



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

PŘÍMÉ SPALOVÁNÍ VODÍKU

DIRECT COMBUSTION OF THE HYDROGEN IN THE COMBUSTION ENGINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lukáš Veger

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michael Böhm

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	Lukáš Veger
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Stavba strojů a zařízení
Vedoucí práce:	Ing. Michael Böhm
Akademický rok:	2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Přímé spalování vodíku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

S příchodem bezemisní dopravy se hledají různé alternativy pro zachování spalovacích motorů, například pomocí přímého spalování vodíku.

Rešeršní část práce se zaměřuje na současná řešení a možnosti v oblasti spalování vodíku ve spalovacích motorech. Dále budou diskutovány vlivy na výkonové parametry motoru, jeho ekonomičnost, ekologii a celkový vliv využití tohoto paliva „well to wheel“ ve srovnání s klasickým zážehovým motorem.

Praktická část zahrnuje základní simulace (například v prostředí GT–Suite) právě pro porovnání vodíku s klasickým benzínem.

Cíle bakalářské práce:

Studie současných řešení na trhu i případně ještě neuvedených prototypů.

Porovnání vodíku s běžnými palivy.

Popis celého procesu well to wheel výroby vodíku a jeho současná omezení.

Praktický příklad srovnání vodíkového motoru s motorem spalující benzín.

Kritické zhodnocení.

Seznam doporučené literatury:

Liu, X., Reddi, K., Elgowainy, A., Lohse-Busch, H., Wang, M., & Rustagi, N. (2020). Comparison of well-to-wheels energy use and emissions of a hydrogen fuel cell electric vehicle relative to a conventional gasoline-powered internal combustion engine vehicle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(1), 972-983. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.10.192>

Acar, C., & Dincer, I. (2020). The potential role of hydrogen as a sustainable transportation fuel to combat global warming. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(5), 3396-3406.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.149>

Verhelst, S., & Wallner, T. (2009). Hydrogen-fueled internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 35(6), 490-527. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.08.001>.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá srovnáním vodíku jako paliva pro spalovací motor vůči konvenčním palivům použitým ve vozidlech. Srovnávanými veličinami jsou hustota, energie potřebná k zážehu, stechiometrický poměr, výhřevnost, oktanové číslo a rychlost šíření plamene. Druhá část se věnuje analýze implementace vodíku jako paliva pro spalovací motor, vznětový i zážehový. Byly zde popsány i důležité prvky prevence proti úniku vodíku či zamezení jeho koncentrace mimo spalovací prostor.

Proběhlo srovnání Well-to-wheels výroby vodíku pomocí metody SMR a metody solární elektrolýzy, kde byla srovnávána spotřeba energie a produkce škodlivých emisí. Dále byly srovnány parametry jednotlivých systémů pohonů, mezi které se řadil konvenční benzínový zážehový motor, elektrický pohon, hybridní pohon, motor spalující biopaliva, vodíkový spalovací motor a vodíkový palivový článek. Sledovanými parametry byly produkce emisí oxidu uhličitého a siřičitého, energetická účinnost a dojezd.

Na závěr byl v simulaci porovnán vodíkový zážehový motor s benzínovým zážehovým motorem. Použit byl program Gt-suite. Sledovanými parametry byly výkonové parametry, produkce emisí oxidů dusíku, měrná spotřeba paliva a závislost průběhu tlaku ve spalovacím prostoru na natočení klikového hřídele.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vodík, spalovací motor, Well-to-wheels

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with the comparison of hydrogen as a fuel for an internal combustion engine against conventional fuels used in vehicles. The quantities compared are density, energy required for ignition, stoichiometric ratio, calorific value, octane number and flame propagation speed. The second part is devoted to the analysis of the implementation of hydrogen as a fuel for an internal combustion engine, both compression ignition and spark ignition. Important elements of prevention against hydrogen leakage or prevention of its concentration outside the combustion space were also described here.

A well-to-wheels comparison of hydrogen production using the SMR method, and the solar electrolysis method was conducted, where the energy consumption and the production of harmful emissions were compared. Furthermore, the parameters of individual drive systems were compared, which included a conventional petrol engine, an electric drive, a hybrid drive, a biofuel burning engine, a hydrogen combustion engine, and a hydrogen fuel cell. The monitored parameters were the production of carbon dioxide and sulfur dioxide emissions, energy efficiency and range.

Finally, the simulation compared a hydrogen spark ignition engine with a gasoline spark ignition engine. Gt-suite program was used. The monitored parameters were performance parameters, production of nitrogen oxide emissions, specific fuel consumption and the dependence of the course of pressure in the combustion chamber on the rotation of the crankshaft.

KEYWORDS

Hydrogen, internal combustion engine, Well-to-wheels

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VEGER, Lukáš. *Přímé spalování vodíku*. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/154049>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Michael Böhm.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Michaela Böhma a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 24. května 2024

.....

Lukáš Veger

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat Ing. Michaelu Böhmovi za cenné rady během psaní bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Lukáši Zeizingerovi za pomoc s grafickými nedostatky. Také bych chtěl poděkovat své rodině a přátelům za trpělivost a podporu.

OBSAH

Úvod	8
1 Použití vodíku v dopravních prostředcích	9
1.1 Palivový článek	9
1.2 Vodík jako palivo pro spalovací motor	10
1.2.1 Fyzikální a chemické vlastnosti	10
1.2.2 Implementace vodíku jako paliva pro vznětový motor	12
1.2.3 Implementace vodíku jako paliva pro zážehový motor	12
2 Well-to-wheels porovnání	17
2.1 Výroba vodíku	18
2.2 Uskladnění vodíku	18
2.3 Převoz	18
2.4 Vodík v osobních automobilech	19
2.5 Srovnání produkce emisí osobních automobilů z hlediska jednotlivých typů paliv z hlediska typu výroby	19
2.5.1 Srovnání energetické účinnosti	20
2.5.2 Srovnání dojezdu, nákladů a spotřeby paliva	21
2.6 Shrnutí produkce emisí jednotlivých druhů pohonů	22
2.7 Porovnání produkce emisí jednotlivých typů paliv	22
2.8 Shrnutí Well-To-Wheels	26
3 Simulace	27
3.1 Vstupní parametry	27
3.1.1 Vstupní parametry benzínového spalovacího motoru	27
3.1.2 Vstupní parametry vodíkového spalovacího motoru	27
3.2 Spalovací motor s nepřímým vstřikem paliva	28
3.2.1 Optimalizace motoru s nepřímým vstřikem paliva a variabilním časováním ventilů	31
3.3 Spalovací motor s přímým vstřikem paliva	34
3.3.1 Optimalizace motoru s přímým vstřikem paliva a variabilním časováním ventilů	37
Závěr	40
Použité informační zdroje	41
Seznam použitých zkratek a symbolů	44

ÚVOD

Vyčerpání zásob ropy se pomalu blíží a je potřeba ji nahradit jiným palivem, ideálně z obnovitelných zdrojů. Vodík lze vyrobit z vody pomocí elektrolýzy, čímž se řadí k obnovitelným zdrojům. Jeho spalování neprodukuje žádné skleníkové plyny ani jiné škodlivé emise. V dopravě jej lze využít pro napájení elektromotorů přeměnou vodíku na elektrickou energii pomocí palivového článku. Druhou možností je použít vodík jako palivo pro spalovací motor. Cílem jeho použití je snížení emisí skleníkových plynů pro zkvalitnění ovzduší a snížení rychlosti, případně úplné zastavení globálního oteplování. Spalováním vodíku vzniká pouze vodní pára, čímž se koloběh uzavře. Tímto získáme v případě výroby vodíku elektrolýzou kompletní uzavřený cyklus.

Cílem automobilek je od počátku 70. let snižování produkce emisí automobilů, aby splňovaly emisní limity stanovené nařízením vlády. Problematika zážehových motorů sestávala z nízké účinnosti a nedokonalého spalování. Snižování emisí si vynutilo inovaci palivového systému, a to použitím nejdříve nepřímého, později i přímého vstřikování paliva řízeného řídicí jednotkou, implementací katalyzátoru, systému recirkulace výfukových plynů. Posledním emisním prvkem je OPF, filtr pevných částic pro benzinové motory.

U vznětových motorů je vysoká problematika produkce sazí (kouřivost) a vysoká produkce oxidů dusíku z důvodu vysokého kompresního poměru a chudé směsi. Tyto problémy byly řešeny osazením systému recirkulace výfukových plynů a katalyzátoru, použitím vířivých klapek v sání a později od roku 2001 osazením filtru pevných částic. Euro 5 emisní norma si vyžádala další uškrcení reakcí motoru tak, aby došlo ke snížení produkce emisí a povinnost osazení filtru pevných částic. Od normy Euro 6, která dále zpřísnila produkci emisí, hlavně emisí oxidů dusíku, si vyžádala použití selektivní katalytické redukce se vstřikováním močoviny a vícestupňovou recirkulací výfukových plynů. Norma Euro 7 přinesla změnu v měření množství pevných částic. Nově již budou měřeny částice od velikosti 10 nanometrů namísto dosavadních 23 nanometrů [1]. Díky této změně bude již do produkce emisí třeba započítat produkci částic při opotřebování obložení brzdových destiček. Byly definovány i limitní hodnoty pro tyto částice, a to 30 mg/km pro čistě elektrická vozidla, 7 mg/km pro většinu vozidel se spalovacími motory, kam se řadí i vozidla s palivovými články a hybridním pohonem, a 11 mg/km pro velká vozidla se spalovacími motory [2]. Dále byly také zpřísněny limity produkce oxidů dusíku pro autobusy a nákladní vozidla. Limitní hodnoty byly nastaveny na 200 mg/kWh pro laboratorní měření a 260 mg/kWh pro reálný provoz [2]. Nově přibylo zvýšení nároků na spolehlivost a trvanlivost vozidel na 200 tisíc kilometrů a 10 let pro konvenční osobní a nákladní automobily [1] a nároky na trvanlivost baterií na 80 % kapacity od výroby to nájezdu 100 tisíc kilometrů nebo 5 let a 72 % kapacity baterie pro nájezd 160 tisíc kilometrů nebo 8 let od výroby pro elektrická a hybridní vozidla. Pro nákladní automobily je nárok na kapacitu snížen na 75 % (100 tisíc kilometrů / 5 let) a 67 % (160 tisíc kilometrů / 8 let) [2].

S každým uvedením nové přísnější emisní normy je posouvána hranice nemožného. S tím přichází vysoké výdaje automobilek na vývoj agregátů splňujících emisní limity. S tím přichází i pokuty za jejich neplnění. Automobilky jsou proto nuceny pro zachování ziskovosti zvyšovat ceny vozidel. Je jen otázkou času, kdy bude cena natolik vysoká, že si nový automobil koupí natolik nízký počet zákazníků, až se automobilce nevyplatí jej nadále vyrábět. Z tohoto důvodu je třeba hledat alternativní nízkoemisní řešení, jako je například použití vodík.

1 POUŽITÍ VODÍKU V DOPRAVNÍCH PROSTŘEDCÍCH

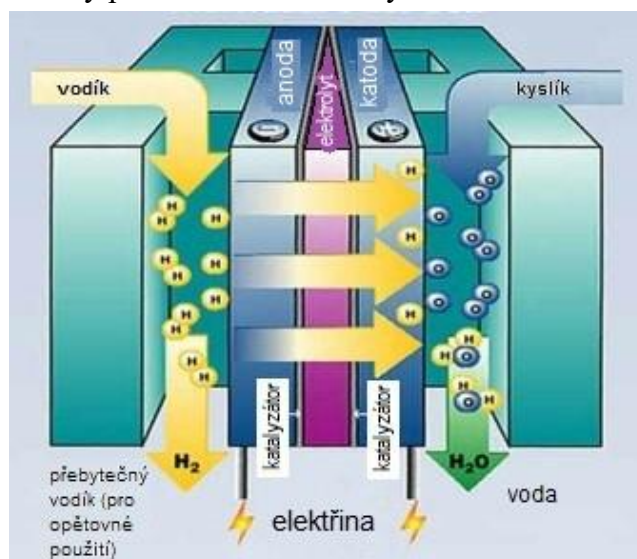
Vodík lze využít jako ekologické palivo pro pohon vozidel. Problematika elektrických vozidel s krátkým dojezdem a dlouho trvajícím nabíjením je řešitelná použitím vodíkové nádrže a palivového článku. Tankování vodíku by tak nebylo výrazně delší než tankování konvenčních fosilních paliv. Použití vodíku jako paliva pro spalovací motor by mohlo přinést snížení produkce emisí a zároveň nezatěžovat přírodu produkcí baterií nutných pro provoz elektromobilů. Při použití palivového článku je také nutné použít baterii pro případ nutnosti použití vyššího výkonu, než jaký je palivový článek schopen zajistit [3].

1.1 PALIVOVÝ ČLÁNEK

Palivový článek přeměňuje chemickou energii vodíku na energii elektrickou, kterou lze použít pro pohon vozidla. Výsledkem této přeměny je tedy elektrická energie a odpadní teplo. Během reakce obvykle nevznikají žádné emise, a proto se jedná o ekologický pohon. [4]

Palivový článek se skládá ze tří hlavních částí, které je možné vidět na Obr. 1:

- Katoda: Zde reaguje kyslík získaný ze vzduchu s ionty a elektrony z vodíku za tvorby molekul vody.
- Anoda: Zde se vodík rozděljuje na ionty vodíku a elektrony.
- Elektrolytická membrána: Jedná se o membránu, která brání průchodu elektronů, čímž je vytvořen elektrický proud. Vodíkové ionty touto membránou projdou bez problému.



Obr. 1 Schéma vodíkového palivového článku [4]

Elektrická energie vytvořená palivovým článkem je uložena v baterii. Například v Toyotě Mirai má baterie kapacitu 1,2 kWh a slouží pouze jako buffer, který kompenzuje výkyvy v tvorbě energie palivovým článkem a lze pro její dobíjení využít také rekuperační brzdění, což sníží produkci prachu z opotřebení brzdového obložení. Tato baterie je z důvodu požadavku na nízkou hmotnost a kompaktní rozměry NiMH typu, který se často používá například v modelářství. Množství vyrobené energie je regulováno řídicí jednotkou. Celý tento systém se vyznačuje vysokou účinností, kdy již výše zmiňovaná Toyota Mirai dosahuje průměrné spotřeby 0,55 kg vodíku na 100 km, což je energetický ekvivalent spotřeby 3,6 litru benzínu na 100 km. [5]

1.2 VODÍK JAKO PALIVO PRO SPALOVACÍ MOTOR

Ve směsi se vzduchem tvoří tyto dva prvky zažehnutelnou směs, kterou by bylo možné použít ve spalovacím motoru. Vzhledem k reakci pouze kyslíku a vodíku by vodíkový spalovací motor měl produkovat emise pouze v podobě vodní páry. Tím by bylo možné snížit celkovou světovou produkci emisí škodlivých látek a zlepšit kvalitu ovzduší převážně v hustě osídlených městech během dopravních špiček.

1.2.1 FYZIKÁLNÍ A CHEMICKÉ VLASTNOSTI

HUSTOTA

Hustota vodíku je $0,08 \text{ kg/m}^3$ při atmosférických podmínkách [6]. Tato hodnota je oproti většině konvenčních paliv nízká hodnota. V porovnání s kapalnými palivy, která mají podstatně vyšší hustotu (750 kg/m^3 pro benzin, 550 kg/m^3 pro LPG a 835 kg/m^3 pro motorovou naftu [7]). CNG, stlačený zemní plyn, s hodnotou při atmosférických podmínkách $0,65 \text{ kg/m}^3$ [7], je jediným zástupcem plynných paliv.

Z tohoto důvodu se CNG stlačuje na přibližně 200 bar [8]. I vodík bude potřeba výrazně stlačit, a to na hodnotu alespoň 600 bar.

ENERGIE POTŘEBNÁ K ZÁŽEHU

Tato veličina je u vodíku velice nízká, a to $0,02 \text{ mJ}$ [9]. U benzínu je tato veličina 40x větší s hodnotou $0,8 \text{ mJ}$ [9]. LPG a CNG mají velice podobnou hodnotu, a to $0,25 \text{ mJ}$ [9] pro LPG a $0,28 \text{ mJ}$ [9] pro CNG. Motorová nafta je známá tím, že je velice obtížně zapalitelná. Její nejnižší energie potřebná k zážehu je 20 mJ [9].

Z tohoto důvodu bude třeba dbát zvýšené opatrnosti při použití vodíku jako paliva pro spalovací motor.

STECHEMETRICKÝ POMĚR

Stechiometrický hmotnostní poměr je určován u hmotnostního poměru vůči množství hmotnostních jednotek (například kilogramů) jedné látky vůči druhé tak, aby bylo dosaženo 100% shoření paliva a nulovému přebytku kyslíku po dokončení hoření. Pořadí je vzduch : palivo

U vodíku je tento poměr 34,2:1, u benzínu 14,7:1, u motorové nafty 14,6:1, LPG 15,5:1 a u CNG 17,2:1. [10]

Z tohoto vyplývá, že množství vodíku, které bude dodáno do motoru, je i vzhledem k jeho hustotě přibližně poloviční vůči stlačenému zemnímu plynu, pokud bude cílem dosažení stochiometrického poměru.

VÝHŘEVNOST

Výhřevnost paliva znamená množství energie uložené v jednotce objemu či hmotnosti tohoto paliva.

Tab. 1 Porovnání výhřevnosti vodíku a konvenčních paliv

	Výhřevnost hmotnostní paliva [MJ/kg]	Výhřevnost hmotnostní stechiometrické směsi [MJ/kg]	Výhřevnost objemová stechiometrické směsi [MJ/m ³]
Vodík	120 až 142	3,72	3,20
Benzin	44 až 46	2,87	3,67
Motorová nafta	42 až 46	2,82	3,62
LPG	46 až 51	2,97	3,79
CNG	42 až 56	2,69	3,08

V Tab. 1 byly porovnány výhřevnosti jednotlivých paliv [11] [12]. Z tabulky je patrné, že i přes vysokou výhřevnost vodíku na kilogram je ve výsledku nejnižší na metr krychlový směsi. Příčinou je nízká hustota vodíku.

