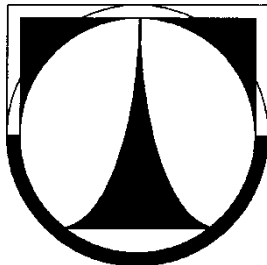


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra vozidel a motorů



OBOHACOVÁNÍ PALIVOVÉ SMĚSI VODÍKEM U

VZNĚTOVÝCH MOTORŮ

ENRICHMENT OF FUEL MIXTURES WITH HYDROGEN IN

DIESEL ENGINES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Jiří Suchánek

Květen 2011

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra vozidel a motorů



Program: B2341 - Strojírenství

Obor : 2301R022 – Stroje a zařízení

Zaměření: Dopravní stroje a zařízení

**OBOHACOVÁNÍ PALIVOVÉ SMĚSI VODÍKEM U
VZNĚTOVÝCH MOTORŮ
ENRICHMENT OF FUEL MIXTURES WITH
HYDROGEN IN DIESEL ENGINES**

Bakalářská práce

KVM – BP – 213

Jiří Suchánek

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Celestýn Scholz, Ph.D., TU v Liberci, KVM

Konzultant bakalářské práce: Ing. Petr Starý, TU v Liberci, KVM

Počet stran: 62

Počet obrázků: 16

Počet příloh: 1

Počet výkresů: 3

Květen 2011

Místo pro vložení originálního zadání DP (BP)

OBOHACOVÁNÍ PALIVOVÉ SMĚSI VODÍKEM U VZNĚTOVÉHO MOTORU

Anotace

V první části práce jsem shrnul současný stav výzkumu a vývoje v oblasti obohacování palivové směsi vodíkem. V druhé části práce jsem se zabýval zkouškami prováděnými v laboratořích TUL. V závěru shrnuji výsledky měření a porovnávám je se získanými teoretickými znalostmi z řešeršní části práce.

Klíčová slova: obohacování paliva vodíkem, vznětový motor, vodík, alternativní palivo

ENRICHMENT OF FUEL MIXTURES WITH HYDROGEN IN DIESEL ENGINES

Annotation:

In the first part of the work I summarize the present state of research and development in enriching fuel mixtures with hydrogen. In the second part of the work I deal with tests in TUL laboratories. In the conclusion I summarize the results of the measurements and compare them with the theoretical knowledge resulting from the research portion of the work.

.

Keywords: enrichment of fuel with hydrogen, diesel engine, hydrogen, alternative fuel

Desetinné třídění:

Zpracovatel:

TU v Liberci, Fakulta strojní, Katedra vozidel a motorů

Dokončeno :

2011

Archivní označení zprávy:

Prohlášení k využívání výsledků bakalářské práce

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

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

Bakalářskou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

V dne

.....
podpis

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Celestýnu Scholzovi, Ph.D. za vstřícné jednání, cenné rady a odborný dohled nad mojí prací. Nemohu opomenout ani rady a připomínky mého konzultanta bakalářské práce pana Ing. Petra Starého, za které mu taktéž patří mé poděkování. Také bych chtěl poděkovat své rodině, která mě po celou dobu studia podporovala.

Seznam symbolů a jednotek

CO	oxid uhelnatý	
CO ₂	oxid uhličitý	
CO _x	souhrnné označení pro oxidy uhlíku	
NO _x	souhrnné označení pro oxidy dusíku	
HC	uhlovodíky	
H ₂ O	molekula vody	
O ₂	molekula kyslíku	
H ₂	molekula vodíku	
ρ_{vzd}	hustota vzduchu	[kg/m ³]
p_b	barometrický tlak	[Pa]
φ	relativní hustota vzduchu	[%]
G_V	objemový průtok	[dm ³ /min]
G_m	hmotnostní průtok	[kg/h]
M	točivý moment	[Nm]
n	otáčky motoru	[1/min]
ω	úhlová rychlost	[rad/s]
P	výkon	[W]
m_{pal}	hmotnost paliva	[kg]
M_p	spotřeba paliva	[kg/h]
t_p	teplota paliva	[°C]
t_{vzd}	teplota nasávaného vzduchu	[°C]
G_{m_vzd}	hmotnostní průtok vzduchu	[kg/h]
G_{V_vzd}	objemový průtok vzduchu	[dm ³ /min]
G_{m_H2}	hmotnostní průtok vodíku	[kg/h]
G_{V_H2}	objemový průtok vodíku	[dm ³ /min]
p_{vyf}	tlak ve výfuku za turbodmychadlem	[kPa]
$t_{\text{vyf_za}}$	teplota ve výfuku za turbodmychadlem	[°C]
$t_{\text{vyf_před}}$	teplota ve výfuku před turbodmychadlem	[°C]
$t_{\text{vzd_za}}$	teplota vzduchu za turbodmychadlem	[°C]
$p_{\text{vzd_za}}$	tlak vzduchu za turbodmychadlem	[kPa]
t_{v_mch}	teplota vody v mezichladiči plnicího vzduchu	[°C]
$t_{\text{vzd_za_mch}}$	teplota vzduchu za mezichladičem	[°C]

$p_{\text{vzd_za_mch}}$	tlak vzduchu za mezichladičem	[kPa]
t_{chl}	teplota chladicí kapaliny před vstupem do chladiče	[°C]
t_{olej}	teplota oleje v olejové vaně	[°C]
p_{olej}	tlak oleje	[kPa]
Q_{H_2}	teplo které se uvolní při dokonalém spálení daného paliva	[MJ/h]
Q_{nafta}	teplo které se uvolní při dokonalém spálení daného paliva	[MJ/h]
E_{H_2}	energetický ekvivalent vodíku	
λ	součinitel přebytku vzduchu	
IEO	International Energy Outlook	
UTAS	University of Tasmania	
SRC	Saskatchewan Research Council	
CFD	Computational fluid dynamics	
bsfc	specifická spotřeba paliva	
LPG	Liquefied Petroleum Gas	
KVM	Katedra vozidel a motorů	
FS	Fakulta strojní	
TUL	Technická univerzita v Libreci	

Obsah

1	Úvod	10
2	Obohacování palivové směsi vodíkem u vznětových motorů	13
2.1	Historie	13
2.2	Základní vlastnosti vodíku a nafty.....	14
2.3	Důvody pro obohacování směsi	14
2.4	Možnosti obohacování směsi	15
2.5	Vodík na palubě vozidla	15
2.5.1	Vodík v nádrži	16
2.5.2	Generátor vodíku	16
2.6	Projekty a studie	18
2.6.1	Projekty.....	19
2.6.2	Studie.....	23
3	Návrh zařízení pro přívod vodíku	33
4	Zkušební stanoviště.....	35
5	Výsledky měření.....	40
6	Závěr	59
	Seznam použité literatury	60
	Seznam příloh	62
	Seznam výkresů	62

1 Úvod

Velký rozvoj dopravy v posledních letech s sebou nese řadu jevů. Neustále přibývajících množství dopravních prostředků je spojeno s nárůstem spotřeby energie pro jejich pohon a zároveň tak stoupá ekologická zatížitelnost planety. K tomuto jevu dochází i přes výrazný technický pokrok, který automobilový průmysl zaznamenal v posledních 15 letech, jež vedl ke snížení škodlivých látek emitovaných do okolí. Emise výfukových plynů totiž výraznou měrou přispívají k zhoršování kvality ovzduší. V dnešní době je převážná část dopravních prostředků poháněna konvenčním pístovým spalovacím motorem, spalujícím naftu či benzín, čili produkty vzniklé zpracováním fosilního paliva - ropy. Stále se rozšiřující automobilová doprava spotřebuje v současné době velké množství fosilních paliv. Jejich zásoby jsou prozatím dostatečné, nikoliv však nevyčerpatelné. Podle prognózy IEO (International Energy Outlook) bude v roce 2020 světová spotřeba energie o 50% vyšší než v roce 2000. Závislost téměř celého sektoru dopravy na fosilních palivech, je velmi problematická a nebezpečná. Náhradu za tato paliva je tedy třeba hledat již dnes, jelikož vývoj nových technologií je velice finančně i technologicky náročný. Je třeba najít takový energetický zdroj, jehož zpracování bude co možná nejjednodušší, nejlevnější a kterého bude dostatečné množství. Cena dopravy se totiž projevuje do cen veškerého zboží. Navíc udržitelnost a cena pohonných hmot jsou velmi důležité pro ekonomiku všech vyspělých, ale i rozvojových států. Nalezení alternativní ekologické koncepce je tak motivováno více nezávislými hledisky.

Ekonomické hledisko představuje především cena současného paliva, která neustále roste, což je dáno stoupající poptávkou a omezeností zdrojů. Ekologické hledisko klade stále vyšší nároky na emise výfukových plynů. Problematické snižování emisí je věnována pozornost již řadu let a řídí se příslušnou legislativou. V současné době jsou sledovány zejména emise uhlíkatých plynů (CO , CO_2), dusíkatých plynů (NO_x), a emise uhlovodíků (označovaných jako HC). Velký důraz je proto z hlediska ekologie kladen i na kvalitu paliva, jež má značný vliv na emise. Evropská komise schválila plán pro postupné nahrazování fosilních paliv alternativními. Mělo by dojít k 20% náhradě benzínu a nafty alternativními palivy v silniční dopravě v dnešních státech Evropské unie do roku 2020.

Dalším hlediskem je závislost na ropě. Myslím tím jednak závislost na ropě jako zdroji neobnovitelné energie. A jednak závislost na dodávkách ropy. Ropa se těží převážně v politicky nestabilních oblastech, což je dalším důvodem pro hledání nezávislosti na této surovině. Automobilky se tedy snaží o maximální úsporu paliva a snižování emisí současných zážehových a vznětových motorů. Dále se zabývají vývojem hybridních technologií, jež by šetřily palivo i životní prostředí. Budoucí automobil nebude poháněn palivem na fosilním základu. Vývoj v automobilovém průmyslu je tedy již řadu let zaměřen na nalezení alternativ k tradičním palivům vyráběným z ropy. Hledání trvale udržitelných zdrojů energie pro dopravní prostředky, vyžaduje komplexní náhled na proces získávání a zpracování primárních zdrojů energie. Některá alternativní paliva se na první pohled mohou jevit jako ekologicky šetrná. Celý proces je ale třeba sledovat od prvopočátku. Konečné výsledky mohou mít totiž právě opačný charakter, než bychom očekávali. Palivem, které by mohlo vyhovovat hledaným parametrům, je vodík.

Vodík je dnes označován jako palivo budoucnosti. Jedná se o ekologický a v budoucnosti možná jediný dostupný zdroj energie. V současnosti je vodík vnímán jako jeden z důležitých energetických zdrojů příštích 100 let. A to zejména kvůli omezeným zdrojům fosilních paliv a dále pak globální potřebě snižování oxidu uhličitého – CO_2 . Vodík však není primárním zdrojem energie pro pohon automobilů, ale pouze jejím nosičem. Jeví se jako možný akumulátor již vyrobené, na druhou stranu ale obtížně skladovatelné energie. Vodík má vysoký obsah chemické energie, kterou lze uvolnit zejména při oxidaci kyslíkem. Přední průmyslová a akademická pracoviště se zaměřily na výzkum a vývoj v oblasti nalezení co možná nejekonomičtějšího využití vodíku coby paliva ve spalovacích motorech. Potřebným krokem pro jeho rozšíření je mimo jiné jeho ekonomicky a ekologicky přijatelná výroba. Způsob výroby vodíku je zásadní při ovlivňování životního prostředí.

Vodík je možno vyrobit několika způsoby. Z ekonomického hlediska je v současné době za nejvýhodnější způsob výroby vodíku považováno parní reformování zemního plynu, tímto způsobem se vyrábí 90% vodíku. Pro výrobu vodíku prostřednictvím elektrolýzy je nutný další energetický nosič – elektřina. Ekologické výhody užití vodíku jako paliva při tomto způsobu výroby jsou tedy do značné míry závislé také na výrobě elektrické energie. Pokud by byl vodík vyráběn pomocí elektřiny vyráběné v uhelných elektrárnách, značně by narostly emise CO_2 .

V případě výroby elektřiny pomocí nukleární energie sice klesnou emise CO_2 , ale na druhou stranu vzniká nebezpečný odpad, který se musí někde uskladnit. Jako ideální a ekologicky výhodné řešení se tedy jeví výroba elektřiny z obnovitelných energetických zdrojů jako například sluneční, vodní, nebo větrné energie. Velkou výhodou vodíku je tedy jednak možnost výroby různými metodami a jednak z různých obnovitelných zdrojů energie. Přepravu vodíku lze realizovat pouze v silnostěnných a tepelně izolovaných nádobách. Takové nádoby jsou velmi nákladné, což je jedním z faktorů limitujících jeho rozšíření. Se skladováním vodíku je spojena řada problémů. Lze ho skladovat buď v kapalně, nebo plynné formě. Jeho nevýhodou je také výbušnost ve směsi s kyslíkem a se vzduchem v širokém koncentračním rozmezí (4 až 95% objemu vodíku v kyslíku, 4 až 77% objemu vodíku ve vzduchu). Je proto důležité dodržovat všechna bezpečnostní opatření, jež eliminují případné riziko havárie. Celá trasa dopravy vodíku musí být těsná, aby nemohlo dojít ke vzniku výbušné směsi. Vodík je o to nebezpečnější, že ho nelze detekovat lidskými smysly. Jedná se totiž o bezbarvý plyn bez zápachu. Je nejlehčím plynem. Jeho molekuly jsou nejmenší, což sebou nese značné problémy při jeho skladování, kdy dochází k únikům. Dalším často zmiňovaným problémem je tzv. vodíková křehkost. Vodík je nejrozšířenějším prvkem ve vesmíru. Na zemi je třetím nejrozšířenějším prvkem po kyslíku a křemíku. Z toho důvodu jsou jeho zásoby prakticky nevyčerpatelné. Mezi pozitivní vlastnosti patří fakt, že se jedná o obnovitelný zdroj energie. Při spalování vodíku nevznikají škodlivé emise, v ideálním případě vzniká pouze vodní pára. Což je další nespornou výhodou vodíku jako paliva. Na druhou stranu vzhledem k tomuto faktu, by mohlo docházet k rychlejšímu korodování výfukové soustavy, při jeho spalování v automobilovém motoru. Sice již existují sériová vozidla využívající jako palivo pouze vodík, ale různé okolnosti prozatím zabraňují jejich masivnějšímu rozšíření. Jedním z problémů je neochota spotřebitelů připlácet za nové, čistší technologie. Dále je to nepřipravenost infrastruktury a stále ještě přijatelné ceny benzínu a nafty. Po dobu než se překlenou zmiňované problémy, by možným přechodem mezi fosilními a alternativními palivy mohlo být obohacování fosilního paliva vodíkem. V tomto období by se tedy mohla objevit vozidla s úpravami na směsná paliva.

2 Obohacování palivové směsi vodíkem u vznětových motorů

V této rešeršní části se zabývám současným stavem výzkumu a vývoje v oblasti obohacování paliva vodíkem u vznětových motorů.

S přihlédnutím ke všem dosud vyvíjeným a vyvinutým technologiím pro pohon vozidla, se domnívám, že pístový spalovací motor bude v automobilech používán ještě dlouhou dobu. Jejich vývoj trvá dnes již více než 150 let. Za tuto dobu došlo k velkému pokroku z hlediska účinnosti motoru a tedy i využití paliva. Nicméně vývoj motorů stále trvá a díky jejich zdokonalování si stále drží vedoucí postavení ve zdrojích mechanické práce. Jsou tak osvědčeným transformátorem chemické energie a nejúčinnějším tepelným strojem v dané kategorii výkonů. Obohacování paliva vodíkem, by mohlo posunout spalovací motory zase o kousek dál.

2.1 Historie

Technologie spalování vodíku není až tak nová, jak by se mohlo na první pohled jevit. První pokusy se spalováním vodíku ve spalovacích motorech se datují k počátku 19. století. Zájem o vodík jako palivo rostl od roku 1970, což bylo období první palivové krize. Kapalný vodík je vhodným palivem pro raketové motory, byl tedy využit jako palivo v mnoha vesmírných projektech. Technologie spalování vodíku je tedy známá řadu let. Nicméně různé okolnosti zabraňovaly jejímu rozšíření. Taková technologie je dnes samozřejmě trnem v oku mocným těžařským společnostem, které by při jejím masivnějším rozšíření přišly o velké zisky. Domnívám se, že tato skutečnost může mít nepříznivý vliv na využití všech alternativních paliv a pohonů. Dnes existuje spousta studií zabývajících se obohacováním paliva vodíkem, jsou ale převážně v anglickém jazyce. V dalších kapitolách se jimi budu zabývat.

2.2 Základní vlastnosti vodíku a nafty

Vodík má oproti fosilním palivům jisté specifické odlišnosti ve vlastnostech. Na tyto vlastnosti je třeba brát zřetel při jeho přepravě, skladování a následném spalování.

Vlastnosti	Nafta	Vodík
Hustota (kg/m^3)	840	0,082
Výhřevnost (MJ/kg)	43,2	119,83
Rychlost plamene (m/s)	0,3	2,70
Teplota vznícení ($^{\circ}\text{C}$)	280	585
Uhlíkatý zbytek (%)	0,1	0,0

Tab. 1 Vlastnosti nafty a vodíku /20/

2.3 Důvody pro obohacování směsi

Obohacováním palivové směsi se rozumí proces, kdy do klasického vznětového motoru přivedeme do spalovacího prostoru k naftě ještě navíc vodík. Vodík hoří rychleji než nafta, což má za následek rychlejší šíření plamene a lepší spálení směsi. Zvýšení rychlosti plamene ve spalovací komoře má nespornou výhodu. Na píst je vytvářen vyšší tlak, což má za následek větší účinnost motoru. Také vlivem vyšší výhřevnosti vodíku a dokonalejšího spálení dostupného paliva, vodík zvýší tepelnou účinnost motoru. Pro rovnoměrný chod motoru je důležité homogenizování směsi vodík/vzduch, aby do každého válce přicházela stejná směs. Směs obohacená o vodík potřebuje pro vznícení nižší energii, tato výhoda se však může stát rázem nevýhodou a to v případě předčasného zažehnutí o horké zbytkové plyny, či o horké části spalovacího prostoru.

Vznětové motory obecně pracují s chudou směsí, tedy se součinitelem přebytku vzduchu $\lambda > 1$. Emise NO_x obecně rostou se vzrůstající teplotou hoření a rychlostí hoření. Při nárůstu koeficientu λ , klesá spalovací teplota směsi, což má tedy příznivý vliv na emise dusíkatých plynů. Zároveň však stoupá energie potřebná k iniciaci zážehu. Vlivem přebytku vzduchu dochází k lepšímu spálení paliva. Což má příznivý vliv na emise CO a nepříznivý na emise CO_2 . Lepší spálení paliva také snižuje přítomnost uhlovodíků ve výfukových plynech. Uhlovodíky totiž vznikají ve spalovací

komoře z důvodu odvodu potřebné energie stěnou válce a tedy nedostatku energie pro šíření plamene. Na druhou stranu spalování velmi chudých směsí může přinést přesně opačné výsledky, než bychom očekávali. Vlivem horšího šíření plamene může docházet k nedokonalému spalování, případně až nevznícení směsi. To se může projevit snížením výkonu a nadměrnými emisemi. Problémy chudých směsí by do značné míry mohl vyřešit přídavek vodíku, jež má velmi široké rozmezí meze zápalnosti ve vzduchu. Vodík zvyšuje spalovací rychlost a snižuje zápalnou teplotu směsi, umožňuje také spalovat chudší směs, což má za následek vyšší tepelnou účinnost motoru a nižší emise. Obohacením paliva by se tedy měla zvýšit účinnost primárního paliva a efektivnost spalování.

2.4 Možnosti obohacování směsi

Je několik možností, jakým způsobem dopravit vodík do válce. V případě obohacování směsi vodíkem, se vzhledem k jednoduchosti využívá především přívod vodíku do sacího potrubí motoru před turbodmychadlo. Homogenní směs vodíku a vzduchu tedy vzniká před vstupem do válců. Do sacího potrubí je vodík přiveden buď do směšovače, jako v případě přívodu LPG, nebo přímo pouze hadicí napojenou do sacího potrubí. Dalším způsobem je přivedení vodíku přímo do válce. Tato úprava již vyžaduje větší konstrukční zásahy do motoru. Vodík je možné přivést buď v plynné fázi vefukovacím ventilem, nebo v kapalně fázi vstřikovacím ventilem. Do válce je možné přivést větší množství vodíku. V případě přívodu do sání jsme totiž limitováni 4% koncentrací vodíku ve vzduchu, od které se tvoří výbušná směs.

2.5 Vodík na palubě vozidla

Vodík může být na palubě vozidla uskladněn v nádržích, nebo je vyráběn až za jízdy z příslušného zařízení. Následně je dopravován do válce motoru, kde je spalován společně s naftou. Vzhledem k tomu, že v současné době není k dispozici dostatečná infrastruktura zahrnující dostatek vodíkových čerpacích stanic. Jeví se technologie výroby vodíku na palubě vozidla jako mnohem dostupnější. Tento způsob se již řadu let používá především v USA a Kanadě.

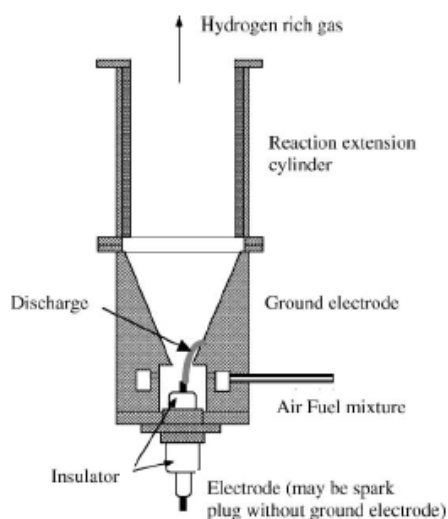
2.5.1 Vodík v nádrži

Třebaže je měrná (vztažená na hmotnost) chemická energie vodíku uvolněná při oxidaci velmi vysoká. Jeho objemová energie je při stejném tlaku a teplotě velmi nízká. Jiné palivové plyny jí mají větší. Z tohoto důvodu je uskladnění vodíku ve vozidlech, spojeno s řadou problémů konstrukčních i energetických.

Ke konstrukčním problémům patří převážně minimalizace hmotnosti a objemu vysokotlakých skladovacích zásobníků. Je tedy třeba vhodné řešení karoserie automobilu s dostatečným a hlavně bezpečným skladováním vodíku. Toto řešení se musí co nejlépe vypořádat se ztrátou užité hodnoty vozidla (velikost vnitřního prostoru, přepravní kapacity, pasivní i aktivní bezpečnosti). Je tedy důležité uskladnit dostatečné množství vodíku s co nejmenšími nároky na zástavbu a s co nejnížší hmotností nádrže. Vývoj těchto zařízení stále probíhá a je velice důležitý pro další rozšíření této technologie. Z energetických problémů je to především náročné stlačování či zkapalňování vodíku. Tankování vodíku do nádrže vozidla sebou nese velké riziko. Proto jsou tankovací stanice často robotizované, aby se minimalizovalo nebezpečí výbuchu. Kvůli zmiňovaným problémům plynoucích z vlastností vodíku, je tato technologie prozatím velmi drahá.

