



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

VLASTNOSTI AUTOMOBILOVÝCH PALIV A JEJICH VLIV NA SPALOVACÍ PROCES

PROPERTIES OF AUTOMOTIVE FUELS AND THEIR EFFECTS ON THE COMBUSTION PROCESS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Dávid Riedl

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Beran

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	Dávid Riedl
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Stavba strojů a zařízení
Vedoucí práce:	Ing. Martin Beran
Akademický rok:	2022/23

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

Vlastnosti automobilových paliv a jejich vliv na spalovací proces

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vypracujte rešerši popisující problematiku vlastností automobilových paliv se zaměřením jak ovlivňují spalovací proces. Zaměřte se na moderní alternativy paliv jako syntetická paliva pro zážehové motory. Hlavním cílem je zhodnocení vlivu na výkonové parametry motoru, výhřevnost, antidetonační vlastnosti, měrná efektivní spotřeba.

Cíle bakalářské práce:

Provedení dostupné rešerše v zadané oblasti se zaměřením na vybrané vlastnosti paliv pro zážehový přeplňovaný motor s vysokým kompresním poměrem.

Rozbor základních vlastností vybraných paliv – výhřevnost vs. antidetonační vlastnosti, stechiometrický poměr vs. výkonové vlastnosti, zhodnocení vlivu na maximální spalovací tlak a teplotu. Vliv použití paliva na měrnou efektivní spotřebu.

Pokuste se na základě nabytých znalostí vyvozené závěry ověřit porovnáním s běžným palivem (experimentálně/na motorové zkušebně nebo pomocí základního zjednodušeného 1D simulačního modelu) – cílem je vybrat palivo vhodné pro přeplňovaný zážehový motor s vysokou kompresí.

Shrnutí zadané problematiky a zhodnocení dosažených závěrů.

Seznam doporučené literatury:

STONE, Richard. Introduction to Internal Combustion Engines. 3rd edition. Hampshire: Palgrave, 1999. ISBN 0-333-74013-01999.

HEISLER, Heinz. Advanced Engine Technology. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. ISBN 1-56091-734-2.

KÖHLER, Eduard. Verbrennungsmotoren. Berechnung und Auslegung des Hubkolbenmotors. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2002. ISBN 3-528-23108-4.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Bakalárska práca je zameraná na získanie informácií o v súčasnosti dostupných syntetických palivách určených na využitie v zážihovom motore. Hlavnou úlohou je rozbor vlastností jednotlivých palív a posúdenie ich vplyvu na spaľovací proces. Vyvodené závery bola snaha ďalej overiť využitím simulácie v softvéri Lotus Engine Simulation, kde došlo k použitiu znalostí základných vlastností a zložení skúmaných palív.

KLÍČOVÁ SLOVA

syntetické palivá, vlastnosti palív, spaľovací proces, výkonové parametre, merná spotreba paliva, zážihový motor, lotus engine simulation.

ABSTRACT

Bachelor thesis is focused on gathering information about nowadays used synthetic fuels in spark-ignition engines. Main objective is to analyse fuel properties and their impact upon combustion process. Another part of this thesis was an effort to verify acquired implications by running a simulation in software Lotus Engine Simulation using knowledge of fuel properties and compositions.

KEYWORDS

synthetic fuels, fuel properties, combustion process, performance specifications, specific fuel consumption, spark-ignition engine, lotus engine simulation.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Riedl, R. *Vlastnosti automobilových paliv a jejich vliv na spalovací proces*. Brno, 2023. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí bakalářské práce Martin Beran. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149768>.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 16. května 2023

.....

Dávid Riedl

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto mieste by som rád poďakoval pánovi Ing. Martinovi Beranovi za pomoc, odborné rady a cenné pripomienky, ktoré mi pomohli úspešne vypracovať bakalársku prácu. Taktiež by som chcel vyjadriť vďaku mojim rodičom a kamarátom za morálnu podporu počas celej dĺžky štúdia.

OBSAH

Úvod.....	7
1 Zážihový motor.....	8
1.1 Ottov cyklus zážihového štvordobého motoru	8
1.2 Zážihový štvordobý motor	9
1.3 Základné parametre štvordobého motoru.....	10
1.3.1 Geometria motora	11
1.3.2 Točivý moment, výkon	11
1.3.3 Stredný efektívny tlak	12
1.3.4 Vybrané parametre účinností.....	12
1.3.5 Merná efektívna spotreba paliva.....	13
1.4 Spaľovací proces a jeho abnormality	14
1.4.1 Princíp horenia u štvordobého zážehového motoru.....	14
1.4.2 Požiadavky na zmes potrebnú pre pohon zážihového motoru	15
1.4.3 Emisie a CO ₂ neutralita.....	17
1.4.4 Abnormality spaľovania.....	19
2 Palivá využívané pre pohon zážihového motora	21
2.1 Hlavné vlastnosti palív zážihových motorov	21
2.1.1 Oktánové číslo	22
2.1.2 Odpariteľnosť	22
2.1.3 Hustota	22
2.1.4 Dolná výhrevnosť paliva.....	22
2.2 Benzín	23
2.2.1 Výroba.....	23
2.2.2 Požiadavky pre moderné benzíny	23
2.3 Etanol	24
2.3.1 Produkcia.....	24
2.3.2 Správanie v zážihovom motore	24
2.4 LPG.....	25
2.4.1 Produkcia.....	25
2.4.2 Správanie v zážihovom motore	25
2.5 Zemný plyn.....	26
2.5.1 CNG	26
2.6 Vodík.....	27
2.6.1 Produkcia.....	27
2.6.2 Správanie v zážihovom motore	27
3 Syntetické palivá.....	29
3.1 Syngas	30
3.1.1 Výroba.....	30
3.1.1.1 Zloženie	30
3.1.2 Správanie v zážihovom motore	31
3.1.3 Emisie	34

3.2	Metanol	35
3.2.1	Zloženie	35
3.2.2	Správanie v zážihovom motore	35
3.2.3	Emisie	36
3.3	Syntetický benzín vyrobený z metanolu	36
3.3.1	Zloženie	36
3.3.2	Výroba	37
3.3.3	Správanie v zážihovom motore	37
3.3.4	Emisie	39
3.4	DMC A MeFo	39
3.4.1	Zloženie	39
3.4.2	Správanie v zážihovom motore	40
3.4.3	Emisie	40
3.5	DMC+	41
3.5.1	Zloženie	41
3.5.2	Správanie v zážihovom motore	41
3.6	Zhrnutie syntetických palív pri použití v zážihovom motore	44
4	Testovanie palív pomocou simulácie	45
4.1	Lotus Engine Simulation	45
4.2	Model motoru	45
4.3	Definovanie vlastného druhu paliva	46
4.4	Rozbor výsledkov simulácie	49
4.4.1	Efektívny výkon	49
4.4.2	Merná efektívna spotreba paliva	51
	Záver	52
	Použité informační zdroje	53
	Seznam použitých zkratok a symbolů	56
	Seznam příloh	58
	Prílohy	59

ÚVOD

Moderná spoločnosť spolieha z veľkej časti na individuálnu mobilitu a dopravu tovarov. Avšak tieto sektory sú zodpovedné za veľkú väčšinu vyprodukovaných CO₂ emisií čím výrazne prispievajú ku globálnemu otepľovaniu a klimatickým zmenám. Pre zvrátenie týchto zmien sa krajiny uchýľujú ku tvorbe energie pomocou obnoviteľných zdrojov ako napríklad solárna, veterná či hydroenergia. Elektrifikáciou dopravy sa snažíme o mobilitu, ktorá bude čistá a udržateľná, čo pre niektoré aplikácie nebude vhodné. Tým, že prísun zo solárnych a veterných elektrární nedokáže byť regulovaný tak došlo k rozhodnutiu, že v časoch nízkeho dopytu elektriny, pôjde táto prebytočná energia na výrobu syntetických palív.