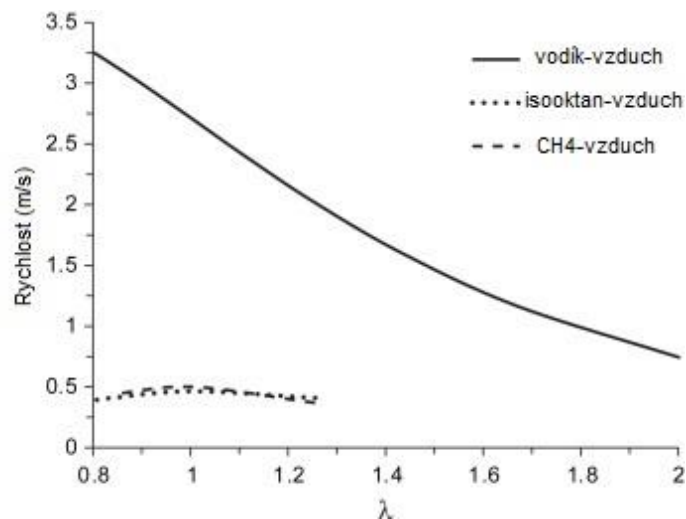
OKTANOVÉ ČÍSLO

Oktanové číslo vyjadřuje odolnost palivu vůči detonacím, které mají u zážehového motoru za následek poškození až úplné zničení motoru. Oktanové číslo se měří metodou AKI, která převládá ve Spojených státech amerických a metodou RON, která se používá zejména v Evropě.

Vodík v hodnotě oktanového čísla vyniká. Podle RON metody dosahuje hodnoty 130 [13]. Benzin v Evropě dosahuje hodnoty obvykle mezi 95 a 100 oktany [13]. LPG se pohybuje v rozmezí 94 až 112 oktany [13], CNG dosahuje hodnoty přibližně 130 oktany [13] a u motorové nafty není oktanové číslo důležitým faktorem, ale dosahuje hodnoty 15 až 25 oktany [13].

RYCHLOST ŠÍŘENÍ PLAMENE

Šíření plamene je díky nízké hustotě a vysoké difuzivitě vodíku turbulentní. Také šíření fronty plamene není kruhové, ale má různé nesymetrické větve. Rychlost šíření plamene je v případě použití plynných paliv rozdílná oproti palivům kapalným. Je závislá na tlaku, teplotě a bohatosti směsi. Srovnáním směsi vodíku a vzduchu se směsí isooktanu a vzduchu v Obr. 2 lze vidět, že je rychlost šíření plamene ve směsi vodíku a vzduchu podstatně rychlejší, a proto je nutné počítat s prudším nárůstem tlaku ve spalovacím prostoru po zažehnutí směsi a případně tomu přizpůsobit časování předstihu. Navíc je rychlost šíření plamene v tomto případě citlivější na bohatost směsi, kdy při poměru $\lambda = 4$ je na hodnotě přibližně stejná, jako u směsi isooktanu a vzduchu při poměru $\lambda = 1$. Z tohoto důvodu bude při použití vodíku jako paliva pro spalovací motor za poměru $\lambda > 2$ možné produkovat nízké emise oxidů dusíku.



Obr. 2 Závislost rychlosti šíření plamene na poměru λ [6]

1.2.2 IMPLEMENTACE VODÍKU JAKO PALIVA PRO VZNĚTOVÝ MOTOR

PROBLEMATIKA VSTŘIKOVÁNÍ VODÍKU DO SPALOVACÍHO PROSTORU VZNĚTOVÉHO MOTORU

Vodík má díky vysokému oktanovému číslu vysokou odolnost vůči detonačnímu spalování, což znamená vysokou prodlevu vznícení. Na druhou stranu má velice nízko

u energii potřebnou k zážehu a vysokou rychlost hoření. Spojením těchto dvou jevů vznikne vysoká prodleva vůči prvotnímu vznícení a následně příliš brzké prohoření krátce po vstřiku paliva příliš blízko vstřikovače, což by mělo za následek jeho zničení. Z tohoto důvodu nebudou vznětové vodíkové motory dále uvažovány jako vhodné pro tuto aplikaci.

1.2.3 IMPLEMENTACE VODÍKU JAKO PALIVA PRO ZÁŽEHOVÝ MOTOR

Zážehový motor je podstatně vhodnější než motor vznětový. Stále je ale problematické dostat vodík do spalovacího prostoru. Zážehové motory mají 2 základní způsoby vstřikování paliva. Prvním je vstřik paliva do sacího kanálu a tím druhým je přímý vstřik paliva přímo do spalovacího prostoru.

OPERACE BEZ ŠKRTÍCÍ LAPKY

Zážehový motor spalující konvenční paliva musí mít vzhledem k úzkému spektru bohatosti směsi, kdy je zažehnutelná, škrťací klapku, která škrťá přísun vzduchu v oblasti nízké zátěže. Poměr vzduchu ku palivu u konvenčního zážehového motoru spalujícího benzin, kdy je směs zažehnutelná, je přibližně 4:1 až 22:1 [6]. Bude-li použit vodík jako palivo, je tento rozptyl podstatně větší, a to mezi 4,8:1 a 340:1 [6]. Z tohoto důvodu není nutné použít u zážehového motoru spalujícího pouze vodík škrťací klapku jako kritický prvek při provozu motoru. Zatížení motoru se tak může regulovat přímo množstvím vstřikovaného paliva stejně jako u vznětového motoru. Možnost spalování chudé směsi zvýší účinnost motoru a zároveň sníží produkci emisí oxidů dusíku [6].

NEPŘÍMÝ VSTŘÍK VODÍKU

Při použití nepřímého vstříku by byl vodík vstřikován do sacího potrubí, případně přímo do sacího kanálu v hlavě motoru.

Vodík představuje nebezpečí, jelikož spolu s kyslíkem tvoří zažehnutelnou směs. Navíc má velmi nízkou energii potřebnou k zapálení, a proto zde vzniká riziko exploze směsi v sacím traktu motoru. Z tohoto důvodu je potřeba zajistit plynulý průchod vodíku sacím potrubím. Na teplé ostré hraně by mohlo dojít ke vzniku exploze. Nejlépe lze zabránit vzniku exploze tím, že po zavření sacího ventilu nezůstane v sacím potrubí žádný vodík. Proto je nutné začít se vstříkem v době, kdy je vzduch v sacím kanále již v pohybu. Dále je nutné ukončit vstřík dříve, než se výfukový ventil zavře. Maximalizování délky vstříku je možné zajistit osazením vstřikovače co nejbližší sacímu ventilu.

Problémem, který nastane při zvýšené zátěži, je vysoké množství plynu, které je potřeba dostat do spalovacího prostoru. Vzhledem k použití vodíku, jehož hustota je $0,08 \text{ kg/m}^3$ [6], jako paliva, je tento nárůst relativně velký. Nárůst objemu plynu je přibližně o 30 %, čímž dojde ke snížení objemu vzduchu nasátého do motoru, a tím i ke snížení jeho výkonu a točivého momentu.

PŘÍMÝ VSTŘÍK VODÍKU

Při přímém vstříku vodíku dojde k jeho dodání do spalovacího prostoru vstřikovačem, který je umístěný přímo v hlavě motoru s vyústěním do spalovacího prostoru.

Vzhledem k vystavení vstřikovací trysky vstřikovače vysokým teplotám a nedostatečnému chlazení plynným vodíkem je důležité zajistit její chlazení. V případě použití kapalného vodíku jako paliva by se vodík samotný o její chlazení postaral. Jinak by bylo nutné zajistit přísun chladicí kapaliny ke vstřikovači tak, aby nedocházelo k únikům chladicí kapaliny mimo chladicí okruh motoru.

Nastavení počátku a délky vstříku lze řešit různými způsoby. Nejjednodušší způsob je započít vstřík hned po zavření sacího ventilu, kde je poměrně dost času, během kterého se palivo může vstřikovat. Druhou možností je fixně nastavit ukončení vstříku před dosažením horní úvratí a upravovat počátek vstřikování v závislosti na zátěži. Dále je možné využít několika vstřikovacích cyklů tak, aby došlo k co největší možné redukci produkce emisí. První vstřík započne po zavření sacího ventilu a poslední by měl začít buď před zážehem a končit po něm, nebo by měl začít a skončit až po zážehu směsi.

Přímý vstřík má oproti tomu nepřímému jednu zásadní výhodu. Palivo se se vzduchem smíchá až ve spalovacím prostoru, čímž odpadá nárok na naddimenzování sacího traktu motoru. Tím lze motor naladit lépe pro vyšší účinnost spalování a zlepšení průběhu točivého momentu zejména v nízkém a středním otáčkovém spektru. Díky vstřikování vodíku až po zavření sacího ventilu je zvýšena plnicí účinnost motoru a tím i jeho výkonnostní parametry [6].

OCHRANA PROTI EXPLOZI MOTORU

V obou případech vstřikování je potřeba dbát důraz na možnost koncentrace vodíku v místech, kde by mohlo dojít k jeho explozi. Důležitá je již dříve zmíněná prevence proti kumulaci vodíku v sacím potrubí motoru. Vodík je díky velikosti své molekuly podstatně náchylnější k úniku než normální vzduch. Z tohoto důvodu je třeba dbát důraz na výběr těsnění a na kvalitu

zpracování jednotlivých částí sacího traktu tak, aby ve spojích dokonale lícovaly. Eliminace horkých míst ve spalovacím prostoru je také velmi důležitým krokem ke kontrolovatelnému zážehu směsi. Nejkritičtějšími místy jsou v tomto případě elektroda zapalovací svíčky a výfukový ventil. Zvýšením odvodu tepla ze zapalovací svíčky použitím takzvané „studenější“ svíčky lze eliminovat horké místo v tomto bodě. Zapalovací svíčky zároveň nesmí mít platinové elektrody, jelikož platina je katalyzátorem oxidace vodíku. Zvětšením dosedací plochy výfukového ventilu a snížením teploty hlavy motoru v tomto místě je možné dostatečně snížit teplotu výfukového ventilu tak, aby nedošlo k samozápalu směsi vodíku a vzduchu v tomto místě. Toho lze docílit například dodatečným kanálem chladícího okruhu, se kterým je možné zároveň ochlazovat i vstřikovací trysku.

Další důležitý faktor je vylepšení odvětrání klikové skříně. Vodík bude i v tomto případě unikat přes pístní kroužky a vodítka ventilů. Z tohoto důvodu je třeba zajistit průtok vzduchu klikovou skříní tak, aby v ní bylo pouze minimální množství zbytkového vodíku. Ventilovaný vodík lze v případě nepřepřlňovaného motoru vyústit v sacím potrubí v blízkosti vstřikovačů. V případě přepřlňovaného motoru nelze vodík ventilovat do sacího potrubí. Jediná možnost by byla vyústění odvětrávání umístit před turbodmychadlo / kompresor. Vzhledem k velice nízké minimální energii potřebné pro zážeh a vysokému rozptylu bohatosti zápalné směsi je toto řešení velice riskantní.

Další možností je vyvedení mimo motor přímo do atmosféry. V tomto případě by musel vodík odcházet mimo motorový prostor. Dále se mezi riskantní oblasti řadí místa, kde by docházelo k jiskření, tudíž okolí brzd a podvozku. Je třeba dbát zvýšené opatrnosti v oblasti výfukového potrubí, které dosazuje za provozu dostatečných teplot, aby došlo k zažehnutí vodku.

Těmito řešeními lze snížit koncentraci vodíku natolik, aby nevzniklo riziko jeho exploze v klikovém prostoru. Hlavní oblastí, kterou vodík bude unikat do klikového prostoru, jsou pístní kroužky. V této oblasti by utěsnění výrazně pomohlo k eliminaci problému.

Aktivním průtokem vzduchu klikovou skříní je také možné podstatně snížit koncentraci vodíku v tomto místě. Rozložení klikové skříně musí být takové, aby byl zajištěn průtok vzduchu celou skříní, aby se nedocílilo kritického zvýšení koncentrace vodíku.

Pro kontrolu nad koncentrací vodíku v kritických místech je vhodné použít senzory, které by jeho koncentraci byly schopné zaznamenat. Zároveň s tímto senzorem je vhodné použít teplotní senzor, kdyby došlo k zapálení vodíku. Vodík hoří bezbarvým plamenem, a proto je velice těžké jej pouhým okem zaznamenat. Rozmístění teplotních senzorů by bylo vhodné tak, aby pokryly všechny kritické oblasti, ve kterých by mohlo dojít k zapálení vodíku.

MOTOROVÝ OLEJ

V důsledku spalování vodíku, při kterém vzniká vodní pára, dochází k degradaci motorového oleje, jelikož motorový olej absorbuje více vodní páry než v případě motoru spalujícího konvenční paliva, je třeba přehodnotit servisní interval výměny oleje. Dále se olej hydrogenuje nespáleným vodíkem, čímž dojde k další degradaci jeho mazacích a rozpouštěcích vlastností. Řešením by bylo použití oleje, jehož mazací vlastnosti méně reagují na přítomnost vlhkosti, případně olej vyvinutý přímo pro motory spalující vodík.

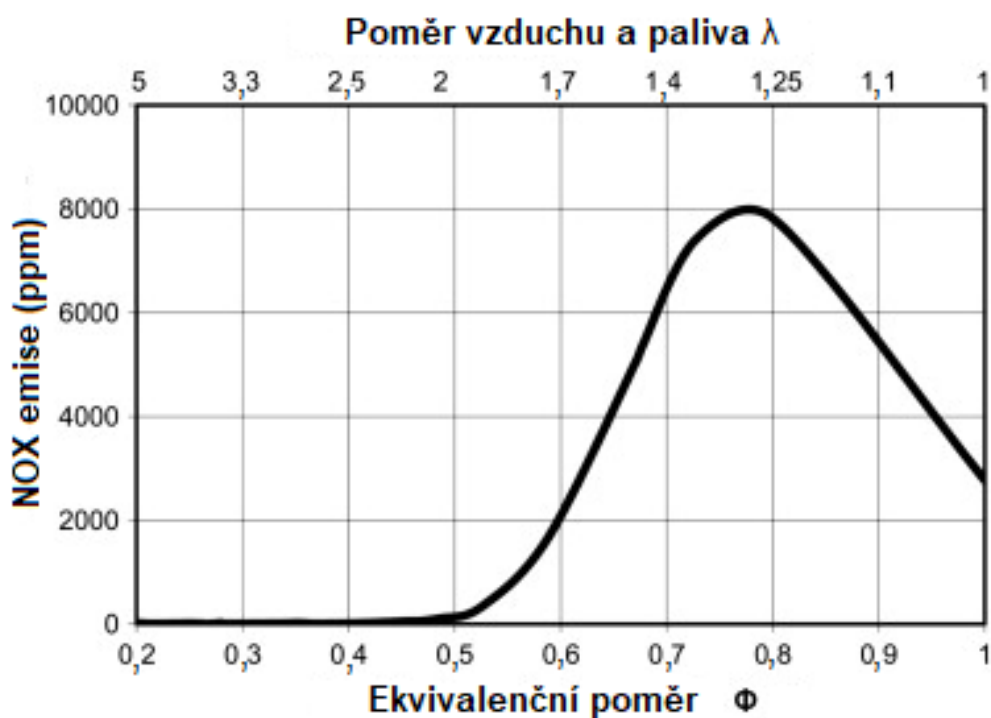
Vzhledem ke zvýšené přítomnosti vlhkosti v celém motoru jsou jednotlivé součásti motoru náchylnější na degradaci povrchu korozi. Z tohoto důvodu bude potřeba zvýšit ochranu materiálu proti korozi.

EMISE

Kromě vzniku vodní páry mají mezi sebou ve spalovacím prostoru možnost reagovat i další plyny obsažené ve vzduchu, jejichž emise je třeba snížit.

Mezi tyto plyny patří například oxid uhličitý. Ten se během spalování může vytvořit pouze v případě, kdy se do spalovacího prostoru dostane motorový olej. Vzhledem k nutnosti kvalitního utěsnění spalovacího prostoru bude však tento způsob minimalizován.

Dalšími škodlivými emisemi jsou emise oxidů dusíku, které se mohou vytvořit reakcí dusíku obsaženém ve vzduchu. Jejich tvorba je podmíněná vysokou teplotou hoření.

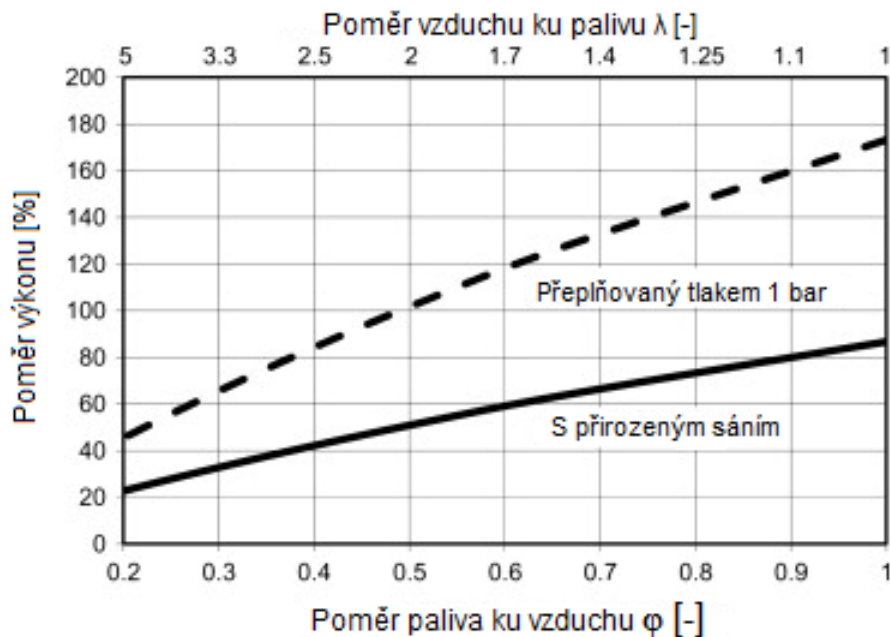


Obr. 3: Graf produkce emisí oxidu dusíku v závislosti na bohatosti směsi [6]

V Obr. 3 lze vidět vliv bohatosti směsi na produkci emisí oxidů dusíku. Vzhledem k možnosti používat zážehový motor spalující vodík bez nutnosti škrcení přívodu vzduchu, je možné tento agregát provozovat v oblasti nízkého a středního zatížení s poměrem vzduchu ku palivu $\lambda \geq 2$, čímž dojde k minimalizaci produkce emisí dusíku. Produkci těchto emisí lze dále snížit použitím třicestného katalyzátoru. Při nízkém zatížení je tak možné dále rozkládat molekuly oxidů dusíku již obsažené ve vzduchu a zajistit tak negativní produkci emisí oxidů dusíku [6].