2.5.2 Generátor vodíku

Generátor vodíku je zařízení, které vyrábí vodík přímo na palubě vozidla. Tím odpadají veškeré problémy s jeho skladováním ve vozidle. Jsou dvě možnosti, jakými lze touto cestou získat vodík. Tou první je reformátor vodíku (obr. 1), který



vyrábí vodík z benzínu. Jedná se o tzv. plazmatronový reformátor. Tuto technologii vynalezli vědci z Massachusetts Institute of Technology. Jedná se o zařízení napájené elektrickým proudem, které vysokou teplotou převádí kapalná paliva na plyn obsahující velké množství vodíku. Dnes se již do této technologie nekládá tolik nadějí, jelikož využívá fosilní palivo.

Obr 1. Plazmatronový reformátor /16/

Druhou možností je tzv. Hydrogen booster, který vyrábí vodík a kyslík elektrolýzou vody s vhodným katalyzátorem. Tato druhá možnost se v současné době jeví jako mnohem efektivnější a lepší. Hlavně z toho hlediska, že výroba vodíku není závislá na fosilním palivu. Nejedná se o úplně novou technologii, ale nynější okolnosti by mohly napomoci jejímu rozšíření a hlavně zdokonalení. Průkopníkem této technologie byl vynálezce Stanley Mayer (1940-1998). Je řada firem, především v Americe, ale již i u nás, které prodávají a vyvíjejí generátory vodíku. Slibují přitom zvýšení výkonu motoru, snížení spotřeby paliva, snížení emisí a kouřivosti. Dále pak vyčištění a lepší chod motoru. V neposlední řadě možnost prodloužení intervalů výměny oleje, jelikož v důsledku dokonalejšího spalování na sebe olej neváže tolik usazenin. Je však velice těžké rozeznat, zařízení, které může opravdu fungovat a kde je uplatňována pouze velká marketingová politika s řadou slibů, které nemohou být prozatím dodrženy. Tyto firmy nabízejí kompletní zařízení (obr. 2), které je určené k montáži do všech motorových prostorů. Vyvíječe jsou schopny vyprodukovat různé množství vodíkového plynu, jsou proto rozděleny dle výkonu, pro různé objemy



motorů. Cena takového kompletního kitu se v USA pohybuje kolem 450,- \$. V ČR stojí kompletní sada pro dieselový motor 6900,- Kč. Na Slovensku se prodává sada za 550,- €. Dále je možnost koupit i jednotlivé díly a zbylé si sehnat, či vyrobit samostatně. Montáž zařízení by měla trvat 2-3 hodiny. Výhodou je i možnost vyndání a namontování zařízení na jiný vůz.

Obr 2. Sada s generátorem vodíku /10/

Princip /12/

Do vodíkového generátoru je přivedena elektřina, která je produkována za chodu motoru v alternátoru. Elektrolýza je technologií výroby vodíku, při které dochází k disociaci vody účinkem elektrického stejnosměrného proudu procházejícího dvěma kovovými elektrodami ponořenými do elektrolytu – vody. Elektrolýzou vody dochází

k štěpení vody na dvě molekuly vodíku a jednu kyslíku. Vodík se vylučuje na negativní straně okruhu (katodě) a kyslík na pozitivní straně okruhu (anodě).



Produkovaný plyn se označuje jako Brownův plyn, skládá se tedy z vodíku a kyslíku (66% a 34%). Tato směs je následně přivedena do sacího potrubí za vzduchový filtr. Jedna z velmi důležitých součástí pro optimální provoz vodíkového generátoru je frekvenční regulátor napětí. Ten mění 12V napětí na sérii pulsů měnící se frekvence, tím dochází k efektivnější výrobě vodíku. Celý systém může být doplněn o řídicí jednotku, která vypne zařízení v případě poklesu napětí autobaterie, nebo nedostatku vody. Velkou výhodou je fakt, že se plyn nikde neskládá. Vyvinuté množství je poměrně malé a všechn vodík je tedy při chodu motoru okamžitě dopraven do sacího potrubí a následně do motoru. Vystává tedy otázka, jestli takové množství vodíku je dostatečné, aby se mohly projevit slibované jevy. Celý systém je velice nenáročný na údržbu. Stačí kontrolovat a dolévat vodu. Vzhledem k tomu, že z 1l vody lze vyprodukovat 1860l Brownova plynu, zůstává voda v cirkulaci poměrně dlouho.

Systém české firmy produkuje v průměru 1l plynu za minutu. Na Slovensku se prodává vyvíječ, který slibuje výrobu 1,2 – 4l plynu za minutu. Což je ale stále velmi malé množství v porovnání s množstvím nasávaného vzduchu do motoru. Objem vodíku ve vzduchu je tak v řádu setin-desetin procenta. Názory na tyto jednotky se tedy různí. Někteří říkají, že nemohou nikdy fungovat, jiní přináší zprávy o snížení spotřeby a emisí. Cílem k úspěchu bude co možná nejúčinnější jednotka pro vývin vodíku. Je nasnadě otázka, zda jsme schopni dostatečně účinnou jednotku vyrobit již dnes.

2.6 Projekty a studie

Mnoho univerzit a vědeckých pracovišť po celém světě v současnosti provádí výzkum spalování vodíku ve vozidlových motorech. Na téma obohacování palivové směsi vodíkem existuje velmi mnoho studií a prototypů vozidel především pro zážehový motor. Já jsem se ale ve své práci zaměřil na motor vznětový. Vzhledem k rostoucí popularitě vznětového motoru v posledních letech, by mohla mít tato práce o to větší význam.

2.6.1 Projekty

Podařilo se mi vyhledat dva funkční, provozuschopné prototypy vozidel poháněné vznětovým motorem, které mají palivovou směs obohacenou o vodík.

Prvním projektem je upravená **Toyota Corolla** /13/, která je uzpůsobena pro dvoupalivové spalování. Projekt UTAS (University of Tasmania) byl prezentován v dubnu roku 2006. Vozidlo se ve stejném roce účastnilo Targa Tasmania rally, což je mezinárodní soutěž na uzavřených tratích, jež trvá pět až šest dní. Rychlostní zkoušky měří kolem 2000 km. Vozidlo má nádrž pro uchovávání vodíku na palubě vozidla. Spalovací motor má výkon 60 kW. Podrobnější informace o vozidle, např. o množství přidávaného vodíku, bohužel nejsou dostupné. Systém má vznětovému motoru zvýšit výkon o 20 % a snížit spotřebu nafty na 80 %. Nicméně, ani podrobné výsledky, které by tyto předpoklady potvrzovaly, nejsou k dispozici.



Obr 3. UTAS H2 Diesel /13/

Druhým projektem je **pick-up GMC** /14/. Toto vozidlo vzniklo v Kanadě pod záštitou Saskatchewan Research Council. Tento projekt zahrnuje výzkum a vývoj dvoupalivového vznětového motoru spalujícího naftu a vodík. Plynný vodík je na palubě vozidla skladován v nádrži. Vozidlo může být provozováno v dvoupalivovém režimu, nebo pouze na naftu. Což je výhodné v ne příliš rozvinuté síti čerpacích stanic vodíku. Technologie může být replikována na různé typy motorů při relativně nízkých nákladech. Studie dokázaly, že při obohacování vodíkem, dochází k lepší

využitelnosti paliva o 7-10%. Tento systém obohacování paliva byl vyvíjen pro instalaci do vozidel GMC s pohonem všech kol. Parametry vozidla jsem shrnul do tab. 2.



Obr 4. Diesel GMC /14/

vozidlo	motor	pohotovostní hmotnost	užitečné zatížení
GMC 4x4	vznětový 6,6l výkon 230 kW při 6000 1/min točivý moment 605 Nm při 1600 1/min	4200kg	1524kg

Tab. 2 parametry vozidla /14/

Základní technické parametry /14/

- Emise výfukových plynů jsou sníženy o 40-50%, což je odvislé od množství přidávaného vodíku. Testy prokázaly snížení NO_x o 14%. Dojezd v dvoupalivovém režimu ve městě a na dálnici je 110 – 180 km.
- Při volnoběhu a velmi nízkém zatížení vozidlo používá jako 60% paliva vodík.
- Naopak při maximálním výkonu je spalována pouze nafta.
- Při nedostatku vodíku lze vozidlo přepnout na čistě naftový pohon.
- Vozidlo nevykazuje žádné ztráty výkonu a nedokonalé spalování.
- V systému duálního paliva nejsou změny na diagnostice motoru, ta funguje stejně jako v sériovém motoru. V případě jakýchkoli problémů informuje řidiče stejně.

Základní části systému /14/

- vodíková nádrž



Vozidlo je vybaveno nádrží, která je umístěná s příslušnými komponenty na korbě vozidla v hliníkovém boxu. Nádrž pojme přibližně 3,5 kg vodíku, který je stlačen na tlak 350 bar (5000 psi). V boxu jsou další komponenty jako ventil, regulátor tlaku, nebo detektor úniku vodíku.

Obr. 5 Nádrž pro skladování vodíku /14/

- příslušenství pod kapotou



Pro dvoupalivový systém jsou pod kapotou instalovány následující komponenty: vstřikovače Keihin, nízkotlaký Tescom regulátor, GFI ventily a detektory úniku vodíku.

Obr. 6 Příslušenství pod kapotou /14/

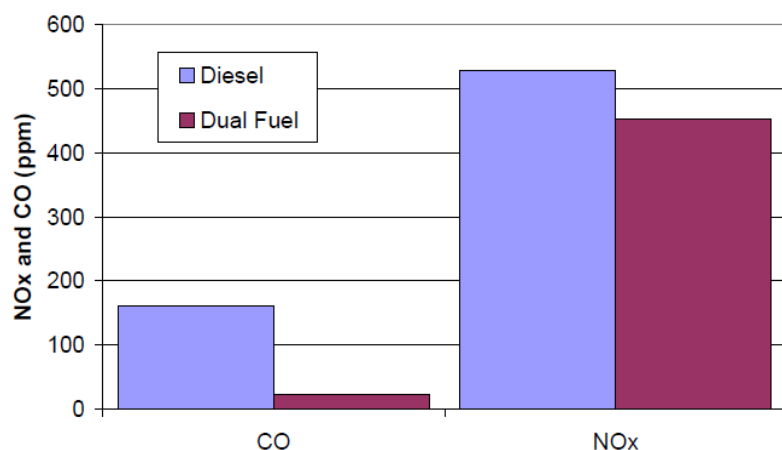
- elektronika systému

Za sedačkami se nachází řídicí jednotky systému. Tyto jednotky sledují otáčky motoru, množství nasávaného vzduchu a jeho teplotu. Měřené hodnoty vyhodnocují a následně řídí proces vefukování vodíku. V kabině je k dispozici palivoměr, který ukazuje procento vodíku v nádrži.

- bezpečnost

O bezpečnost se starají dvě čidla detekující únik vodíku v boxu u nádrže a dvě čidla v motorovém prostoru. O případném úniku je řidič informován blikajícími diodami na display. Při detekci úniku vodíku na 20% dolní mezi výbušnosti, jednotka uzavírá ventily a přepne motor do čistě naftového režimu.

Výsledky /14/



Měření emisí bylo prováděno při různých zátěžích na vozidlovém dynamometru. Při 42% nahrazením paliva vodíkem došlo ke snížení emisí NO_x o 14% a CO o 86%.

hrazením nafty vodíkem /14/

Duální palivový systém umožňuje nahradit až 60% fosilního paliva (nafty) vodíkem a to v závislosti na jízdním cyklu. Dojezd testovaného vozidla při duálním provozu je 110-180km, což zatím není mnoho. Dostačuje však pro městský provoz, kde by bylo snížení emisí nejvíce pocíťováno. Na motoru nejsou prováděny žádné větší zásahy a nejsou patrné žádné ztráty výkonu. V testovaném vozidle navíc zbývá ještě dostatečný prostor pro náklad.

2.6.2 Studie

V této části shrnuji obsahy studií univerzit a odborných pracovišť z celého světa, týkajících se výzkumu obohacování paliva vodíkem vznětového motoru. Tyto práce jsou v současné době volně přístupné na internetu v anglickém jazyce.

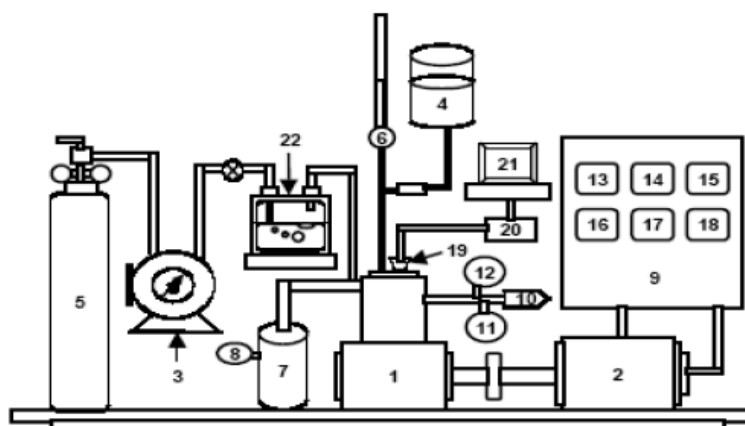
Autorem první studie /15/ je vedoucí pracovník americké skupiny pro alternativní paliva W. Thor Zollinger (**Idaho National Engineering**). Ve studii jsou shrnuty vlastnosti obohaceného paliva. Dále se studie zabývá testy vznětového motoru Cummins BC4 na dynamometru. Vodík byl přiváděn do sání motoru z generátoru. Testy bylo prokázáno snížení emisí, což byl i důvod montáže zařízení a dále pak malé snížení spotřeby. Vše je zpracováno v následující tabulce.

	CO	HC	NO _x	BSFC
změna s přídavkem vodíku	-2,90%	-8,30%	-4,60%	-2,10%

Tab. 3 Výsledky měření /15/

Výsledky dlouhodobých testů prokázaly, že u některých motorů může vodíkový generátor spotřebu paliva zvyšovat. Žádné konkrétnější informace nejsou bohužel v práci uvedeny. Dále se studie zabývá různými technologickými možnostmi pro snižování emisí.

Jacob Wall (**University of Idaho**) je autorem další studie /16/ z roku 2008. Práce se zabývá obecnou teorií spalování a vlastnostmi vodíku při spalování. Dále možnostmi a způsoby obohacování směsi, nejen u vznětového motoru. Neméně důležitým bodem je ekologie, kde jsou mimo jiné objasněny důvody tvorby jednotlivých emisí a důvody snížení emisí při obohacování paliva. Práce shrnuje další studie zabývající se tématem a je obohacena o grafy zachycující vliv různého množství přídavku vodíku na spalování. Vlivem přídavku vodíku došlo k poklesu sledovaných složek výfukových plynů.



LEGEND

- | | | |
|----------------------|------------------------|---------------------------|
| 1.Engine | 9. Dynamometer panel | 17.Lub oil Temp. Indictor |
| 2.Dynamometer | 10. Silencer | 18. Rotameter |
| 3.Gas flow meter | 11. Smoke Pump | 19.Pressure Sensor |
| 4.Diesel Tank | 12. HC/CO Analyzer | 20. Charge Amplifier |
| 5.Hydrogen Cylinder | 13. Stop Watch | 21.DDA.System |
| 6.Burette (Diesel) | 14. RPM Indicator | 22. Flame Trap |
| 7. Air Tank | 15. Ext Temp Indicator | |
| 8. Air Flow meter | 16. Coolant Temp. Indr | |

Obr. 7 Schéma měřícího stanoviště /16/

Dále jsou v práci uvedeny i výsledky měření z jiných univerzit. Na univerzitě ve Windsoru v Kanadě bylo pomocí simulačního programu CHEMIKIN zjištěno, že je pro spalování efektivnější přidávat vodík a kyslík, než čistý vodík. Přidání 10% vodíku a kyslíku bylo ekvivalentní k přidání 20% čistého vodíku. Experimentální metoda, kde bylo přidáváno do spalovacího procesu 2% vodíku a 1% kyslíku, příznivý vliv

takovéhoto množství kyslíku na spalování vyvrátila. Na univerzitě Kocaeli využili všechny dostupné informace a sestavili zařízení pro generování vodíku. Zařízení fungovalo na principu elektrolýzy. Schéma zařízení je na obr. 8 a technické informace o této jednotce jsou uvedeny v tab. 4. Tato jednotka produkovala úctyhodných 20 l/h při 90 V a 3 A.

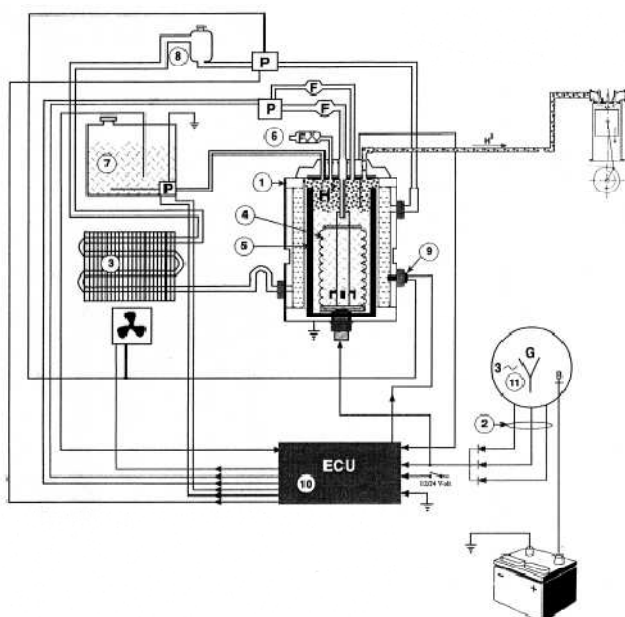


Fig. 1. General structure of the system (1. Electrolysis cell; 2. Secondary circuit; 3. Radiator; 4. Anode electrode; 5. Cathode electrode; 6. Air filter; 7. Water tank; 8. Cooling water tank; 9. Water temperature sensor; 10. Electronic control unit of the system; 11. Alternator. P — water pump; F — water filter).

Obr. 8 Elektrolytická jednotka kocaelijské univerzity /16/

Maximální dodávka plynu	20 l/h
Katodová elektroda	Uhlíková
Anodová elektroda	Platinová
Elektrolytické napětí	90 V
Elektrolytický proud	3 A
Objem nádrže	2,5 l
Spotřeba vody	100 ml/250 km
Rozměry	150x140x135 mm
Váha	2 kg

Tab. 4 Technické specifikace jednotky /16/

Tento systém byl testován na čtyřech vozidlech. Vlivem přidání této jednotky do vozidla, došlo k navýšení spotřeby testovaných vozidel o 25-40% a snížení emisí výfukových plynů o 40-50%.

Tato studie prokázala značný rozpor mezi teoretickými předpoklady a experimentálními testy. Práce potvrdila, že při obohacování paliva dochází ke snižování emisí, ke snížení spotřeby paliva však došlo pouze v případě přivedení vodíku z lahve.

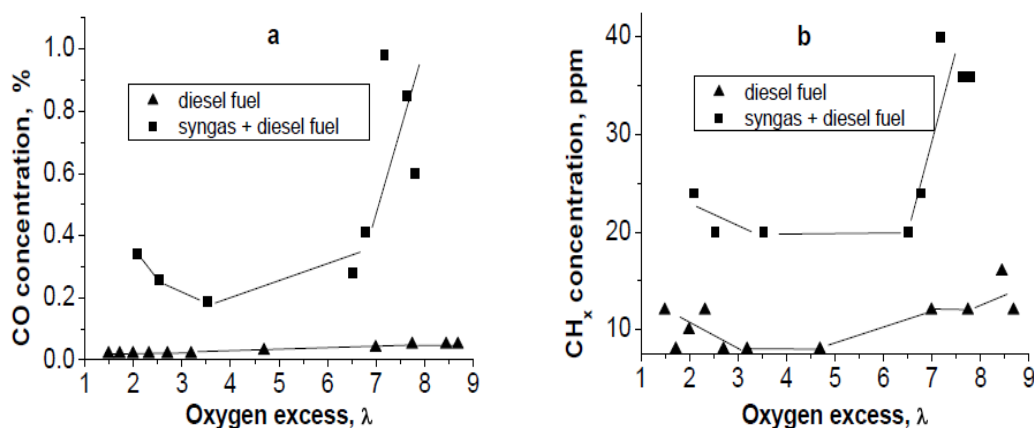
Následující studie /17/ byla prezentována na mezinárodním vodíkovém kongresu a výstavě IHEC 2005 v Instambul (Turecko). Vedoucím tohoto projektu byl Vladislav Sadykov (**Russian Academy of Sciences**). Dokument shrnuje vícero studií a zabývá se především generátory syntézního plynu a jejich vlivem na spalování v různých motorech. Mimo jiné testy probíhaly také na vznětovém motoru s označením D-245,12. Jedná se o čtyřtákní, čtyřválcový motor o vrtání 80mm a zdvihu 120mm s výkonem 50kW. Boreskov Institute of catalysis vyvinul zmiňované generátory syntézního plynu, které jsou schopné převést uhlovodíkové palivo na syntézní plyn selektivní oxidací se vzduchem. V případě vznětového motoru byly sníženy emise NO_x , v některých případech na minimum. Na druhou stranu emise CH_x a CO vzrostly a zároveň klesla účinnost paliva. V práci jsou dále popsány funkce a principy generátorů syntézního plynu. Jsou uvedeny tři typy, které se liší různým

poměrem příslušných produkovaných plynů, obsahy složek syntézního plynu jsou uvedeny v tab. 5. Všechny generátory produkují 10 m³ plynu za hodinu.

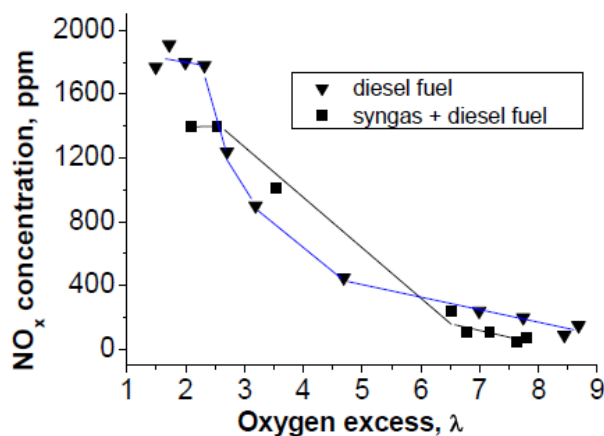
H ₂	CO	CO ₂	N ₂	CH ₄	H ₂ O
22-32%	12-25%	1-6%	50%	0,4-8%	0,5-5%

Tab. 5 Složky syntézního plynu /17/

Vznětový motor byl testován při konstantních otáčkách 1300 1/min. A to ve dvou režimech, nejprve bez přídavku syntézního plynu a následně s částečnou náhradou motorové nafty syntézním plynem. Z výsledků shrnutých do grafů je patrné, že došlo ke snížení NO_x pouze v poměrně bohaté a velmi chudé směsi. Jinak byl zaznamenán nárůst, stejně jako ostatních zkoumaných složek. Emise CH_x se zvýšily pouze mírně, zatímco emise CO vzrostly značně. Syntézní plyn totiž obsahuje poměrně velké množství CO.