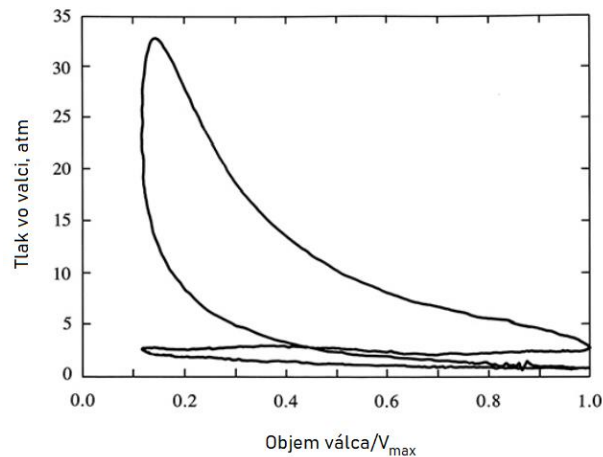
V budúcnosti to umožní pri bežných spaľovacích motoroch ich uviesť ako alternatívu voči fosílnym palivám. Vo všeobecnosti sa pri ich využití očakáva, že tvorba oxidu uhličitého bude redukovaná, čo závisí primárne na spôsobe ich výroby a jednotlivých vlastnostiach. Okrem emisného hľadiska je nutné zaistiť aby správanie motorov pri využití týchto palív bolo, čo najviac podobné ako pri využití fosílnych palív alebo účinnejšie. Toto správanie zohľadňujú jednotlivé parametre, ktoré je možno pri využití rozličných palív skúmať a porovnávať. Medzi najdôležitejšie patria točivý moment, výkon, účinnosť, stredný efektívny tlak a merná efektívna spotreba paliva. Všetky menované sú hlavne ovplyvňované jednotlivými vlastnosťami palív, ktoré sa prejavujú v rámci spaľovacieho procesu. Medzi rozhodujúce vlastnosti patria zloženie paliva, jeho hustota, oktánové číslo, výhrevnosť a ďalšie. Ich nedokonalé nastavenie pre spaľovací proces sa prejaví jeho abnormalitami, ktoré zasa negatívne ovplyvnia parametre správania motora. Ich testovanie pri využití syntetických palív je okrem použitia v skutočnom motore možné aj pri využití simulačných softvérov za predpokladu znalostí základných vlastností konkrétneho paliva.

Cieľom práce je spracovať momentálne dostupné alebo aktívne testované syntetické palivá, či už v plynnom alebo kvapalnom skupenstve, a porovnať ich vybrané vlastnosti. Rozborom porovnať akým spôsobom ovplyvňujú jednotlivé palivá parametre fungovania spaľovacieho motoru a ako sa odlišujú od bežne využívaného fosílného paliva v zážihových motoroch - benzínu. Získané závery sú ďalej využité pri overovaní výsledkov dosiahnutých využitím simulačného programu Lotus Engine Simulation za pomoci zjednodušeného 1D modelu na ktorom boli simulované porovnávané syntetické palivá. Celkovým cieľom je vybrať najvhodnejšie palivo pre preplňovaný zážihový motor s vysokou kompresiou.

1 ZÁŽIHOVÝ MOTOR

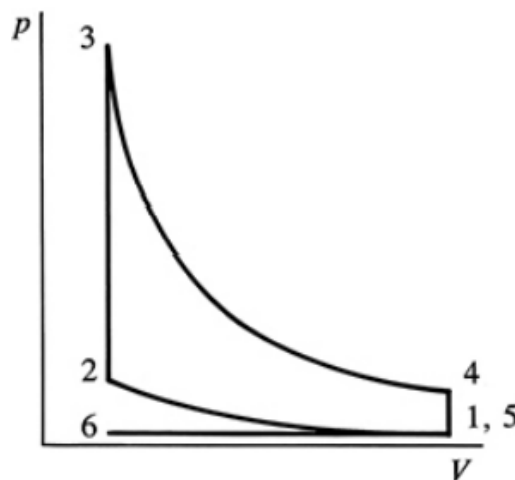
1.1 OTTOV CYKLUS ZÁŽIHOVÉHO ŠTVORDOBÉHO MOTORU

Na ilustrovanie procesov, ktoré sa dejú pri cykle zážihového motora sa využíva p-V diagram. Skutočný p-V diagram je možné vidieť v *Grafe 1*. Na zjednodušenie výpočtov a približné určenie charakteristík (kompresný pomer, termická účinnosť, potrebný prívod tepla) motora sa nevyužíva reálna závislosť tlakov na objemoch, ale zjednodušená - teoretický Otto cyklus.



Graf 1 p-V diagram skutočného zážihového motora. [1]

Ottov cyklus sa skladá v p-V diagrame, ako je možné pozorovať v *Grafe 2*, z 2 adiabatických kriviek a 2 izochorických. Pri deji 6-1 (zdvih I) dochádza k nasávaniu zmesi vzduchu s parami paliva. To sa deje za konštantnej teploty. Dej 1-2 (zdvih II) predstavuje adiabatickú kompresiu zmesi (zmena tepla je nulová). V HÚ piestu dochádza k deji 2-3 pri ktorom prebieha prívod tepla izochoricky z okolia, čo nahrádza horenie paliva zapáleného v bode 2. Dej 3-4 ilustruje adiabatickú expanziu spodín horenia. Predpokladáme, že majú totožné vlastnosti ako nasávaná zmes. Výfuk spodín horenia nahradzujeme izochorickým odvodom tepla do okolia v deji 4-5. Dej 5-6 (zdvih IV) predstavuje výtlak zvyšných spodín horenia za konštantnej teploty. Účinnosť teoretického cyklu je v porovnaní s reálnou situáciou vždy vyššia. Horná hranica je u teoretických cyklov vždy definovaná ako účinnosť ideálneho Carnotovho cyklu.



Graf 2 p-V diagram teoretického Otto cyklu. [1]

Termodynamická účinnosť Ottovho cyklus vyjadrená rovnicou[1]:

$$\eta_t = \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^{1-\kappa} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} \quad (2)$$

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} \quad (3)$$

kde ε je kompresný pomer, V_1 je objem zmesi na DÚ, V_2 je objem zmesi na HÚ, κ je Poissonova konštanta, c_p je tepelná kapacita plynu pri stálom tlaku a c_v je tepelná kapacita plynu pri stálom objeme.

Z rovníc je jasné, že účinnosť je závislá len na kompresnom pomere. Väčší kompresný pomer spôsobí nárast termickej účinnosti, ale nie je možné ho zväčšovať neobmedzene pretože by dochádzalo k samovznieteniu zmesi, čo by negatívne ovplyvnilo chod motora (prehrievanie, detonácia). Možnosťou zvýšenia kompresného pomeru je teda zväčšenie zdvihového objemu V_z , čo môže byť značné problematické napríklad pre obmedzené rozmery priestoru, kde sa motor bude nachádzať. Účinnejšou cestou k zvýšeniu výkonu motora je zvyšovanie stredného efektívneho tlaku obehu p_e .

