

# Potenciál vznětového dvoupalivového motoru z hlediska snižování emisí skleníkových plynů

## Ing. Ivan Bortel

Studijní obor: Dopravní stroje a zařízení

Školitel: Prof. Ing. Michal Takáts, CSc.

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

### Úvod

Předmětem práce je analýza přístupů, které mohou snížit produkci oxidu uhličitého emitovaného při provozu vznětového motoru osobního vozidla. Na problém je sice pohlíženo primárně z pohledu splnění požadavků legislativy, která zohledňuje pouze CO<sub>2</sub> detekované ve výfukových plynech, přesto však práce zvažuje také reálnou uhlíkovou stopu, tzv. „Well to Wheel“ emise CO<sub>2</sub>. Jako hlavní prostředek ke splnění těchto požadavků byla zvolena náhrada motorové nafty palivy s nižším obsahem uhlíku a s potenciálem k výrobě obnovitelnými technologiemi, konkrétně hydrogenovaným rostlinným olejem (HVO), zemním plynem (v obnovitelné variantě biometan) a vodíkem. Reálně dosažitelná snížení emisí CO<sub>2</sub> jsou popsána experimentálně pomocí emisního testu analogického k WHSC v případě HVO a simulací homologačních jízdních cyklů WLTC a NEDC v případě dvoupalivových konceptů vznětového motoru spalujících zemní plyn a vodík.

### Cíle disertační práce

Hlavním cílem je posoudit potenciál vznětového dvoupalivového motoru ve vztahu ke snížení koncentrace CO<sub>2</sub> ve výfukových plynech s ohledem na požadavky budoucí evropské legislativy s respektem k tzv. „Well to Wheel“ emisím CO<sub>2</sub>. Současně je třeba posuzovat i úroveň jinak škodlivých složek výfukových plynů sledovaných legislativou. Vhodným řešením se jeví použití alternativních paliv s nižším obsahem uhlíku, která vedou na snížení koncentrace CO<sub>2</sub> ve výfukových plynech, přičemž je žádoucí, aby tyto paliva bylo zároveň možné produkovat s velkou mírou obnovitelnosti a tím se splnil i požadavek na reálný pokles produkce CO<sub>2</sub> z osobní dopravy.