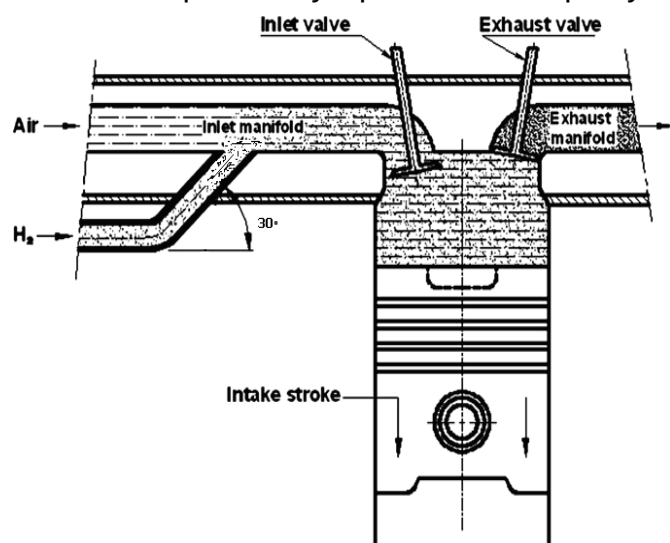


Graf 2 Vliv přídavku syntézního plynu na emise CO a HC /17/



Graf 3 Vliv přídavku vodíku na emise NO_x/17/

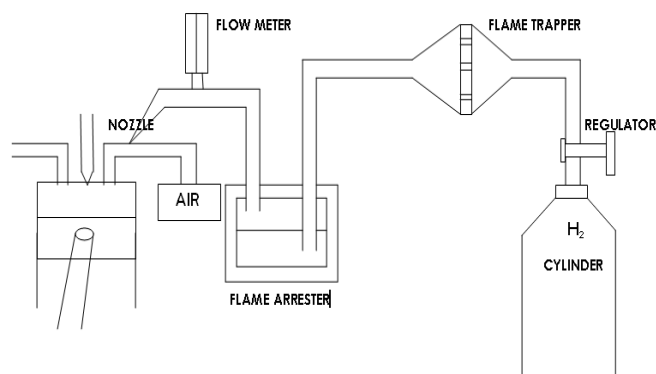
Další studie /18/ z **Anna University - India** se zabývá výpočtovým fluidním modelem potrubí pro přívod vodíku do sání motoru pomocí softwaru STAR-CD. Směšovací parametry, proudění a zpětný tlak byly analyzovány pomocí CFD



(Computational Fluid Dynamics). Získané poznatky byly použity pro změny na testovaném motoru. Analýza byla prováděna na různých vstupních úhlech napojení vodíkového potrubí do sání motoru. Touto cestou byl vyhodnocen jako nejlepší úhel vstupu vodíku 30° (obr. 9), kdy dochází k nejlepšímu směšování a nejmenšímu protitlaku.

Obr. 9 Systém přívodu vodíku /18/

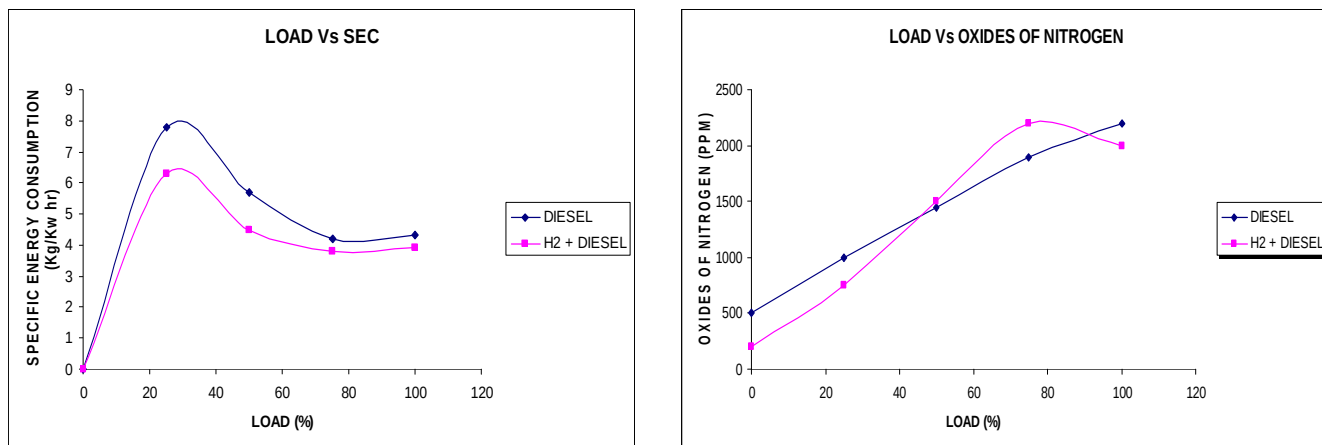
Testovaným motorem byl čtyřdobý, vodou chlazený, vznětový jednoválec o výkonu 5,9 kW při 1600 1/min, který byl připojen k dynamometru. Schéma testovacího stanoviště je uvedeno na obr. 10. Celý systém pro dopravu vodíku do válce sestává z vysokotlaké plynové lahve naplněné vodíkem, na niž je vysokotlaký ventil a regulátor tlaku. Tlak vodíku byl snížen na atmosférickou hodnotu. Dále jsou



Obr. 10 Schéma zkušebního stanoviště /18/

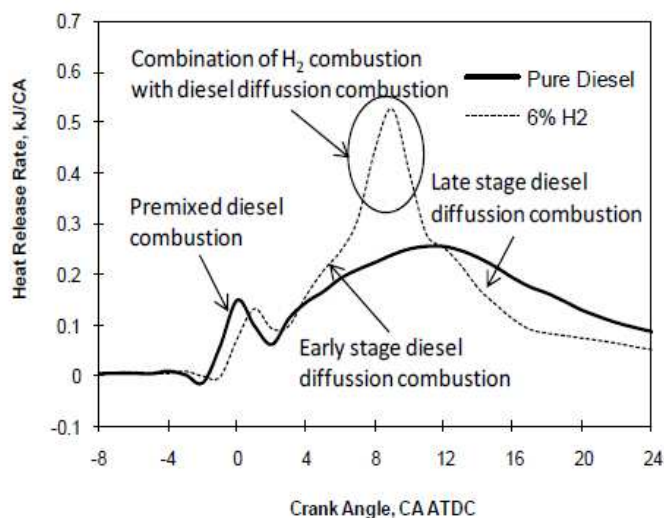
v systému umístěny bezpečnostní prvky pro zabránění případnému zpětnému šíření plamene. Pro měření množství byl instalován průtokoměr. Test probíhal při konstantních otáčkách 1600 1/min a při různých zatíženích a různých množstvích vodíku.

Práce je doplněna o řadu grafů, které ukazují změny procesu spalování při obohacení paliva vodíkem. Testy bylo prokázáno zvýšení tepelné účinnosti motoru, snížení specifické energetické spotřeby a snížení emisí, až na emise NO_x , jež se při větších zatíženích, jak je patrné z grafu 4 zvýšily.



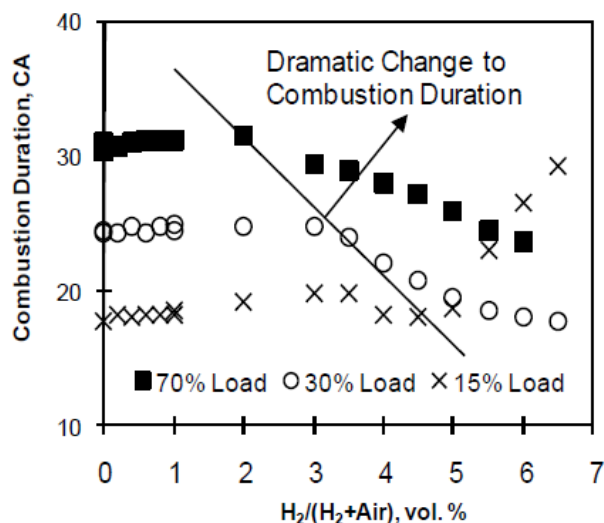
O_x na zatížení /18/

Tato krátká studie /19/ pochází z **West Virginia University – USA**. Uvádí charakteristiky spalování obohacené směsi vznětového motoru Cummins ISM370. Účinky přídavku vodíku do nasávaného vzduchu byly zkoumány v různých režimech zatížení. Při zahájení šíření plamene, dochází vlivem přídavku vodíku k velkému uvolnění tepla a rychlejšímu šíření plamene. Rychlost uvolňování tepla v závislosti na natočení klikové hřídele ukazuje následující graf 5.



Graf 5 Rychlost uvolňování tepla, 1200 1/min, 70% zatížení /19/

Následující graf 6 ukazuje závislost doby spalování na množství přidávaného vodíku. Z grafu je patrné, že přidání malého množství vodíku nemá takřka žádný vliv na dobu



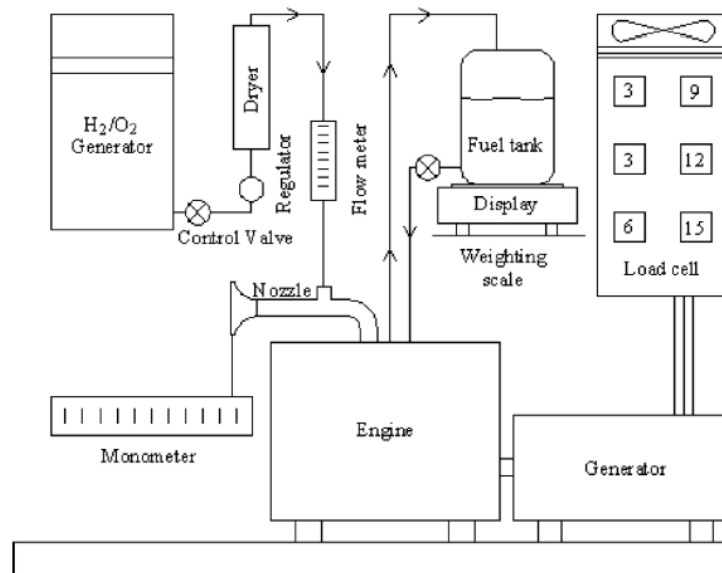
spalování. Při 70 a 30% zatížení dochází nárůstem přidaného množství vodíku ke snižování doby spalování. Při 15% zatížení dochází od 5% H₂ k prodloužení této doby. V práci bohužel chybí objasnění tohoto jevu.

Graf 6 Doba spalování v závislosti na množství H₂ /19/

Cílem následující studie /20/ z **University of South Australia** bylo prozkoumat dopady přidavku plynu H₂/O₂, produkovaného generátorem EPOCH EP-500, který byl připojený na externí zdroj energie. Toto zařízení produkovalo zmiňovaný plyn elektrolyzou vody. Uspořádání zkušebního stanoviště je patrné z obr. 11. Motor, jehož parametry jsou uvedeny v tab. 6, byl testován při konstantních otáčkách 1500 1/min. Do sání motoru bylo přivedeno různé množství H₂/O₂ plynu (1-6%). Procentuální podíl H₂/O₂ plynu je diesellový ekvivalent, kdy 6% H₂/O₂ odpovídá produkci generátoru 30 l/min.

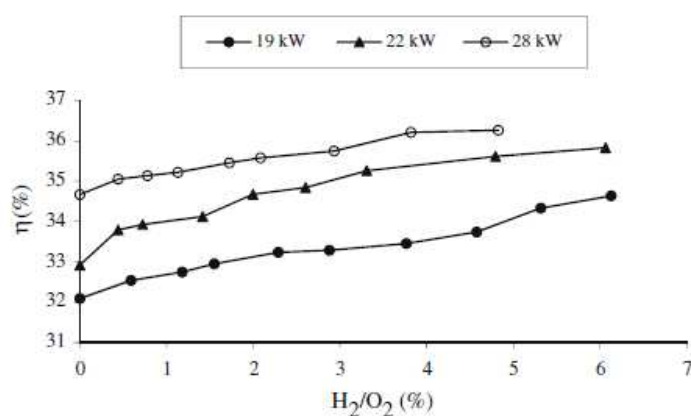
Typ spalovacího motoru	čtyřválcový motor s přímým vstřikem paliva
Vrtání x zdvih	104x118 mm
Kompresní poměr	17,9
Maximální výkon	38 kW při 1500 1/min

Tab. 6 Parametry motoru /20/



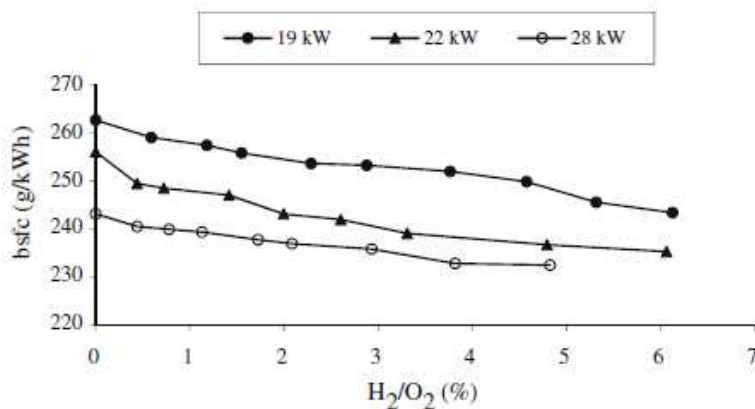
Obr. 11 Schematický náčrt testovacího stanoviště /20/

Testy bylo prokázáno, že při vzrůstajícím objemu přivedeného H_2/O_2 plynu tepelná účinnost motoru rostla, což je vidět na následujícím grafu 7.

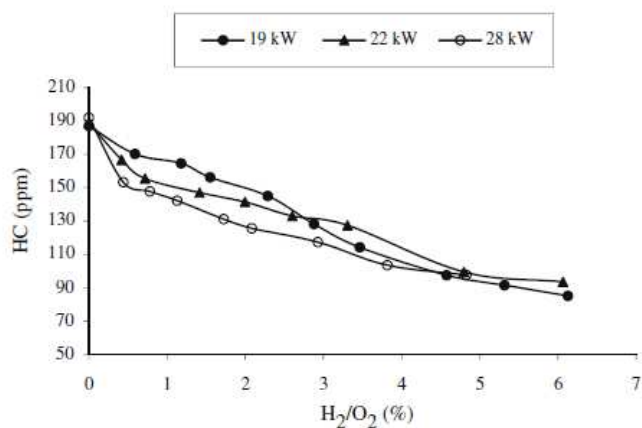


Graf 7 Vliv přídatku H_2/O_2 na tepelnou účinnost motoru /20/

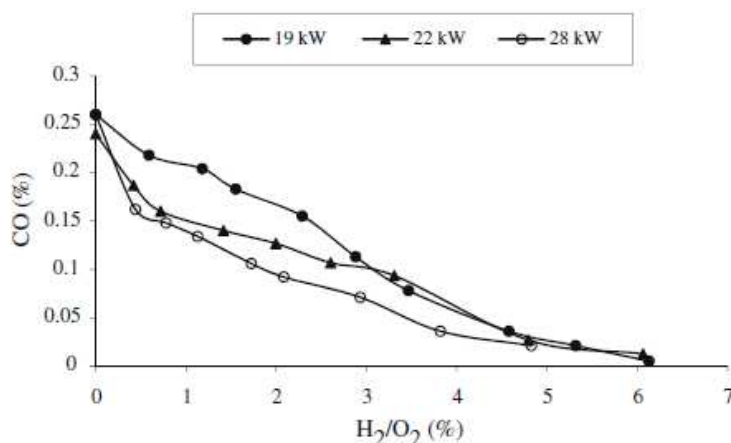
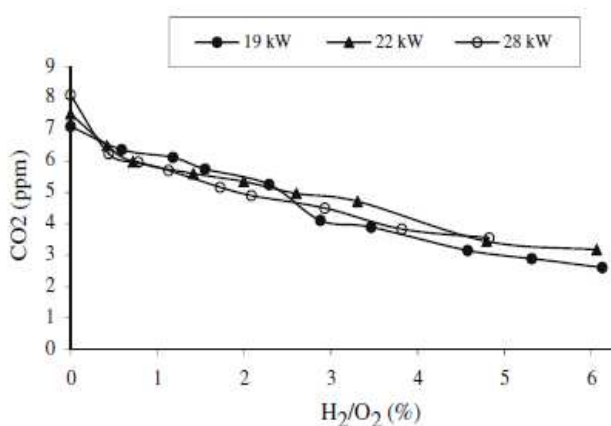
Zmiňované hodnoty jsou v práci konfrontovány se studií, kde se přidával čistý vodík a ve které bylo dosaženo obdobných výsledků. Dále se práce zabývá vlivem přídatku H_2/O_2 na specifickou spotřebu paliva při různém zatížení. Se stoupajícím podílem H_2/O_2 plynu, dochází ke snižování specifické spotřeby paliva, což je patrné z grafu 8. Přídatkem H_2/O_2 plynu o více než 5% došlo ke snížení spotřeby přibližně o 15%.



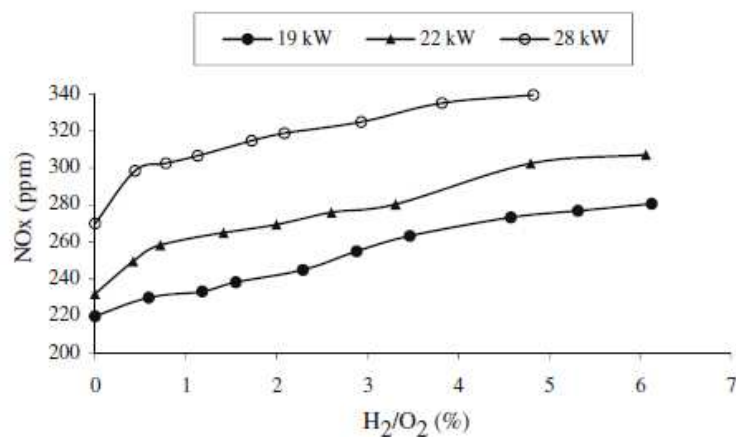
paliva /20/



emise HC /20/



e CO /20/



Graf 11 Vliv přídatku H₂/O₂ na emise NO_x /20/

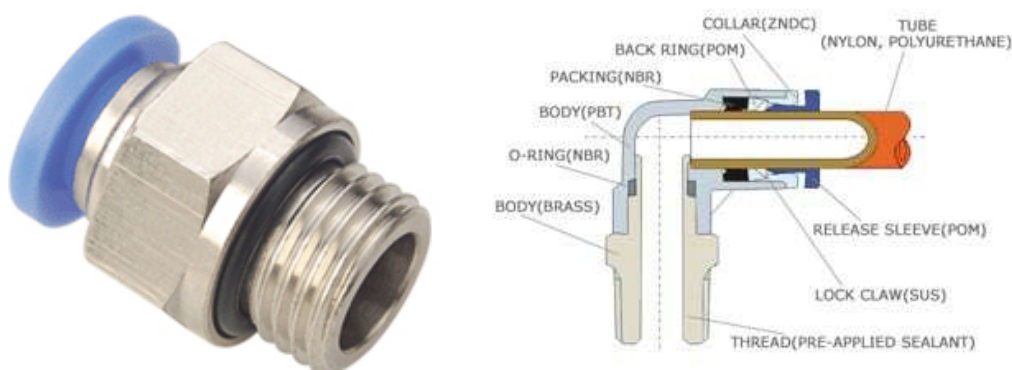
Z uvedených studií je patrné, že výsledky nejsou jednotné a pro tuto chvíli je nelze sumarizovat a vyvodit příslušné závěry. Je vidět, že výsledky jsou odvislé od mnoha okolností a patrně závisí i na každém konkrétním testovaném motoru. Jak je uvedeno ve studiích, tak další rozpory mohou nastat mezi teoretickými předpoklady a praktickými zkouškami. Studie nejsou jednotné při uvádění procentuálního podílu obsahu vodíku, jež je často nejednoznačně definován. Způsob obohacování směsi je ve studiích často také odlišný. Do procesu obohacování je přiváděn vodík z lahve, nebo generátoru, ten může být navíc napojen na externí zdroj. V některých studiích je substituována část fosilního paliva (nafty) vodíkem. Domnívám se, že někteří autoři mohou publikovat jen ty informace, které se jim z nějakého důvodu hodí. Proto si myslím, že nelze všechny tyto studie zcela objektivně posuzovat.

3 Návrh zařízení pro přívod vodíku

Cílem tohoto bodu bakalářské práce bylo vyřešit přívod vodíku do sacího potrubí motoru. Vodík je k měřicímu stanovišti přiveden z potrubního rozvodu laboratoře pomocí polyuretanové hadice. Tato hadice je velice odolná vůči ohybu, tlaku, korozi a vibracím. Vlastnosti této hadice jsou shrnuty v tab. 7. Bylo tedy třeba vyřešit napojení této hadice do sacího potrubí motoru. Vzhledem k zmiňovaným vlastnostem vodíku bylo třeba mít tento přívod dokonale utěsněn. Prodejci nabízí k hadicím nejrůznější příslušenství pro spojování a napojování hadice. Z tohoto sortimentu jsem vybral tzv. fitinku (obr. 12) s vnějším závitem G1/8. Tato součástka stojí přibližně 20,- Kč, skrývá jednoduchý systém pro uchycení hadice (obr. 12), kterou stačí pouze zasunout. Fitinka přijde zašroubovat do navrženého dílu, jež je přivařen koutovým svarem k sacímu potrubí. K tomuto dílu je přivařena trubička, která je ohnutá do osy sacího potrubí. A to kvůli eliminaci odporu nasávaného vzduchu, aby docházelo k lepší homogenizaci směsi. Vše je znázorněno v přiložené výkresové dokumentaci.

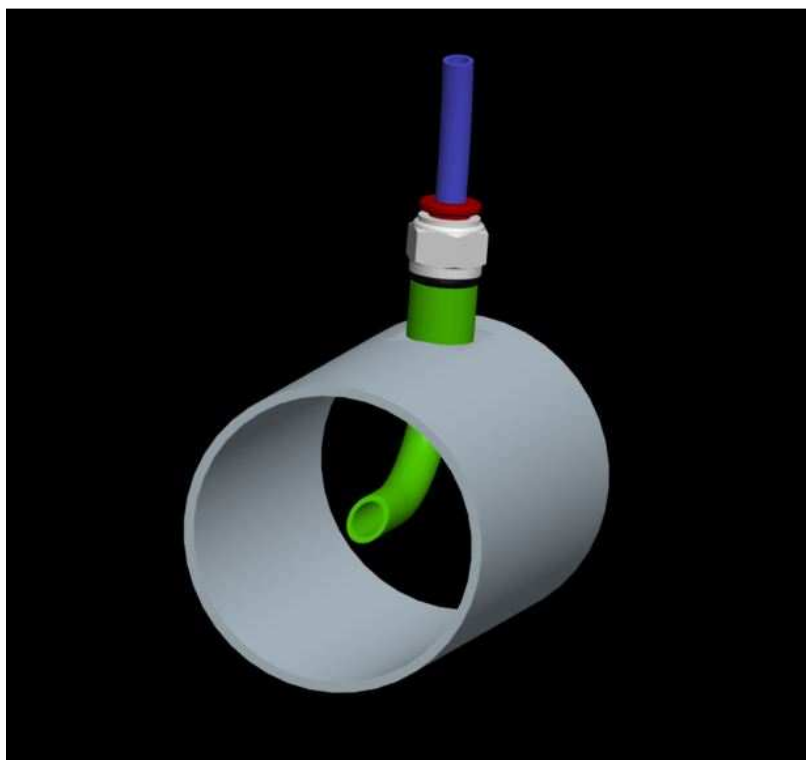
Materiál	Polyurethane
Ničivý tlak	3 MPa
Pracovní tlak	1 MPa
Pracovní teplota	-20°C až 60°C

Tab. 7 Vlastnosti hadice /25/

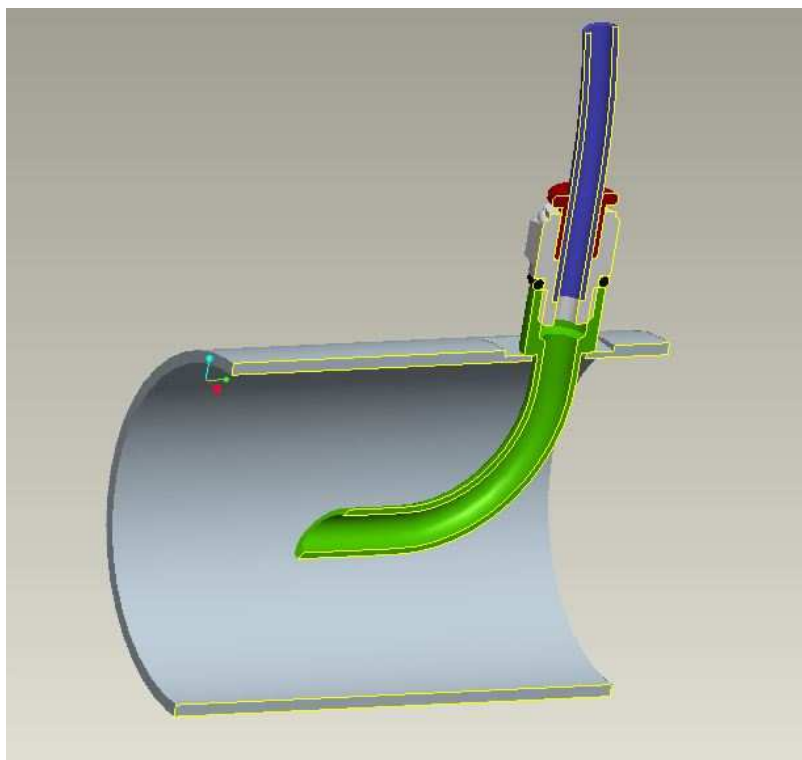


Obr. 12 Fitinka /24/

Modelaci přívodu vodíku a následnou výkresovou dokumentaci jsem provedl pomocí programu ProEngineer wildfire 4.0.