Základným problémom so zvyšovaním p_e je dosiahnutie zvýšenia hmotnostného naplnenia valca. To je možné vyriešiť v menšej miere aj dynamickým dopĺňovaním valca, ale efektívnejším spôsobom je preplňovanie. Moderné automobily využívajú plniace agregáty zložené z turbodúchadla, ktoré je poháňané turbínou pomocou výfukových plynov. Existuje možnosť aj preplňovania mechanicky hnanými dúchadlami, ktoré pracujú objemovým spôsobom. Ich základný princíp spočíva v stlačení vzduchu v kompresore turbodúchadla a následnom posunutí vzduchu do výmenníka tepla. Využitie chladenia spôsobí, že dôjde k nárastu hustoty stlačeného vzduchu pred vstupom do motora. Tento faktor zapríčini zvýšenie hmotnostného naplnenia valca a prejaví sa na znížení teplôt nespálenej zmesi, čo obmedzí jav klepania motora, ktorý sa bude bližšie rozoberať v ďalších kapitolách.[1],[2]

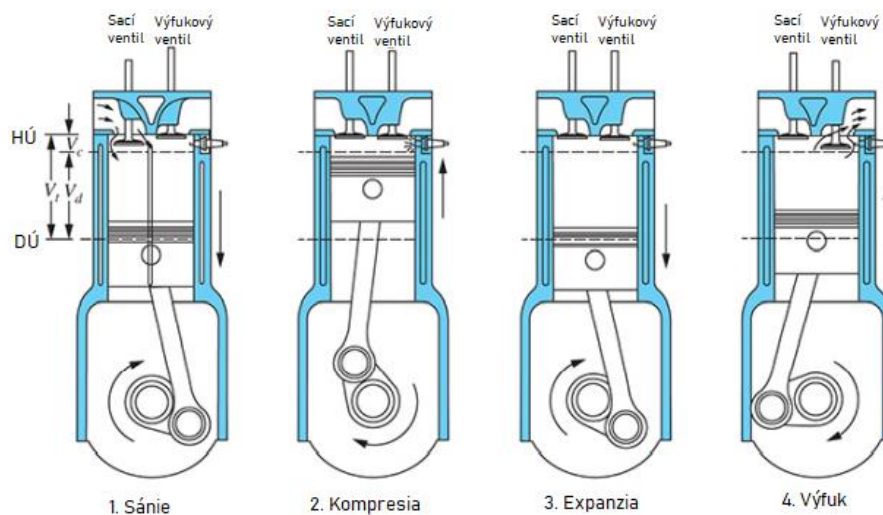
1.2 ZÁŽIHOVÝ ŠTVORDOBÝ MOTOR

Zážihové motory pracujúce v štyroch dobách patria medzi tie najviac používané pri konštrukcii automobilov v súčasnosti. Motor je tepelný stroj, ktorý spaľuje zmes paliva a vzduchu, aby získal mechanickú prácu.

Pracovný cyklus prebieha štyrmi zdvihmi piestu (dvomi otočeniami kľukovej hriadele). Grafické znázornenie tohto procesu je vidieť v *Obr.1.* [2], [3]:

1. Sáníe – Začína s piestom, ktorý sa nachádza v HÚ a postupuje k DÚ a nastáva nasávanie horľavej zmesi vzduchu a paliva do valca. Aby bolo možné zvýšiť naindukovanú masu, ktorú privádzame do valca, dochádza k otvoreniu sacieho ventilu tesne pred začatím sánia a zatvoreníu po skončení.

2. Kompresia – Piest sa pohybuje z DÚ do HÚ. Obidva ventily sú uzavreté. Vo valci dochádza ku kompresii zmesi na zlomok pôvodného objemu. Ku koncu dochádza k zapáleniu zmesi zážihom elektrickou iskrou od zapalovacej sviečky, kedy vzniká turbulentný plameň, ktorý sa rozšíri do celej zmesi a dochádza k rýchlemu nárastu tlaku a teploty vo valci.
3. Expanzia – Vysokoteplotné a vysokotlakové plyny, vzniknuté horením zmesi, zatlačia piest z HÚ do DÚ a donútia kľukovú hriadeľ rotovať. Ako sa piest pohybuje smerom k DÚ dochádza k otvoreniu výfukového ventilu a začatiu procesu výfuku kedy klesne tlak vo valci na takú úroveň aby sa vyrovnal tlaku vo výfukovom systéme.
4. Výfuk – Zvyšné zhorené plyny opúšťajú valec, kvôli veľkému počiatočnému rozdielu medzi tlakmi vo valci a na výfuku a po jeho vyrovnaní sú tlačené piestom, ktorý sa vracia z DÚ do HÚ. Ako sa piest pohybuje k HÚ nastáva proces otvorenia sacieho ventilu a po dosiahnutí HÚ zatvorenia výfukového ventilu. Cyklus sa znova opakuje.



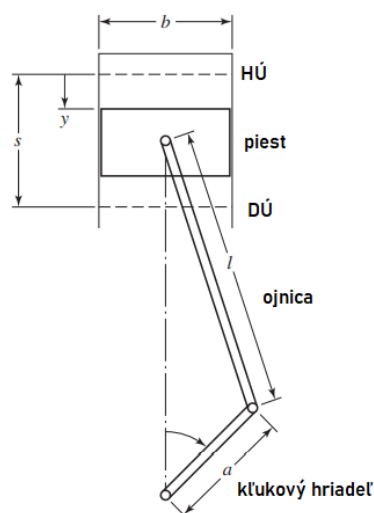
Obr. 1 Princíp činnosti štvordobého zážihového motora. [2]

1.3 ZÁKLADNÉ PARAMETRE ŠTVORDOBÉHO MOTORU

Zmyslom tejto kapitoly je opísať základné parametre, ktoré sú bežne používané na kvantifikovanie operácie daného spalovacieho motora. Tieto faktory ovplyvňujú či celková cena za prevádzku motora nie je pre používateľa príliš vysoká alebo či sa nevymyká reguláciám životného prostredia. Taktiež ich použitie umožňuje porovnávať medzi sebou spalovanie jednotlivých automobilových palív a určiť, ktoré je na používanie najvýhodnejšie.

1.3.1 GEOMETRIA MOTORA

Pre každý valec, piest, ojnici kľukový hriadeľ a blok hlavy môže byť reprezentovaný jednoduchým mechanizmom. Medzi najdôležitejšie parametre patria vrtanie b , dĺžka ojnice l , polomer kľuky a , zdvih s a uhol natočenia kľuky θ , ktorých schematické znázornenie je možné pozorovať v Obr.2. [3]



Obr. 2 Geometria mechanizmu motora. [3]

Polomer kľuky je polovičný oproti vrtaniu. Piest sa nachádza v hornej úvratí ak je uhol kľuky $\theta = 0^\circ$. Objem vo valci V_2 je na tejto pozícii minimálny. Pri $\theta = 180^\circ$ je piest v pozícii dolnej úvratí a objem V_1 dosahuje maximálnej hodnoty. [3]

Ako rozdiel maximálneho a minimálneho objemu vo valci sa definuje zdvihový objem pre viac valcov [3]:

$$V_z = n_c(V_1 - V_2) = \frac{\pi}{4} b^2 s \quad (4)$$

kde V_z je zdvihový objem, n_c je počet valcov, b je vrtanie a s je zdvih.

Ďalším dôležitým parametrom je piestová rýchlosť, pretože napätia a iné faktory sa škálujú skôr podľa piestnej ako motorovej rýchlosti. [3]

$$\overline{U}_p = 2ns \quad (5)$$

kde n je počet otáčok za minútu.

1.3.2 TOČIVÝ MOMENT, VÝKON

Efektívny výkon je miera vykonanej práce. Točivý moment je miera vykonanej práce za počet otáčok hriadeľa. Efektívny výkon je výkonový výstup motora meraný pomocou dynamometra. [2],[3]

$$P_e = 2\pi\tau N, \quad (6)$$

kde P_e je efektívny výkon a τ je točivý moment.

Indikovaný výkon je práca skutočného obehu premiestnená z plynu na piest počas cyklu.[3]

$$\dot{P}_i = \int p dV, \quad (7)$$

kde \dot{P}_i je indikovaný výkon, p je tlak vo valci a V objem valca.