### Dílčí cíle

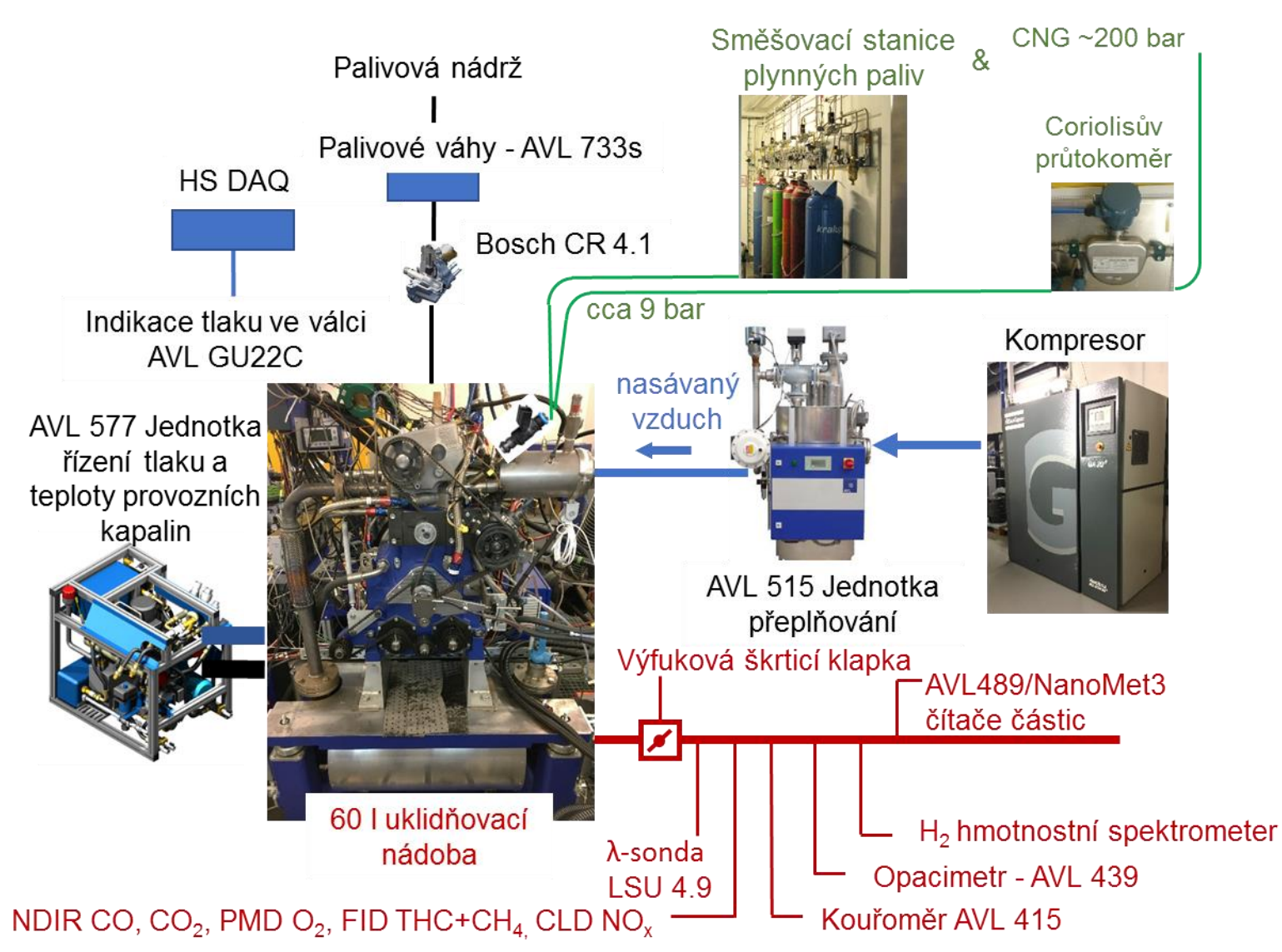
- Zhodnocení potenciálu náhrady motorové nafty hydrogenovaným rostlinným olejem (HVO) ve vznětovém motoru
- Zhodnocení možností dvoupalivového vznětového motoru nafta-zemní plyn (DF CNG)
- Zhodnocení možností dvoupalivového vznětového motoru nafta-vodík (DF H<sub>2</sub>)
- Zhodnocení potenciálu náhrady 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.

### Výzkumný motor

#### AVL Typ 5402.088

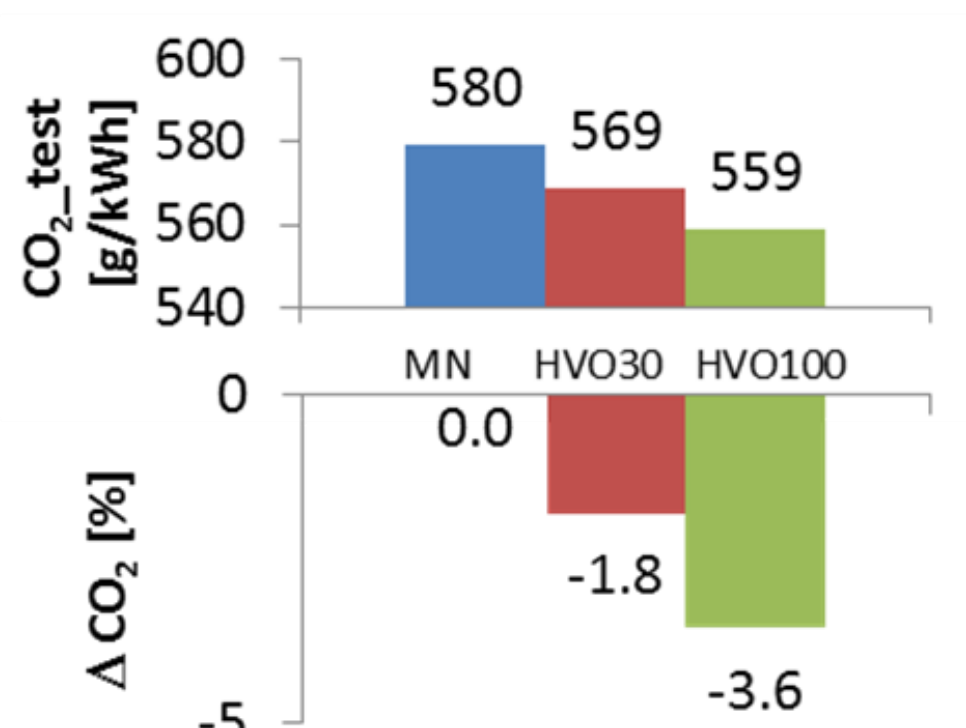
- úprava na dvoupalivový provoz
- elektronicky řízené vstřikování obou paliv
- pasivní chlazení vstřikovače