Obr. 13 Model přívodu vodíku



Obr. 14 Model přívodu vodíku v řezu

4 Zkušební stanoviště



Obr. 15 Měřící stanoviště - laboratoře TUL

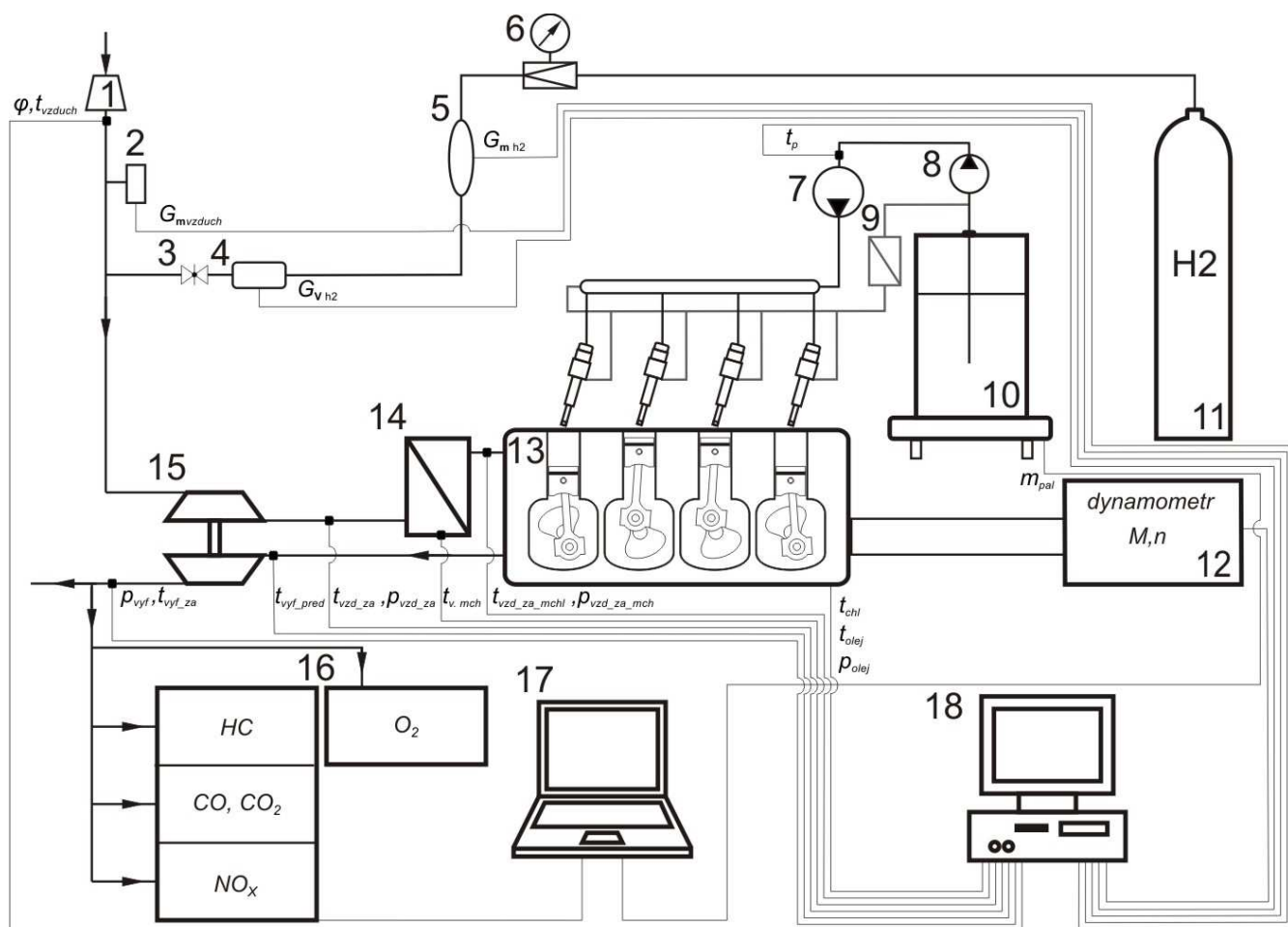
Měření probíhala v laboratoři motorů KVM na FS TU v Liberci. Testovaným agregátem byl vznětový motor Cummins ISBe4. Jedná se o přeplňovaný, čtyřválcový motor o objemu $4,5 \text{ dm}^3$ a výkonu 140 kW při 2500 1/min s přímým vstřikem paliva – Common Rail. Motor je řízen elektronickou jednotkou. Ovládání zatížení a otáček bylo prováděno pomocí hlavního počítače.

Vodík je uskladněn v tlakových lahvích z bezpečnostních důvodů a předpisů mimo budovu. K příslušnému měřicímu stanovišti je dopraven pomocí potrubního rozvodu. Cestou k motoru je měřen průtok vodíku v kg/h a dm^3/min . Tlak vodíku je regulován na 1-2 bar a to především kvůli kuličkovému průtokovému měřiči, aby nedošlo k jeho poškození. Vodík je přiveden polyuretanovou hadicí 6x4 (6mm vnější průměr, 4mm vnitřní průměr) do sání motoru až za průtokoměr (měřící průtok vzduchu v sacím potrubí) a to kvůli možnému nebezpečí vzplanutí směsi od horké

části průtokoměru. Vzhledem k tomu, že průtokem vodíku potrubím vzniká statická elektřina, je přívodní část uzemněna.

Motor je připojen k vodnímu dynamometru Schenck D700, jehož pomocí se měří otáčky a točivý moment motoru. Palivová nádrž je umístěna na elektronické váze, která je napojená na notebook, jenž zaznamenává úbytek váhy. Z těchto dat jsem spočítal spotřebu motoru. Z nádrže je palivo čerpáno nízkotlakým, podávací čerpadlem. Následně je vedeno do vysokotlakého čerpadla, jež dopravuje palivo pod vysokým tlakem do zásobníku tlaku paliva (railu). Ze zásobníku je palivo rozvedeno k jednotlivým vstřikovačům Bosh. Přebytečné palivo je přes chladič vedeno zpět před nádrž, odkud je znovu dopravováno do vstřikovačů.

Výfukové plyny vycházející z motoru roztáčí lopatky turbíny, která je přes hřídel spojena s dmychadlem. To pak stlačuje nasávaný vzduch, což umožňuje dopravení většího množství vzduchu do válce motoru. Při zachování stejného poměru směsi, můžeme do válce dopravit větší množství paliva. Tyto důvody jsou hlavní příčinou k nárůstu výkonu přeplňovaného motoru. Hlavní nevýhodou stlačování vzduchu je jeho zahřívání. Což má za následek nižší hustotu a tedy méně vzduchu ve válci. Z tohoto důvodu se před vstupem vzduchu do motoru zařazuje mezichladič stlačeného vzduchu (výměník voda-vzduch), který vzduch ochladí na přijatelnou teplotu. Vzorky výfukových plynů jsou dále vedeny k analyzátorům, které vyhodnocují složky výfukových plynů. Tyto data taktéž zaznamenává zmiňovaný notebook. Výfukové plyny jsou odsávány výkonným ventilátorem a vedeny tunelem pod podlahou ven na střechu budovy. Analyzátory jsou vyhodnocovány složky výfukových plynů, jdoucí přímo z motoru. Na motoru totiž není zařazen předepsaný selektivní katalyzátor NO_x . Chladicí kapalina motoru, je stejně jako nasávaný vzduch chlazená v tepelném výměníku. Voda pro chlazení je čerpána čerpadlem z bazénu pod laboratoří. Na tento okruh je napojen i vodní dynamometr. Snímače sledovaných veličin jsou připojeny k převodníkům a systému automatickému sběru dat. Rozmístění snímačů je patrné z následujícího schématu laboratoře (Obr. 14). Toto schéma jsem vytvořil pomocí programu CorelDRAW X3. Do tab. 8 jsem zpracoval přehled měřených veličin a způsob jejich snímání. V tab. 9 jsou uvedeny analyzátory výfukových plynů.



1. vzduchový filtr
2. měřič průtočného množství vzduchu (kg/h)
3. regulátor průtoku vodíku
4. měřič průtočného množství vodíku (dm³/min)
5. měřič průtočného množství vodíku (kg/h)
6. regulátor tlaku, tlakoměr
7. vysokotlaké čerpadlo paliva
8. nízkotlaké čerpadlo paliva
9. chladič paliva
10. palivová nádrž
11. tlaková láhev s vodíkem
12. dynamometr Schenck D700
13. testovaný motor Cummins ISBe4
14. mezichladič stlačného vzduchu
15. turbodmychadlo
16. analyzátory výfukových plynů
17. notebook
18. počítač pro řízení testu a sběr dat

Obr. 16 Schéma měřícího stanoviště

měřená veličina	způsob snímání
ϕ - relativní hustota vzduchu [%] t_{vzd} – teplota nasávaného vzduchu [°C]	sdružený snímač SENSORIKA HTP 7013
G_{m_vzd} – hmotnostní průtok vzduchu [kg/h]	hmotnostní průtokoměr SIERRA model 620S-L13-M1-EN2-V4-DD-0-WM
$G_{m_H_2}$ – hmotnostní průtok vodíku [kg/h]	Hmotnostní průtokoměr MICRO MOTION model 2700R11AFFZZZ
$G_{V_H_2}$ – objemový průtok vodíku [dm ³ /min]	kuličkový průtokoměr pro měření průtoku vzduchu – překalibrován na H ₂
p_{vyf} – tlak ve výfuku za turbodmychadlem [kPa]	senzor DMP 331 - JUMO
t_{vyf_za} – teplota ve výfuku za turbodmychadlem [°C]	termočlánek - JUMO
$t_{vyf_před}$ – teplota ve výfuku před turbodmychadlem [°C]	termočlánek - JUMO
t_{vzd_za} – teplota vzduchu za turbodmychadlem [°C]	Pt100 - JUMO
p_{vzd_za} – tlak vzduchu za turbodmychadlem [kPa]	senzor DMP 331 - JUMO
t_{v_mch} – teplota vody v mezichladiči plnicího vzduchu [°C]	Pt100 - JUMO
$t_{vzd_za_mch}$ – teplota vzduchu za mezichladičem [°C]	Pt100 - JUMO
t_{chl} – teplota chladicí kapaliny před vstupem do chladiče [°C]	Pt100 - JUMO
t_{olej} – teplota oleje v olejové vaně [°C]	Pt100 – JUMO
p_{olej} – tlak oleje [kPa]	senzor DMP 331 - JUMO
M – točivý moment motoru	Dynamometr Shenck D700
n – otáčky motoru	Dynamometr Shenck D700
m_{pal} – hmotnost paliva [kg]	váha Sartorius 1
t_p – teplota paliva [°C]	Pt100 - JUMO
$p_{vzd_za_mch}$ – tlak vzduchu za mezichladičem [kPa]	Senzor DMP 331 - JUMO

Tab. 8 Přehled měřených veličin a způsobu jejich snímání

měřená veličina	analyzátor		kalibrace
CO	Horiba	0-1.000 ppm	799 ppm
CO	Hartmann & Braun	0-8%	5,5%
CO ₂	Hartmann & Braun	0-16%	14,1%
NO _x	Emerson	0-5000 ppm	4060 ppm
HC	Hartmann & Braun	0-1000 ppm	2760 ppm v CH ₄

Tab. 9 Přehled měřených složek výfukových plynů a jejich analyzátorů

5 Výsledky měření

Měřená data byla zaznamenávána frekvencí 1 Hz. Měření a zaznamenání většiny dat je provedeno automaticky systémem hlavního počítače, jehož pomocí se ovládá také regulace dynamometru. Notebook, jehož funkce jsou synchronizovány s hlavním počítačem, je využit pro zaznamenávání dat z měření výfukových emisí a je také napojen na elektronickou váhu, na které je umístěna nádrž nafty. Tyto data jsou vyhodnocována a zaznamenávána také frekvencí 1 Hz. Ke změně hodnoty průtočného množství vodíku docházelo vždy po čtyřech minutách. Nastavení průtočného množství se provádělo manuálně regulátorem průtoku vodíku těsně před vstupem vodíku do sání motoru. Na počátku testu nebyl přidáván žádný vodík. Průtočné množství vodíku s každým dalším 4 minutovým intervalem postupně skokově rostlo. Maxima průtočného množství vodíku bylo dosaženo po 28 minutách. V následujících 4 minutových intervalech se průtočné množství vodíku postupně snižovalo (ve stejných krocích, jako rostlo) až na nulu. Samotný sledovaný test při daném zatížení trval tedy vždy 1 h. Vše je patrné z tabulek uvedených níže.

Získaná naměřená data, která byla zaznamenána po 1s jsem vyhodnotil pomocí programu Microsoft Excel 2007. K vyhodnocení jsem použil vždy střední hodnotu příslušných dat z prostředních 2 minut daného 4 minutového intervalu. To kvůli tomu, abych do vyhodnocování nezahrnul oblasti, kdy se reguloval průtok vodíku. Tímto způsobem jsem dostal průměrné hodnoty všech 4 minutových intervalů, které jsem zpracoval do tabulky. Vzhledem k počtu dat bylo důležité vymyslet vhodný vzorec, jehož pomocí program vypočítal příslušné střední hodnoty.

Příklad použitého vzorce pro výpočet průměrných hodnot daných intervalů:

$$f_x = \text{PRŮMĚR}(\text{POSUN}(\text{K\$2}; 60 + 240 * (\$S9 - 1); 0; 120; 1)) \quad (2)$$

Dále bylo třeba spočítat spotřebu paliva (nafty) v daných intervalech. Počítač zaznamenával pouze celkový úbytek hmotnosti palivové nádrže, jež byl navíc ve formě textu. Tyto hodnoty bylo tedy potřeba nejprve převést na číslo.

Příklad použitého vzorce pro výpočet spotřeby paliva v daném intervalu:

$$f_x = ((\text{POSUN}(\$F\$2; 240 * S6; 0; 1; 1)) - (\text{POSUN}(\$F\$2; 240 * S5; 0; 1; 1)))/4 * 60 \quad (3)$$

Některé hodnoty jsem následně použil pro výpočet dalších veličin, které jsou uvedeny také v tabulce. Pro názornost jsem v každém sloupci tabulky daného testu a režimu zatížení využil funkce podmíněného formátování, jež změny veličin názorně, barevně odlišila. S růstem dané veličiny tak stoupá intenzita barvy daného pole od žluté, až po červenou. Pro lepší představu jsem z těchto dat sestavil grafy. Jak je patrné z tabulky, tak hodnoty při zvyšování obsahu vodíku, nekorespondují s hodnotami při jeho následném snižování. Získané body grafu jsem tedy proložil exponenciální spojnici trendů. Z této přímky je z grafů jasně patrné, zda s přibývajícím obsahem vodíku dochází k růstu, či poklesu sledované veličiny. Další spojnicové grafy, jsem uvedl v příloze. Znázorňují změnu příslušné veličiny v závislosti na růstu a poklesu přidávaného množství vodíku.

Použité vzorce:

Hustota vzduchu (kg/m^3):

$$\rho_{\text{vzduch}} = \frac{0,4644}{t_{\text{vzd}} + 273} \cdot \left\{ \frac{p_b}{1000} \cdot 7,50064 - \frac{\varphi}{100} \cdot (0,412 \cdot t - 1,6) \right\} \quad (4)$$

Průtok vzduchu (dm^3/min):

$$G_{V_vzduch} = \frac{G_{m_vzduch} \cdot 1000}{\rho_{\text{vzduch}} \cdot 60} \quad (5)$$

Výkon motoru (kW):

$$P = \frac{M \cdot \omega}{1000} = M \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60 \cdot 1000} \quad (6)$$

Teplo, které se uvolní při dokonalém spálení daného paliva (MJ/h):

$$Q_{H_2} = Hu_{H_2} \cdot G_{m_H_2} \quad (7)$$

$$Q_{\text{nafta}} = Hu_{\text{nafta}} \cdot M_p \quad (8)$$

Teoretická uvolněná tepla jsem použil k výpočtu mnou stanoveného energetického ekvivalentu vodíku (9). Díky velké výhřevnosti vodíku i při relativně nízkém obohacování (do 4% vodíku v objemu vzduchu) je zaznamenán poměrně rapidní nárůst uvolněného tepla

$$E_{H2} = \frac{Q_{H2}}{Q_{H2} + Q_{nafta}} \quad (9)$$

Měrná spotřeba paliva (g/kW· h)

$$m_p = \frac{M_p + G_{m-H2}}{P} \cdot 100 \quad (10)$$

Měrná spotřeba paliva je veličina, která udává kolik hmotnostního množství paliva je třeba na vyprodukování jednotky energie. Vzhledem k tomu, že na naměřeném výkonu se podílí obě paliva, zahrnul jsem tedy do vzorce hmotnostní množství obou paliv.

Účinnost motoru:

$$\eta = \frac{P}{Q} = \frac{P}{Q_{H2} + Q_{nafta}} \quad (11)$$

Do vzorce (11) jsem dosadil veličiny v základních jednotkách tzn. P (W) a Q (J/s).

V následujících tabulkách jsou zmiňované mnou zpracované výsledky měření s dalšími dopočtenými hodnotami. Jelikož tabulka obsahovala poměrně značné množství hodnot, byl jsem nucen jí kvůli vložení do textového editoru rozdělit do více tabulek. V tabulkách 10-13 jsou uvedeny výsledky z prvního měření (1500 1/min) při 25% zatížení. Výsledky 50% zatížení jsou uvedeny v tabulkách 14-17. Následují tabulky s hodnotami druhého měření (1900 1/min). Tabulky 18-21 obsahují hodnoty při 25% zatížení a tabulky 22-25 při 50% zatížení. Za těmito tabulkami jsou vloženy grafy, jež znázorňují změny sledovaných veličin na množství přidávaného vodíku.

čas (min)	$G_{V\ H_2}$ (dm ³ /min)	$G_{m\ H_2}$ (kg/h)	G_{vzd} (dm ³ /min)	$G_{m\ vzd}$ (kg/h)	$G_{m\ H_2}/G_{m\ vzd}$	$G_{V\ H_2}/G_{V\ vzd}$	$G_{m\ H_2}/M_p$	E_{H_2}	Q_{H_2} (MJ/h)
25%/1500									
0:00	0,000	0,000	3830,070	265,989	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000
0:04	7,900	-	3855,724	267,764	-	0,205%	0,000%	0,000%	0,000
0:08	15,900	0,085	3852,796	267,563	0,032%	0,413%	1,667%	4,419%	10,186
0:12	26,200	0,140	3895,939	269,898	0,052%	0,672%	2,729%	7,037%	16,776
0:16	32,000	0,171	3943,511	272,942	0,063%	0,811%	3,373%	8,555%	20,491
0:20	74,900	0,400	3961,070	274,160	0,146%	1,891%	7,843%	17,868%	47,932
0:24	112,300	0,600	3994,015	275,508	0,218%	2,812%	11,561%	24,281%	71,898
0:28	150,000	0,800	3996,136	275,657	0,290%	3,754%	15,326%	29,830%	95,864
0:32	112,300	0,600	3980,916	274,610	0,218%	2,821%	11,730%	24,550%	71,898
0:36	74,900	0,400	3972,799	273,128	0,146%	1,885%	7,937%	18,043%	47,932
0:40	32,000	0,171	3960,108	272,259	0,063%	0,808%	3,413%	8,649%	20,491
0:44	26,200	0,140	3956,023	271,978	0,051%	0,662%	2,811%	7,234%	16,776
0:48	15,900	0,085	3952,156	271,713	0,031%	0,402%	1,707%	4,520%	10,186
0:52	7,900	0,000	3951,768	271,686	0,000%	0,200%	0,000%	0,000%	0,000
0:56	0,000	0,000	3952,204	271,714	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000

Tab 10 Shrnující tabulka prvního měření, 25% zatížení

čas (min)	Q_{nafta} (MJ/h)	M_p (kg/h)	m_p (g/kWh)	M (Nm)	Nárůst M (%)	P (kW)	t_{vzd} (°C)	φ (%)	t_p (°C)
25%/1500									
0:00	222,264	5,145	23,167	141,383	0,000%	22,208	22,992	43,342	27,833
0:04	220,968	5,115	23,028	141,408	0,018%	22,212	23,000	43,000	29,433
0:08	220,320	5,100	22,627	145,883	3,183%	22,915	23,000	42,133	30,767
0:12	221,616	5,130	21,870	153,408	8,505%	24,097	23,725	41,000	31,000
0:16	219,024	5,070	21,471	155,400	9,914%	24,410	24,000	40,000	31,617
0:20	220,320	5,100	19,975	175,292	23,983%	27,535	24,000	39,000	32,000
0:24	224,208	5,190	19,175	192,233	35,966%	30,196	25,000	38,867	32,000
0:28	225,504	5,220	18,005	212,858	50,554%	33,436	25,000	38,000	32,000
0:32	220,968	5,115	19,056	190,925	35,041%	29,990	25,000	37,000	32,217
0:36	217,728	5,040	20,131	172,033	21,679%	27,023	26,000	37,000	33,000
0:40	216,432	5,010	21,911	150,533	6,472%	23,646	26,000	36,000	33,000
0:44	215,136	4,980	22,297	146,183	3,395%	22,962	26,000	36,000	33,000
0:48	215,136	4,980	22,766	141,633	0,177%	22,248	26,000	36,000	33,000
0:52	213,192	4,935	22,976	136,742	-3,283%	21,479	26,000	36,000	33,000
0:56	220,320	5,100	24,290	133,667	-5,458%	20,996	26,000	36,492	33,000