VÝKONNOSTNÍ PARAMETRY

V Obr. 4 lze vidět srovnání výkonnostních parametrů benzinového a vodíkového zážehového motoru. Z tohoto srovnání lze vidět, že i přes vyšší výhřevnost vodíku a jeho vyšší oktanové číslo, které mají za následek možnost zvýšení účinnosti spalování, nejsou dostatečné na vyrovnání výkonnostních parametrů. Příčinou nízkého výkonu je vysoký poměr vzduchu ku palivu, kdy pro stechiometrickou směs je tento poměr u benzínu 14,7:1 a u vodíku 34,2:1 [6]. V případě potřeby dosažení vyšších výkonnostních parametrů u vodíkového motoru při zachování nízkých emisí je zde možnost přepřehování motoru například turbodmychadlem, které se hojně využívá u většiny moderních zážehových motorizací. Vodík má díky svému vysokému oktanovému číslu vysokou odolnost vůči klepání, a proto je toto řešení vhodné.



Obr 4: Porovnání výkonové hustoty vodíkového zážehového motoru s přirozeným sáním a přepřehovaný tlakem 1 bar vůči benzinovému zážehovému motoru [6]

2 WELL-TO-WHEELS POROVNÁNÍ

Well-To-Wheels metoda zkoumá produkci emisí od výroby jednotlivých paliv až po jejich využití v dopravě. Pro srovnání Well-To-Wheels produkce emisí vodíku s konvenčními palivy byla zvolena studie z roku 2019 [14], která zkoumala všechny důležité parametry. Pro tohle srovnání byly použity 2 metody měření, a to metoda Window-sticker a metoda 5-cycle, které se do této analýzy podepsaly v převozu paliva a ve využití paliva vozidlem.

Metoda Window-sticker se skládá ze dvou testovacích cyklů, a to z 55 % městského a ze 45 % z dálničního. [15]

5-cycle metoda ke dvěma metodám z metody Window-sticker přidává vysokorychlostní cyklus, cyklus s vysokou okolní teplotou za použití klimatizace a cyklus s nízkou ambientní teplotou [15]. 5-cycle test se začal používat v roce 2008 pro zpřesnění měřicí metody a přiblížení naměřených hodnot reálnému provozu vozidla [15]. Přesnější specifika jednotlivých cyklů lze vidět v Tab. 2 níže.

Tab. 2 Detaily testovacích cyklů [15]

Vlastnosti test. cyklů	Testovací cykly				
	Městský	Dálniční	Vysokorychlostní	S klimatizací	S nízkou ambientní teplotou
Maximální rychlost	90 km/h	96 km/h	128 km/h	88 km/h	90 km/h
Průměrná rychlost	34 km/h	77 km/h	78 km/h	34 km/h	34 km/h
Maximální zrychlení	1,47 m·s ⁻²	1,42 m·s ⁻²	3,76 m·s ⁻²	2,26 m·s ⁻²	1,47 m·s ⁻²
Simulovaná vzdálenost	17,6 km	16,5 km	12,8 km	5,8 km	17,6 km
Čas	31,2 min	12,75 min	9,9 min	9,9 min	31,2 min
Zastavení vozidla	23	0	4	5	23
Čas doby provozu na volnoběh	18 %	0 %	7 %	19 %	18 %
Start motoru	Studený	Teplý	Teplý	Teplý	Studený
Teplota v laboratoři	20–30 °C			35 °C	-6,7 °C
Klimatizace ve vozidle	Vypnuta	Vypnuta	Vypnuta	Zapnuta	Vypnuta
Topení ve vozidle	Vypnuto	Vypnuto	Vypnuto	Vypnuto	Zapnuto

2.1 VÝROBA VODÍKU

Čistý vodík se v přírodě téměř nenachází a jediný nesyntetický původ by byl ve vesmíru. Proto je třeba jej vyrobit pomocí chemických reakcí. Nejrentabilnější jsou dva způsoby.

Prvním je metoda SMR, která spočívá v reakci zemního plynu s přehřátou vodní párou. Zemní plyn, který obsahuje metan, je vstříkovan do přehřáté vodní páry o teplotě 700 až 1000 °C stlačené na tlak 3 až 25 bar [16]. Produktem této reakce je vodík, oxid uhelnatý a malé množství oxidu uhličitého. Následuje reakce oxidu uhelnatého s přehřátou vodní párou za vzniku oxidu uhličitého, vodíku a malého množství tepla [16]. Problémem je ale zdroj, kterým je fosilní palivo a produkce oxidu uhelnatého (po oxidaci oxidu uhličitého), což se negativně projevuje na celkové uhlíkové stopě vodíku.

Druhým způsobem je elektrolýza, kterou lze rozdělit podle typu elektrolytu. Ten může být z polymeru, kdy kladně nabitý vodíkové ionty a elektrony prochází touto polymerovou membránou ke katodě, kde se sloučí a vytvoří vodíkový plyn [17]. Dalšími typy elektrolytů mohou být například tekutá lázeň z hydroxidu sodného či draselného [17]. Dále lze jako elektrolyt využít tuhá keramika, která ale potřebuje pro správnou funkci teplotu přes 700 ° [17].

Elektrolýza je velice energeticky náročným procesem, kdy na výrobu jednoho kilogramu vodíku je spotřebováno 50 až 55 kWh [18] elektrické energie. Metoda SMR není náročná na elektrickou energii, jelikož na výrobu jednoho kilogramu vodíku spotřebuje pouze 0,49 MJ [19] elektrické energie, což lze přepočítat na 0,136 kWh. Zároveň však spotřebuje 16,3 litru vody [19] a 3,04 kg zemního plynu [19], který lze přepočítat na 44,4 kWh energie.

2.2 USKLADNĚNÍ VODÍKU

Velkým problémem je uskladnění vodíku. Jeho hustota při teplotě 20 °C a atmosférickém tlaku je pouhých 0,08 kg/m³. Je nutné jej tedy skladovat pod vysokým tlakem nebo v kapalném stavu. Při tlaku 35 MPa má vodík hustotu 26,1 kg/m³ a v kapalném stavu při atmosférickém tlaku 71 kg/m³. Vodík je v případě výroby z methanu dostáván pod tlakem 2 MPa a stlačení na 35 MPa, případně podchlazení na -252,8 °C, je v obou případech velmi energeticky náročné, což se opět negativně projevuje na uhlíkové stopě [14].

Samotné stlačení vodíku je relativně energeticky náročný proces, který spotřebuje přibližně 2,2 kWh [20] elektrické energie na jeden kilogram vodíku. V případě zkapalnění vodíku je potřeba ještě více elektrické energie, a to 10 kWh na 1 kilogram vodíku [20].

2.3 PŘEVOZ

Jak bylo již zmíněno výše, vodík má velice nízkou hustotu. I v kapalném stavu je jeho hustota méně jak desetinná oproti tekutým fosilním palivům. Ve speciálních trubkových nádržích je možné jedním nákladním vozidlem převést 300 až 1100 kg [14] stlačeného plynného vodíku. Pro tekutý vodík se používají kryogenické tankery, které uvezou až 4000 kg tekutého vodíku [14].

Převoz vodíku je přibližně stejně náročný na množství energie jako převoz jiných typů paliv. Elektrickou energii není potřeba převážet, a proto je z tohoto hlediska nejekologičtější.

2.4 VODÍK V OSOBNÍCH AUTOMOBILECH

Na první problém lze narazit hned na čerpacích stanicích. Těch, které prodávají vodík je velice málo. V červnu roku 2022 se otevřela první čerpací stanice s vodíkem v Ostravě-Vítkovicích společnosti Cylinders Holding. Paušální cena za jedno natankování byla v roce 2022 2500 korun českých. Po natankování však vozidla na vodík neprodukuje žádné emise. [21]

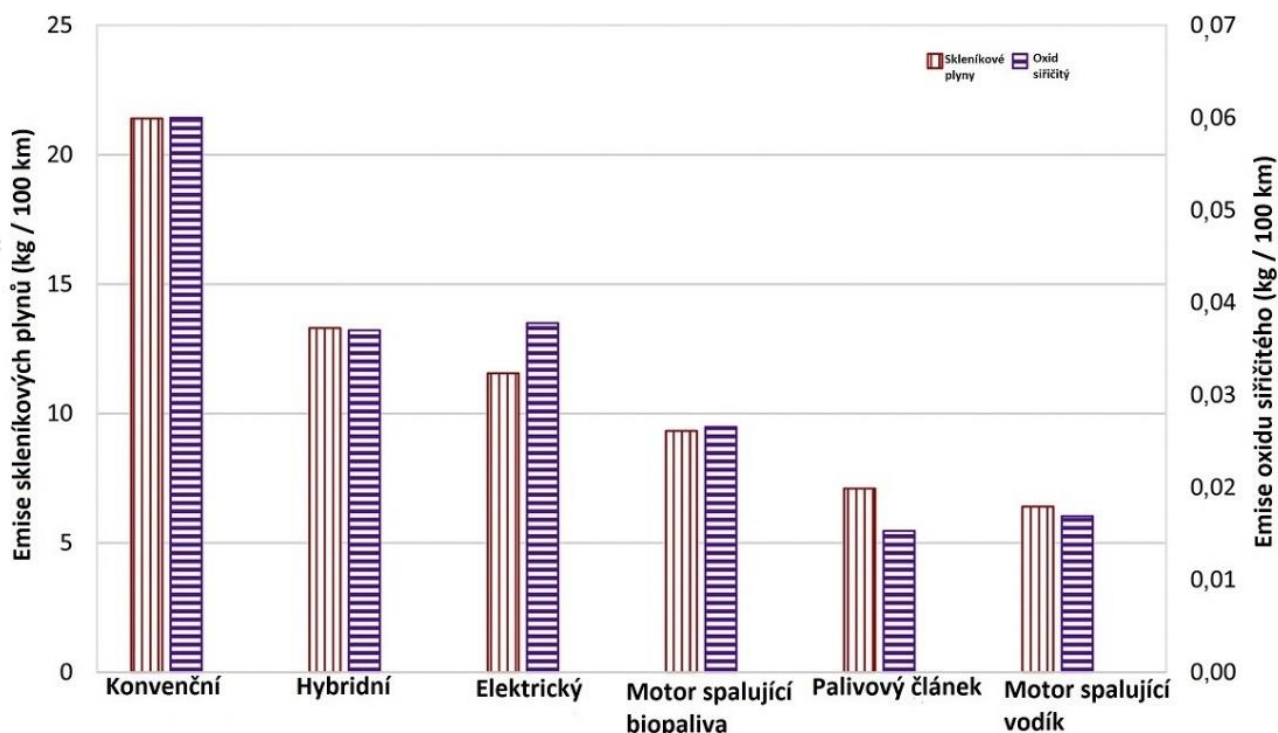
Následuje druhý problém, a to velikost nádrže na vodík. Například Toyota Mirai, která používá systém s palivovým článkem, 1,2 kWh baterií a 141 litrovou kapacitou nádrží na vodík, na které ujede až 650 km [14]. Běžné nádrže na benzin mají v dnešní době kapacitu 55 a více litrů, s nimiž není problém ujet stejnou vzdálenost s daleko menším množstvím zabraného místa.

Samotná vodíková čerpací stanice potřebuje pro svůj provoz, čerpání a chlazení vodíku elektrickou energii. Příkladem je vodíková čerpací stanice Linde, která má maximální příkon 45 kW [22].

2.5 SROVNÁNÍ PRODUKCE EMISÍ OSOBNÍCH AUTOMOBILŮ Z HLEDISKA JEDNOTLIVÝCH TYPŮ PALIV Z HLEDISKA TYPU VÝROBY

V tomto srovnání byly porovnávány pohony osobních automobilů. Patří mezi ně konvenční spalovací motory, spalovací motory na biopaliva hybridní systémy, čistě elektrická vozidla, vodíková vozidla s palivovými články a s vodíkovými spalovacími motory.

Cílem je srovnání produkce škodlivých emisí. Tyto emise snižují kvalitu ovzduší, poškozují ekosystémy, snižují kvalitu vody, okyselují půdu a způsobují kyselé deště. Nahrazením konvenčních fosilních paliv lze dosáhnout snížení produkce škodlivých emisí.

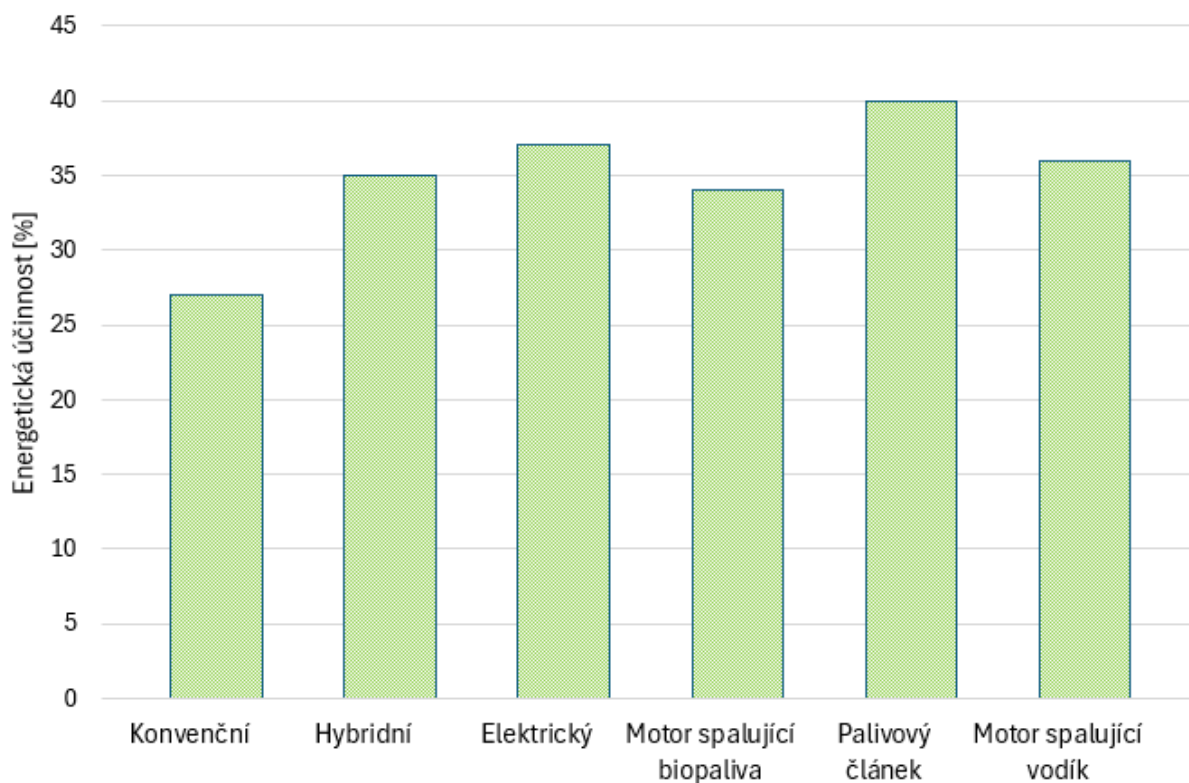


Obr. 5 Produkce skleníkových emisí a oxidu siřičitého pro jednotlivé typy pohonů [23]

V Obr. 5 lze vidět produkce emisí skleníkových plynů a oxidu siřičitého pro jednotlivé typy pohonů z hlediska jejich produkce během výroby vozidla a produkce emisí spalováním daného paliva po průměrnou danou životnost vozidla, která byla stanovena na 160 000 kilometrů [23]. Jednoznačně nejhůře vychází konvenční spalovací motory na fosilní paliva. O druhé místo se dělí elektrické a hybridní systémy. Hybridní systém produkuje sice o přibližně 15 % více skleníkových plynů, ale také produkuje o přibližně 10 % méně emisí oxidu siřičitého. Na třetí místo se umisťují spalovací motory na biopaliva, které produkují přibližně poloviční množství emisí skleníkových plynů a oxidu siřičitého z důvodu, že se vyrábí synteticky z rostlinných zdrojů, nemusí se komplikovaně těžit z ropných ložisek, převážet na velké vzdálenosti a poté se rafinovat. Jako nejlepší pohony se jeví vodíkové systémy pracující s palivovými články a vodíkové spalovací motory. Produkují totiž o přibližně 40 % (palivové články), respektive o 45 % (vodíkové spalovací motory) emisí skleníkových plynů. U emisí oxidu siřičitého jich produkují palivové články o přibližně 55 % a vodíkové spalovací motory o přibližně 50 % méně. Všechny typy pohonů však produkovaly velmi nízké hodnoty emisí oxidu siřičitého, proto na tyto hodnoty není nutné brát zřetel.

2.5.1 SROVNÁNÍ ENERGETICKÉ ÚČINNOSTI

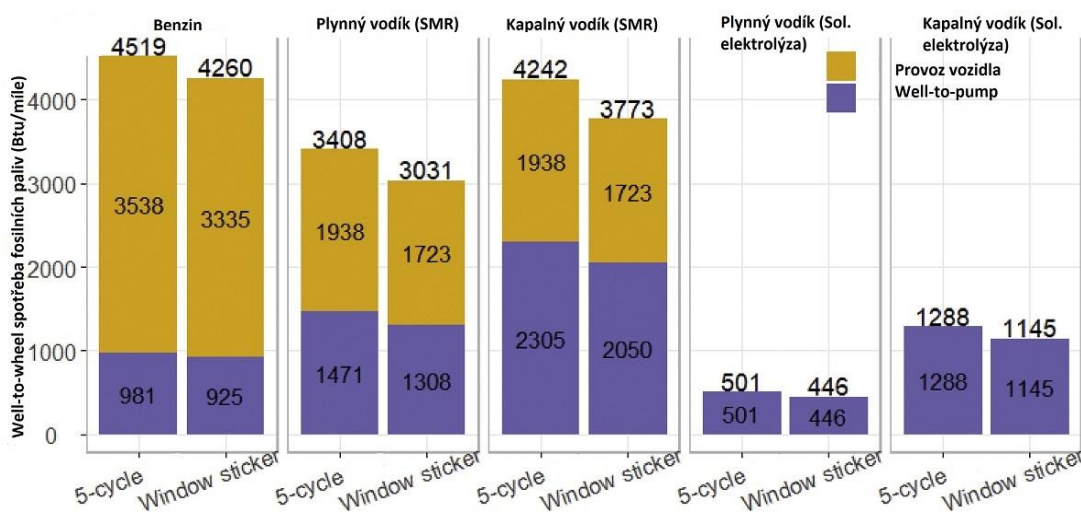
Srovnáním energetické účinnosti v Obr. 6 bylo zjištěno, že vodíkové spalovací motory dosahují podstatně vyšší účinnosti než motory spalující benzín a mírně vyšší účinnosti než motory spalující biopaliva či hybridní pohon. Elektrický pohon dosáhl mírně vyšší účinnosti než vodíkový motor. Nejvyšší účinností oplýval pohon pomocí palivových článků s hodnotou 40 %.