Vrtání x zdvih	85 x 90 mm
kompresní poměr	14:1–16:1
Zdvihový objem	0.511 dm <sup>3</sup>
Počet válců/ventilů	1/4
Vstřík kapalného/plynného paliva	BOSCH Common Rail CP4.1/VW PFI CNG
Maximální otáčky	4500 min <sup>-1</sup>



Tab. 1 Základní parametry výzkumného motoru Obr. 1 Schéma stanoviště s výzkumným jednoválcem

## Hydrogenovaný rostlinný olej



- Emisní test analogický k WHSC
- Snižuje emise většiny škodlivých látek už od malých přídavků HVO do motorové nafty
- Úspora „Well to Wheel“ emisí CO<sub>2</sub> 40–54 % ve srovnání s fosilní motorovou naftou
- Redukce výfukových emisí CO<sub>2</sub> ve výši 3.6 % je z hlediska legislativy bohužel nedostatečná

Obr. 2 Emise CO<sub>2</sub> v testu WHSC pro motorovou naftu, směs 30 % HVO a naftu a 100 % HVO, ε = 16:1

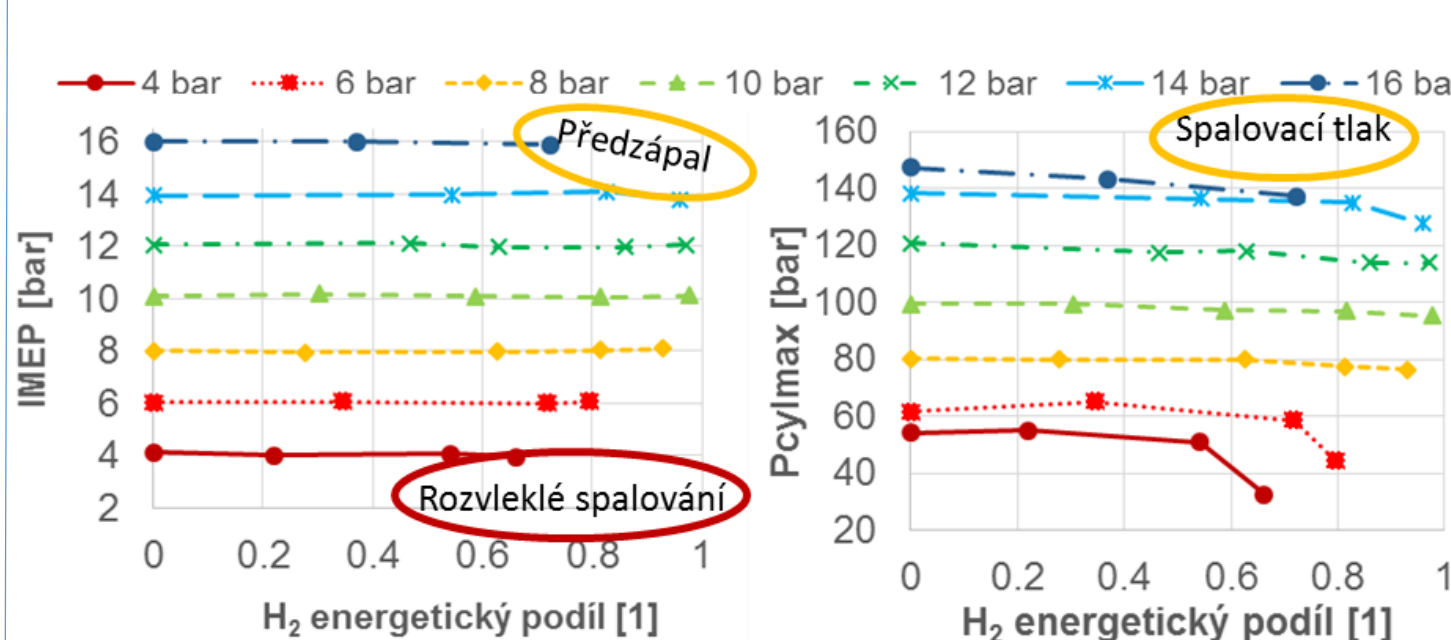
## Nafta-zemní plyn

## Nafta-vodík

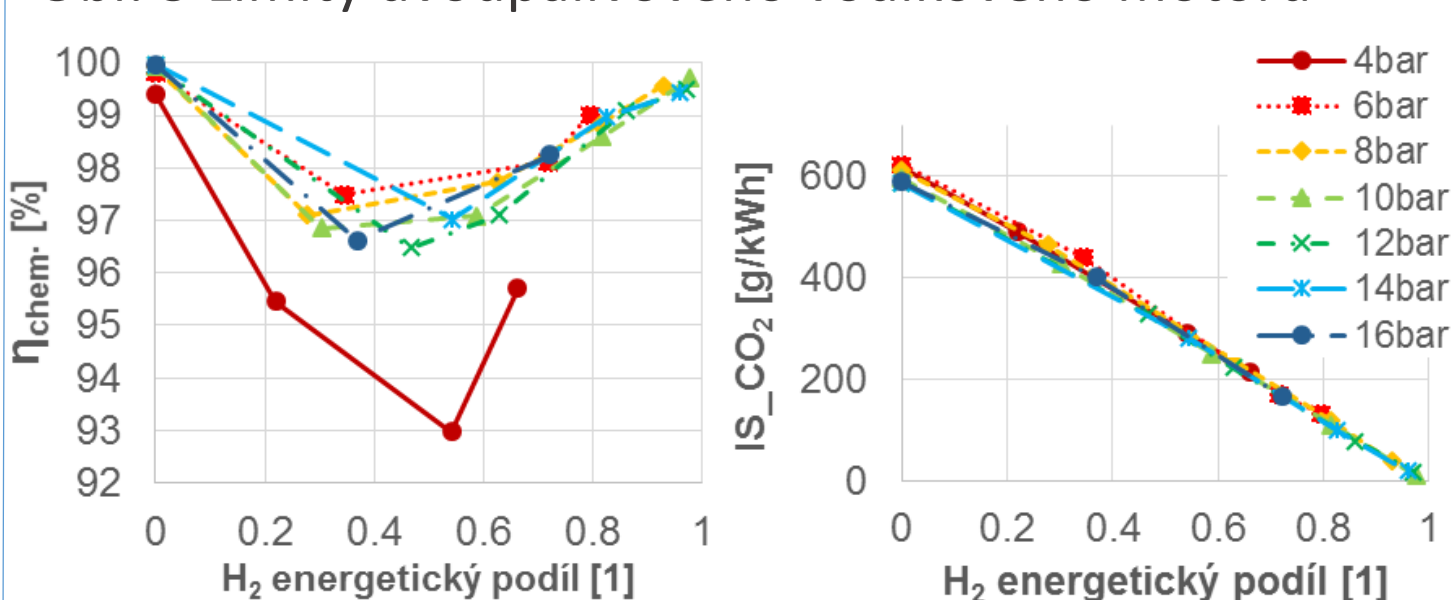
Kompresní poměr (ε = 14:1) a maximální střední indikovaný tlak dány limity při spalování vodíku. Konfigurace motoru shodná pro obě varianty.