Tab 11 Shrnující tabulka prvního měření, 25% zatížení

čas (min)	p _{vzd za mch} (kPa)	t _{vuf pred} (°C)	t _{vuf za} (°C)	t _{olej} (°C)	t _{vzd za} (°C)	t _{vzd za mch} (°C)	t _{chl} (°C)	t _{v. mch} (°C)	p _{vuf} (kPa)
25%/1500									
0:00	95,292	296,333	191,392	72,114	42,905	32,835	75,022	34,538	119,904
0:04	105,000	308,025	236,033	82,657	46,177	33,625	77,731	36,154	120,728
0:08	109,292	318,042	251,583	86,946	47,481	34,947	78,995	37,975	120,757
0:12	111,400	325,217	259,275	89,555	48,066	35,333	81,286	33,881	121,305
0:16	111,000	322,442	259,742	91,799	48,418	31,787	82,468	26,303	121,899
0:20	115,817	346,175	271,792	93,471	49,830	29,260	82,924	25,963	122,802
0:24	121,883	370,467	290,558	95,223	51,713	28,273	84,205	26,349	123,727
0:28	128,633	397,492	309,925	97,525	53,669	28,190	85,204	26,876	124,643
0:32	124,233	373,600	301,683	97,780	52,433	28,366	84,789	26,939	123,733
0:36	118,942	348,525	284,933	97,323	50,728	28,421	84,738	26,682	122,853
0:40	112,108	319,617	263,708	95,969	48,755	28,288	83,455	26,378	121,826
0:44	110,000	313,217	255,358	95,099	47,996	28,018	83,260	26,142	121,506
0:48	108,000	306,567	249,283	94,208	47,453	27,740	82,272	25,959	121,248
0:52	106,400	299,517	243,850	93,810	46,941	27,533	82,071	25,778	120,956
0:56	105,125	295,525	239,958	93,290	46,638	27,295	82,283	25,635	120,828

Tab 12 Shrnující tabulka prvního měření, 25% zatížení

čas (min)	η (%)	p _{vzd za} (kPa)	p _{olej} (kPa)	HC (ppm)	NO _x (ppm)	CO (ppm)	CO (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)
25%/1500									
0:00	35,971%	110,659	484,950	33,128	769,042	198,950	0,0086	4,890	15,796
0:04	36,188%	111,828	469,908	37,210	769,342	177,325	0,0069	4,825	16,051
0:08	35,789%	112,491	462,858	39,870	798,042	140,575	0,0061	4,842	16,002
0:12	36,390%	113,223	457,558	40,388	835,867	117,108	0,0050	4,839	15,895
0:16	36,689%	113,489	453,533	40,965	810,467	122,242	0,0045	4,732	15,995
0:20	36,952%	115,025	450,458	38,448	980,250	62,450	0,0021	4,775	15,367
0:24	36,712%	116,670	446,700	36,513	1183,617	40,333	0,0000	4,849	14,776
0:28	37,455%	118,370	440,900	34,688	1464,817	34,017	0,0002	4,927	14,100
0:32	36,865%	116,716	440,817	35,318	1201,958	38,525	0,0001	4,813	14,758
0:36	36,619%	115,152	442,883	36,645	992,317	58,642	-0,0001	4,725	15,361
0:40	35,929%	113,319	447,725	38,610	805,600	124,900	0,0018	4,617	16,059
0:44	35,645%	112,851	449,250	39,610	782,333	142,042	0,0018	4,590	16,207
0:48	35,546%	112,430	450,942	40,778	752,450	170,817	0,0038	4,565	16,396
0:52	36,270%	111,966	451,925	42,273	722,367	206,433	0,0054	4,536	16,594
0:56	34,308%	111,734	452,492	42,133	719,467	222,092	0,0070	4,536	16,671

Tab 13 Shrnující tabulka prvního měření, 25% zatížení

čas (min)	$G_{V\ H_2}$ (dm ³ /min)	$G_{m\ H_2}$ (kg/h)	$G_{V\ vzd}$ (dm ³ /min)	$G_{m\ vzd}$ (kg/h)	$G_{m\ H_2}/G_{m\ vzd}$	$G_{V\ H_2}/G_{V\ vzd}$	$G_{m\ H_2}/M_p$	E_{H_2}	Q_{H_2} (MJ/h)
50%/1500									
1:00	0,000	0,000	4870,176	334,825	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000
1:04	7,900	-	4879,386	335,460	-	0,162%	0,000%	0,000%	0,000
1:08	15,900	0,085	4889,956	335,064	0,025%	0,325%	0,768%	2,085%	10,186
1:12	26,200	0,140	4906,661	335,474	0,042%	0,534%	1,270%	3,402%	16,776
1:16	32,000	0,171	4904,981	334,826	0,051%	0,652%	1,549%	4,119%	20,491
1:20	74,900	0,400	4928,822	335,498	0,119%	1,520%	3,623%	9,132%	47,932
1:24	112,300	0,600	4972,505	337,353	0,178%	2,258%	5,398%	13,023%	71,898
1:28	150,000	0,800	5003,408	339,013	0,236%	2,998%	7,237%	16,717%	95,864
1:32	112,300	0,600	4994,313	337,721	0,178%	2,249%	5,420%	13,069%	71,898
1:36	74,900	0,400	4987,840	336,176	0,119%	1,502%	3,623%	9,132%	47,932
1:40	32,000	0,171	4963,890	334,566	0,051%	0,645%	1,547%	4,114%	20,491
1:44	26,200	0,140	4958,083	334,175	0,042%	0,528%	1,268%	3,398%	16,776
1:48	15,900	0,085	4956,253	334,052	0,025%	0,321%	0,771%	2,094%	10,186
1:52	7,900	0,000	4955,895	334,028	0,000%	0,159%	0,000%	0,000%	0,000
1:56	0,000	0,000	4948,798	333,549	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000
2:00	KONEC								

Tab 14 Shrnující tabulka prvního měření, 50% zatížení

čas (min)	Q_{nafta} (MJ/h)	M_p (kg/h)	m_p (g/kWh)	M (Nm)	Nárůst M (%)	P (kW)	t_{vzd} (°C)	ϕ (%)	t_p (°C)
50%/1500									
1:00	476,928	11,040	20,024	351,000	0,000%	55,135	26,000	36,433	33,000
1:04	477,576	11,055	19,944	352,883	0,537%	55,431	26,000	36,000	33,000
1:08	478,224	11,070	19,840	357,942	1,978%	56,225	27,000	35,000	33,000
1:12	476,280	11,025	19,669	361,367	2,953%	56,763	27,658	33,775	34,000
1:16	476,928	11,040	19,707	362,167	3,181%	56,889	28,142	32,108	34,000
1:20	476,928	11,040	19,169	379,925	8,241%	59,678	29,000	31,008	34,000
1:24	480,168	11,115	18,845	395,758	12,752%	62,166	30,000	30,217	34,000
1:28	477,576	11,055	18,320	411,967	17,369%	64,712	30,392	29,317	34,000
1:32	478,224	11,070	18,780	395,600	12,707%	62,141	31,000	28,550	34,000
1:36	476,928	11,040	19,174	379,825	8,212%	59,663	32,000	27,908	34,000
1:40	477,576	11,055	19,777	361,367	2,953%	56,763	32,000	27,100	34,000
1:44	476,928	11,040	19,827	358,983	2,274%	56,389	32,000	27,000	34,000
1:48	476,280	11,025	19,941	354,692	1,052%	55,715	32,000	27,000	34,000
1:52	474,984	10,995	19,972	350,467	-0,152%	55,051	32,000	27,000	34,000
1:56	470,448	10,890	19,980	346,983	-1,144%	54,504	32,000	27,000	34,000
2:00	KONEC								

Tab 15 Shrnující tabulka prvního měření, 50% zatížení

čas (min)	p _{vzd za mch} (kPa)	t _{vyf pred} (°C)	t _{vyf za} (°C)	t _{olej} (°C)	t _{vzd za} (°C)	t _{vzd za mch} (°C)	t _{chl} (°C)	t _{v. mch} (°C)	p _{vyf} (kPa)
50%/1500									
1:00	149,775	499,483	356,192	96,954	71,488	28,246	86,385	29,180	140,408
1:04	157,883	513,817	393,650	101,903	75,586	30,933	87,737	32,155	141,290
1:08	161,000	521,750	403,650	103,946	76,836	33,092	87,645	32,773	141,648
1:12	162,525	526,958	408,467	105,150	77,595	34,214	87,902	32,774	141,946
1:16	163,233	529,750	410,692	105,573	78,058	34,650	87,858	32,890	141,899
1:20	167,958	549,908	422,817	106,143	80,173	35,083	88,017	33,333	143,009
1:24	172,250	568,458	436,892	106,205	82,469	35,355	88,142	33,310	144,062
1:28	176,992	586,558	450,883	106,875	84,586	35,534	88,460	33,131	145,045
1:32	174,000	569,850	443,433	107,551	83,290	35,629	88,218	33,267	144,143
1:36	170,000	552,783	431,108	106,884	81,528	35,926	87,878	33,427	143,192
1:40	165,000	531,850	415,983	106,238	79,088	35,955	87,828	33,483	141,866
1:44	164,000	528,642	411,475	105,737	78,618	35,879	87,480	33,478	141,663
1:48	162,958	523,575	407,508	105,291	78,038	35,848	87,706	33,471	141,299
1:52	161,158	518,267	403,958	104,527	77,442	35,738	87,646	33,335	141,021
1:56	160,408	514,400	400,983	104,467	76,948	35,588	87,650	33,133	140,758
2:00	KONEC								

Tab16 Shrnující tabulka prvního měření, 50% zatížení

čas (min)	η (%)	p _{vzd za} (kPa)	p _{olej} (kPa)	HC (ppm)	NO _x (ppm)	CO (ppm)	CO (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)
50%/1500									
1:00	41,618%	138,247	431,092	27,258	1669,867	45,033	0,0003	8,675	10,590
1:04	41,784%	139,706	410,933	28,560	1695,500	44,858	0,0002	8,664	10,600
1:08	41,443%	140,431	403,700	28,610	1730,550	45,642	0,0007	8,704	10,414
1:12	41,445%	140,893	400,283	27,350	1751,292	45,592	0,0010	8,712	10,276
1:16	41,173%	140,991	398,017	26,093	1775,008	46,000	0,0002	8,714	10,179
1:20	40,933%	143,032	394,675	26,135	1909,475	50,975	0,0010	8,776	9,607
1:24	40,538%	144,938	390,692	26,713	2074,842	60,225	0,0014	8,835	9,068
1:28	40,625%	146,744	386,317	27,063	2239,967	76,975	0,0028	8,901	8,474
1:32	40,665%	145,033	386,817	25,795	2071,167	58,975	0,0025	8,811	9,079
1:36	40,923%	143,176	390,250	24,155	1918,992	49,767	0,0043	8,765	9,568
1:40	41,028%	140,923	393,633	23,363	1770,492	45,367	0,0040	8,732	10,091
1:44	41,118%	140,594	395,667	23,278	1762,033	44,467	0,0014	8,745	10,136
1:48	41,231%	139,963	396,683	22,960	1738,175	44,008	0,0006	8,733	10,251
1:52	41,724%	139,430	397,883	22,415	1719,717	42,683	0,0007	8,717	10,369
1:56	41,708%	138,995	399,017	21,893	1716,567	42,967	0,0006	8,701	10,447
2:00	KONEC								

Tab17 Shrnující tabulka prvního měření, 50% zatížení

čas (min)	G _{V H2} (dm ³ /min)	G _{m H2} (kg/h)	G _{V vzd} (dm ³ /min)	G _{m vzd} (kg/h)	G _{m H2} /G _{m vzd}	G _{V H2} /G _{V vzd}	G _{m H2} /M _p	E _{H2}	Q _{H2} (MJ/h)
25%/1900									
0:00	0,000	0,000	4741,590	329,305	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000
0:04	7,900	-	4743,474	329,436	-	0,167%	0,000%	0,000%	0,000
0:08	15,900	0,085	4750,589	329,930	0,026%	0,335%	2,276%	6,313%	10,186
0:12	26,200	0,140	4753,049	330,101	0,042%	0,551%	3,748%	10,397%	16,776
0:16	32,000	0,171	4755,602	330,028	0,052%	0,673%	4,597%	12,751%	20,491
0:20	74,900	0,400	4815,823	333,614	0,120%	1,555%	10,582%	29,353%	47,932
0:24	112,300	0,600	4861,728	336,509	0,178%	2,310%	15,748%	43,683%	71,898
0:28	150,000	0,800	4888,263	338,346	0,236%	3,069%	21,080%	58,474%	95,864
0:32	112,300	0,600	4877,039	337,569	0,178%	2,303%	15,564%	43,173%	71,898
0:36	74,900	0,400	4827,313	334,131	0,120%	1,552%	10,540%	29,237%	47,932
0:40	32,000	0,171	4770,908	330,227	0,052%	0,671%	4,560%	12,649%	20,491
0:44	26,200	0,140	4764,310	329,770	0,042%	0,550%	3,779%	10,481%	16,776
0:48	15,900	0,085	4763,672	329,726	0,026%	0,334%	2,294%	6,364%	10,186
0:52	7,900	0,000	4738,734	327,998	0,000%	0,167%	0,000%	0,000%	0,000
0:56	0,000	0,000	4736,480	327,840	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000

Tab 18 Shrnující tabulka druhého měření, 25% zatížení

čas (min)	Q _{nafta} (MJ/h)	M _p (kg/h)	mp (g/kWh)	M (Nm)	Nárůst M (%)	P (kW)	t _{vzd} (°C)	φ (%)	t _p (°C)
25%/1900									
0:00	161,352	3,735	41,393	45,350	0,000%	9,023	23,000	37,000	30,000
0:04	161,352	3,735	40,493	46,358	2,223%	9,224	23,000	37,000	30,358
0:08	161,352	3,735	37,504	51,192	12,881%	10,185	23,000	37,000	31,000
0:12	161,352	3,735	35,577	54,742	20,709%	10,892	23,000	37,000	31,000
0:16	160,704	3,720	34,075	57,392	26,553%	11,419	23,225	36,550	31,000
0:20	163,296	3,780	27,093	77,542	70,985%	15,428	23,750	36,000	31,008
0:24	164,592	3,810	24,457	90,625	99,835%	18,031	24,000	36,000	31,892
0:28	163,944	3,795	22,798	101,300	123,374%	20,155	24,000	36,000	32,000
0:32	166,536	3,855	24,978	89,642	97,666%	17,836	24,000	35,950	32,000
0:36	163,944	3,795	27,981	75,350	66,152%	14,992	24,000	35,000	32,000
0:40	162,000	3,750	35,486	55,533	22,455%	11,049	24,000	35,000	32,000
0:44	160,056	3,705	36,330	53,192	17,291%	10,583	24,000	35,000	32,000
0:48	160,056	3,705	36,850	51,692	13,984%	10,285	24,000	35,000	32,000
0:52	157,464	3,645	43,004	42,600	-6,064%	8,476	24,000	35,367	32,000
0:56	157,464	3,645	45,122	40,600	-10,474%	8,078	24,000	36,000	32,000

Tab 19 Shrnující tabulka druhého měření, 25% zatížení

čas (min)	p _{vzd za mch} (kPa)	t _{vyf pred} (°C)	t _{vyf za} (°C)	t _{olej} (°C)	t _{vzd za} (°C)	t _{vzd za mch} (°C)	t _{chl} (°C)	t _{v. mch} (°C)	p _{vyf} (kPa)
25%/1900									
0:00	82,175	205,933	162,283	85,039	46,965	26,324	78,263	24,855	130,505
0:04	83,550	209,058	165,833	87,494	47,595	26,498	78,840	25,313	130,688
0:08	84,658	213,217	168,875	88,084	47,967	26,851	78,750	25,543	131,096
0:12	86,000	217,367	172,483	88,836	48,314	27,048	78,997	25,683	131,373
0:16	86,583	219,800	174,933	89,511	48,529	27,203	79,229	25,708	131,480
0:20	91,008	240,658	187,025	90,258	50,304	27,375	79,968	25,989	133,179
0:24	95,900	259,675	202,400	91,528	52,312	27,891	80,211	26,623	134,827
0:28	99,817	275,258	215,192	92,569	53,760	28,323	80,596	27,095	136,024
0:32	98,000	263,258	211,033	92,904	53,149	28,654	80,575	27,193	135,133
0:36	93,942	244,700	198,275	92,288	51,462	28,736	80,335	26,927	133,569
0:40	88,408	222,400	181,850	91,448	49,360	28,473	79,821	26,423	131,727
0:44	87,000	218,458	175,783	90,760	48,903	28,128	79,808	26,174	131,380
0:48	86,325	216,667	173,083	90,503	48,661	27,921	79,426	26,133	131,261
0:52	84,142	206,908	167,250	90,300	47,768	27,780	79,399	25,993	130,468
0:56	83,292	204,350	164,125	89,735	47,459	27,654	79,325	25,912	130,237

Tab 20 Shrnující tabulka druhého měření, 25% zatížení

čas (min)	η (%)	p _{vzd za} (kPa)	p _{olej} (kPa)	HC (ppm)	NO _x (ppm)	CO (ppm)	CO (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)
25%/1900									
0:00	20,132%	111,885	494,233	97,673	271,217	1343,117	0,0948	2,737	16,066
0:04	20,580%	112,164	490,708	97,643	269,400	1342,833	0,0947	2,738	16,060
0:08	21,376%	112,617	489,608	95,240	272,892	1342,550	0,0947	2,738	16,040
0:12	22,013%	113,013	488,292	89,685	279,508	1342,275	0,0948	2,737	16,053
0:16	22,688%	113,120	487,758	86,483	282,800	1342,008	0,0948	2,738	16,067
0:20	26,295%	115,080	486,275	59,870	332,733	1341,742	0,0948	2,740	16,072
0:24	27,449%	116,898	484,650	46,070	393,767	1341,500	0,0947	2,741	16,059
0:28	27,928%	118,297	482,708	40,258	468,942	1341,250	0,0947	2,740	16,062
0:32	26,929%	117,320	482,550	45,946	397,992	1341,008	0,0946	2,741	16,058
0:36	25,473%	115,512	483,508	59,650	338,808	1340,775	0,0946	2,743	16,045
0:40	21,797%	113,353	485,033	86,383	285,283	1340,550	0,0946	2,741	16,037
0:44	21,546%	112,997	485,925	91,561	279,158	1340,292	0,0946	2,740	16,048
0:48	21,749%	112,828	486,392	94,598	277,017	1340,050	0,0946	2,740	16,058
0:52	19,378%	111,971	487,083	107,218	263,675	1339,817	0,0945	2,742	16,052
0:56	18,468%	111,714	487,458	107,354	263,433	1339,592	0,0945	2,741	16,053

Tab 21 Shrnující tabulka druhého měření, 25% zatížení

čas (min)	$G_{V\ H_2}$ (dm ³ /min)	$G_{m\ H_2}$ (kg/h)	$G_{V\ vzd}$ (dm ³ /min)	$G_{m\ vzd}$ (kg/h)	$G_{m\ H_2}/G_{m\ vzd}$	$G_{V\ H_2}/G_{V\ vzd}$	$G_{m\ H_2}/M_p$	E_{H_2}	Q_{H_2} (MJ/h)
50%/1900									
1:08	0,000	0,000	6578,482	455,331	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000
1:12	7,900	-	6598,178	455,158	-	0,120%	0,000%	0,000%	0,000
1:16	15,900	0,085	6610,724	455,888	0,019%	0,241%	0,705%	1,955%	10,186
1:20	26,200	0,140	6645,211	456,868	0,031%	0,394%	1,154%	3,200%	16,776
1:24	32,000	0,171	6671,710	457,158	0,037%	0,480%	1,413%	3,918%	20,491
1:28	74,900	0,400	6724,076	460,752	0,087%	1,114%	3,300%	9,155%	47,932
1:32	112,300	0,600	6806,249	464,829	0,129%	1,650%	4,932%	13,681%	71,898
1:36	150,000	0,800	6869,695	469,166	0,171%	2,184%	6,552%	18,174%	95,864
1:40	112,300	0,600	6834,561	465,218	0,129%	1,643%	4,944%	13,715%	71,898
1:44	74,900	0,400	6761,567	460,256	0,087%	1,108%	3,317%	9,200%	47,932
1:48	32,000	0,171	6713,118	455,443	0,038%	0,477%	1,425%	3,953%	20,491
1:52	26,200	0,140	6704,134	454,836	0,031%	0,391%	1,165%	3,232%	16,776
1:56	15,900	0,085	6700,864	454,618	0,019%	0,237%	0,706%	1,957%	10,186
2:00	7,900	0,000	6678,628	453,110	0,000%	0,118%	0,000%	0,000%	0,000
2:04	0,000	0,000	6688,221	453,761	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000
2:08	KONEC								

Tab 22 Shrnující tabulka druhého měření, 50% zatížení

čas (min)	Q_{nafta} (MJ/h)	M_p (kg/h)	m_p (g/kWh)	M (Nm)	Nárůst M (%)	P (kW)	t_{vzd} (°C)	ϕ (%)	t_p (°C)
50%/1900									
1:08	525,528	12,165	21,290	287,175	0,000%	57,139	24,000	37,000	31,000
1:12	521,640	12,075	21,095	287,692	0,180%	57,241	25,000	36,000	31,592
1:16	520,992	12,060	21,074	289,642	0,859%	57,629	25,092	35,125	32,000
1:20	524,232	12,135	20,890	295,325	2,838%	58,760	26,000	34,892	33,000
1:24	522,936	12,105	20,841	296,050	3,090%	58,904	27,000	34,000	33,000
1:28	523,584	12,120	20,086	313,275	9,089%	62,332	27,000	33,000	33,000
1:32	525,528	12,165	19,635	326,742	13,778%	65,011	28,000	32,350	33,850
1:36	527,472	12,210	19,181	340,892	18,705%	67,826	28,000	31,775	33,983
1:40	524,232	12,135	19,677	325,283	13,270%	64,721	29,000	31,000	34,000
1:44	520,992	12,060	20,245	309,325	7,713%	61,546	29,000	30,058	34,000
1:48	518,400	12,000	20,802	294,067	2,400%	58,510	30,000	30,000	34,000
1:52	519,048	12,015	20,974	291,267	1,425%	57,953	30,000	29,692	34,000
1:56	520,344	12,045	21,087	289,108	0,673%	57,523	30,000	29,033	34,000
2:00	519,696	12,030	21,234	284,742	-0,847%	56,654	30,000	29,000	34,000
2:04	520,344	12,045	21,261	284,733	-0,850%	56,653	30,000	29,000	34,000
2:08	KONEC								