Obr. 6 Srovnání účinností jednotlivých systémů [23]

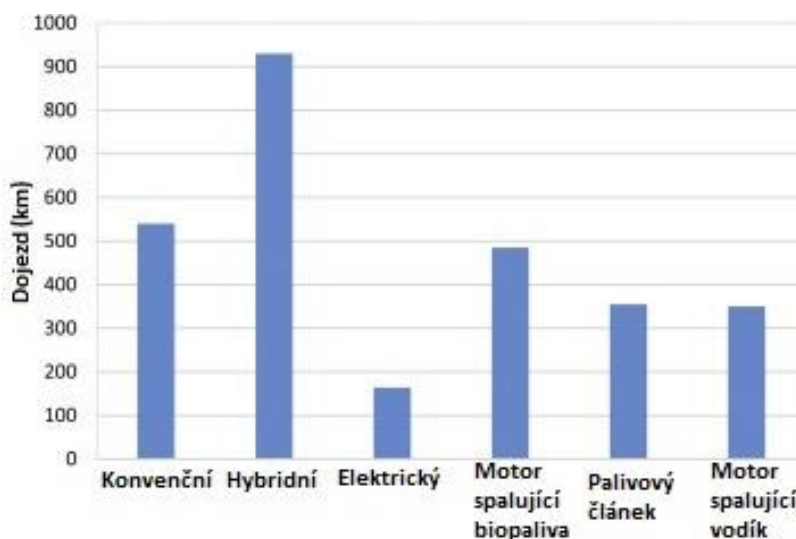
2.5.2 SROVNÁNÍ DOJEZDU, NÁKLADŮ A SPOTŘEBY PALIVA

V Obr. 7 je srovnána spotřeba fosilního paliva jednotlivých systémů v jednotkách energie (BTU na jednu ujetou míli). Nejvyšší spotřeby fosilního paliva dosáhly klasické spalovací motory. V tomto srovnání vyšel nejlépe elektrický pohon. Vodíkové systémy se umístily za spalovacími motory na biopaliva, které se umístily za elektrický pohon s tím, že lépe vyšly palivové články. Z tabulky lze vidět, že podle metody Window-sticker je spotřeba o přibližně 10 % nižší. Také lze vidět, že použití kapalného vodíku zvyšuje výrazně spotřebu v oblasti Well-to-pump oproti použití vodíku plyného. Nejlépe se jeví metoda solární elektrolýzy, která spotřebuje zlomek energie ze sítě oproti metodě SMR i benzínu z důvodu použití pouze obnovitelného zdroje k produkci vodíku.



Obr. 7 Porovnání spotřeby fosilního paliva u jednotlivých druhů pohonu [14]

Dalším důležitým parametrem je dojezd. Zde dopadlo vozidlo s vodíkovým spalovacím motorem lépe než čistě elektrické vozidlo, ale ostatní typy pohonů jej překonaly. Vodíkové palivové články dosáhly pouze o 1,4 % delšího dojezdu. Nejlépe dopadl hybridní pohon v kombinaci konvenčního spalovacího motoru a elektromotoru. Přesné výsledky testu jsou uvedeny v Obr. 8.



Obr. 8 Srovnání dojezdů jednotlivých typů pohonů [23]

2.6 SHRUTÍ PRODUKCE EMISÍ JEDNOTLIVÝCH DRUHŮ POHONŮ

Z hlediska produkce emisí skleníkových plynů na Obr. 5 vodíkové spalovací motory dosáhly podstatně nižších hodnot než konvenční spalovací motory. Tyto hodnoty byly také nižší než u hybridních a elektrických systémů, i u spalovacích motorů na biopaliva. Lepších hodnot dosáhl vodíkový spalovací motor i vůči palivovým článkům.

Z Obr. 5 lze vyčíst také produkci emisí oxidu siřičitého, kde vodíkový spalovací motor dosahoval opět podstatně nižších hodnot než konvenční spalovací motory, hybridní a elektrické systémy, i motory spalující biopaliva. Palivový článek zde však produkoval přibližně o 15 % méně emisí oxidu siřičitého než motor spalující vodík.

Obr. 6 popisuje srovnání energetické účinnosti systémů. Vodíkový motor zde dosáhl výrazně vyšší hodnoty než konvenční spalovací motory. Oproti hybridním systémům a motorům spalujícím biopaliva zde nebyla účinnost vodíkového motoru výrazně vyšší. Čistě elektrický systém dosáhl mírně vyšší účinnosti než vodíkový motor a palivový článek v tomto srovnání dosáhl nejvyšší účinnosti.

Hodnoty spotřeby fosilního paliva na ujetý kilometr lze vyčíst z Obr. 7. Zde byl vodík jako palivo znázorněn pomocí metody jeho výroby. Metoda solární elektrolýzy se vyznačovala velmi nízkou spotřebou, avšak solární elektrolýza je metoda, která je pro velkoobjemovou výrobu vodíku nereálná. Výroba pomocí metody SMR zaznamenala znatelný nárůst spotřeby, a to z důvodu použití fosilního paliva přímo ve výrobě. Tímto dojde téměř k vyrovnání s konvenčním spalovacím motorem, jehož zástupce bylo vozidlo Mazda 3 s agregátem s nepřímým vstřikem paliva, který se neřadil mezi velmi úsporné modely. Novodobé přepřlované agregáty s přímým vstřikem paliva dosahují vyšší účinnosti, která ovlivní sledovanou hodnotu spotřeby fosilního paliva.

Z Obr. 8 lze vyčíst dojezdy jednotlivých pohonů, kde vodíkový spalovací motor i palivový článek nedosahoval na hodnoty konvenčního spalovacího motoru, ani motoru spalujícího biopaliva. Hybridní systém dosahoval 2,7krát vyššího dojezdu než vodíkový spalovací motor. Nejhůře se vyznačoval elektrický systém. Nízký dojezd elektrických vozidel způsoben nízkou energetickou hustotou baterií, kdy u vozidla Tesla Model 3 je například energetická hustota baterie 540 kJ na 1 kilogram hmotnosti [24], což je přibližně 220krát méně než při použití vodíku a přibližně 77krát méně než při použití benzínu jako paliva, viz Tab. 1.

2.7 POROVNÁNÍ PRODUKCE EMISÍ JEDNOTLIVÝCH TYPŮ PALIV

Pro měření emisí za použití plynného vodíku se předpokládal převoz pomocí trubkového vozíku. Nákladem byl plynný vodík o hmotnosti 1000 kg a tlaku 500 bar [14]. Kompresce při nakládání spotřebovala měrnou energii 2,58 kWh/kg H₂ [14]. Přeprava na vzdálenost 90 mil (144 km) spotřebovala měrnou energii 3,64 MJ/kg H₂ [14]. Na čerpací stanici spotřebovala opětovná komprese měrnou energii 1,21 kWh/kg H₂ [14] a předchlazení 0,63 kWh/kg H₂ [14].

Pro převoz kapalného vodíku za použití kryogenického tankeru měl převážený vodík hmotnost 4000 kg a byl převážen na stejnou vzdálenost 90 mil (44 km) [14]. Pro zkapalnění vodíku bylo spotřebováno 12 kWh/kg H₂ [14], čerpání do tankeru spotřebovalo 0,08 kWh/kg H₂ [14], převoz 1,21 MJ/kg H₂ [14] a opětovné přečerpání do stanice 0,55 kWh/kg H₂ [14].

Jako testovací vozidla byla použita pro zástupce palivových článků Toyota Mirai a zástupcem spalovacích motorů se stala Mazda 3. Pro měření spotřeby paliva byly použity metody 5-cycle test a Window sticker. Jejich výsledky se nachází v Tab. 3

Tab. 3 Spotřeba paliv v BTU/mi [14]

Metoda měření	Toyota Mirai	Mazda 3
Window-sticker	1723	3568
5-cycle test	1937	3787

Pomocí GREET modelu byly zjištěny emise, které byly produkovány provozem Mazdy 3, viz Tab. 4

Tab. 4 Emise produkované vozidlem Mazda 3 [14]

Měřená sloučenina	CO ₂	CH ₄	NO _x	CO
Naměřená hodnota (g/km)	178,5	0,001375	0,003438	0,2313

V rámci měření byly uvažovány 2 druhy výroby vodíku, a to metoda SMR a metoda solární elektrolýzy. Dále byly uvažovány 2 typy přepravy vodíku, a to přeprava trubkovým návěsem, kde byl přepravován plynný vodík (metoda označována jako G.H₂), a kryogenickým tankerem (metoda označována jako L.H₂), kterým byl převážen kapalný vodík. [14]

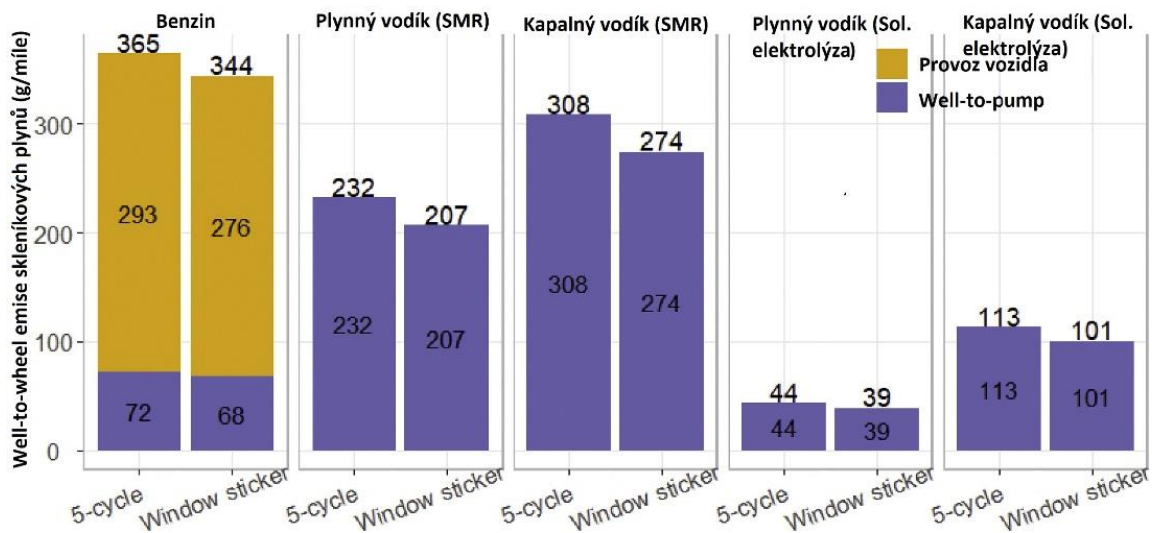
Pro možnost započítání emisí z produkce elektrické energie byl použit model produkce energie v USA z roku 2018 a jeho předpokládaný vývoj v roce 2030, viz. Tab. 5. Tato data byla poté započítána do celkové spotřeby energie a tvorby emisí pro objektivní porovnání jednotlivých druhů paliv.

Tab. 5 Model zdrojů elektrické energie [14]

Zdroje energie	Podíl tvorby energie				Podíl spotřebované energie a produkce emisí při tvorbě elektrické energie v síti USA v roce 2018			
	USA		Kanada		Spotřeba fosilních paliv (BTU)	Skleníkové plyny (g)	CO (g)	NO _x (g)
	2018	2030	2018	2030				
Zbytkový olej	0,5 %	0,2 %	0,0 %	0,0 %	11900	1,03E+03	2,55E-01	4,48E+00
Zemní plyn	29,8 %	33,0 %	41,3 %	27,4 %	7780	5,07E+02	3,49E-01	4,31E-01
Uhlí	32,7 %	28,2 %	6,3 %	0,0 %	10200	1,06E+03	8,72E-02	5,14E-01
Jaderná energie	20,6 %	16,6 %	9,7 %	0,0 %	98,7	8,32E+00	1,30E-02	1,76E-02
Biomasa	0,1 %	0,2 %	0,5 %	1,6 %	409	6,52E+01	4,99E+00	1,10E+00
Vodní toky	7,7 %	7,1 %	17,9 %	17,6 %	-	-	-	-
Geotermální energie	0,4 %	1,0 %	5,0 %	14,0 %	-	9,57E+01	-	-
Větrná energie	6,4 %	9,7 %	7,1 %	15,3 %	-	0,00E+00	-	-
Sluneční energie	1,2 %	3,4 %	11,1 %	22,8 %	-	0,00+E+00	-	-
Ostatní	0,5 %	0,6 %	1,2 %	1,4 %	-	2,61E+00	-	-

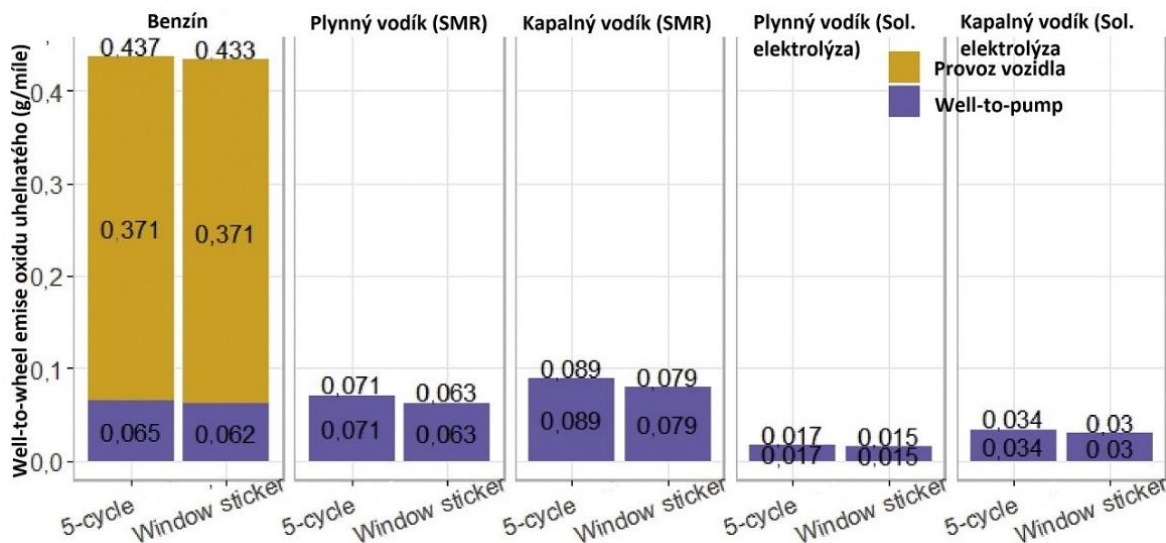
Obr. 11 znázorňuje produkci emisí skleníkových plynů pro jednotlivé typy paliv. Nejlépe vychází plynný vodík produkovaný solární elektrolýzou. Kapalný vodík je na tom podstatně hůře, jelikož pro jeho zkapalnění potřebujeme o mnoho více energie, čímž značně vzrostou celkové produkované emise. Srovnáním metody solární elektrolýzy a SMR zjistíme, že výrobou vodíku metodou SMR je produkováno podstatně více emisí skleníkových plynů. Oproti benzínu však jsou emise produkované metodou SMR stále nižší (o přibližně 20 % pro kapalný a o 40 % nižší pro plynný vodík).

Studie firmy Zemo [25] potvrdila, že metoda SMR je nevýhodná, co se produkce oxidu uhličitého týče. Elektrolýza, která byla napájena elektřinou ze solárních panelů nebo větrných elektráren je velice ekologická, avšak z hlediska náročnosti elektrolýzy na množství energie je nereálné, aby byl vodík tímto způsobem vyráběn ve velkém množství, které by uspokojilo poptávku v případě masového zavedení vodíkových spalovacích motorů. Napájení elektrolýzy ze sítě by vzhledem k danému modelu produkovalo více emisí jako metoda SMR, viz 2.1.



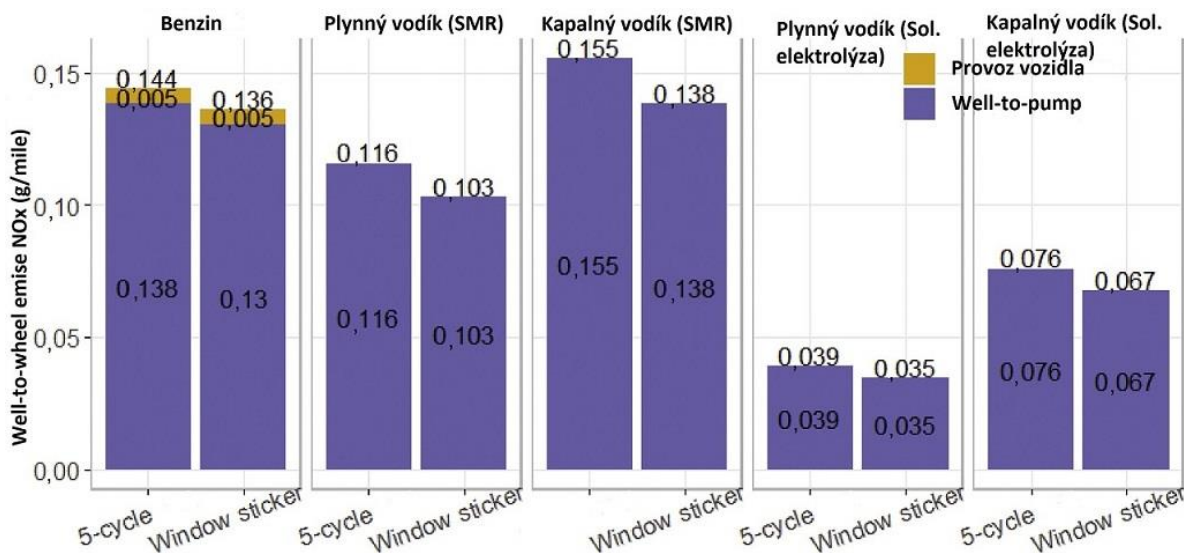
Obr. 11 Produkce emisí skleníkových plynů pro jednotlivá paliva [14]

V Obr. 12 byla porovnávána produkce oxidu uhelnatého pro obě metody výroby vodíku a benzin. Well-To-Pump, dále jen WTP, produkuje u benzínu a SMR metody pro obě skupenství vodíku velice podobné množství oxidu uhelnatého. Nejlépe vychází opět metoda solární elektrolýzy pro plynný vodík. U benzínu se k produkci oxidu uhelnatého přičítá také produkce samotným provozem vozidla, která toto palivo značně znevýhodňuje oproti vodíku (spalování vodíku vytváří pouze emise vodní páry).