- Stechiometrický koncept vede na nižší účinnost, čímž je potlačena redukce CO<sub>2</sub> vůči vznětové variantě
- výhodnější chudá koncepce se součinitelem přebytku vzduchu λ ≈ 1.7 coby kompromisem mezi chemickou účinností a emisemi NO<sub>x</sub>
- zemní plyn vede na nižší η<sub>chemická</sub> než vodík
- kvůli možnosti spalování vodíku není plně využít potenciál zemního plynu

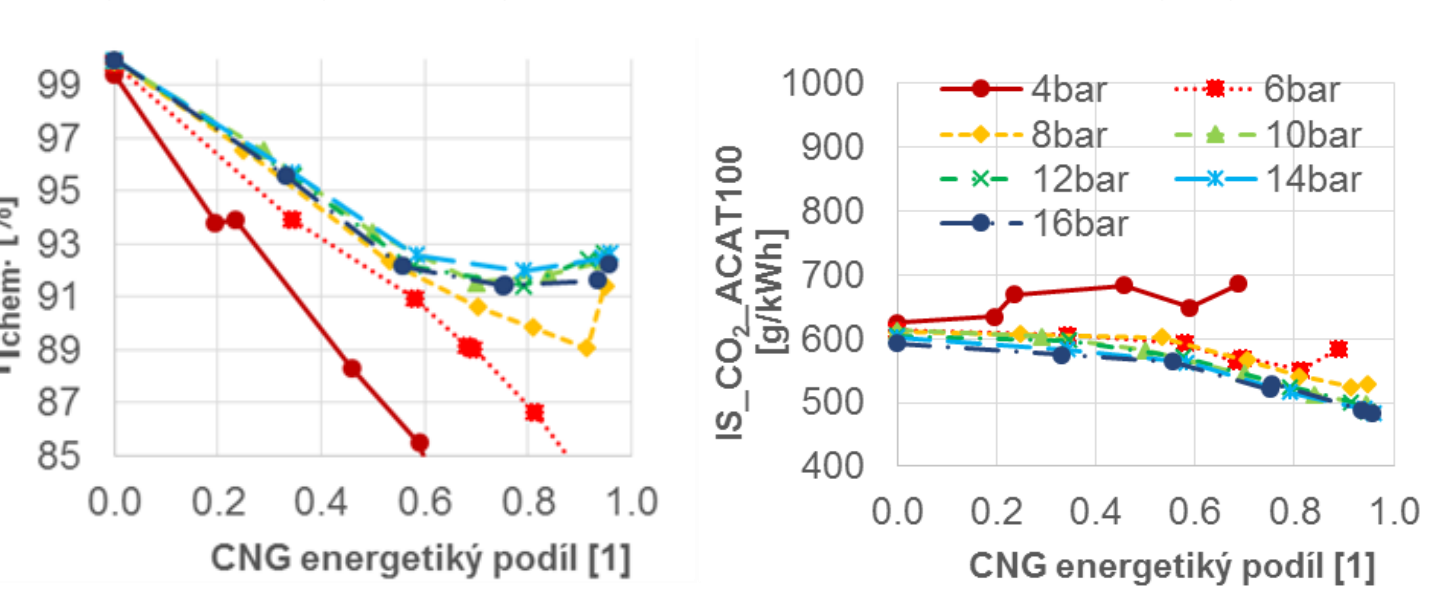
- dostatečně chudá směs (λ ≈ 2.2) dovolí dosáhnout přiměřeného IMEP
- Vodík umožňuje dvoupalivový provoz v nižších zatíženích



Obr. 3 Limity dvoupalivového vodíkového motoru



Obr. 5 ηchem a emise CO<sub>2</sub> vodíkového konceptu



Obr. 4 ηchem a emise CO<sub>2</sub> země-plynového konceptu

- Nejvýhodnější jsou nejvyšší energetické podíly plynných paliv
- V nízkém zatížení nutno zachovat čistě vznětový režim