Indikovaný výkon pre štvordobý motor[3]:

$$P_i = \frac{n_c \dot{P}_i n}{2}, \quad (8)$$

Efektívny výkon je menší v porovnaní s indikovaným kvôli mechanickému treniu motora, stratách pri pumpovaní v sání a výfuku, ktoré sú zhrnuté pod stratou trecieho výkonu, P_Z [3]:

$$P_Z = P_i - P_e \quad (9)$$

Podiel efektívneho výkonu a indikovaného výkonu je mechanická účinnosť, η_m [3]:

$$\eta_m = \frac{P_e}{P_i} \quad (10)$$

1.3.3 STREDNÝ EFEKTÍVNY TLAK

Točivý moment je dôležitou medzou schopnosti konkrétneho motora pracovať, ale je závislý na veľkosti motora. Užitočnejším parametrom je stredný efektívny tlak a jedná sa o prácu vykonanú za jednotku zdvihového objemu. Je to priemerný tlak, ktorý vyústi v rovnaké množstvo práce vykonanej motorom. Pomocou tohto parametru je možné porovnávať motory rôznych zdvihových objemov. [2],[3]

Existujú 3 typy stredných efektívnych tlakov a to indikovaný, trecí a brzdny. Najpoužívanejším parametrom je brzdny stredný efektívny tlak [3]:

$$p_e = \frac{2P_e}{v_z n} \quad (11)$$

Najideálnejšie hodnoty brzdnych stredných efektívnych tlakov pre atmosférický zážihový motor sú v rozsahu 1050 až 1250 kPa. Pre preplňované sa to pohybuje od 1800 do 2400 kPa.

1.3.4 VYBRANÉ PARAMETRE ÚČINNOSTÍ

Spaľovacie motory pracujú s malou účinnosťou premeny tepelnej energie na mechanickú prácu, ktorá je predávaná cez prevodové a pojazdné ústroje až na hnacie kolesá vozidla. Celková účinnosť daného spaľovacieho motora bude závisieť na hodnotách čiastkových účinnosti. Účinnosť plnosti diagramu η_{pl} udáva pomer medzi indikovanou prácou obehu a teoretickou prácou ideálneho obehu. Chemická účinnosť η_{CH} určuje maximum využitia chemického potenciálu daného paliva a oxidačného procesu vo valci. Vo všeobecnosti je nižšia chemická účinnosť u zážihových motoroch. Termodynamická účinnosť η_t je účinnosťou ideálneho obehu a jej odvodenie bolo vysvetlené v kapitole 1.1.

Mechanická účinnosť η_m reprezentuje vzniknuté mechanické straty v motore, od pohonu významného príslušenstva motora a výmeny náplne valca. [2]:

$$\eta_c = \eta_{pl} \cdot \eta_{CH} \cdot \eta_t \cdot \eta_m \quad (12)$$

Z hľadiska celkovej účinnosti sa zážihový motor pohybuje na rozmedzí 20 až 30 %. Pre porovnanie sú tieto hodnoty u vznetrových motorov 30 až 40 % a u predchodcu spaľovacích motorov parných strojov to býva medzi 5% až 15%.

OBJEMOVÁ ÚČINNOSŤ

Podstatný parameter u štvordobých motorov je objemová účinnosť. Je definovaná ako hmotnosť paliva a vzduchu naindukovaná do valca podelená hmotnosťou, ktorú by inak zaujal zdvihový objem pri konkrétnej hustote v sacom potrubí. Výskyt prvkov v sacom systéme, ktoré bránia prúdu paliva a vzduchu v prechode (škrtiaca klapka, sací kanál a ventil) vytvárajú pokles tlaku vo vstupujúcom prúde, čo zredukuje hustotu a takisto aj celkovú masu paliva vo valci. Zväčšovanie objemovej účinnosti je výhodné, pretože zároveň stúpa aj množstvo paliva, ktoré môže byť spálené a produkovaný výkon pre daný objem valcov je maximalizovaný. [2],[3]

$$e_v = \frac{2\dot{m}_i}{\rho_i V_z n} \quad (13)$$

kde e_v je objemová účinnosť, \dot{m}_{in} je hmotnostný tok nasávanej zmesi a ρ_i je hustota nasávanej zmesi zo sacieho potrubia.[3]

$$\dot{m}_i = \dot{m}_a + \dot{m}_f \quad (14)$$

kde \dot{m}_a je hmotnostný tok nasávaného vzduchu a \dot{m}_f je hmotnostný tok nasávaného paliva. [3]

1.3.5 MERNÁ EFEKTÍVNA SPOTREBA PALIVA

Jedná sa o porovnávaciu metriku pre účinnosť premeny chemickej energie paliva na prácu produkovanú motorom. Existujú dva parametre mernej spotreby paliva a to: efektívny a indikovaný. Efektívna (m_{pe}) je široko používaná, zatiaľ čo indikovaná sa využíva hlavne v počítačových simuláciách. Merná efektívna spotreba paliva je definovaná ako podiel hmotnostného toku paliva k efektívnemu výkonu. Tento parameter je hlboko spojený so samotnou účinnosťou motora. Čím menšia je hodnota spotreby tým väčšia účinnosť. Pri palivách tento parameter zohráva smerodajnú úlohu, pretože získané hodnoty sú lepšie uchopiteľné ako účinnosť a prezradia či skúmané palivo je efektívne spaľované v motore alebo nie. [3]

$$m_{pe} = \frac{\dot{m}_f}{P_e} \quad (15)$$

1.4 SPALŮVACÍ PROCES A JEHO ABNORMALITY

1.4.1 PRINCÍP HORENIA U ŠTVORDOBÉHO ZÁŽEHOVÉHO MOTORU

ZÁŽIH ZAPALOVACOU SVIEČKOU

Prítomnosť zdroja energie je základnou podmienkou k začiatku horenia zmesi paliva a vzduchu. U zážihových motorov túto funkciu plní zapalovacia sviečka. Horenie je iniciované elektrickým výbojom, ktorý vzniká v medzere centrálnej elektródy na zapalovacej sviečke. Konfigurácia zapalovacej sviečky je zostavená z dvoch elektród. Jedna, ktorá je uzemnená k motoru a druhej – centrálnej keramicky izolovanej. Na zážih je potrebný výboj o veľkosti 20 - 30 kV. Proces zážihu výbojom má štyri fázy. V prvej fáze predvýboju je energia dodaná do plynových molekúl aby došlo k ich ionizácii. Napätie rastie na takú úroveň, že prúd je umožnené prechádzať medzerou a v momente, kedy môže prechádzať ionizovaným plynom začína fáza rozpadu. V tej behom pár nanosekúnd dôjde k zvýšeniu prúdu na 100 A a tým pádom aj vzniku nízkoimpedančného spojenia medzi elektródami. Udržateľnosť plazmového jadra je veľmi závislá na charakteristike fázy rozpadu. Vo fáze oblúku dochádza k zníženiu prúdu z pôvodnej hodnoty na hodnotu 100 V a tiež zníženiu prúdu na približne 1 A. V poslednej fáze dochádza k vzniku tlejivého výboja, ktorý trvá dlhší časový úsek ako predošlé. Napätie dosahuje 500 V a prúd sa pohybuje okolo 0,1 A.

PROCES HORENIA

Počas procesov výboja nastáva presun elektrickej energie do zmesi paliva a vzduchu, kde dochádza k zvyšovaniu teploty dostatočne vysokej na to aby vznikli lokálne chemické reakcie. Horenie v spaľovacích motoroch nastáva skrz plameň ku koncu kompresie. Plameň môžeme definovať ako obmedzenú oblasť v rámci ktorej dochádza k uvoľneniu chemickej energie a reakcii oxidovania paliva. U zážihových motorov dochádza k takmer dokonalému premiešaniu palivových výparov so vzduchom pred iniciovaním horenia, čo spôsobí vznik vopred zmiešaného plameňa. Ten je zvyčajne veľmi úzky a jeho šírka sa pohybuje v zlomkoch milimetrov. U spaľovacích motorov by bolo ideálne aby dochádzalo ku dokonalému horeniu, keďže jeho produkty voda a oxid uhličitý sa už ďalej opakovane nespália.