Obr. 12 Produkce emisí oxidu uhelnatého pro jednotlivé druhy paliv [14]

Obr. 13 znázorňuje aktuálně nejvíce řešené emise oxidů dusíku (NO_x). Díky nim při reakci s kyslíkem a ozonem vzniká kyselina dusičná. Ta je známá kvůli kyselým dešťům a snižováním kvality vody. Výsledné emise jsou opět nejnižší pro plyný vodík vyrobený solární elektrolýzou (o přibližně 70 % nižší oproti benzínu). Překvapivé jsou hodnoty produkce emisí metodou SMR a následným převozem kapalného vodíku, které mírně převyšují emise produkované benzínem. SMR metoda s následným převozem plynného vodíku produkuje přibližně o 20 % méně emisí oxidů dusíku. Ačkoliv v grafem nebyly u vodíku vyznačeny emise oxidů dusíku způsobené provozem vozidla, tak produkovány byly, avšak v tak nízkém množství, že v grafu nebyly vyznačeny.

Obr. 13 Produkce emisí NO_x pro jednotlivé druhy paliv [14]

2.8 SHRnutí WELL-TO-WHEELS

Porovnáním metody SMR a solární elektrolýzy bylo zjištěno, že metoda SMR produkuje podstatně větší množství emisí než solární elektrolýza, ale použití solární elektrolýzy pro výrobu velkého množství vodíku je nereálné, jelikož elektrolýza spotřebuje velké množství elektrické energie. Napájení Elektrolýzy ze sítě by zvýšilo produkci emisí nad úroveň produkce emisí metody SMR. 1 kilogram vodíku vyrobený elektrolýzou spotřebuje 53 kWh [26] elektrické energie a výroba 1 kWh elektrické energie vyprodukuje v průměru zemí Evropské unie přibližně 250 gramů oxidu uhličitého [27]. To ve výsledku znamená vyprodukování přibližně 13,3 kilogramů oxidu uhličitého na 1 kilogram vyrobeného vodíku. Metoda SMR vyprodukuje přibližně 9 kilogramů oxidu uhličitého na 1 kilogram vodíku [28].

Z důvodu velice nízké hodnoty hustoty vodíku při atmosférickém tlaku je jeho přeprava komplikovanější než u normálních paliv. Proto byly zvoleny dvě možnosti, a to vodík stlačený na 50 MPa, který se dá převážet v trubkovém návěsu, nebo převoz zkapalnělého vodíku, jež lze převézt v kryogennickém tankeru. Po kompletním spočítání veškeré energie potřebné pro přepravu 1 kg vodíku vyjde na 4,42 kWh pro plynný a 12,55 kWh pro zkapalnělý vodík [14]. Zkapalnělý vodík proto vykazoval zvýšenou produkci emisí oproti vodíku plynnému a stlačenému na 350 bar [14].

Celkové emise jsou závislé na zdrojích elektrické energie. Pro porovnání byl použit model totožný se zdroji elektrické energie ze Spojených států amerických z roku 2018, kde se více než 60 % elektrické energie vyrobilo z neobnovitelných zdrojů.

Rozdíly tvorby emisí při použití vozů Mazda 3 a Toyota Mirai se výrazně liší, jelikož Mazda 3 používá zážehový spalovací motor, který produkuje oxidy dusíku, oxid uhelnatý i skleníkové plyny. Naproti tomu Toyota Mirai používá palivové články, čímž neprodukuje žádné škodlivé emise.

V Obr. 11, Obr. 12 a Obr. 13 lze vidět srovnání množství vyprodukovaných emisí jednotlivých druhů a celkovou spotřebu energie pro benzin, plynný a kapalný vodík vyrobený metodou SMR a plynný i kapalný vodík vyprodukovaný solární elektrolýzou. V předchozích odstavcích bylo zjištěno, že transport vodíku v kapalném stavu je energeticky náročnější a metoda SMR produkuje mnohem více emisí než solární elektrolýza. Srovnání provozu na benzin a provozu na kapalný vodík vyrobený pomocí metody SMR je velice zajímavé, jelikož jsou hodnoty vyprodukovaných emisí v těchto případech velice podobné. Z toho vyplývá, že se kombinace produkce vodíku metodou SMR a jeho převozu v kapalném stavu nevyplatí. Metodu SMR lze tedy efektivně využít pouze v případě převozu vodíku v plynném stavu. Produkce vodíku solární elektrolýzou vytvoří mnohem méně emisí, než benzin i metoda SMR, tudíž ji lze v obou případech přepravy vodíku považovat za ekologičtější.

3 SIMULACE

Simulace, ve které byl porovnáván zážehový motor spalující vodík s konvenčním benzinovým zážehovým motorem, byla provedena v programu Gt-suite. Byly zkoumány výkonové parametry (průběh výkonu a točivého momentu), měrná spotřeba paliva a produkce emisí oxidů dusíku. Dále byl zkoumán průběh tlaku ve válci během spalování a jejich srovnání, zda odpovídají teorii v rešeršní části.

Pro testování byl zvolen experimentální čtyřdobý jednoválcový motor z knihovny programu. Jeho vrtání je 86 mm, zdvih 86,07 mm. Zdvihový objem tak odpovídá hodnotě 0,5 litru.

Kompresní poměr pro benzinový motor s nepřímým vstřikem paliva byl nastaven na 9,5:1, aby nedocházelo k detonačnímu spalování. Při použití přímého vstřiku paliva byl kompresní poměr navýšen na 10,5:1. U vodíkového motoru byl nastaven na 12,5:1.

3.1 VSTUPNÍ PARAMETRY

- Okolní atmosféra tvořena vzduchem
- Teplota okolního prostředí: 300 K
- Atmosférický tlak: 100 hPa

3.1.1 VSTUPNÍ PARAMETRY BENZÍNOVÉHO SPALOVACÍHO MOTORU

Jako palivo byl zvolen benzín, jehož hustota je 739 kg/m^3 , oktanové číslo je 97,5 RON a stechiometrický poměr je 14,575:1.

Dalšími důležitými parametry, které významně ovlivňují spalování, jsou úhel natočení klikového hřídele, kdy je spáleno 50 % paliva, které je pro benzín 8° . Druhým důležitým parametrem je rozpětí mezi 10 a 90 % spáleného paliva, taktéž v úhlu natočení klikového hřídele, který je pro benzín 25° . Posledním parametrem je Wiebeho exponent, který určuje průběh spalování paliva. Tento exponent je pro benzin roven 2.

3.1.2 VSTUPNÍ PARAMETRY VODÍKOVÉHO SPALOVACÍHO MOTORU

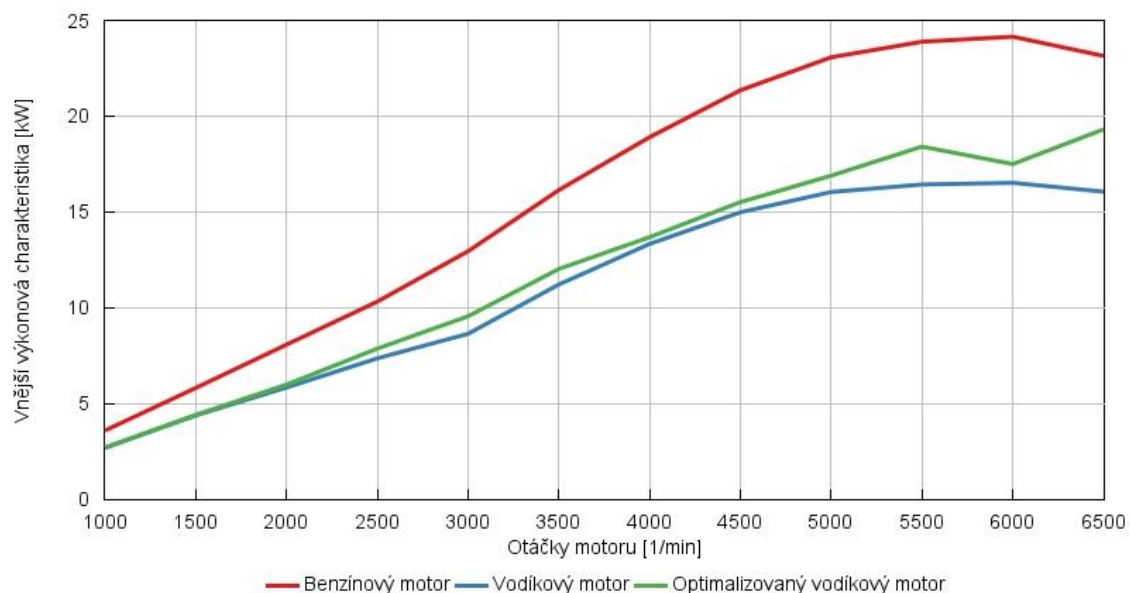
Jako palivo byl zvolen plynný vodík. Jeho vlastnosti již byly popsány v kapitole 1.2.1. Byla zvolena stechiometrická směs ($\lambda = 1$), aby bylo možno výsledky porovnat s konvenčním zážehovým motorem spalujícím benzín.

Parametry modelu spalování byly převzaty z experimentálního vodík spalujícího motoru z knihovny Gt-Suite. Úhel natočení klikového hřídele při 50 % spálené směsi měl hodnotu $15,5^\circ$, rozpětí mezi 10 až 90 % spálení paliva činil $6,2^\circ$ a Wiebeho exponent byl roven 1.

3.2 SPALOVACÍ MOTOR S NEPŘÍMÝM VSTŘIKEM PALIVA

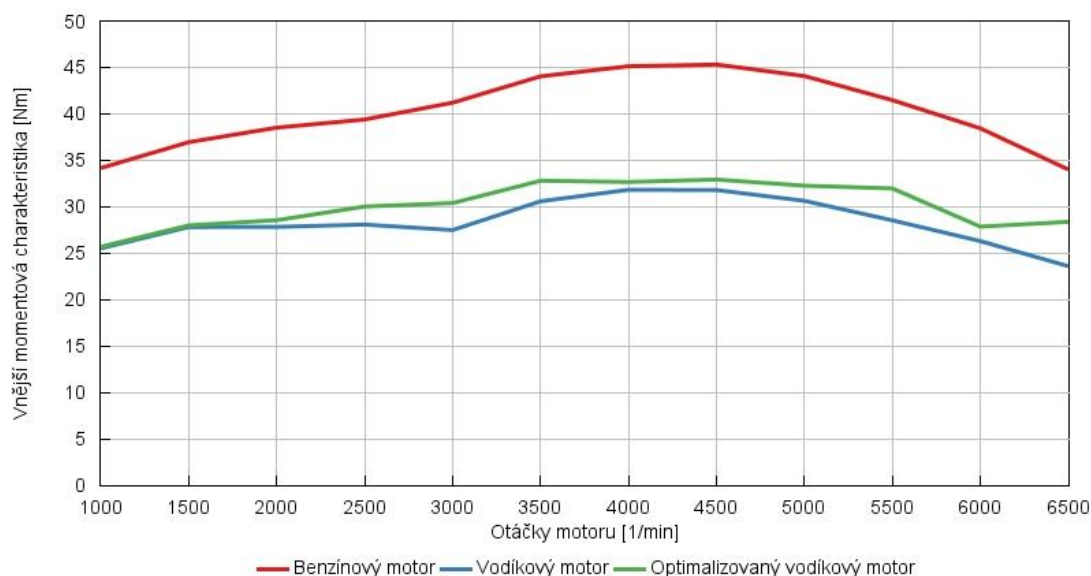
Optimalizovanými parametry vodíkového motoru byly počátek vstřiku paliva, který se pohyboval v rozmezí 340 a 450 stupni pro motor s nepřímým a mezi 400 a 600 stupni po spalovací horní úvrati pro vodíkový motor s přímým vstřikem paliva, a součinitel λ , kterému bylo umožněno se volně pohybovat v rozmezí hodnot 0,8 až 5. Simulace však vyhodnotila, že pro minimalizaci produkce emisí oxidů dusíku byla optimální hodnota $\lambda = 0,8$. Manuálním zvýšením hodnoty lambda docházelo k nárůstu vyprodukovaných emisí oxidů dusíku. Mezi hodnotami lambda 2 a 5 byl tento nárůst lineární, což neodpovídalo teorii. Důvodem mohla být nekompletní licence programu Gt-Suite, kde nedocházelo k propracovaným výpočtům spalovacího procesu.

Optimalizace proběhla se zaměřením primárně na co nejnižší emise oxidů dusíku, sekundárně na nejnižší možnou spotřebu paliva a nejvyšší možný výkon.



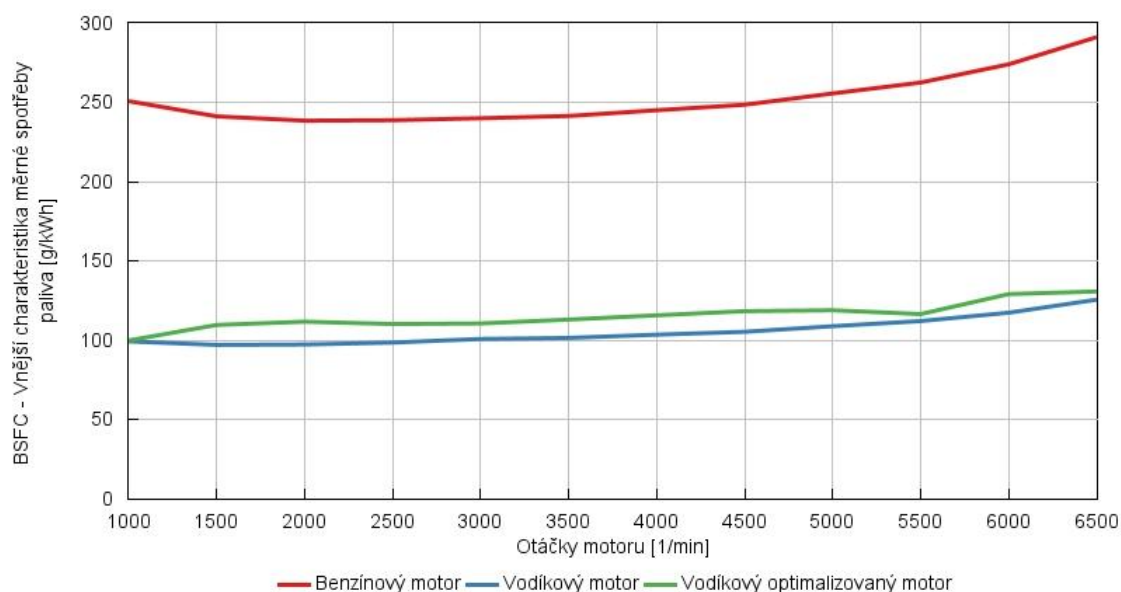
Obr. 14 Srovnání průběhu výkonu benzínového a vodíkového motoru s nepřímým vstřikem paliva

V Obr. 14 lze vidět srovnání průběhu výkonu motoru spalujícího benzín a vodík. Vodíkový motor byl následně optimalizován. Průběh i maximální hodnota výkonu u optimalizovaného vodíkového motoru byl zlepšen, ačkoliv stále nedosahoval hodnot benzínového motoru, nýbrž hodnot přibližně o 25 % nižších. Toto odpovídá snížení plnicí účinnosti v teoretické části práce.



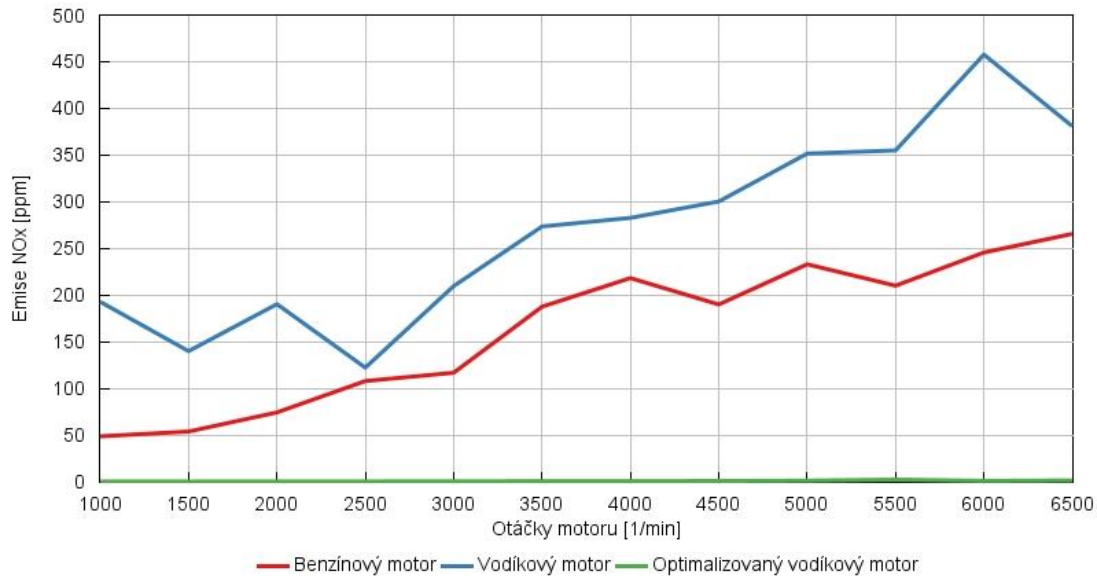
Obr. 15 Srovnání průběhu točivého momentu benzínového a vodíkového motoru s nepřímým vstřikem paliva

V Obr. 15 je znázorněn průběh točivého momentu motoru spalujícího benzín a motoru spalujícího vodík. Ani po optimalizaci nedosáhl vodík parametrů benzínového motoru, avšak došlo ke zlepšení průběhu točivého momentu zejména v první polovině otáčkového spektra.