## Simulace jízdních cyklů

- Výsledky experimentů extrapolovány na čtyřválcový motor

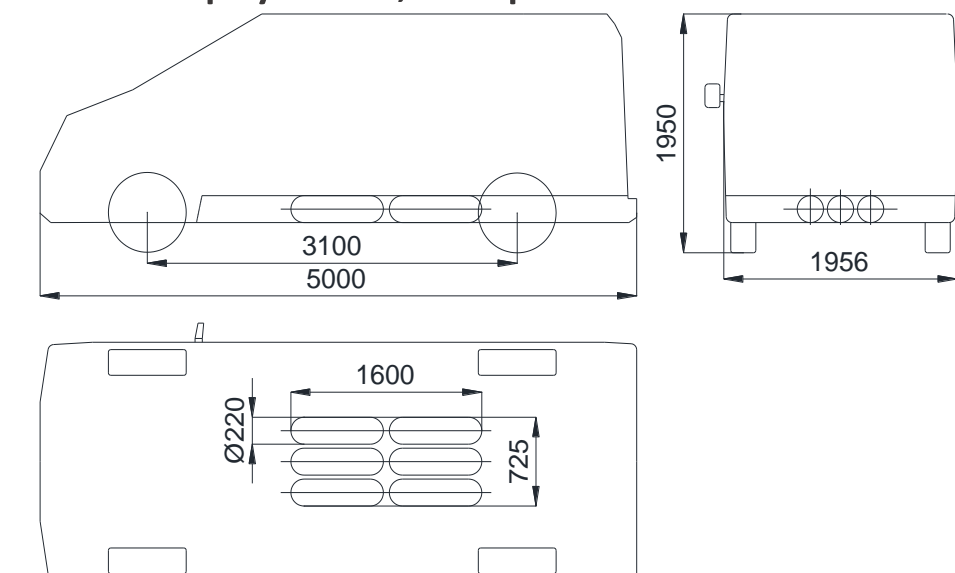
	Nafta	Nafta-vodík	Nafta-z. plyn
Provozní hmotnost [kg]	2001	2183	2199
Nádrže kapalné MN [dm <sup>3</sup> ]	50	12	12
Plynné palivo (nádrže 160 l) při tlaku 700/200 bar [kg]	0	6.25/2.25	-/24
Maximální točivý moment	233–247 Nm při 1200–3200 min <sup>-1</sup>		
Maximální výkon	82–84 kW při 4000 min <sup>-1</sup>		
Počet válců/zdvihový objem	4/2.044 dm <sup>3</sup>		