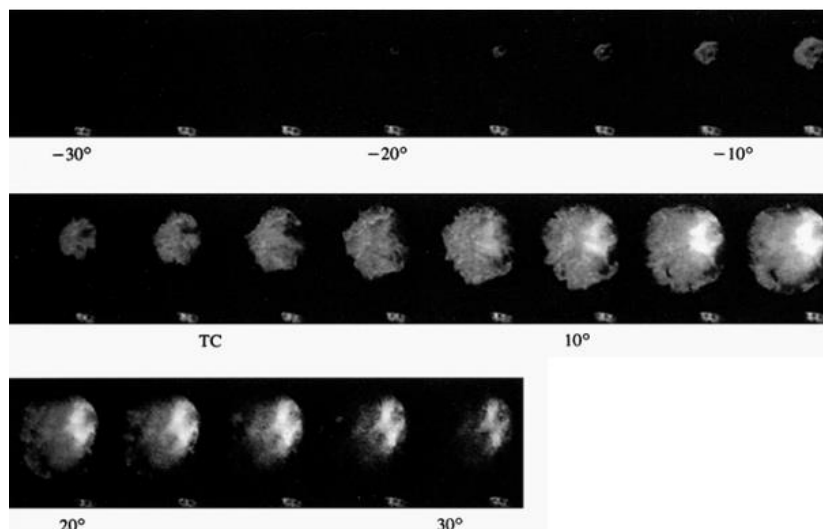
Jedná sa o horenie pri ktorom dochádza k úplnému spáleniu obidvoch súčastí zmesi – paliva a vzduchu. Tento typ spaľovania by zamedzil vzniku toxických látok, ktoré sú škodlivé pre ľudský organizmus alebo životné prostredie.

Rovnice dokonalého spaľovania: [2]



Po zapálení sa tento plameň mení na turbulentný, keďže sa vo vnútri valca nachádza turbulentný prúd, ktorý skrивuje alebo zvráštľuje plameň. To sa deje z dôvodu lokálnej turbulencie a náhodnej fluktuácie jeho rýchlosti. Čím väčšia turbulencia sa vytvorí tým viac sa zvráštľuje a rýchlejšie sa rozširuje. Bežná rýchlosť laminárneho plameňa je niekoľkokrát menšia ako turbulentného. Ak by nedošlo ku vzniku turbulencie tak horenie by sa šírilo pomaly a proces spaľovania by nebol dokončený dostatočne včas počas expanzie a nevznikla by dostatočná hnacia sila. Plameň sa potom rozširuje skrz palivové výpary, vzduch a zmes spáleného plynu dokiaľ nedosiahne steny spaľovacej komory a na nich sa uhasí.

Rozširovanie sa líši cyklus od cyklu a to preto lebo charakteristiky ako tvar tlaku, objemový zlomok pri zapálení, hmotnostný zlomok spálenia nie sú pre každý cyklus totožné. Vývoj tohto rozširovania je možné vidieť v *Obr.3*. Rozhodujúce je aj zloženie a pohyb zmesi v bezprostrednej blízkosti zapalovacej sviečky pri zážihu. Ako bolo už vyššie naznačené tento proces sa nazýva nedokonalým spaľovaním a je zjednodušene definovaný nasledujúcou rovnicou. [2]



Obr. 3 Rozširovanie plameňa zážihového motoru. [2]

1.4.2 POŽIADAVKY NA ZMES POTREBNÚ PRE POHON ZÁŽIHOVEHO MOTORU

Zážihové motory pracujú vtedy keď dochádza k horeniu predmiešanej zmesi zloženej z okolitého vzduchu a paliva v nádrži. Úlohou prípravy je splnenie požiadaviek motoru počas celého režimu fungovania. Optimálne je také nastavenie, ktoré docieli, čo najväčšiu hodnotu vystupujúceho výkonu a čo najmenšiu spotrebu paliva pri hladkej a spoľahlivej pracovnej operácii. V praxi je nutné prihliadať taktiež na produkované emisie, ktorých regulovanie ovplyvňuje zloženie zmesi a tým pádom sa optimálne stáva nevhodným. Zníženie emisii sa dosiahne recyklovaním zlomku výfukových plynov prostredníctvom EGR ventilu späť do sacieho systému. Relatívne proporcie paliva a vzduchu sú tiež závisle na parametroch rýchlostí a zaťažení motoru. Charakteristiky spaľovania zmesi vzduchu a paliva a vlastnosti produktov, ktoré spaľovaním vzniknú a riadia činnosť, účinnosť a emisie motoru korelujú najlepšie pre veľký rozsah palív relatívne k stechiometrickým proporciám zmesi.

STECHEMIETRIA

Stechiometrická reakcia je definovaná tak, že palivo zhorí úplne a jedinými produktami tejto reakcie sú CO_2 a voda. Kompozícia finálnych produktov závisí na stechiometrii. Pre predstavu, ak reaktanty sú bohaté na palivo tak v reakcii nebude dostatok vzduchu na reakciu s palivom, čo vyústí do vzniku vedľajších produktov CO a H_2 . Naopak, ak bude zmes chudobná tak tam nebude dostatok paliva aby došlo ku využitiu všetkého kyslíka, čo spôsobí výskyt nespáleného kyslíka v koncovej zmesi produktov. [3]

$$\phi = \frac{FA}{FA_S} \quad (19)$$

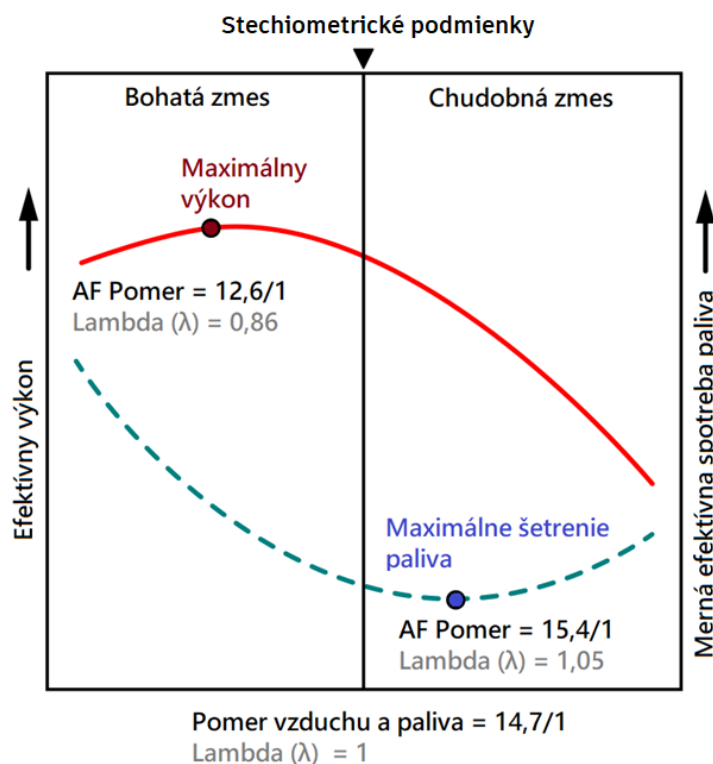
$$\lambda = \frac{AF}{AF_S} \quad (20)$$

kde ϕ je ekvivalentný pomer paliva a vzduchu, FA je skutočný pomer paliva a vzduchu, FA_S je stechiometrický pomer paliva a vzduchu, λ je ekvivalentný pomer vzduchu a paliva, AF je skutočný pomer vzduchu a paliva, AF_S je stechiometrický pomer vzduchu a paliva.