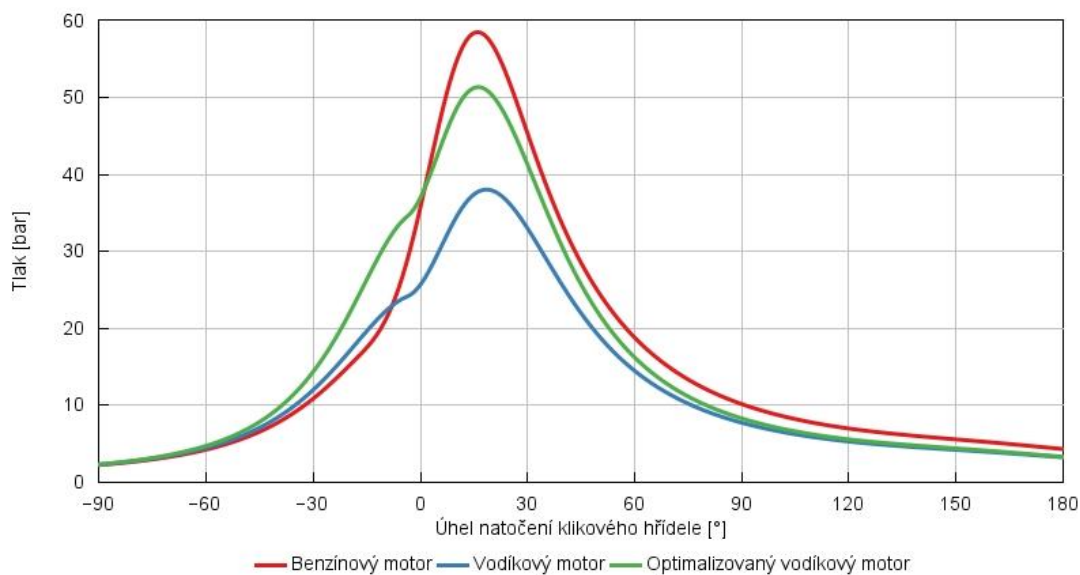
Obr. 16 Srovnání spotřeby paliva benzínového a vodíkového motoru s nepřímým vstřikem paliva

V obr. 16 je možné vidět měrnou spotřebu paliva benzínového a vodíkového motoru. Zvýšený kompresní poměr měl za následek nižší měrnou spotřebu paliva v celém otáčkovém spektru. Po optimalizaci došlo k mírnému nárůstu měrné spotřeby v celém otáčkovém spektru. Došlo k tomu z důvodu optimalizace na minimalizaci produkce emisí oxidů dusíku.



Obr. 17 Srovnání produkce oxidů dusíku benzínového a vodíkového motoru s nepřímým vstřikem paliva

Na Obr. 17 lze vidět, že produkce emisí oxidů dusíku je u vodíkového motoru před optimalizací vyšší než u benzínového motoru. Po optimalizaci se produkce emisí vodíkového motoru snížila téměř na nulu. Maximální hodnota dosahovala přibližně 2,5 ppm, což je stokrát méně než u benzínového motoru.

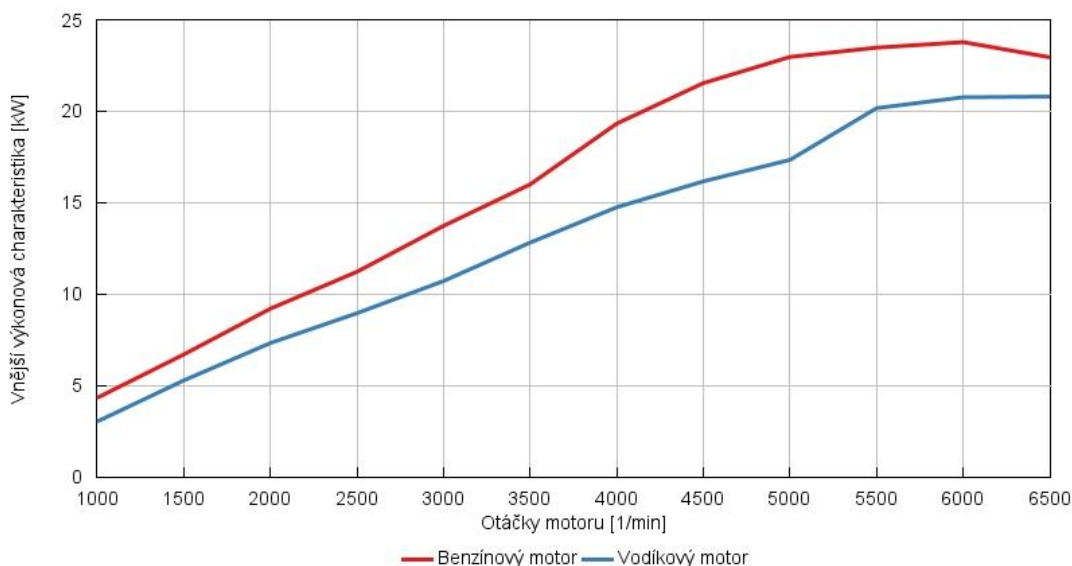


Obr. 18 Srovnání průběhu tlaku ve spalovacím prostoru v závislosti na natočení klikového hřídele benzínového a vodíkového motoru s nepřímým vstřikem paliva

V Obr. 18 je možné vidět průběh tlaku ve spalovacím prostoru v závislosti na natočení klikového hřídele. V rešeršní části bylo zjištěno, že vodík má vyšší rychlost šíření plamene, což se potvrdilo i v simulaci, kdy tlak u optimalizovaného motoru narůstá výrazně dříve než u motoru spalujícího benzin.

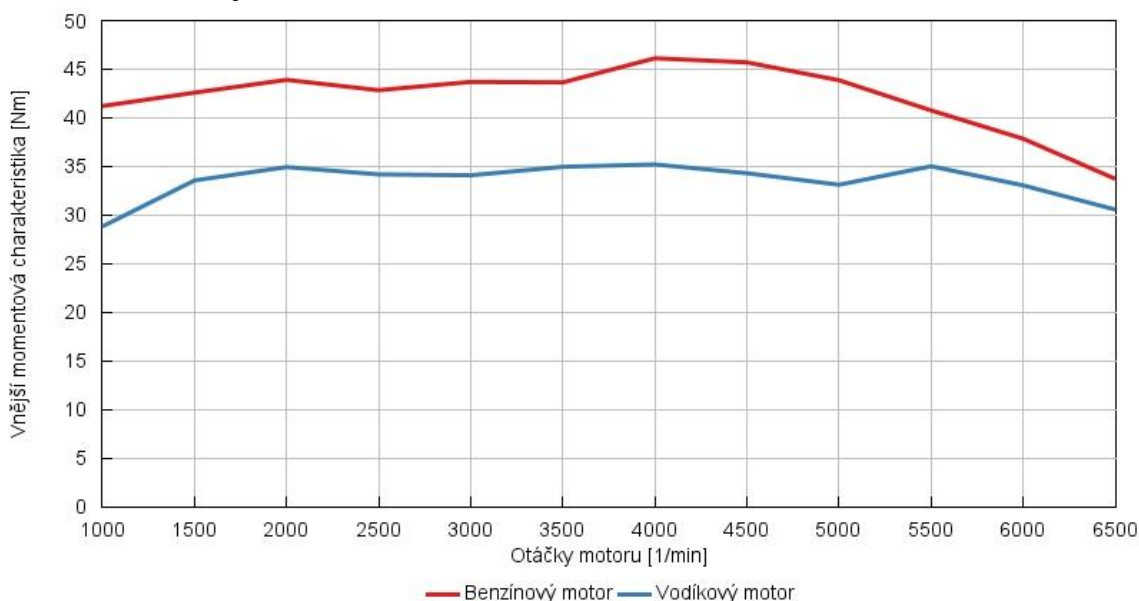
3.2.1 OPTIMALIZACE MOTORU S NEPŘÍMÝM VSTŘIKEM PALIVA A VARIABILNÍM ČASOVÁNÍM VENTILŮ

Variabilní časování ventilů bylo implementováno tak, aby se vačkové hřídele mohly natáčet kontinuálně, nezávisle na sobě a nezávisle na klikovém hřídeli. Standartní časování sacího vačkového hřídele byl 239 stupňů po zažehovací horní úvrati. Pohyb byl umožněn mezi 210 a 250 stupni. Původní časování výfukového vačkového hřídele bylo 159 stupňů po zažehovací horní úvrati a pohyb byl umožněn mezi 150 a 180 stupni.



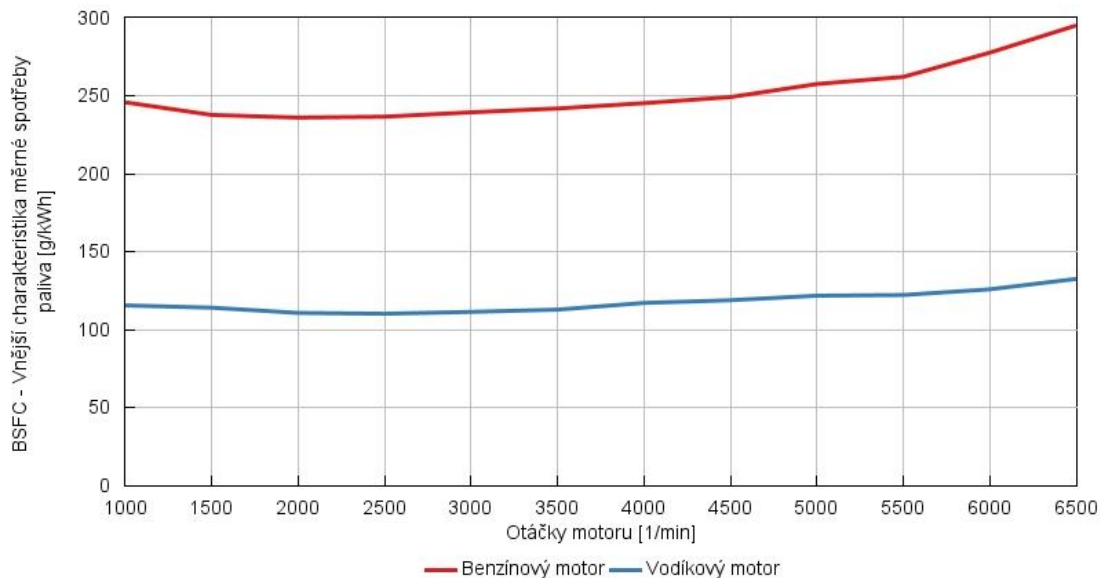
Obr. 19 Srovnání průběhu výkonu benzínového a vodíkového motoru s nepřímým vstřikem paliva s variabilním časováním ventilů

Na Obr. 19 lze vidět průběh výkonu motoru s oběma typy paliv po implementaci systému variabilního časování ventilů. V obou případech došlo k navýšení výkonu zejména v první polovině otáčkového spektra. U vodíkového motoru došlo i k nárustu maximálního výkonu, avšak stále nedosahuje hodnot benzínového motoru.



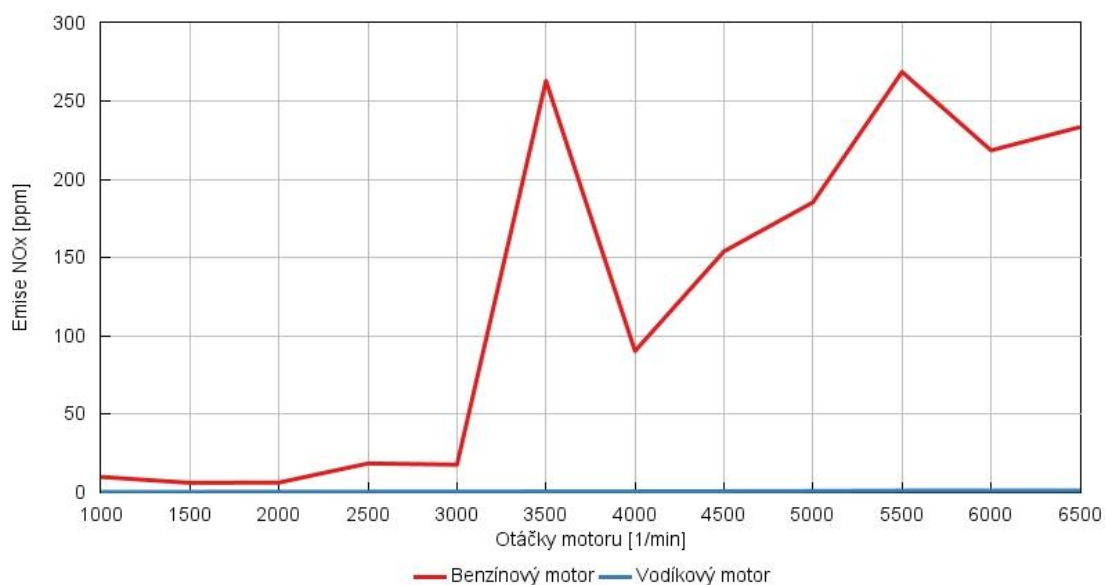
Obr. 20 Srovnání průběhu točivého momentu benzínového a vodíkového motoru s nepřímým vstřikem paliva s variabilním časováním ventilů

Obr. 20 znázorňuje průběh točivého momentu vodíkového a benzínového motoru po optimalizaci s variabilním časováním ventilů. V grafu je patrné vyhlazení průběhu momentu v celém otáčkovém spektru pro benzínový i vodíkový motor. Dále je patrné, že se hodnoty momentu vodíkového motoru přiblížily hodnotám motoru benzínového a zcela zmizela oblast do 3500 otáček za minutu, kde byl moment výrazně nižší než ve zbytku otáčkového spektra.



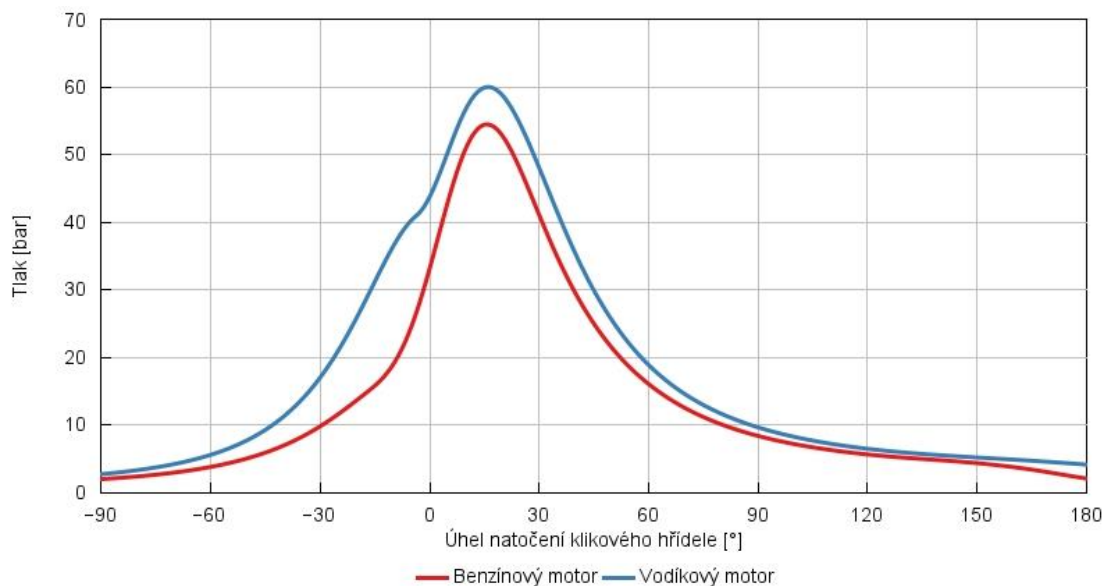
Obr. 21 Srovnání měrné spotřeby paliva benzínového a vodíkového motoru s nepřímým vstřikem paliva s variabilním časováním ventilů

Obr. 21 ukazuje, že po implementaci variabilního časování ventilů došlo u vodíkového motoru ke snížení měrné spotřeby paliva. U benzínového motoru došlo naopak k jejímu mírnému zvýšení.



Obr. 22 Srovnání produkce emisí oxidů dusíku benzínového a vodíkového motoru s nepřímým vstřikem paliva s variabilním časováním ventilů

Na Obr. 22 je možné srovnat produkci emisí oxidů dusíku benzínového a vodíkového motoru. Z grafu je patrné, že implementace variabilního časování ventilů nezvýšilo produkci emisí oxidů dusíku vodíkového motoru. U benzínového motoru se však nad 3000 otáček za minutu produkce zvedla. Pod touto hranicí je výrazně vyšší. V běžném provozu by tak nemuselo dojít k nárůstu produkovaných emisí oxidů dusíku, jelikož je málokdy motor vytáčen nad tuto úroveň.



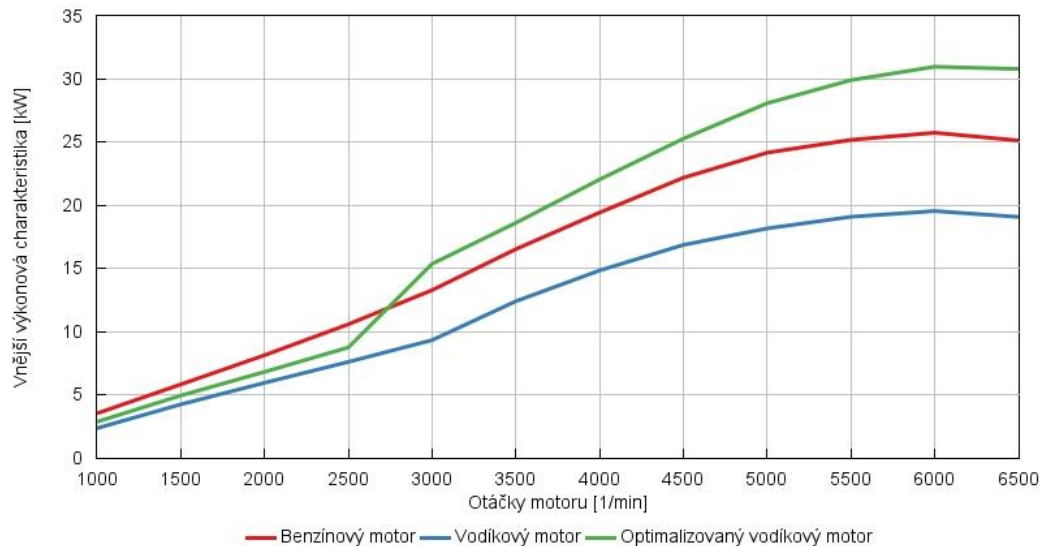
Obr. 23 Srovnání průběhu tlaku v závislosti na úhlu natočení klikového hřídele benzínového a vodíkového motoru s nepřímým vstřikem paliva s variabilním časováním ventilů

Na Obr. 23 je možné vidět, že i nadále je nárůst tlaku vodíkového motoru rychlejší, ale po implementaci variabilního časování ventilů došlo k překonání maxima benzínového motoru.