Tab. 2 Základní údaje o vozidlu vybraném pro simulaci a jeho pohonech

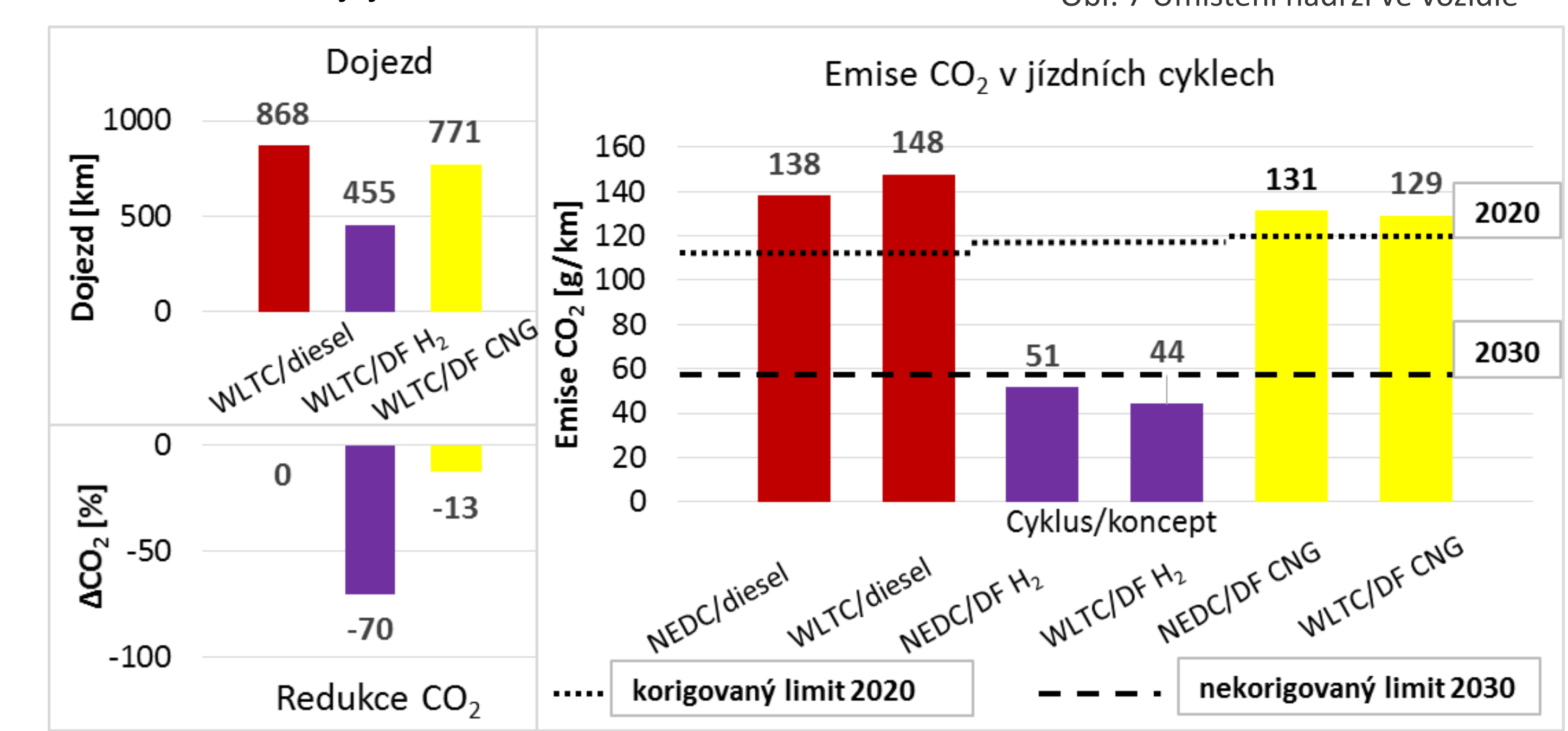
- vyšší zatížení v cyklu WLTP vede na častější využití dvoupalivového režimu a tím na nižší emise CO<sub>2</sub>
- Redukce CO<sub>2</sub> na zemní plyn je nedostatečná
- Dvoupalivový vodíkový koncept umožňuje splnit limity pro emise CO<sub>2</sub> i po roce 2030
- Alternativní provoz na zemní plyn i naftu umožní provoz při současně se rozvíjející vodíkové infrastruktuře