U zážehových motorov sa využíva najčastejšie ako palivo benzín. Jeho hodnota AF_S je 14,72. Hodnota stechiometrického pomeru sa palivo od paliva líši. Ak hodnota λ výjde menšia ako 1 jedná sa o bohatú zmes ak väčšia o chudobnú. Pri hodnote $\lambda=1$ je zmes stechiometrická.

ROZDIELY V POŽIADAVKÁCH PODĽA PREVÁDZKY MOTORU

Požiadavky pre zmes sú rôzne podľa toho či dochádza k operácii motora za úplne otvoreného škrtiaceho ventilu, kedy je snaha plne využiť indukovaný vzduch aby sme získali maximálny možný výkon alebo pri čiastočnom zaťažení kedy je esenciálne efektívne využiť palivo. U WOT sa maximálneho výkonu pre danú objemovú účinnosť dosahuje použitím bohatej zmesi o hodnote $\lambda \approx 0,9$. Niekedy dochádza k využitiu aj bohatších zmesí aby sa zvýšila objemová účinnosť tým, že dôjde k zvýšeniu chladenia vzduchu, ktorý sprevádza odparovanie paliva. To má za následok zníženie výskytu klepania a zníženie celkovej teploty výfukových plynov. U čiastočného zaťaženia je výhodné zriediť zmes vzduchu a paliva s dodatočným vzduchom alebo recyklovanými výfukovými plynmi. Prejaví sa to zlepšenou účinnosťou premeny paliva.



Graf 3 Vplyv zmeny pomeru vzduchu a paliva na výkon a spotrebu motora. [4]

Z Grafu 3 je na prvý pohľad zreteľné prečo sa využíva stechiometrický pomer z parametrických hľadísk. Pri využití bohatej zmesi dochádza k nárastu spotreby a k zvyšovaniu výkonu, u chudobnej zasa k poklesu výkonových charakteristík pri znížení spotreby.

V minulosti pri absencii striktných NO_x emisií bol očividnou voľbou dodatočný vzduch čím vznikla chudobná zmes. V súčasnosti sa viac využíva zmes takmer stechiometrická, ktorá uľahčí vyčistenie výfuku za pomoci trojcestného katalyzátoru. Vhodným riedidlom sú potom recyklované výfukové plyny, ktorých využitie zníži NO_x emisie. Zvyšovaním riedidla dochádza k spomaleniu spaľovacieho procesu a zvýšeniu jeho variability od cyklu k cyklu. Na to aby bola zaručená hladkosť fungovania motoru musí byť zabezpečená do istej úrovne opakovateľnosť a level stability spaľovacieho procesu. Ako sa záťaž znižuje tak aj klesá hranica riedenia čerstvej zmesi.[2],[3]

1.4.3 EMISIE A CO_2 NEUTRALITA

Emisie produkované spaľovacími motormi patria medzi najväčšie znečisťovateľ a ovzdušia. Okrem následkov na životné prostredie sa ich prítomnosť dokáže podpísať na ľudskom zdraví preto je do budúcnosti cieľom znížiť ich výskyt na minimum. Medzi hlavné emisie patria oxidy dusíku NO_x , oxid uhľnatý CO , uhl'ovodíky HC , pevné častice PM .

OXIDY DUSÍKU

K ich tvorbe dochádza v spaľovacom priestore počas procesu spaľovania. Prebiehajú disociácie N_2 a O_2 na ich atómový stav a ich následne reakcie z molekulárnym kyslíkom a dusíkom. Do NO_x patria NO a NO_2 . Platí, že čím vyššia je teplota spálených plynov za plameňom tým nastáva väčšia tvorba NO .

OXID UHOL'NATÝ

Objavuje sa prevažne u spaľovacích motorov idúcich na bohatej zmesi. Pri spaľovaní je nedostatočné množstvo kyslíka aby došlo k reakcii a vzniku CO_2 . Ďalším zdrojom tvorby CO je disociácia CO_2 pri vysokých teplotách spaľovania. Parameter, ktorý najviac tvorbu tohto typu emisie ovplyvňuje je ekvivalentný pomer paliva a vzduchu.

UHLOVODÍKY

Sú produkované primárne výskytom nespáleného benzínu vo výfuku motora. Najväčšie hodnoty dosahujú pri štartovaní a prvotnom zahrievaní motora z dôvodu zníženého vyparovania paliva a oxidácie. U zážihových motorov pri expanzii nenastáva zhorenie všetkého paliva, ale približne 9% zostane nespálené. Počas ďalších dôb dôjde k zníženiu nespáleného paliva na 2%, ktoré idú potom von výfukom. Za vznik uhl'ovodíkov sú v princípe zodpovedné tieto mechanizmy: štrbiny v spaľovacom priestore, olejové vrstvy, zbytky uhlíka prítomné na hlave piestu, v trubkách a vo valci, nesformovanie sa paliva do kvapôčok, uhasenie plameňa pred stenou valca a únik vo výfukovom potrubí.

PEVNÉ ČASTICE

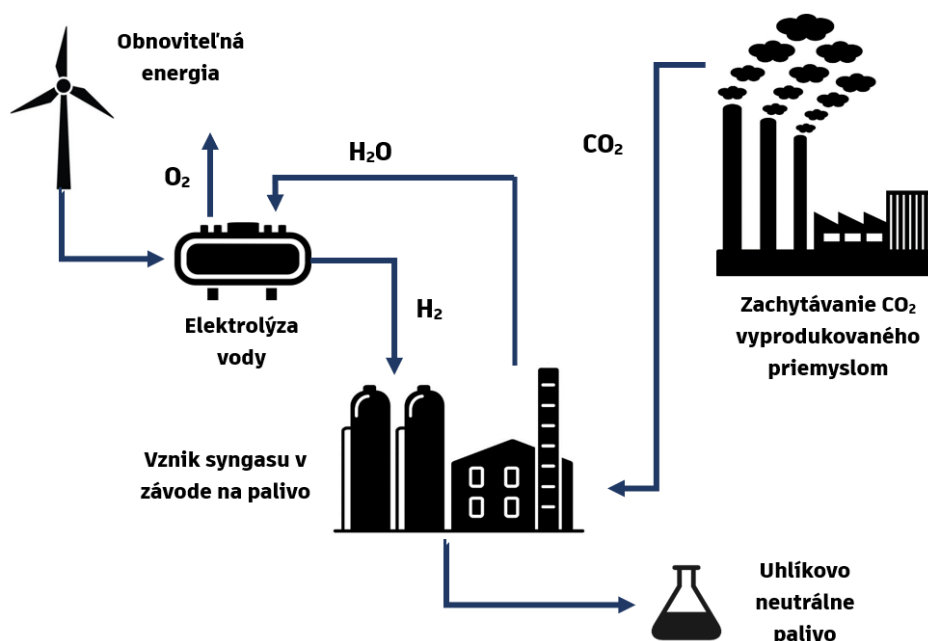
U zážihových motorov ich výskyt nie je tak prísne kontrolovaný ako u vznetrových. Ale ich výskyt je aj tak do určitej miery redukovaný keďže môžu spôsobiť respiračné problémy. Najčastejšie sa prejavujú vo forme viditeľného dymu alebo sadzí vo výfukových plynach. Materiál, ktorý sa zachytí na filtroch je tvorený dvoma komponentmi: organickou - uhl'ovodíkmi a pevným uhlíkom najčastejšie vo forme sadze. [2],[3]

UHLÍKOVÁ NEUTRALITA

Pre správne implementovanie syntetických palív v automobilovom priemysle je nutné sa zamýšľať aj nad tvorbou emisií (hlavne CO_2), ktorých úplne eliminovanie pri využití spaľovacieho motoru je veľmi zložitú. Na vyriešenie tohto problému sa začína rozprávať o koncepcii uhlíkovo neutrálnych palív. Ich podstata spočíva v tom, že všetok vytvorený CO_2 pri spaľovaní je následne využitý na výrobu ďalšieho paliva, čím z hľadiska hodnôt skleníkových plynov v atmosfére nedôjde k nárastu. Vzniknuté palivá je možné považovať za obnoviteľné, pretože nebude dochádzať k využitiu fosílnych zdrojov. Proces zachytávania uhlíku môže prebiehať aj z atmosféry, ale získať jeho dostatok pre výrobu paliva bude značne energeticky náročné. Z tohto dôvodu je užitočné presunúť jeho zber k zdrojom s veľkou koncentráciou CO_2 .