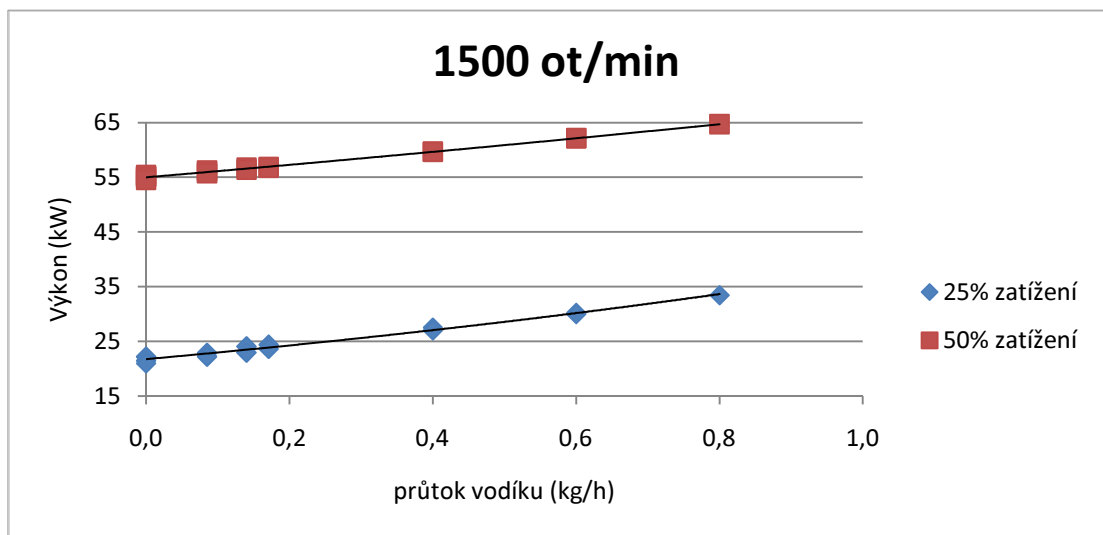
Tab 23 Shrnující tabulka druhého měření, 50% zatížení

čas (min)	p _{vzd za mch} (kPa)	t _{vyf pred} (°C)	t _{vyf za} (°C)	t _{olej} (°C)	t _{vzd za} (°C)	t _{vzd za mch} (°C)	t _{chl} (°C)	t _{v. mch} (°C)	p _{vyf} (kPa)
50%/1900									
1:08	138,625	433,567	320,058	95,408	88,946	29,853	85,920	30,021	175,103
1:12	141,950	436,683	333,583	103,407	90,180	32,506	86,227	29,703	175,622
1:16	143,008	439,750	337,017	104,296	90,847	33,541	86,212	29,382	176,135
1:20	145,000	445,025	340,792	105,865	91,994	34,581	86,148	30,723	176,915
1:24	145,967	447,375	343,000	105,739	92,408	35,233	86,084	31,226	177,088
1:28	149,075	461,858	352,425	106,611	94,882	35,812	86,436	31,703	179,461
1:32	152,000	473,033	360,825	106,831	96,978	35,933	86,456	31,244	181,583
1:36	155,275	485,317	369,842	107,792	99,158	36,127	86,904	31,280	183,652
1:40	153,158	474,633	364,775	108,061	97,540	36,414	86,966	31,948	181,561
1:44	150,025	461,500	355,608	107,308	95,339	36,237	86,543	31,149	179,083
1:48	146,825	447,642	345,258	106,407	92,867	36,134	86,403	31,583	176,496
1:52	145,950	444,542	342,000	106,412	92,215	36,023	86,380	31,410	175,888
1:56	145,100	442,667	340,400	106,146	91,948	35,926	86,071	31,308	175,705
2:00	144,158	438,592	337,583	105,976	91,220	35,822	85,988	31,272	174,934
2:04	144,142	438,083	336,942	106,058	91,247	35,984	85,966	31,695	174,953
2:08	KONEC								

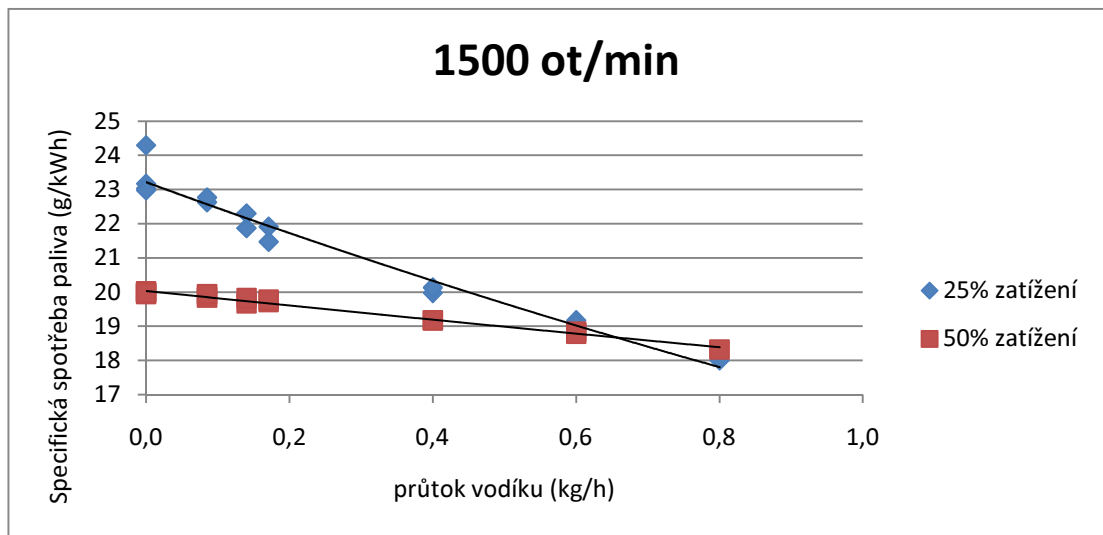
Tab 24 Shrnující tabulka druhého měření, 50% zatížení

čas (min)	η (%)	p _{vzd za} (kPa)	p _{olej} (kPa)	HC (ppm)	NO _x (ppm)	CO (ppm)	CO (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)
50%/1900									
1:08	39,141%	156,199	468,850	23,402	1327,475	96,483	0,0034	6,645	11,185
1:12	39,504%	156,506	461,367	25,973	1334,150	92,742	0,0032	6,599	11,263
1:16	39,058%	156,973	458,792	25,125	1338,100	87,175	0,0030	6,576	11,194
1:20	39,100%	157,987	457,850	23,387	1364,117	77,483	0,0024	6,611	11,146
1:24	39,022%	158,195	457,042	22,129	1373,408	72,642	0,0020	6,603	11,076
1:28	39,263%	160,944	455,717	20,715	1508,483	47,592	0,0008	6,590	10,811
1:32	39,175%	163,172	454,592	19,558	1606,250	36,667	0,0006	6,562	10,619
1:36	39,172%	165,473	452,900	19,755	1727,583	29,900	0,0005	6,540	10,438
1:40	39,085%	163,245	453,100	18,798	1609,133	36,375	0,0008	6,552	10,646
1:44	38,944%	160,438	454,158	18,310	1491,292	48,442	0,0010	6,565	10,933
1:48	39,087%	157,683	455,800	18,233	1400,358	69,333	0,0017	6,588	11,110
1:52	38,936%	157,063	456,375	17,153	1391,575	74,425	0,0020	6,599	11,101
1:56	39,033%	156,826	456,808	16,618	1378,258	79,100	0,0018	6,614	11,201
2:00	39,245%	156,003	457,025	16,333	1364,967	87,342	0,0019	6,605	11,273
2:04	39,195%	156,020	457,200	15,653	1372,075	88,650	0,0023	6,633	11,274
2:08	KONEC								

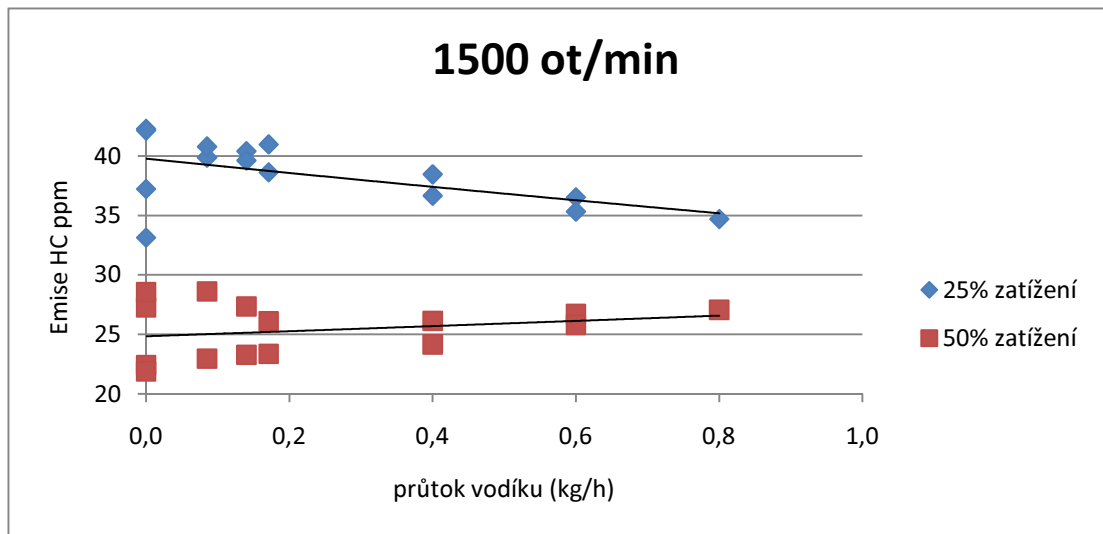
Tab 25 Shrnující tabulka druhého měření, 50% zatížení



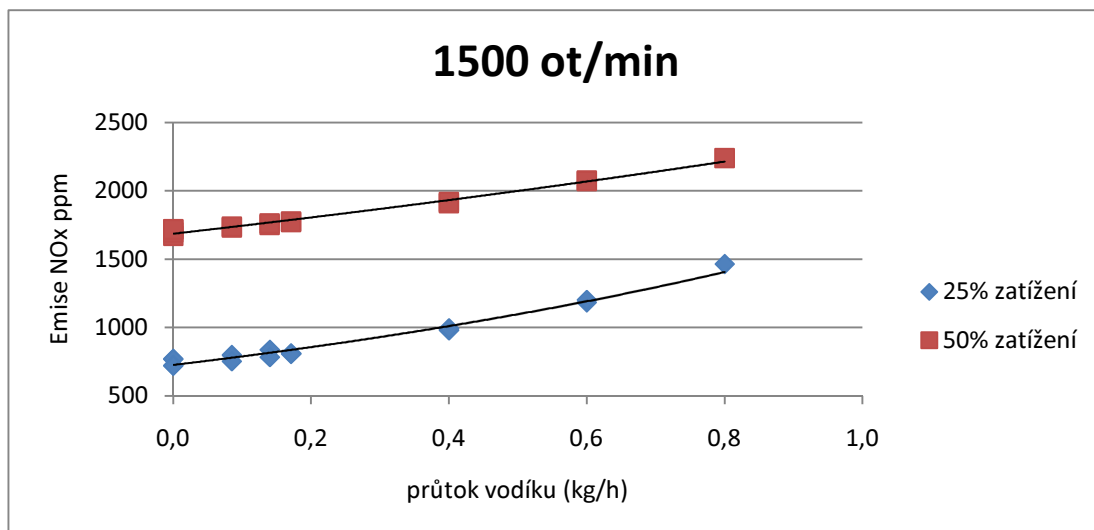
Graf 12 Vliv přidaného množství vodíku na výkon motoru



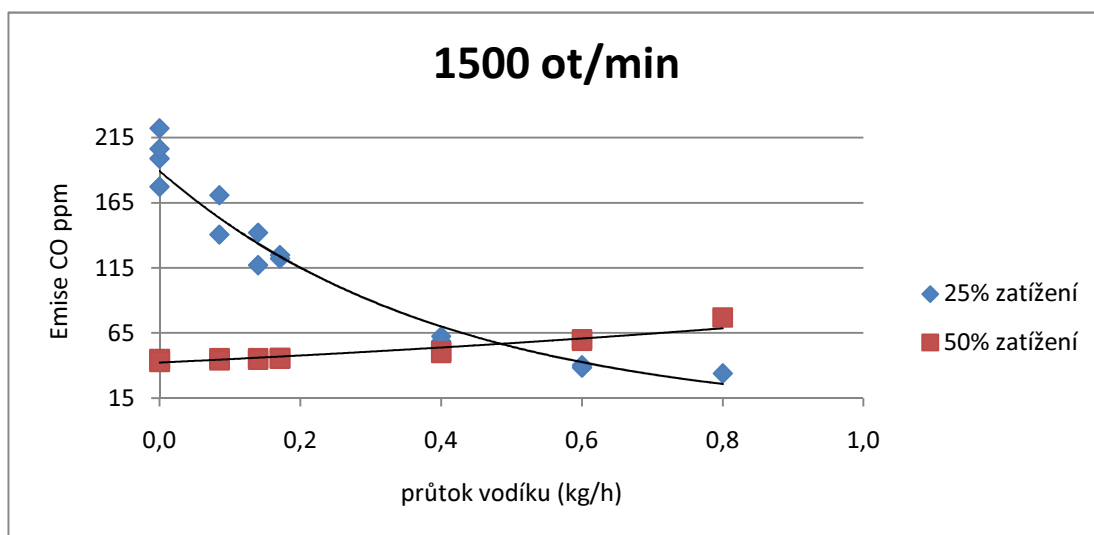
Graf 13 Vliv přidaného množství vodíku na specifickou spotřebu paliva



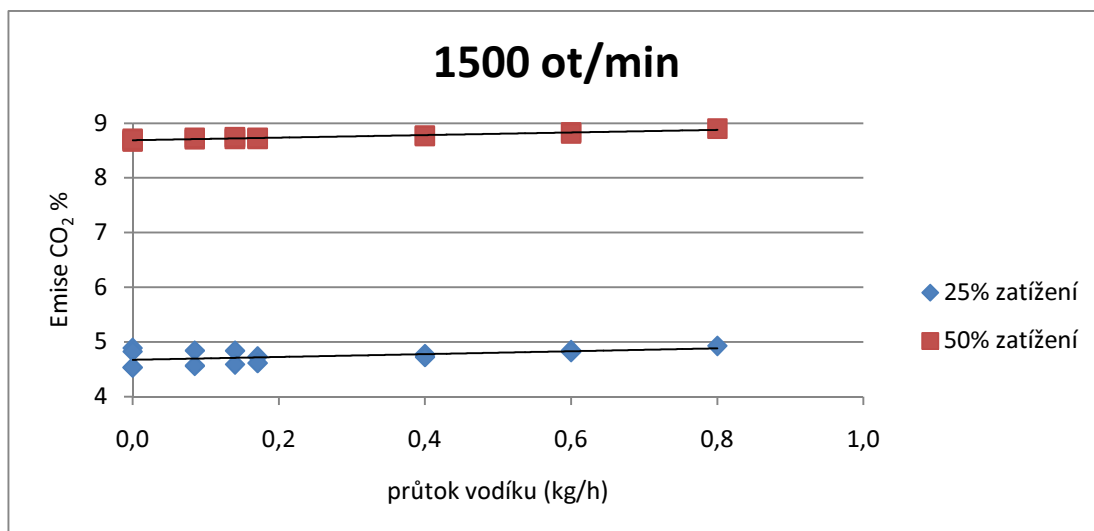
Graf 14 Vliv přidaného množství vodíku na emise CH



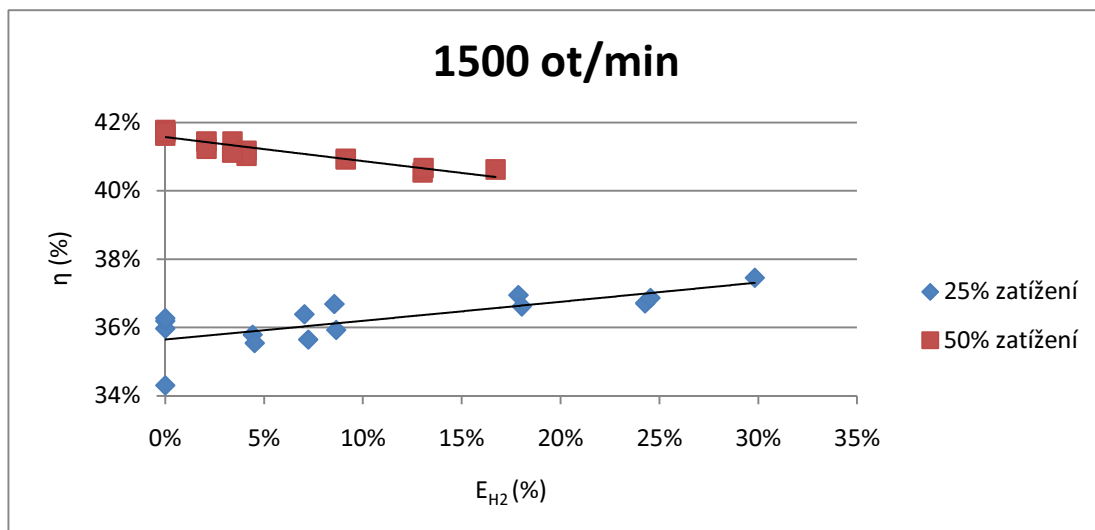
Graf 15 Vliv přidaného množství vodíku na emise NO_x



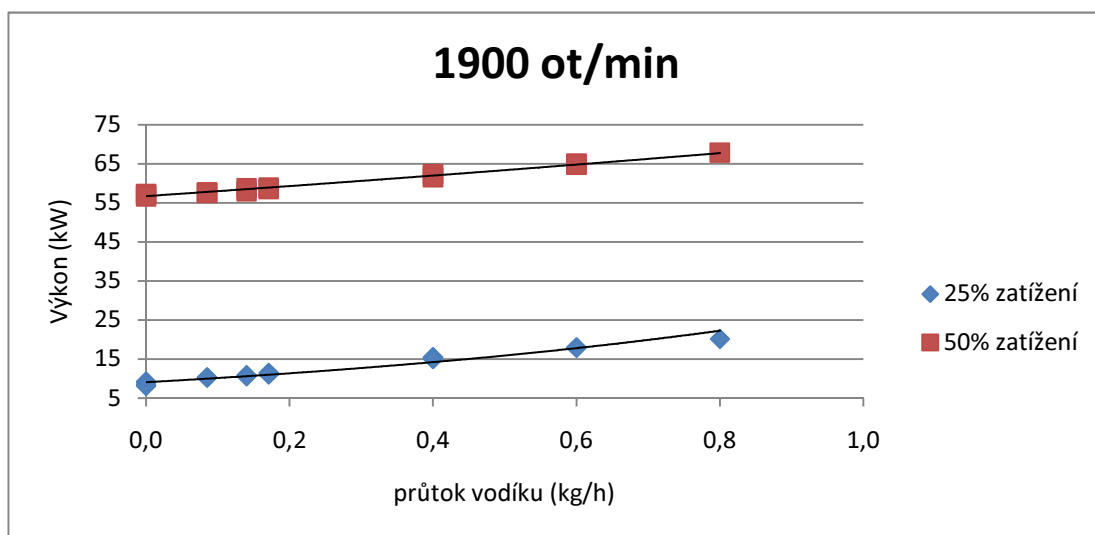
Graf 16 Vliv přidaného množství vodíku na emise CO



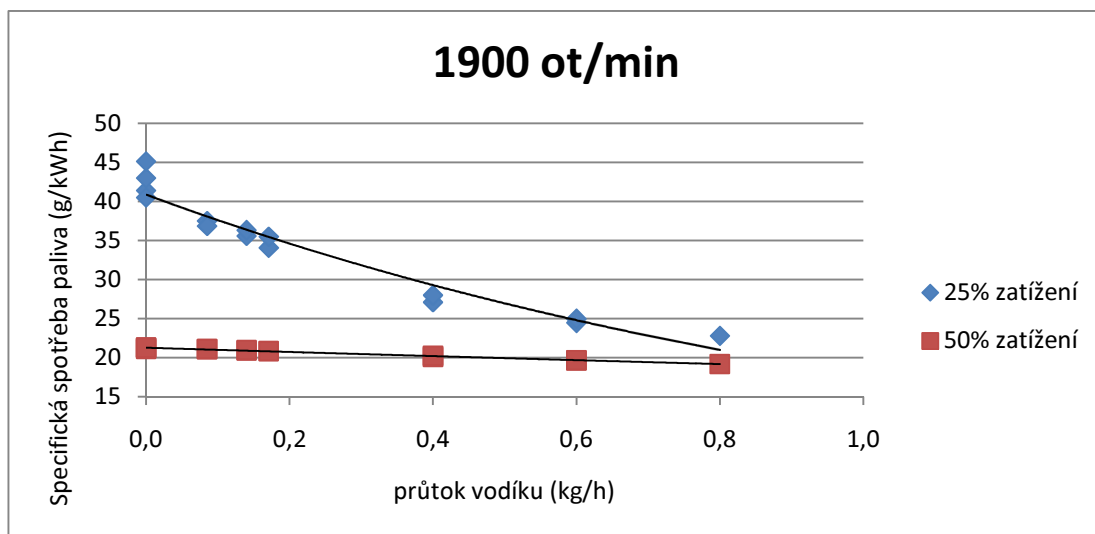
Graf 17 Vliv přidaného množství vodíku na emise CO₂



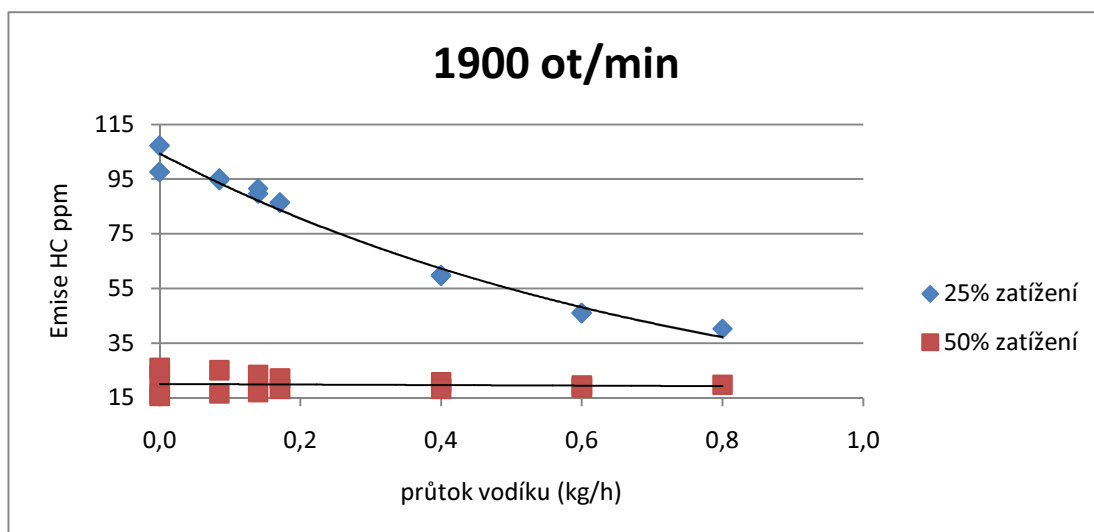
Graf 18 Vliv přídavku vodíku na tepelnou účinnost motoru



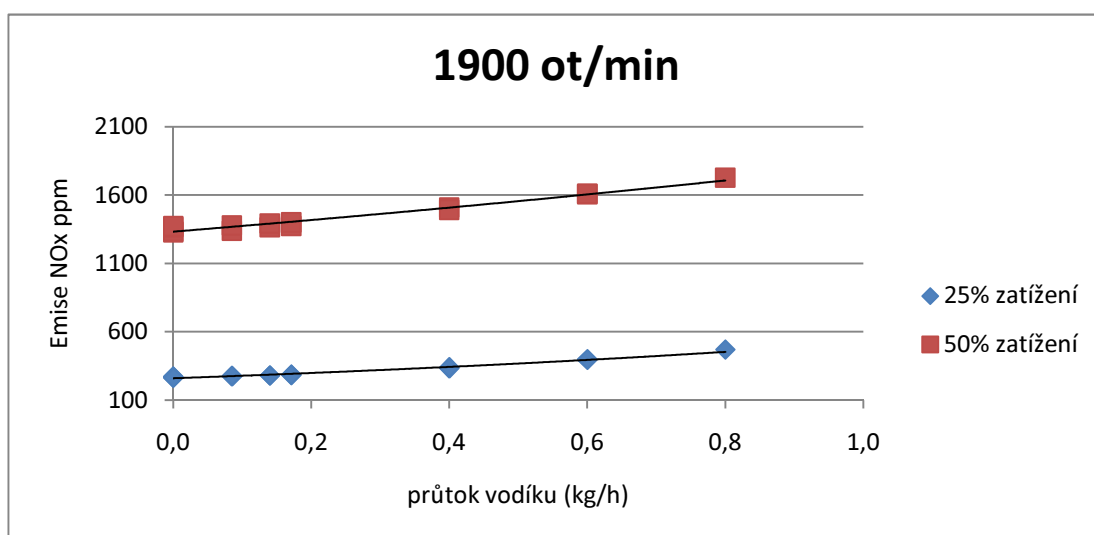
Graf 19 Vliv přidaného množství vodíku na výkon motoru