IMEP [bar]	800	1200	2000	3200	4000	4500
16	90%	96%	93%	90%	90%	90%
14	95%	96%	92%	90%	90%	90%
12	89%	95%	89%	84%	82%	82%
10	87%	90%	84%	87%	84%	82%
8	85%	88%	85%	72%	65%	61%
6	82%	74%	58%	51%	29%	0%
4	81%	54%	0%	0%	0%	0%
2	0%	0%	0%	0%	0%	0%
1	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Obr. 6 Náhrada nafty zemním plynem, resp. vodíkem



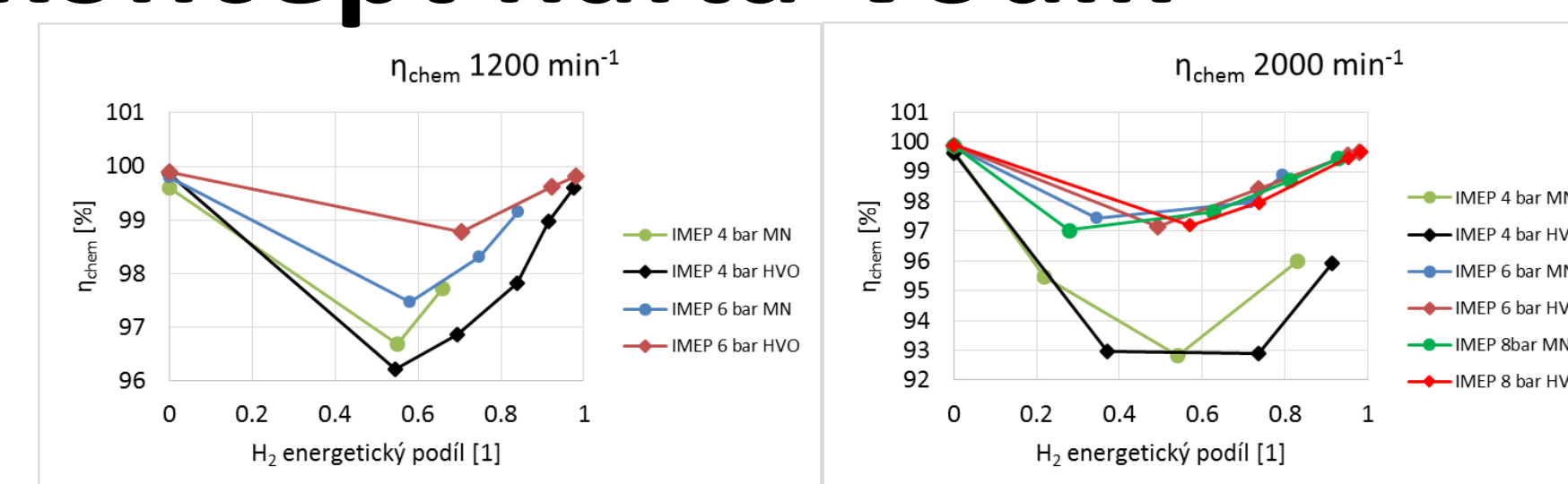
Obr. 7 Umístění nádrží ve vozidle



Obr. 8 Hlavní výsledky získané v jízdní simulaci vozidla

## Přínos HVO pro koncept nafta-vodík

- zvýšení podílu vodíku v nízkém zatížení
- rozšíření dvoupalivového provozu do nižších zatížení
- další snížení emisí CO<sub>2</sub>



Obr. 8 Vliv HVO na dvoupalivový vodíkový koncept

### Závěr

Cílem práce bylo stanovit potenciál vznětového dvoupalivového motoru ke snížení emisí CO<sub>2</sub> ve výfukových plynech s ohledem na budoucí evropskou legislativu a s respektem k reálnému dopadu na globální oteplování. To mělo být dosaženo pomocí paliv s nižším obsahem uhlíku, konkrétně hydrogenovaný rostlinný olej (HVO), zemní plyn a vodík. Analýza byla provedena na základě dat z experimentů na jednoválcovém motoru a simulací v GT-Suite.

V případě HVO byla pro určení potenciálu dostatečná data z experimentálního průzkumu v režimech běhu motoru podobných jako při WHSC testu. Snížení emisí CO<sub>2</sub> ve výfukových plynech vůči motorové naftě bylo ale nedostatečné. Přejde-li legislativa k relevantnějšímu hodnocení dle „Well to Wheel“, půjde o perspektivní palivo.

Dále proběhlo experimentální mapování dvoupalivového konceptu vznětového motoru zapalující pilotní dávkou kapalného paliva homogenní směs vzduchu a zemního plynu, resp. vodíku. Dosažení přiměřeného středního indikovaného tlaku bez výskytu klepání a výšek do sání bylo při spalování vodíku dosaženo snížením kompresního poměru na 14:1 a udržováním dostatečně chudé směsi pomocí přepřívání.

Na základě experimentálních dat byly sestaveny potřebné charakteristiky plnorozměrového čtyřválcového motoru, které se pak použili pro simulaci jízdy vozidla vybaveného tímto pohonem v cyklu NEDC a WLTC. Koncept nafta-zemní plyn výrazně překračoval budoucí požadavky na dráhové emise CO<sub>2</sub>. Další uvažovaný koncept spalování - nafta-vodík ukázal předpoklady splnit budoucí požadavky legislativy z hlediska emisí CO<sub>2</sub> osobních vozidel. Dráhové emise CO<sub>2</sub> dosahly hodnot pro 51 g/km v NEDC a 44 g/km ve WLTC, přičemž limit platný po roce 2030 činí 59.4 g/km. Tento koncept pohonu tedy umožňuje předpokládat nasazení spalovacího motoru v osobní dopravě i po roce 2030. Z pohledu snížení celkové uhlíkové stopy je třeba dbát na vhodnou technologii výroby vodíku. 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. Umožňuje totiž nouzový dojezd v čistě vznětovém režimu či náhradu vodíku zemním plynem nebo biometanem.

Další zlepšení parametrů tohoto konceptu bylo identifikováno experimenty s náhradou motorové nafty palivem HVO. Ten přináší benefity jak v dvoupalivovém, tak čistě vznětovém provozu agregátu a navíc dále snižuje uhlíkovou stopu konceptu díky výrobě pomocí obnovitelných technologií. Další zlepšení sledovaných parametrů by také přinesla celková optimalizace motoru zahrnující návrh spalovacího prostoru pro uvažovaný koncept spalování.

### Reference

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.