Separácia uhlíka z atmosféry alebo spalín spočíva v termochemickom absorpčnom cykle, ktorý pozostáva z štyroch reakcií – absorpcia, kaustifikácia, regenerácia a hydratácia. CO_2 je absorbovaný hydroxidom sodným z ktorého reakciou vznikne uhličitan sodný. U kaustifikácie dôjde k pridaniu haseného vápna z čoho sa vyzráža nerozpustný uhličitan vápenatý. V tejto fáze dochádza k regenerácii hydroxidu sodného, ktorý možno opätovne použiť. CO_2 je následne uvoľnené skrz kalcináciu – tepelnú dekompozíciu uhličitanu vápenatého v špeciálnej peci, pri čom vzniká pálene vápno, ktoré je možné recyklovať.

Ďalším podstatným prvkom pre tvorbu palív je vodík. Podobne ako CO_2 musí byť jeho zdroj obnoviteľný a momentálne sa javí ako najlepšie riešenie voda. Prvou metódou je oddelenie vodíku a kyslíku do dvoch separátnych reaktoroch za vysokých teplôt pri použití oxidu kovu. Táto reakcie je energeticky náročná a pre efektívnu tvorbu by bolo nutné zabezpečiť rekuperáciu tepla. Druhou metódou je elektrolyza vody. Tá spočíva v púšťaní elektrického prúdu medzi dvoma elektródami skrz vodu, čo spôsobí rozdelenie molekuly vody. Pri tejto metóde dochádza k využitiu veľkého množstva elektrickej energie, preto je nutné aby bola dodávaná čistá energia – vyrobená z obnoviteľných zdrojov. Zjednodušená schéma procesu výroby uhlíkovo neutrálnych palív je na Obr.4.



Obr. 4 Schéma výroby uhlíkovo neutrálnych palív.

Ďalším krokom je tvorba syngasu (syntetického plynného paliva), ktorý je možný ďalej spracovať. Je prevažne zložený z vodíku a CO. Trendom je využitie Water Gas Shift reakcií, ktoré pracujú na základe nasledovnej rovnice : [2]

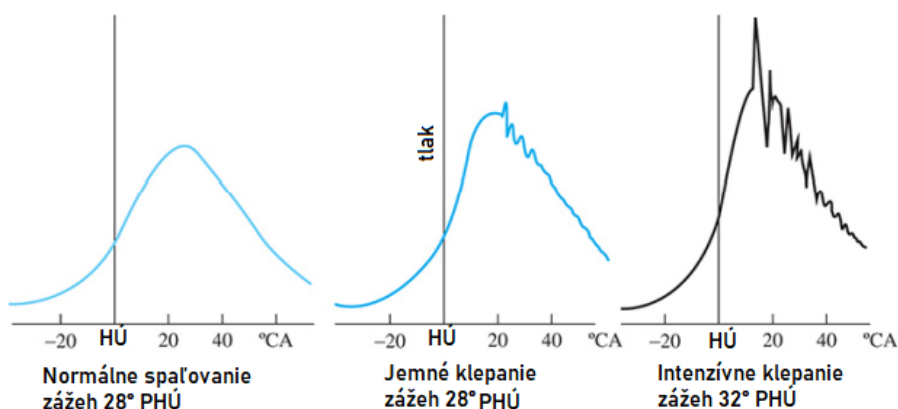


Syngas je možné použiť už v zážihovom motore, ale je vhodné ho posunúť do ďalších procesov, ktoré umožnia vytvorenie kvapalných palív s lepšími vlastnosťami napríklad metanol. Ten sa využíva na výrobu novodobých syntetických benzínov. [5]

1.4.4 ABNORMALITY SPALOVANIA

DETONAČNÉ HORENIE

V bežnej komunikácii tiež nazvané klepanie motora, keďže motor vydáva pri tejto abnormalite vysokofrekvenčný hluk, ktorý sa objavuje opakovane. Detonačné horenie vzniká v dôsledku spontánneho zážihu podstatnej porcie koncového plynu - zmesi paliva, vzduchu a zvyškového plynu ešte pred rozširovaním plameňa. Rozdiely medzi bežným spaľovaním a spaľovaním s klepaním je možné pozorovať v *Grafe 4*.

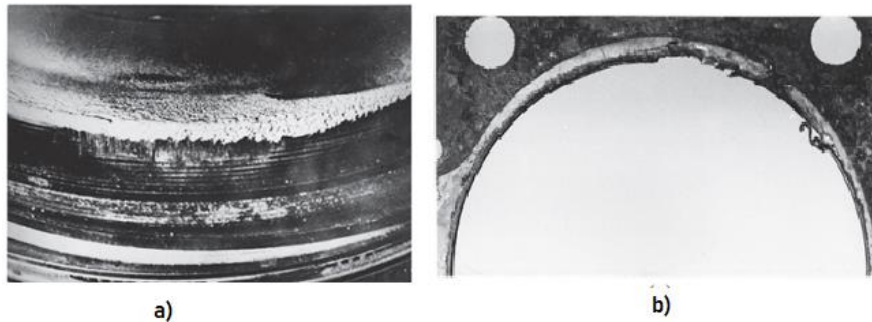


Graf 4 Tlak vo valci proti postaveniu kľukového hriadeľa. [2]

Toto horenie pramení z kompresie koncového plynu spôsobenej expanziou spálenej časti zážihu, čo spôsobí zvýšenie teploty plynu do bodu teploty vznietenia. Keď tento abnormálny spaľovací proces prebieha, dochádza k rapidnému uvoľneniu chemickej energie v koncovom plyne, čo má za následok nárast lokálnych tlakov a šírenie tlakových vln podstatnej amplitúdy skrz spaľovaciu komoru.

Medzi negatívne efekty, ktoré táto abnormalita produkuje patrí nárast strednej teploty komory, čo zvyšuje šance na predbežné spaľovanie, odstránenie olejového filmu, ktorý lubrikuje steny valca čím dochádza k suchému treniu medzi stenami a piestnymi krúžkami a negatívny vplyv rázových vln na piestový čap. Medzi faktory, ktoré napomáhajú detonačnému horeniu patrí vysoký kompresný pomer, nízke oktánové číslo, dlhá cesta plameňa od bodu zážihu, mierne bohatá zmes paliva a vzduchu, nedostatočné chladenie spaľovacej komory, nadbytočné nahličovanie spaľovacej komory a dna piestu. Pri detonačnom horení zohráva určitú rolu aj rýchlosť motora.

Za nízkych rýchlostí je väčší časový úsek na predhriatie koncového plynu prednou časťou plameňa, čo podporuje detonačné horenie, zatiaľ čo pri vyšších rýchlostiach je času porovnateľne menej, čo znamená, že koncového plynu sa tvorí podstatne menej alebo sa netvorí vôbec. Na *Obr. 5* je možné vidieť následky klepania na konštrukcii motora – pieste.