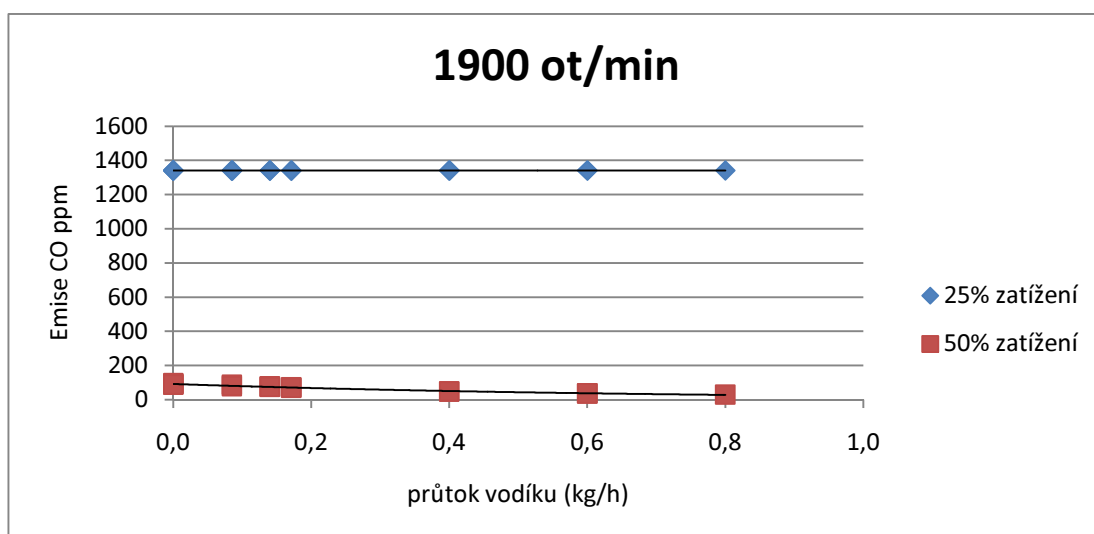
Graf 20 Vliv přidaného množství vodíku na specifickou spotřebu paliva



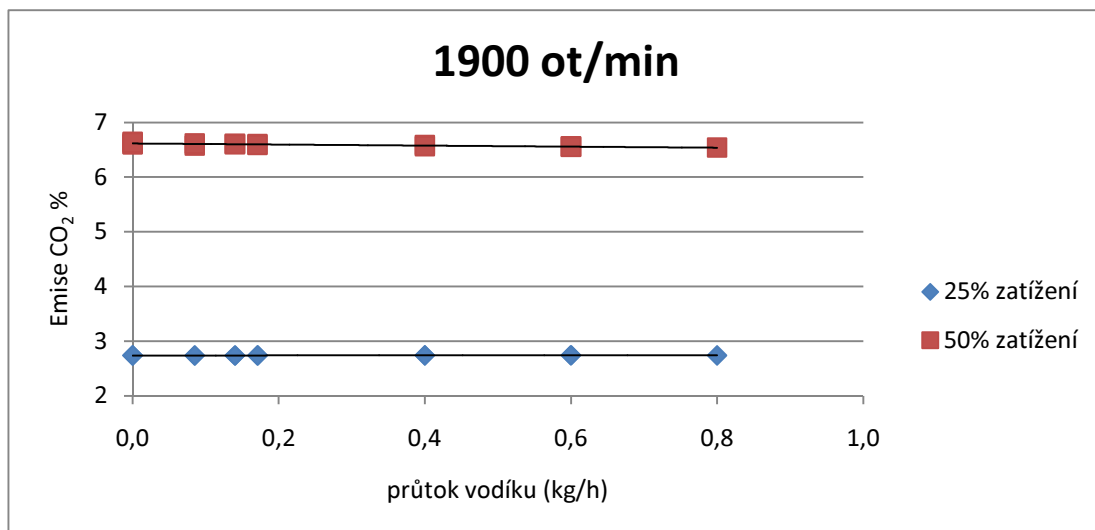
Graf 21 Vliv přidaného množství vodíku na emise CH



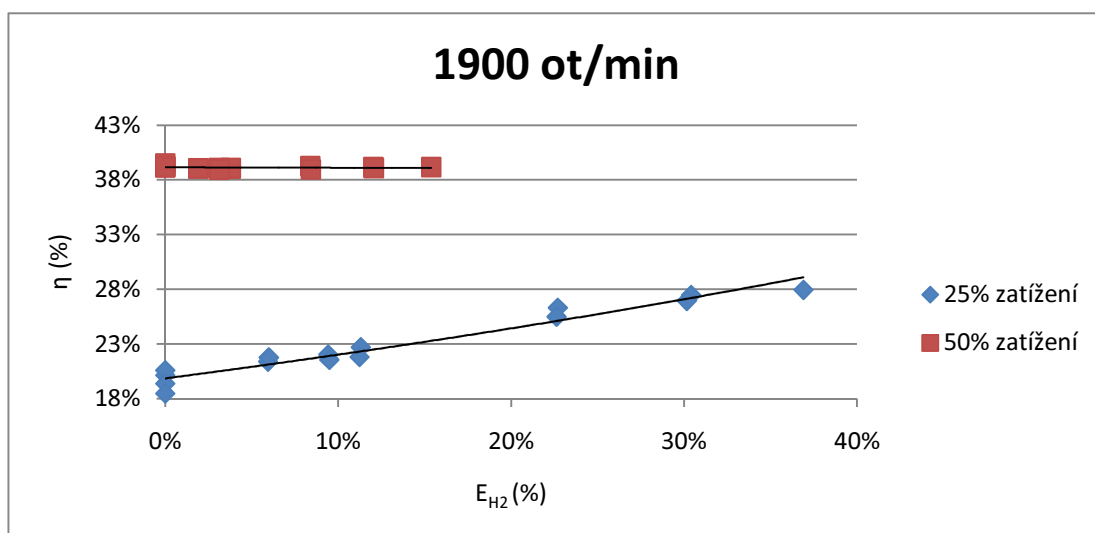
Graf 22 Vliv přidaného množství vodíku na emise NO_x



Graf 23 Vliv přidaného množství vodíku na emise CO



Graf 24 Vliv přidaného množství vodíku na emise CO₂



Graf 25 Vliv přídavku vodíku na tepelnou účinnost motoru

Jak je patrné z tabulek 10,14,18 a 22 množství vodíku se v měřeních měnilo od 0-0,8 kg/h (0-150 l/min). Motor při maximálním průtoku vodíku nasával 275-469 kg/h respektive 3996-6869 dm³/min vzduchu v závislosti na zatížení a otáčkách. Z těchto čísel je patrné, že přidávané množství vodíku vzhledem k nasávanému množství vzduchu je opravdu malé. Jak je patrné z tabulek, tak objemový obsah vodíku ve vzduchu se pohybuje pod 4%. Pokud by bylo množství vodíku větší, než 4% mohlo by dojít ke vznícení, jak bylo v práci několikrát uvedeno. Průtok vzduchu v l/min se nemění stejně jako průtok v kg/h. To je zapříčiněno tím, že ve vzorci pro přepočet je obsažena hustota vzduchu, která je závislá na teplotě a ta se v průběhu testu nepatrně měnila. Množství vodíku vzhledem k naftě se při maximálním průtoku vodíku v závislosti na otáčkách a zatížení měnilo od 7-21%. Tyto hodnoty nám říkají o kolik procent více paliva (vodíku) se do procesu spalování přidalo. Vypovídající schopnost má především uvolněné teplo, jež jsem pro obě paliva v tabulce také uvedl. Jak je patrné z tabulek, tak i přídavek pouze malého množství vodíku, jímž je palivo (nafta) obohaceno, znamená poměrně velký nárůst uvolněného tepla. V tabulkách 11,15,19 a 23 jsou uvedeny změny velmi sledovaných a diskutovaných veličin. A to změny měrné spotřeby paliva, jež se v každém měření s přídavkem vodíku snižovala (graf 13,20). To je zapříčiněno tím, že při vzrůstajícím průtoku vodíku vzrůstal točivý moment motoru a tedy i výkon (graf 12,19). V tabulkách 12,16,20 a 24 jsou informační hodnoty různých veličin. Z těchto tabulek je patrné, že v důsledku růstu obsahu vodíku ve směsi, roste teplota a tlak ve výfuku. Dmychadlo tedy stlačuje nasávaný vzduch na větší tlak a ten se více zahřívá. V důsledku nárůstu tlaku dmychadlo stlačuje více vzduchu. S uvedených jevů si je možné odvodit, že s růstem obsahu vodíku ve směsi stoupá teplota ve válci a na píst působí větší síla. V tabulkách 13,17,21 a 25 jsou také velmi sledované veličiny a to emise výfukových plynů. Jejich změny jsou zřetelnější z grafů uvedených pod tabulkami. Jak je patrné z grafů 14 a 21, tak přídavek vodíku má příznivý vliv na emise HC při nižším (25%) zatížení. Při posuzování vlivu obsahu vodíku na emise HC při vyšším (50%) zatížení, je situace obtížnější. Jak je patrné z tabulek 17 a 25, je zde znatelný rozdíl mezi začátkem a koncem měření. Tedy v situacích, kdy je přídavek vodíku nulový a motor spaluje pouze naftu. Na konci testu jsou hodnoty zdaleka nejnižší. Domnívám se, že tato skutečnost by mohla být zapříčiněna čistící schopností vodíku, jež byla zmíněna v rešeršní části. V tomto režimu by tedy k objektivnímu posouzení

vlivu přídavku vodíku na emise HC bylo třeba proložit každý interval, kdy se měnilo množství vodíku, intervalem, kde by se nepřidával žádný vodík. Domnívám se, že poté bychom získali přesnější výsledky. Emise NO_x , jak je patrné z grafu 15 a 22, ve všech případech rostou. A to z důvodu stoupající teploty ve válci, jež roste s množstvím přidaného množství vodíku. Tento problém může řešit vstřikování AdBlue (močovina) do katalytického konvektoru, kde se oxidy dusíku rozkládají na dusík a vodu. Některé oxidy dusíku jsou zdraví škodlivé, napadají plíce a sliznice. Na grafech 16 a 22 je vidět vliv přídavku vodíku na emise CO. Zásadního poklesu bylo dosaženo při otáčkách 1500 1/min a 25% zatížení. Při vyšším zatížení došlo k nárůstu. V otáčkách 1900 1/min a 25% zatížení se hodnoty takřka neměnily a při 50% zatížení došlo k jejich snížení. Emise CO_2 v závislosti na průtoku vodíku jsou patrné z grafů 17 a 24. Zatímco při otáčkách 1500 1/min došlo k mírnému nárůstu této složky v obou režimech. Při otáčkách 1900 1/min a zatížení 50% došlo ke snížení. Při 25% zatížení byly emise CO_2 přibližně konstantní. Plyn CO_2 se podílí na vzniku skleníkového efektu, ale není jedovatý. Emisní norma EURO tyto emise neomezuje. Plyn CO je zdraví škodlivý. Při stanovení jednoznačných závěrů vlivu přídavku vodíku na emise oxidů uhlíku by patrně bylo třeba provést další měření. V některých případech (1500 1/min a 1900 1/min při 25% zatížení) totiž došlo k podobnému jevu, jako v případě emisí HC. A sice k tomu, že se výrazně lišili hodnoty na začátku a konci měření (tab. 13,21). Z grafů 18 a 25 je patrný vliv přídavku vodíku, jenž je vyjádřen jako energetický ekvivalent, na tepelnou účinnost motoru. V nižším zatížení (25%) došlo v obou měřeních vlivem přídavku vodíku k nárůstu tepelné účinnosti motoru. Palivo bylo tedy v tomto režimu lépe využito. Zatímco v nižších otáčkách (1500 1/min) došlo jen k malému zvýšení tepelné účinnosti, ve vyšších otáčkách (1900 1/min) došlo k nárůstu až o 8%. Při vyšším zatížení (50%) byl vliv přídavku vodíku na tepelnou účinnost motoru malý. Při otáčkách 1500 1/min došlo k mírnému snížení, při otáčkách 1900 1/min nenastaly takřka žádné změny.

Domnívám se, že stojíme před branami využívání vodíku jako paliva. Nicméně abychom mohli tuto technologii začít používat v běžném životě, tak je třeba učinit další vývoj v oblasti výroby, skladování a dopravy vodíku. Využívání této technologie již dnes, by bylo patrně poměrně nákladné. Fosilní palivo (nafta) je v současné době i

s přihlédnutím k uvolněnému teplu stále levnější. Přibližné, orientační hodnoty cen obou paliv jsem uvedl v následující tab. 11.

palivo	Vodík	Nafta	Nafta - přepočet
Cena (1kg paliva)	5 € = 125,- Kč	34,- Kč	94,18,- Kč (2,77 kg)
Q (1kg paliva)	119,83 MJ/h	43,2 MJ/h	119,83 MJ/h

Tab. 11 Ekonomická bilance

Z výsledků měření jsou patrné některé příznivé vlivy přidavku vodíku na spalovací proces. Jako je snížení specifické spotřeby paliva (vlivem zvýšení výkonu motoru), nárůst tepelné účinnosti motoru a prokazatelné snížení některých složek výfukových plynů v jistých režimech. K porovnání naměřených výsledků nemám bohužel v rešeršní části dostatečně vhodnou studii. Nejvíce srovnatelnou je studie z University of South Australia. Maximální přiváděné množství bylo $30 \text{ dm}^3/\text{min}$ (H_2/O_2), v laboratořích TUL se přivádělo až $150 \text{ dm}^3/\text{min}$ (H_2). Při porovnávání změn sledovaných veličin na intervalu přívodu vodíku do $30 \text{ dm}^3/\text{min}$, bylo na australské univerzitě vlivem obohacování paliva vodíkem, dosaženo lepších výsledků na spalovací proces ve všech ohledech. Což by mohlo být zapříčiněno i vlivem přidavku kyslíku.

Z informací, které jsem získal, mám důvod si myslet, že dnes prodávané generátory vodíku, nejsou schopny pro tuto chvíli vyprodukovat dostatečné množství vodíku, aby se mohli projevit deklarované jevy. Pokud by se však podařilo vyvinout dostatečně výkonnou a účinnou jednotku pro vývin vodíku, tak by se tyto vyvíječe mohli stát zajímavou technologií v oblasti obohacování paliva.

Myslím si, že by v budoucnu velmi efektivním způsobem obohacování směsi mohlo být skladování vodíku v nádrži a jeho následné přivedení do sání motoru. Vefukování množství vodíku by řídila řídicí jednotka, jež by komunikovala s řídicí jednotkou motoru a řadou snímačů. Pak by bylo možné proces obohacování směsi dokonale řídit a maximálně zefektivňovat. Ještě zajímavějších výsledků bychom mohli dosáhnout v případě vefukování, případně vstřikování vodíku přímo do válce. Bylo by samozřejmě třeba učinit měření, jež by nám ukázaly výhody a nevýhody tohoto způsobu.

6 Závěr

Zpracoval jsem poměrně rozsáhlou rešeršní část, která byla podstatným zdrojem teoretických znalostí v oblasti obohacování palivové směsi vodíkem u vznětového motoru. Po získání teoretických znalostí jsem provedl návrh řešení pro přívod vodíku do sání motoru. Následně jsem se soustředil na nejpodstatnější část práce a to na měření, jež probíhala v laboratořích TUL. Testovaným agregátem byl vznětový motor Cummins ISBe4. Měření probíhala při otáčkách 1500 a 1900 1/min a při zatížení 25 a 50%. Množství přiváděného vodíku se v měřeních měnilo od 0-0,8 kg/h (0-150 l/min). Měřicí stanoviště jsem zdokumentoval a popsal. Naměřená data jsem vyhodnotil pomocí programu Microsoft Excel 2007, následně jsem je zpracoval do tabulky a grafů. Ze získaných informací lze vyvodit některé dílčí závěry. Přídavek vodíku má jednoznačně pozitivní vliv na točivý moment motoru, jež vzrostl až o 123% (25% zatížení, 1900 1/min). V důsledku tohoto jevu se snížila měrná spotřeba paliva. Pokud bychom v závislosti na množství přidávaného vodíku omezily množství vstřikované nafty, do takové míry, abychom dostali stejný výkon, jako při provozu motoru pouze na naftu. Mohli by se do značné míry redukovat emise výfukových plynů. Tuto moji domněnku by bylo třeba ověřit měřeními. Přídavek vodíku má dále příznivý vliv na využití paliva a tepelnou účinnost motoru.

Složitější situace nastává při stanovení dílčích závěrů v oblasti vlivu přídavku vodíku na emise výfukových plynů. S určitostí můžeme říci, že s rostoucím obsahem vodíku ve směsi rostou emise NO_x . Emise nespálených uhlovodíků HC se v nižším zatížení snížily v obou měřeních. Při vyšším zatížení je vyhodnocení vlivu přídavku vodíku na tuto složku výfukových plynů složitější, tento jev jsem popisoval v závěru kapitoly – výsledky měření. Při zkoumání vlivu přídavku vodíku na emise CO_x by bylo třeba vyhodnotit více testů při různých otáčkách a zatíženích, aby bylo možno stanovit jednoznačné závěry.

Technologie obohacování paliva vodíkem je pro tuto chvíli stále ještě poměrně nákladná. V oblasti obohacování paliva je třeba další technický vývoj, aby bylo případně možné přenést tuto technologii z laboratoří do vozidel na silnici.

Seznam použité literatury

1. Josef Kameš: Alternativní pohon automobilů, Praha 2004
2. Ing. Tuček, Ing. Dvořáková, Hanzal: Vodík – ČATP, Praha 2004
<http://www.catp.cz/publikace/vodik.pdf>
3. Ing. Michal Bačkovský: Alternativní paliva pro pohon motorových vozidel, 2010
<http://www.techportal.cz/3/1/alternativni-paliva-pro-pohon-motorovych-vozidel-cid237444/>
4. Ing. Jan Žároveň: Náhrada ropy v dopravě, 2002
<http://www.vosaspsekrizik.cz/cs/download/studium/sps/elektroenergetika/nahrada-ropy-v-doprave.pdf>
5. Prof. Ing. Gustav Šebor, CSc., Doc. Ing. Milan Pospíšil, CSc., Ing. Jan Žároveň: Technicko-ekonomická analýza vhodných alternativních paliv v dopravě – VŠCHT, Praha 2006
<http://www.kraj-lbc.cz/public/doprava/prezentace07/pdfs/12a.pdf>
6. Jíša Petr: Emisní charakteristiky směsí vodíku se zemním plynem – VŠCHT, Praha 2009
http://tresen.vscht.cz/kap/data/studentska_cinnost/obhajoba_semestrálního_projektu_2009/42_emisni_charakteristiky_smesi_vodiku_se_zemním_plynem_soubor.pdf
7. Vodík jako alternativní ekologické palivo
<http://www.vossost.cz/pk/Data/HTML/VODIK.HTM>
8. Michal Roškanin: Perspektivy alternativních paliv v ČR, 2010
<http://www.petroil.cz/alternativa/clanek.asp?id=13360>
9. Budoucnost má CNG a vodík
<http://www.cpu.cz/napsali-o-nas/1514-3>
10. <http://www.hho4cars.eu>
11. <http://www.vodikovypohon.sk>
12. <http://www.jednavodu.cz>
13. UTAS H₂ diesel
<http://www.netinform.net/h2/h2mobility/Default.aspx?ID=32&CATID=0>

14. DUAL-FUEL HYDROGEN PICKUP TRUCKS
<http://www.cder.dz/A2H2/Medias/Download/Proc%20PDF/PARALLEL%20SESSIONS/%5BS22%5D%20Internal%20Combustion%20Engines/13-06-06/232.pdf>
15. W. Thor Zollinger: Cleaning up Diesel and Automotive Exhaust with Hydrogen
<http://ebookbrowse.com/cleaning-up-diesel-and-automotive-exhaust-with-hydrogen-pdf-d13072137>
16. Jacob Wall: Effect of Hydrogen Enriched Hydrocarbon Combustion on Emissions and Performance
<http://www.panaceauniversity.org/Hydrogen%20Enriched%20Hydrocarbon%20Combustion.pdf>
17. Vladislav Sadykov: Syngas As A Fuel For IC And Diesel Engines: Efficiency And Harmful Emissions Cut-off, 2005
<http://www.ichet.org/ihec2005/files/manuscripts/Sadykov%20V.-Russia.pdf>
18. CFD ANALYSIS AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF CI ENGINE USING HYDROGEN WITH DIESEL
<http://aspireacademicexcellence.com/documents/Mr.S.Prabhakar.doc>
19. THE COMBUSTION PROCESS OF A HEAVY-DUTY H₂-DIESEL DUAL FUEL ENGINE
http://www.combustioninstitute.org/33rd_InProgress/W4P058.pdf
20. S. Bari: Effect of H₂/O₂ addition in increasing the thermal efficiency of a diesel engine
<http://smacksboosters.110mb.com/HHODiesel.pdf>
21. Prof. Ing.. Stanislav BEROUN, CSc., Doc. Ing. Celestýn SCHOLZ, Ph.D.:
 Dobudování experimentální základny v laboratoři KVM FS TU v Liberci
22. Doc. Ing. Celestýn SCHOLZ, Ph.D.: Dynamika měření systému Common Rail
23. <http://www.pneuflexfittings.com>
24. <http://www.technoline.cz>
25. Vlastní studijní materiály, TUL 2007-2010

Seznam příloh

Příloha č. 1: Závislosti sledovaných veličin na množství přidaného vodíku (grafy)