3.3 SPALOVACÍ MOTOR S PŘÍMÝM VSTŘIKEM PALIVA

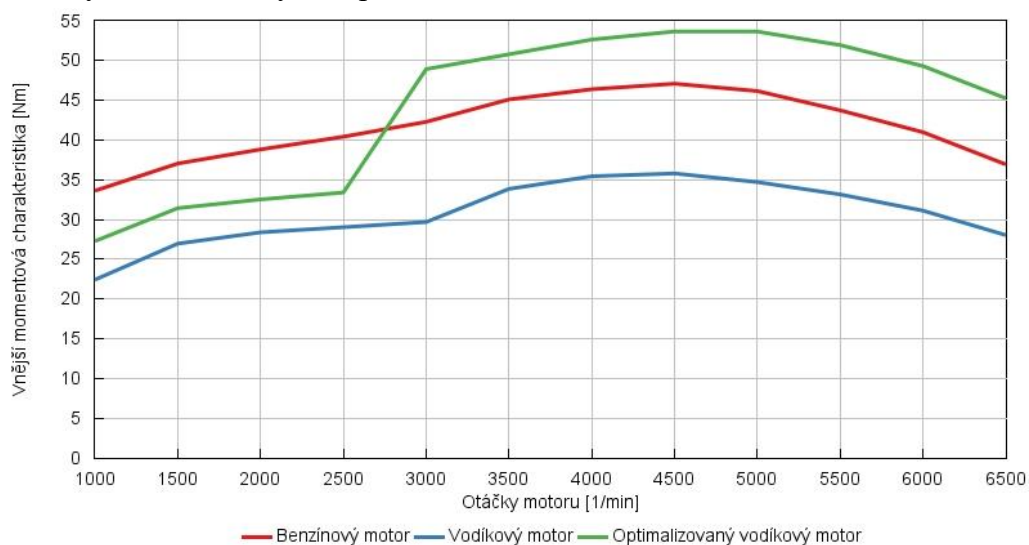
Pro optimalizaci byly zavedené stejné hodnoty jako u motoru s nepřímým vstřikem paliva. I zde došlo k nastavení hodnoty lambda na 0,8.

Optimalizace proběhla s primárním zaměřením na minimalizaci emisí oxidů dusíku. Sekundárním zaměřením bylo snížení spotřeby paliva a zvýšení výkonu motoru



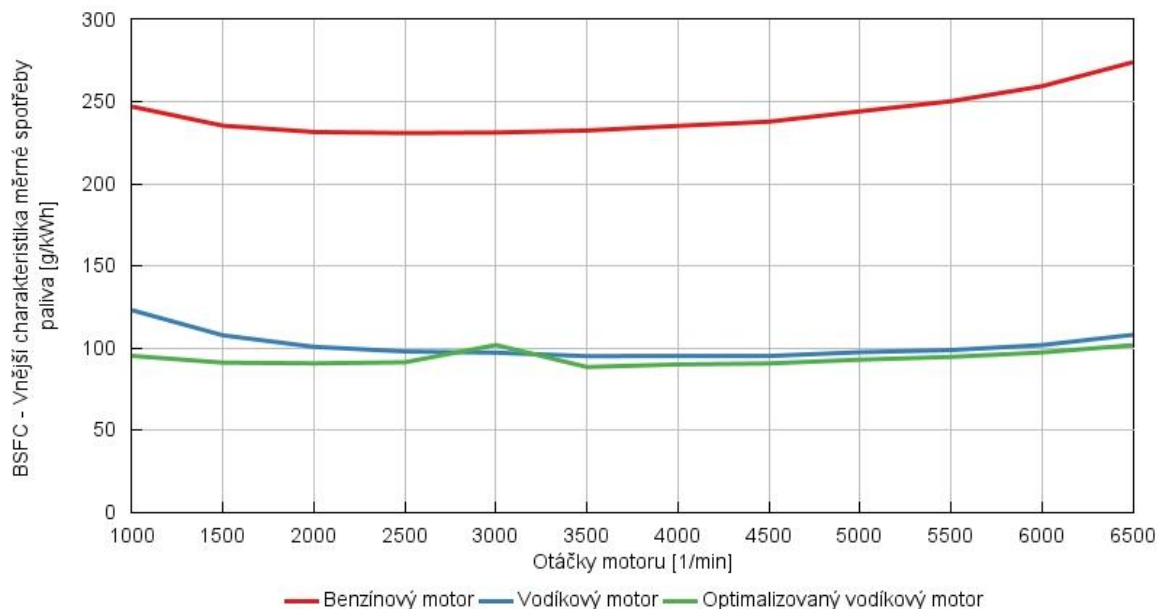
Obr. 24 Srovnání průběhu výkonu benzínového a vodíkového motoru s přímým vstřikem paliva

V Obr. 24 lze porovnat průběh výkonu benzínového a vodíkového motoru. Vodíkový motor před optimalizací nedosahuje výkonových parametrů benzínového motoru. To je způsobeno počátkem vstřiku nastaveným na horní úvrať na začátek sacího cyklu. Vodík tedy vyplňuje válec a snižuje plnicí účinnost motoru. Po optimalizaci vodíkového motoru došlo k výraznému zvýšení výkonu zejména nad 2500 otáčkami za minutu, kde vodíkový motor dosáhl vyššího výkonu než motor benzínový. To bylo způsobeno vstřikováním vodíku po zavření sacího ventilu, čímž bylo dosaženo vysoké plnicí účinnosti.



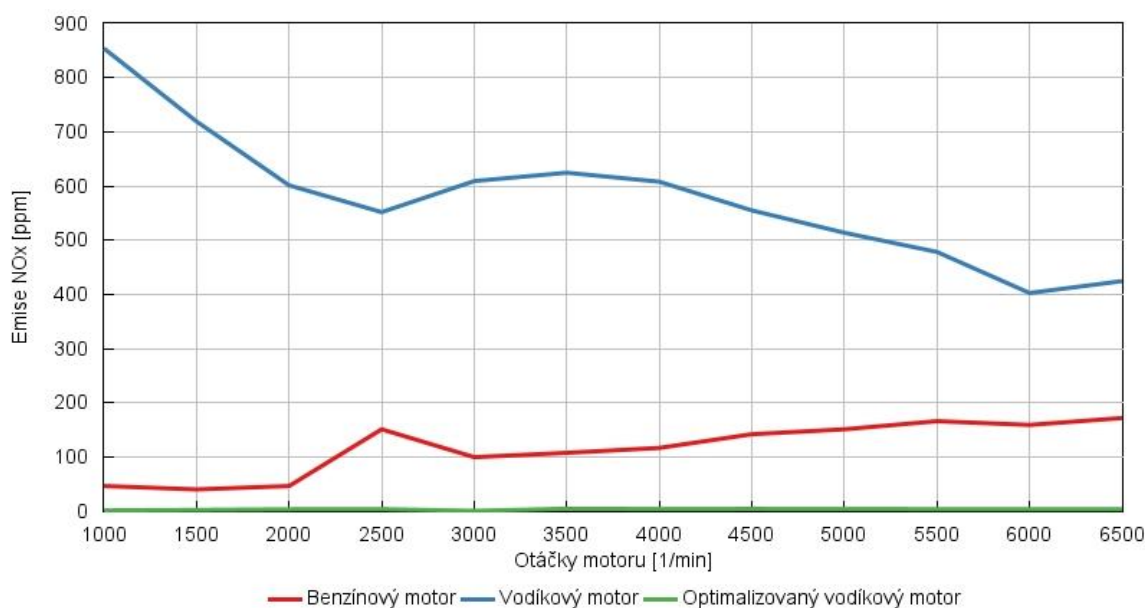
Obr. 25 Srovnání průběhu točivého momentu benzínového a vodíkového motoru s přímým vstřikem paliva

Obr. 25 znázorňuje průběh točivého momentu benzínového a vodíkového motoru. Změny odpovídají v grafu průběhu výkonu. U optimalizovaného vodíkového motoru je prudký nárůst točivého momentu po překonání 2500 otáček za minutu. Tato změna je nevhodná pro použití do silničního provozu, a proto by bylo vhodné průběh momentu dále optimalizovat.



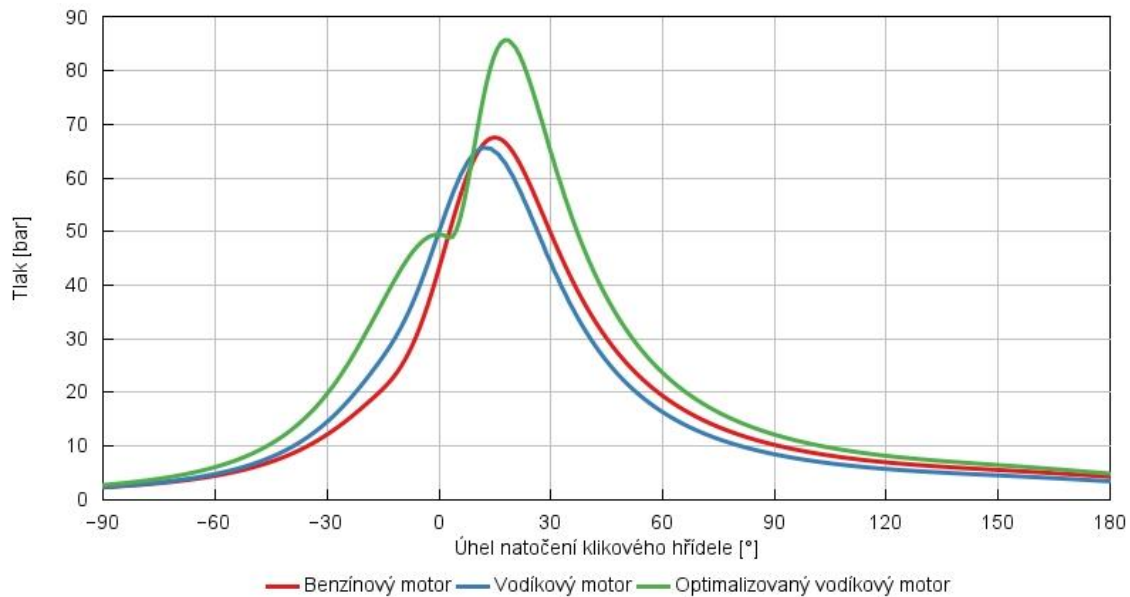
Obr. 26 Srovnání měrné spotřeby paliva mezi motorem benzínového a vodíkového motoru s přímým vstřikem paliva

Na Obr. 26 je srovnání měrné spotřeby paliva benzínového a vodíkového motoru. Vodíkový motor, stejně jako u vodíkového motoru s nepřímým vstřikem paliva, zde dosahuje nižší měrné spotřeby paliva než motor benzínový. Po optimalizaci tato měrná spotřeba dále klesla, převážně v oblasti do 2500 otáček za minutu.



Obr. 27 Srovnání produkce emisí oxidů dusíku benzínového a vodíkového motoru s přímým vstřikem paliva

Obr. 27 obsahuje graf srovnání produkce emisí oxidů dusíku v závislosti na otáčkách benzínového a vodíkového motoru. V tomto grafu lze vidět, že vodíkový motor s přímým vstřikem paliva před optimalizací produkuje výrazně více emisí oxidů dusíku než benzínový motor. Po optimalizaci se produkce emisí oxidů dusíku benzínového motoru blíží opět nule. Maximální naměřená hodnota byla 4,4 ppm.

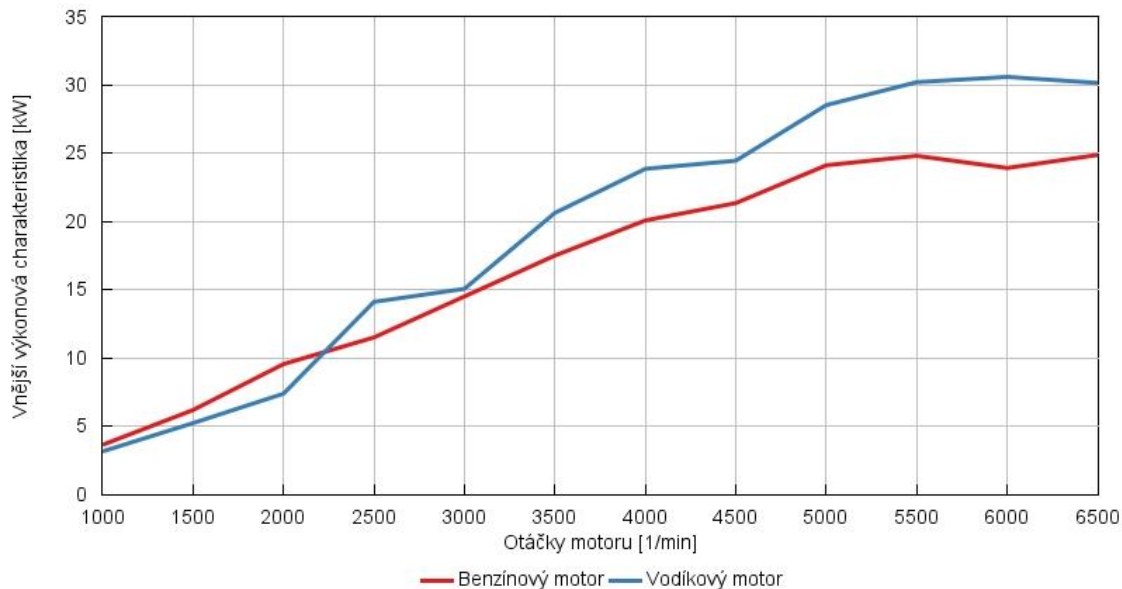


Obr. 28 Srovnání průběhu tlaku v závislosti na úhlu natočení klikového hřídele benzínového a vodíkového motoru s přímým vstřikem paliva

Na Obr. 28 lze vidět srovnání průběhu tlaku ve spalovacím prostoru v závislosti na úhlu natočení klikového hřídele benzínového a vodíkového motoru. Nárůst tlaku u optimalizovaného vodíkového motoru započal dříve, dosáhl vyššího maxima a dané maximum se nacházelo o 3 stupně později za horní úvratí než u benzínového motoru. To potvrzuje tvrzení o rychlejším šíření plamene v rešeršní části.

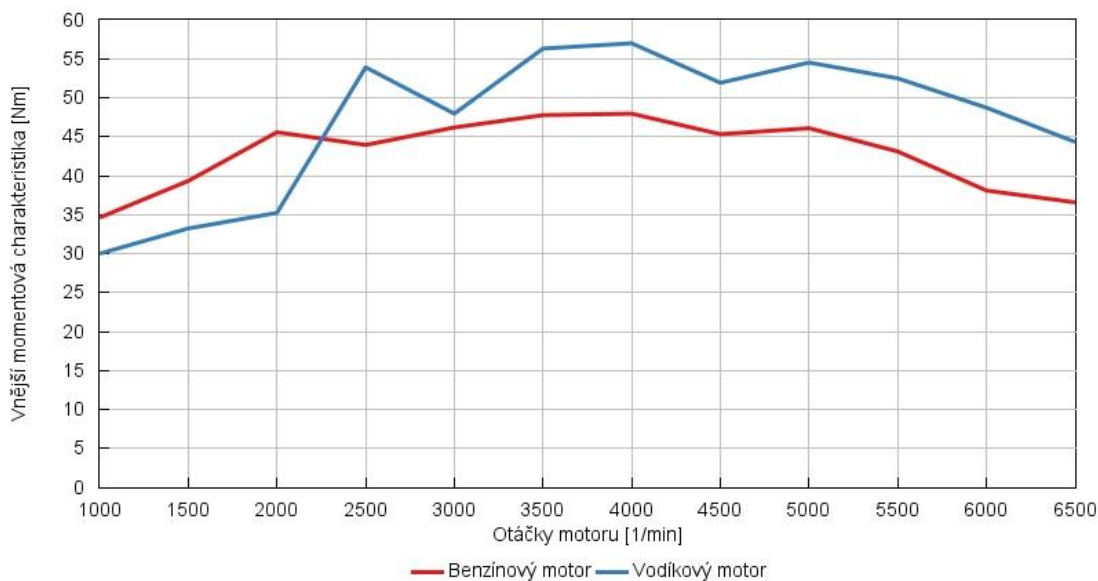
3.3.1 OPTIMALIZACE MOTORU S PŘÍMÝM VSTŘIKEM PALIVA A VARIABILNÍM ČASOVÁNÍM VENTILŮ

Variabilní časování ventilů bylo v případě motoru s přímým vstřikem paliva zavedeno stejně jako u motoru s nepřímým vstřikem paliva.



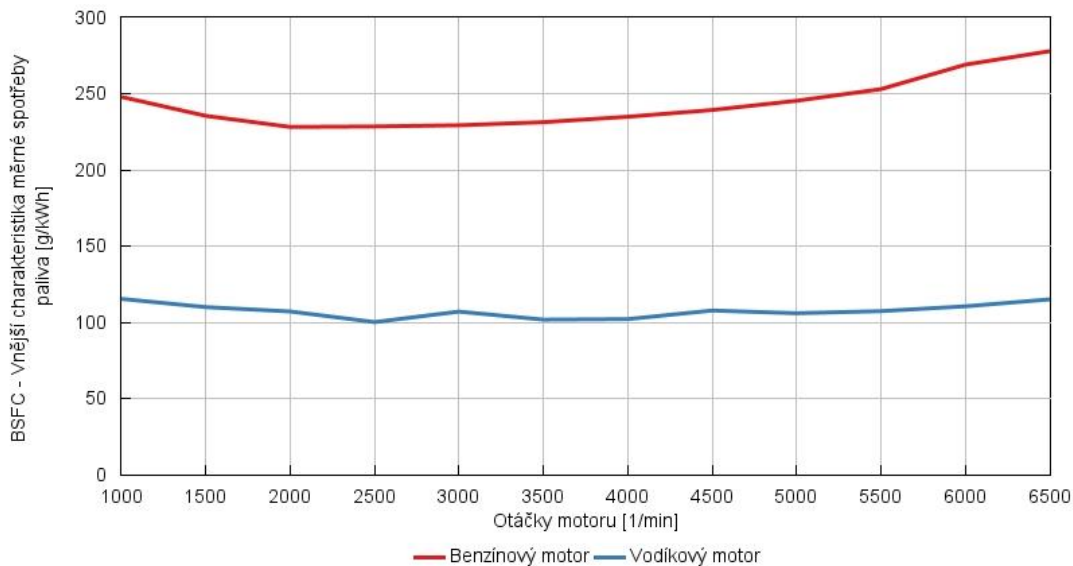
Obr. 29 Srovnání průběhu výkonu benzínového a vodíkového motoru s přímým vstřikem paliva s variabilním časováním ventilů

Na obr. 29 je znázorněn průběh výkonu vodíkového a benzínového motoru s přímým vstřikem paliva po implementaci systému variabilního časování ventilů. U vodíkového motoru došlo ke zlepšení v celém otáčkovém spektru, zejména v oblasti před dosažením 3000 otáček za minutu, kde již není tak výrazný nárůst výkonu s rostoucími otáčkami. U benzínového motoru došlo k mírnému snížení maximálního výkonu.



