vznětového přeplňovaného motoru spalujícího zemní plyn zapalovaný vznětem kapalného paliva*. [Research Report]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2017.
- [128] Bortel, I. - Vávra, J. - Takáts, M. *Vznětový motor - od nafty k vodíku*. [Unpublished Lecture]. CAS-SAE. 2018-10-31.
- [131] Bortel, I. - Vávra, J. - Takáts, M. *Hydrogen Use in a Compression Ignition Engine - HydrogenDays 2018*. [Unpublished Lecture]. HydrogenDays 2018. 2018-06-14.
- [137] Bortel, I. - Vávra, J. - Strapko, M. - Emrich, M. *Funkční vzorek řídicího a palivového systému vícepalivového motoru*. [Functional Sample]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2017.