Seznam výkresů

KVM – BP – 213 – 01: PRIVOD VODIKU – výkres sestavy

KVM – BP – 213 – 01-01: PRIRUBA - výrobní výkres dílu pro přívod H₂

KVM – BP – 213 – 01-02: KONCOVA TRUBKA

Příloha CD - BP_Suchánek_Jiří_2011.pdf

- SESTAVA.pdf

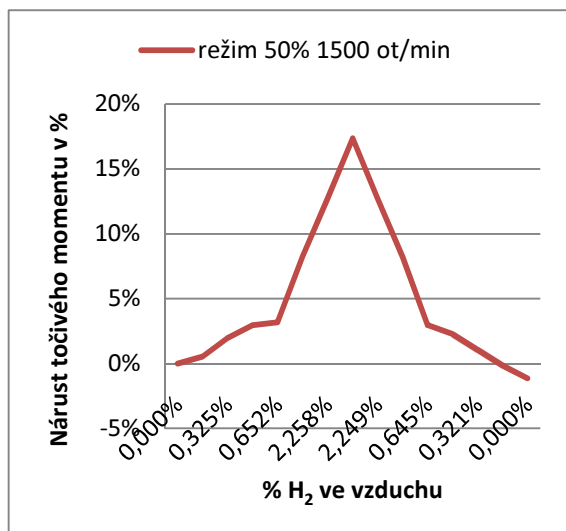
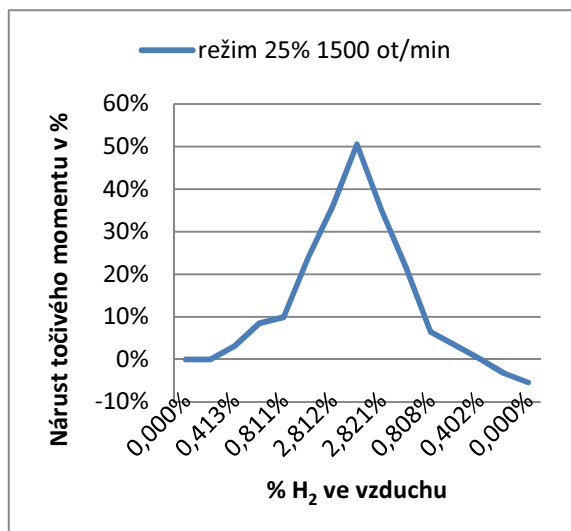
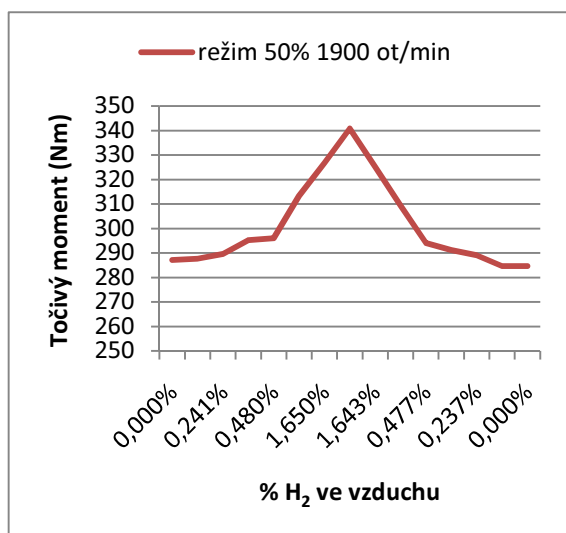
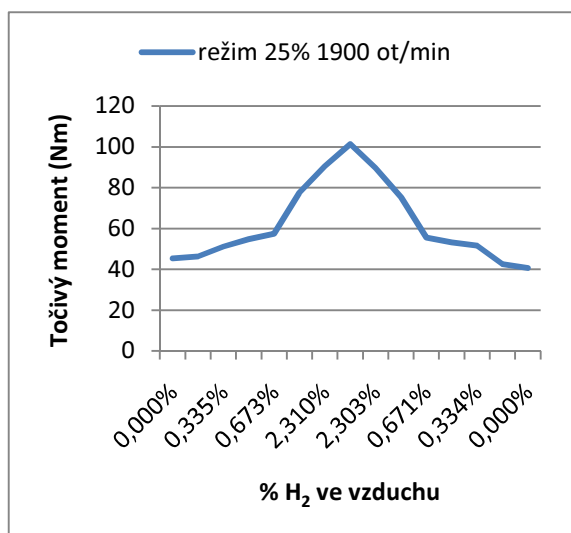
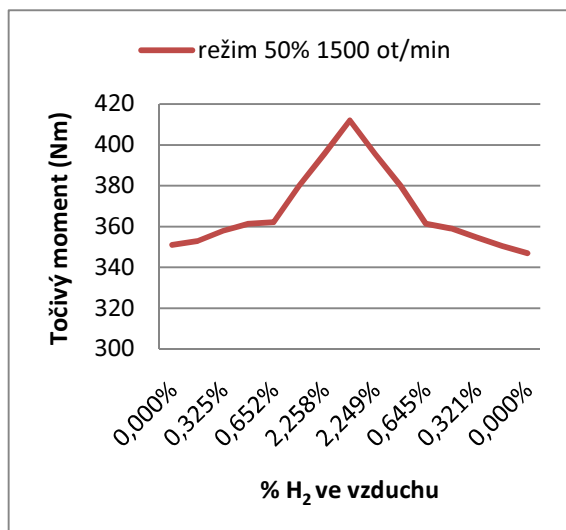
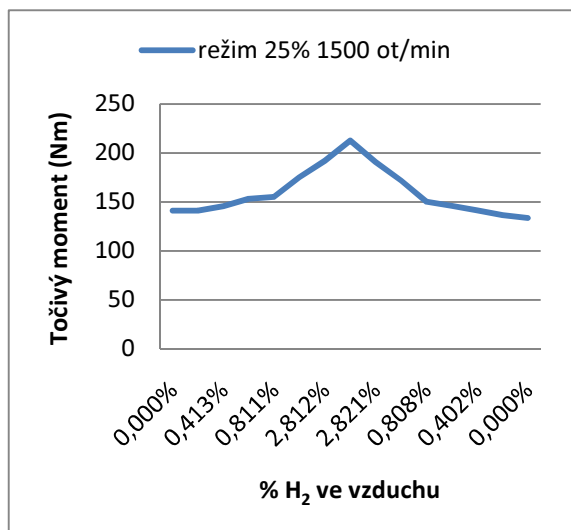
- PRIRUBA.pdf

- TRUBKA.pdf

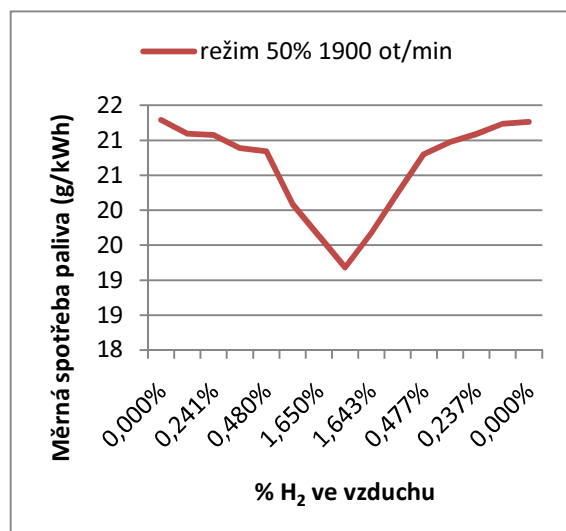
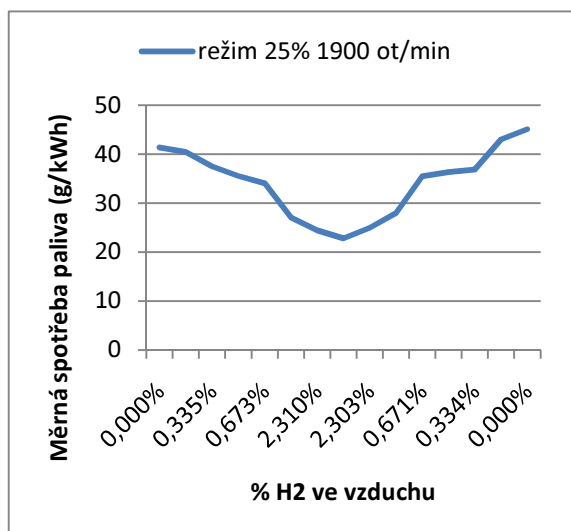
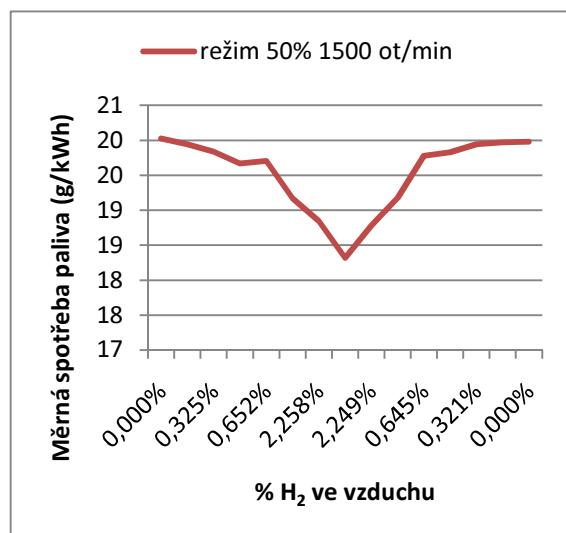
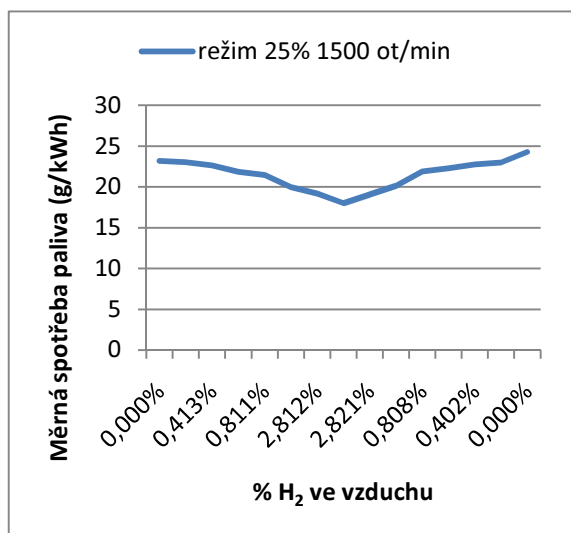
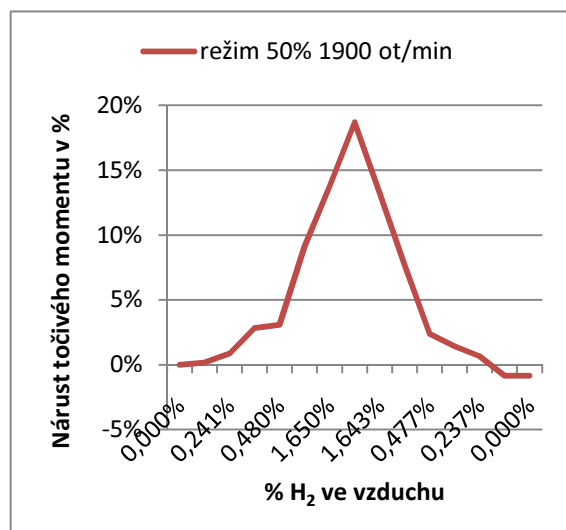
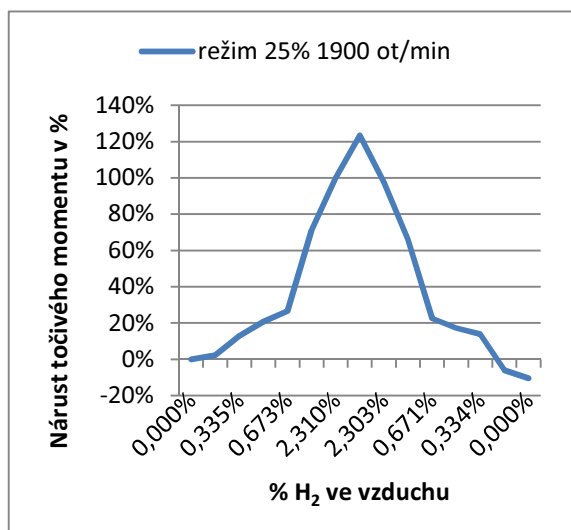
- vyhodnocení testu 1 (1500).xls

- vyhodnocení testu 2 (1900).xls

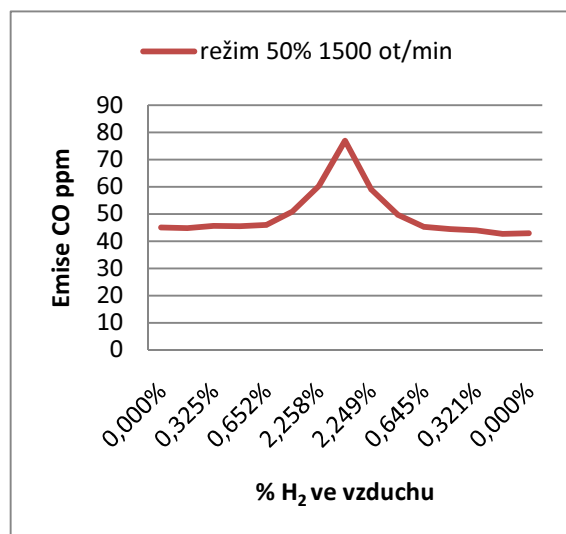
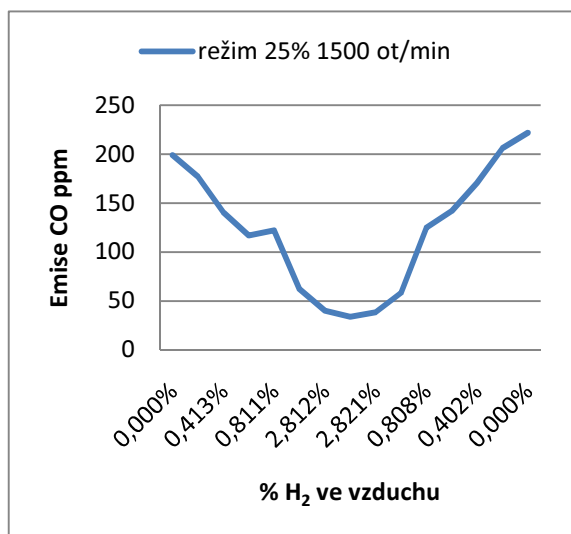
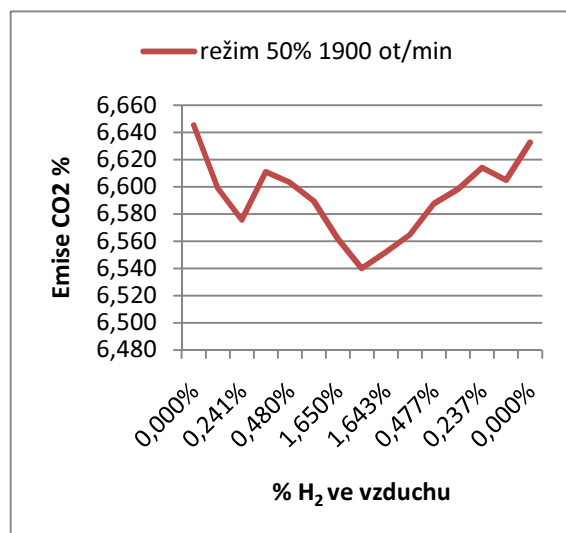
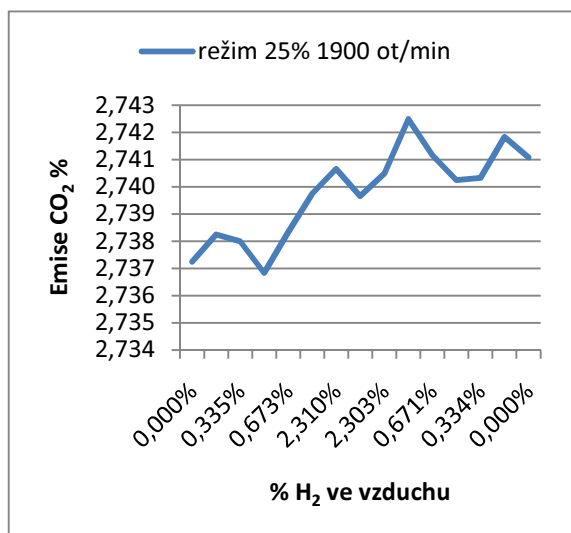
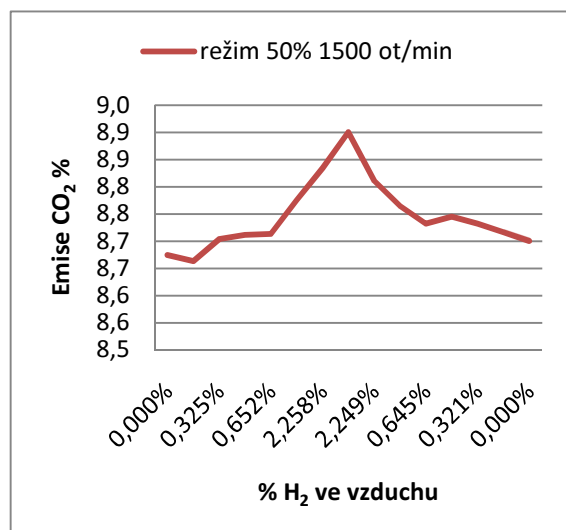
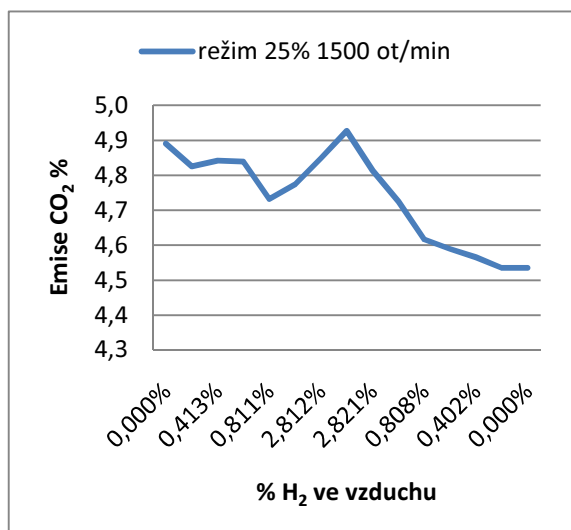
Příloha č.1



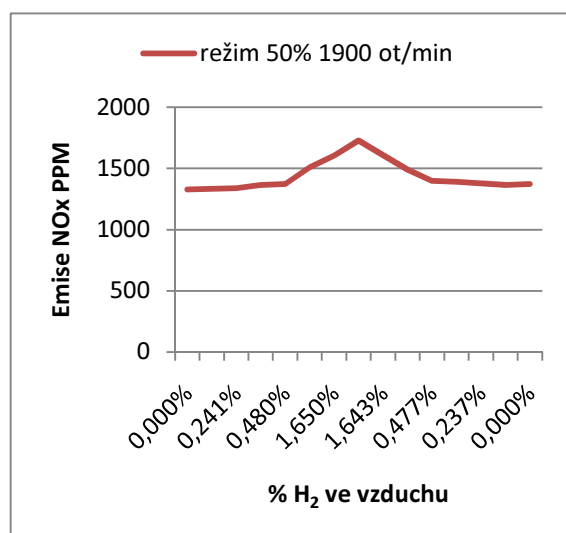
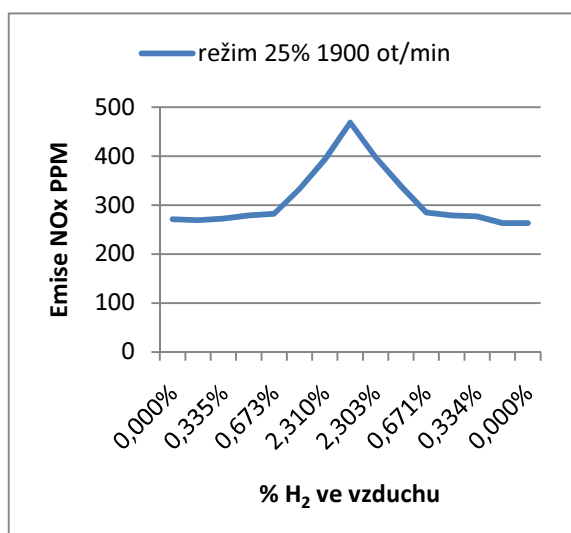
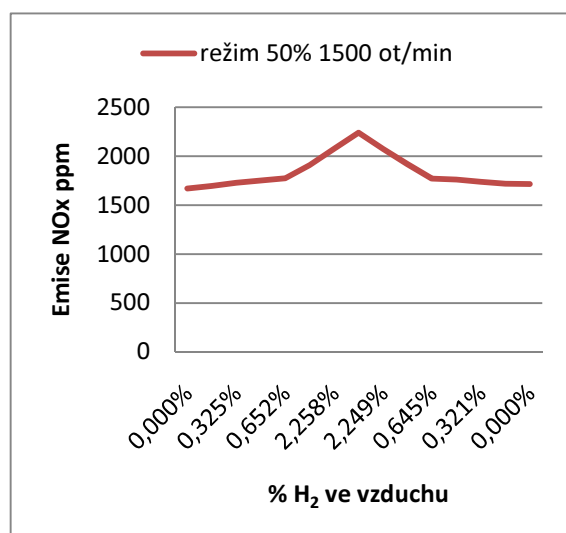
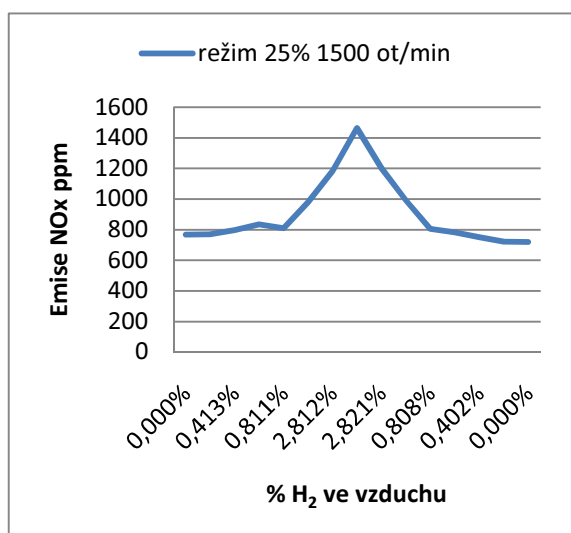
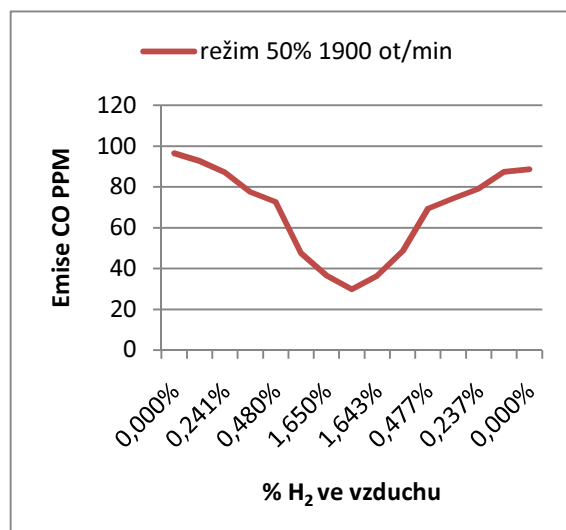
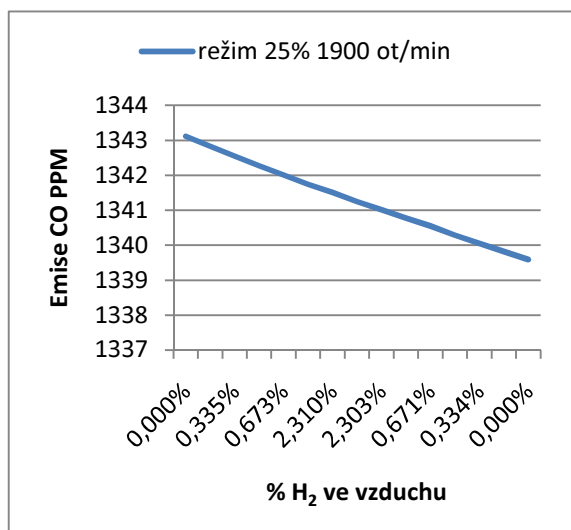
Příloha č.1



Příloha č.1



Příloha č.1



Příloha č.1