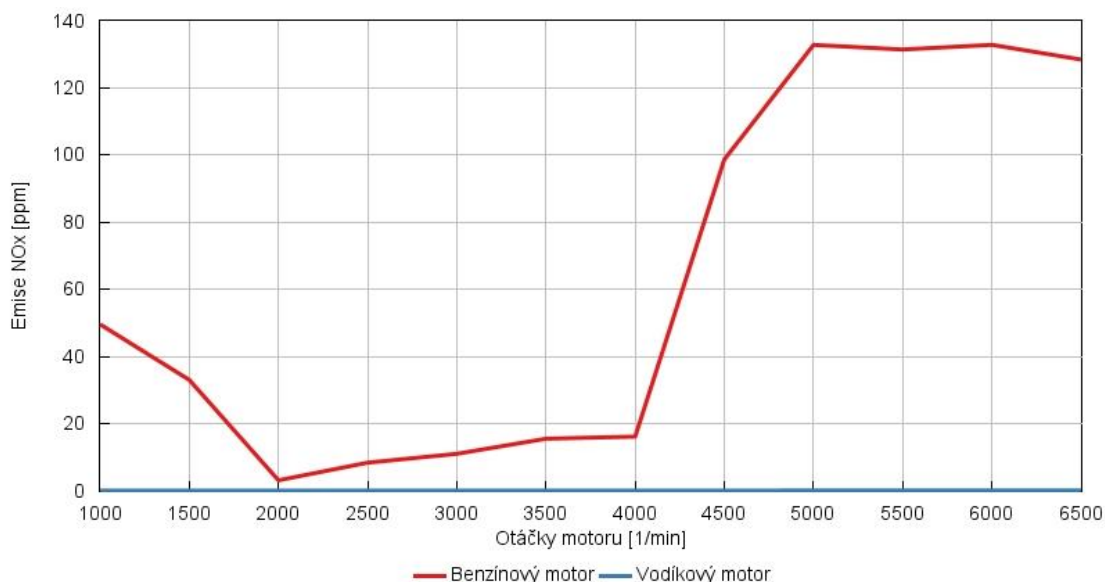
Obr. 30 Srovnání průběhu točivého momentu benzínového a vodíkového motoru s přímým vstřikem paliva s variabilním časováním ventilů

Obr. 30 znázorňuje nárůst momentu po implementaci variabilního časování ventilů, kdy je patrný nárůst točivého momentu u obou použitých paliv, a to zejména v nízkých otáčkách. Po překročení 2250 otáček za minutu dosahoval motor spalující vodík vyšších hodnot než motor benzínový.



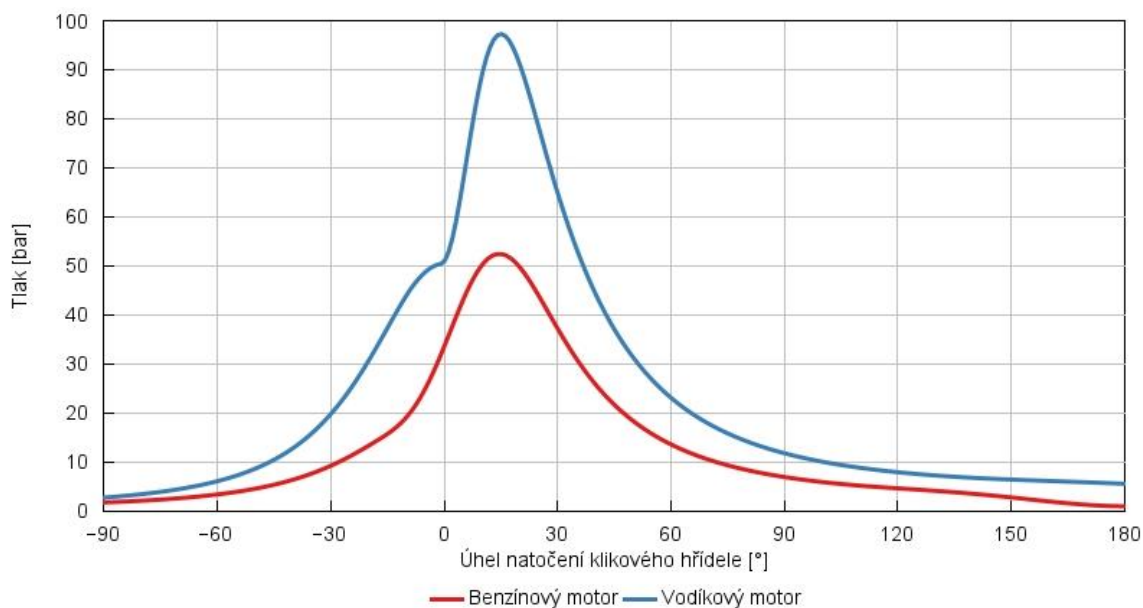
Obr. 31 Srovnání měrné spotřeby paliva benzínového a vodíkového motoru s přímým vstřikem paliva s variabilním časováním ventilů

Na Obr. 31 lze vidět, že implementace variabilního časování ventilů neznamena výraznou změnu spotřeby paliva benzínového motoru. Vodíkový motor zaznamenal mírný nárůst měrné spotřeby paliva, avšak stále je spotřeba paliva méně než poloviční než u benzínového motoru.



Obr. 32 Srovnání produkce emisí oxidů dusíku benzínového a vodíkového motoru s přímým vstřikem paliva s variabilním časováním ventilů

Obr. 32 poukazuje, stejně jako u motoru s nepřímým vstřikem paliva, na snížení produkce emisí benzínového motoru v první polovině otáčkového spektra. Vodíkový motor také zaznamenal mírné snížení produkce emisí oxidů dusíku a přiblížil se tak ještě více bezemisnímu provozu.



Obr. 33 Srovnání tlaku ve spalovacím prostoru benzínového a vodíkového motoru s přímým vstřikem paliva s variabilním časováním ventilů

Na Obr. 33 je znázorněn průběh tlaku ve válci při použití obou paliv. U vodíkového motoru došlo opět k rychlejšímu nárůstu tlaku a maximální tlak dosáhl přibližně o 90 % vyšší hodnoty než tlak benzínového motoru. Tento nárůst není úměrný nárůstu výkonu a vyžaduje použití výrazně pevnějších materiálů.

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo studium současných řešení na trhu a případně ještě neuvedených prototypů, porovnání vodíku s běžnými palivy, popis celého procesu Well-to-wheels výroby vodíku a jeho současné omezení, praktický příklad srovnání vodíkového spalovacího motoru s motorem spalujícím benzín a kritické zhodnocení.

Vodík byl srovnán s dalšími typy paliv z chemického hlediska, kde byla analyzována hustota, energie potřebná k zážehu, stechiometrický poměr, výhřevnost, oktánové číslo a rychlost šíření plamene. Zde bylo zhodnoceno, že je i přes svou velmi nízkou hustotu schopen díky své vysoké výhřevnosti pohánět spalovací motor s výkonovými parametry srovnatelnými s konvenčními spalovacími motory.

Dále byl vodík zhodnocen z hlediska využití ve vznětovém a zážehovém spalovacím motoru, kde byl vyhodnocen jako nevhodný pro vznětový motor, avšak pro motor zážehový jej lze po dodatečných úpravách aplikovat.

Ve Well-to-wheels srovnání, kde byl porovnáván vodík s benzínem z hlediska spotřeby energie a produkce emisí, bylo zjištěno, že produkce vodíku metodou SMR dosahovala podobných hodnot spotřeby energie a produkce emisí jako konvenční produkce a spalování benzínu. Metoda výroby solární elektrolýzou naopak produkovala emise pouze v případě přepravy vodíku a výsledné hodnoty tak byly výrazně nižší než hodnoty konvenčního spalovacího motoru i vodíkového pohonu s produkcí metodou SMR. Solární elektrolýza je ale metoda nevhodná pro velkoobjemovou výrobu. Produkce emisí a spotřeba energie klasické elektrolýzy dosahovala hodnot převyšující ty, které vznikly použitím metody SMR.

Srovnání benzínového a vodíkového spalovacího motoru proběhlo v programu Gt-suite, kde byl použit ukázkový zkušební jednoválcový čtyřtaktní motor o objemu 0,5 litru. Motory byly vytvořené dva, s nepřímým a přímým vstřikem paliva. Po optimalizaci motoru s nepřímým vstřikem paliva nebylo u vodíkového motoru dosaženo výkonových parametrů motoru benzínového a produkce emisí oxidů dusíku vodíkového motoru byly velmi nízké. U motoru s přímým vstřikem paliva výkonové parametry vodíkového motoru paliva převyšovaly hodnoty motoru benzínového. Emise oxidů dusíku byly opět výrazně nižší.

Dalším postupem by bylo provedení simulace v plné licenci programu, která má simulovaný detailní model spalování, jelikož při ochuzení směsi došlo k výraznému nárůstu produkce emisí oxidů dusíku i přes použití hodnoty lambda 5. Následovalo by měření reálného motoru a jeho optimalizace.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] BACCINI, Federico. Watered-down agreement on new Euro 7 standards gains support from European Parliament. *Eunews* [online]. 2023 [cit. 2024-03-29]. Dostupné z: [https://www.eunews.it/en/2024/03/13/euro-7-standards-european-parliament/#:~:text=Regarding%20limits%20for%20braking%20emissions,%2Fkm%20for%20other%20powertrains\).](https://www.eunews.it/en/2024/03/13/euro-7-standards-european-parliament/#:~:text=Regarding%20limits%20for%20braking%20emissions,%2Fkm%20for%20other%20powertrains).)
- [2] POPP, Dana. Euro 7: Deal on new EU rules to reduce road transport emissions. *European Parliament News* [online]. 2023 [cit. 2024-03-29]. Dostupné z: <https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20231207IPR15740/euro-7-deal-on-new-eu-rules-to-reduce-road-transport-emissions>
- [3] *Toyota Mirai*. Online. In: *Wikipedia: the free encyclopedia*. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-. [cit. 2024-05-09]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Toyota_Mirai.
- [4] Jak fungují palivové články? [online]. 2017. [cit. 2024-03-01]. Dostupné z: <https://elektro.tzb-info.cz/elektromotory-pohony-a-stroje/16987-jak-funguji-palivove-clanky>.
- [5] Princip palivového článku. [online]. [cit. 2024-03-20]. Dostupné z: <https://elektro.tzb-info.cz/elektromotory-pohony-a-stroje/16987-jak-funguji-palivove-clanky>
- [6] VERHELST, Sebastian a WALLNER, Thomas. Hydrogen-fueled internal combustion engines. [online]. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2009, roč. 35, č. 6, s. 490-527. ISSN 03601285. [cit. 2024-04-29]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.08.001>.
- [7] Fuels - Densities and Specific Volumes. [online]. [cit. 2024-04-22]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-densities-specific-volumes-d_166.html.
- [8] Compressed Natural Gas (CNG). [online]. [cit. 2024-03-03]. Dostupné z: [https://www.unitrove.com/engineering/gas-technology/compressed-natural-gas#:~:text=Compressed%20natural%20gas%20\(CNG\)%20is,m%C2%B3%20dependin g%20on%20the%20composition.](https://www.unitrove.com/engineering/gas-technology/compressed-natural-gas#:~:text=Compressed%20natural%20gas%20(CNG)%20is,m%C2%B3%20dependin g%20on%20the%20composition.)
- [9] GRONDIN, Gregory. Minimum Ignition Energy: MCA Annual Seminar. 2016. [online]. [cit. 2024-04-22]. Dostupné z: https://marinechemistassociation.com/wp-content/uploads/2018/09/Minimum_Ignition_Energy.pptx.
- [10] Stoichiometric Combustion Ratios [online]. [cit. 2024-03-03]. Dostupné z: <http://wiki.gekgasifier.com/w/page/6123822/Stoichiometric%20Combustion%20Ratios>
- [11] Heat Values of Various Fuels [online]. [cit. 2024-03-03]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/heat-values-of-various-fuels.aspx>
- [12] Important fuel specifications for Diesel Used In IC Engine [online]. [cit. 2024-03-03]. Dostupné z: <https://learnmech.com/fuel-specifications-diese/>

- [13] Fuel Properties Comparison. [online]. *Alternative Fuels Data Center*. [cit. 2024-04-22]. Dostupné z: <https://afdc.energy.gov/fuels/properties>.
- [14] LIU, Xiniu; REDDI, Krishna; ELGOWAINY, Amgad; LOHSE-BUSCH, Henning; WANG, Michael et al. Comparison of well-to-wheels energy use and emissions of a hydrogen fuel cell electric vehicle relative to a conventional gasoline-powered internal combustion engine vehicle. [online]. *International journal of hydrogen energy*. 2020, roč. 2020, č. 45, s. 972 - 983. [cit. 2024-02-27]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319919340650?via%3Dihub>.
- [15] Detailed Test Information [online]. 2017 [cit. 2024-03-01]. Dostupné z: https://www.fueleconomy.gov/feg/fe_test_schedules.shtml
- [16] Hydrogen Production: Natural Gas Reforming. *Office of energy efficiency & renewable energy* [online]. [cit. 2024-03-29]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-natural-gas-reforming>
- [17] Hydrogen Production: Electrolysis. *Office of energy efficiency & renewable energy* [online]. [cit. 2024-03-29]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis>
- [18] KOŁODZIEJCZYK, Bart. Seawater electrolysis: a hydrogen revolution or technological dud? Here are the numbers. Online. 2023. [cit. 2024-05-13]. Dostupné z: <https://www.weforum.org/agenda/2023/09/seawater-electrolysis-a-hydrogen-revolution-or-technological-dead-end-here-are-the-numbers/#:~:text=In%20reality%2C%20and%20due%20to,and%20type%20of%20technology%20used>.
- [19] BUDSBERG, Erik; CRAWFORD, Jordan; GUSTAFSON, Rick; BURA, Renata a PUETTMANN, Maureen. Ethanologens vs. acetogens: Environmental impacts of two ethanol fermentation pathways. Online. *Biomass and Bioenergy*. 2015, roč. 83, s. 23-31. ISSN 09619534. [cit. 2024-05-13]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.08.019>.
- [20] NI, Meng. An Overview of Hydrogen Storage Technologies. Online. 2006, roč. 24, č. 3, s. 197-209. ISSN 0144-5987. [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1260/014459806779367455>.
- [21] BEDNÁŘ, Marek. Česko má první veřejnou stanici k čerpání vodíku. Stojí v Ostravě [online]. 2022 [cit. 2024-04-09]. Dostupné z: <https://www.novinky.cz/clanek/auto-cesko-ma-prvni-verejnou-stanici-k-cerpani-vodiku-stoji-v-ostrove-40401553>
- [22] Hydrogen fuelling station with cryo pump technology. Efficiency at its best. [online]. [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: https://www.linde-engineering.com/en/images/DS_Cryo%20Pump_tcm19-523716.pdf.
- [23] ACAR, Canan a DINCER, Ibrahim. The potential role of hydrogen as a sustainable transportation fuel to combat global warming. [online]. *International journal of hydrogen energy*. 2020, roč. 2020, č. 45, s. 3396 - 3406. [cit. 2024-02-27]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319918333767?via%3Dihub>.

- [24] *Tesla Model 3*. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-. [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_Model_3.
- [25] SAVAGE, Jackie a Gloria ESPOSITO. Hydrogen Vehicle Well-to-Wheel GHG and Energy Study. *Office of energy efficiency & renewable energy* [online]. 2021. [cit. 2024-03-29]. Dostupné z: https://www.zemo.org.uk/assets/reports/Zemo_Hydrogen_Vehicle_Well-to-Wheel_GHG_and_Energy_Study_2021.pdf
- [26] *Electrolysis of water*. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-. [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Electrolysis_of_water#:~:text=As%20of%202022%2C%20commercial%20electrolysis,kWh%20\(HHV\)%20of%20energy](https://en.wikipedia.org/wiki/Electrolysis_of_water#:~:text=As%20of%202022%2C%20commercial%20electrolysis,kWh%20(HHV)%20of%20energy).
- [27] Greenhouse gas emission intensity of electricity generation. [online]. 2023. [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/co2-emission-intensity-14#tab-chart_7.
- [28] SUN, Pingping a ELGOWAINY, Amgad. Updates of Hydrogen Production from SMR Process in GREET® 2019. [online]. 2019. [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: https://greet.anl.gov/files/smr_h2_2019.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

<i>SMR</i>	Parní reformování methanu
<i>NiMH</i>	Nikl-metal hydrid, typ akumulátorového článku
<i>LPG</i>	Zkapalněný ropný plyn
<i>CNG</i>	Stlačený zemní plyn
<i>CH₄</i>	Metan
<i>CO₂</i>	Oxid uhličitý
<i>CO</i>	Oxid uhelnatý
<i>NO_x</i>	Oxidy dusíku
<i>AKI</i> [-]	Index odolnosti vůči klepání
<i>RON</i> [-]	Výzkumné oktanové číslo
λ [-]	Směšovací poměr hmotnosti paliva ve směsi ku vzduchu a teoretickému množství vzduchu
Φ [-]	Směšovací poměr hmotnosti vzduchu ve směsi ku palivu a teoretickému množství vzduchu
<i>ppm</i> [-]	Počet částic na 1 milion