Obr. 5 a) erózia dna piestu po 10 hodinách vysokorýchlostného klepania,
b) roztrhnutie tesnenia hlavy valca kvôli silnému klepaniu. [2]

PREDBEŽNÉ ZAPALOVANIE

Tento pojem môžeme definovať ako výskyt zážihu pred vznikom samotného zážihu od zapalovacej sviečky. Hlavné zdroje tejto abnormality sú prehriatie elektródy zapalovacej sviečky a prítomnosť nezhorenej zmesi v lokálnej časti vo vnútri valca, ktorá sa samozapáli ku koncu kompresie. Pri vážnom a dlho sa opakujúcom klepaní motora môže taktiež dôjsť k tomuto prehriatiu. Na to aby došlo k samozapáleniu musí zmes dosahovať teplotu okolo 700 až 800°C. Vyvolanie zážihu a rozširovanie plameňa je podobné ako pri bežnom horení. Rozdiel nastáva v tom, že zatiaľ čo zapálenie vyvolané zapalovacou sviečkou je kontrolované tak pri predbežnom je výskyt zážihu neodhadnuteľný. Pri predbežnom zapalovaní dochádza k predĺženiu celkového času, čo spálene plyny strávia vo valci čím nastáva presun tepla na steny komory čoho výsledkom je, že teploty potrebné na samozapálenie budú nastávať pri každej kompresii skôr ako pri predošlej. Tým pádom dôjde k tomu, že najvyšší tlak vo valci, ktorý bežne nastáva medzi 10° až 15° po HÚ sa bude postupne vyskytovať bližšie a bližšie HÚ. To spôsobí, že nastane zvyšovanie teploty a tiež hodnoty najvyššieho tlaku vo valci čoho následkom je, že najvyšší tlak sa začne vyskytovať ešte pred HÚ. U jednovalcových motorov dôjde k zníženiu rýchlosti a výstupného výkonu. U viac valcových motorov to predstavuje väčší problém pretože zatiaľ čo zvyšné valce pracujú na maximum a vytvárajú najvyšší možný výkon a rýchlosť, tak piest vo valci, ktorý trpí na predbežné zapalovanie bude vytvárať negatívnu prácu tým pádom bude ťahaný zvyšnými, kým eventuálne zvýšené teplo nespôsobí zadretie piestu a jeho piestnych krúžkov, čo môže vyústiť do situácie ako na *Obr.6*. [2],[3],[6],[7]

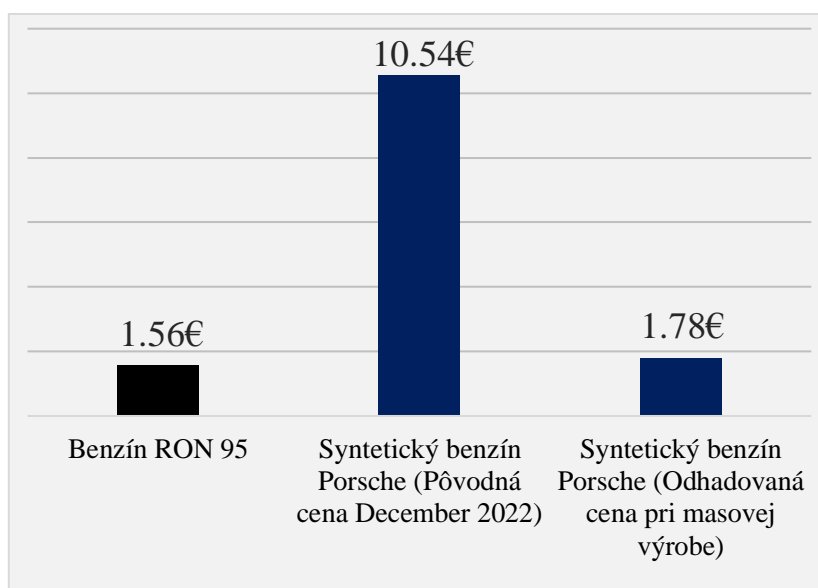


Obr. 6 Predieravenie piestu spôsobené predbežným zapalovaním. [2]

2 PALIVÁ VYUŽÍVANÉ PRE POHON ZÁŽIHOVÉHO MOTORA

Motorové palivá slúžia ako pohonná hmota pre vozidlá. Na ich odlišenie je možné ich rozdeliť podľa skupenstva – u zážihových motorov najčastejšie na plynné a kvapalné. Ďalším deliacim kritériom môže byť spôsob ich získavania. Podľa neho poznáme palivá fosílna, ktoré vznikajú z ropy, uhlia alebo zemného plynu, a obnoviteľné, ktorých spôsob tvorby je do budúcnosti udržateľný a vyrábajú sa za pomoci vody alebo poľnohospodárskych plodín. Taktiež je možné rozdelenie podľa zloženia na uhl'ovodíkové (benzín), alternatívne (LPG, CNG) a neuhl'ovodíkové (alkoholy, vodík).

Pre nájdenie správnej alternatívy pre palivo zážihového motoru je nutné určiť ako by v ideálnom prípade malo vyzeráť. Očakáva sa vysoká výhrevnosť paliva na jednotku hmotnosti, vysoké oktánové číslo, čo najmenší obsah nespáliteľných podielov, schopnosť tvoriť zmes, schopnosť jednoduchého zápalu zmesi, chemická časová stálosť, čo najnižšia úroveň spôsobovania korózie palivového systému a nekorozivnosť spalín, čo najnižšie zdravotné riziko, minimálna tvorba škodlivých produktov spaľovania (polycyklické uhl'ovodíky, olovo, oxidy síry) a nízka cena. Zatiaľ čo väčšinu očakávaní pri syntetických palivách je možné vyhodnotiť objektívne tak porovnanie cien je z dôvodu ranného stavu masovej výroby nemožné ako sa dá pozorovať v *Grafe 5*. [7],[9]



Graf 5 Porovnanie cien za liter syntetického a bežne predávaného benzínu. [10],[11]

2.1 HLAVNÉ VLASTNOSTI PALÍV ZÁŽIHOVÝCH MOTOROV

Na zabezpečenie správnej funkcie motora je potrebné aby fungoval na palive s vhodnými vlastnosťami, ktoré zabezpečia jeho najefektívnejší chod. Je zložité povedať ako každá charakteristika ovplyvňuje fungovanie motora, pretože častokrát sú prepojené medzi sebou a zmenou jednej dochádza automaticky k ovplyvneniu ďalších.

2.1.1 OKTÁNOVÉ ČÍSLO

Oktánové číslo definuje kvalitu paliva proti detonačnému horeniu. Palivá sú zoradené na škále a čím vyššie číslo majú priradené tým lepšia je ich odolnosť. Bežná škála je založená na dvoch uhľovodíkoch, ktoré predstavujú začiatok a koniec. Podľa definície je n-heptánu priradené číslo 0 a izooktánu 100. Tieto dve konkrétne zlúčeniny boli zvolené z dôvodu ich veľkého rozdielu odolnosti detonačného horenia. Taktiež v dobe zavedenia sa zvyčajne používané benzíny nepribližovali svojimi detonačnými vlastnosťami k izooktánu. Existuje niekoľko štandardizovaných metód hodnotenia oktánových čísel pri ktorých dochádza k testovaniu paliva a jeho detonačných vlastností a následnému priradeniu zmesi izooktánu a n-heptánu o rovnakých charakteristikách. Proporcía objemu v percentách izooktánu v zmesi korešponduje s oktánovým číslom. Najčastejšími metódami sú výskumná a motorová, ktoré sú vykonávané v štandardizovaných jednovalcových motoroch s nastaviteľným kompresným pomerom. Motorová metóda je náročnejšia na detonačné horenie. Pri palivách s ešte vyšším oktánovým číslom ako toluén alebo etanol je jeho definícia a overenie založené na referenčných štandardoch izooktánu s rôznymi množstvami pohybujuúcimi sa v milimetroch protidetonačného aditíva – tetraetyl olova.

2.1.2 ODPARITEĽNOSŤ

Z definície je odpariteľnosť potenciál pre vyparovanie za danej teploty a tlaku. Je to jedným z kľúčových faktorov pre tvorbu zmesi. V motoroch, ktoré spaľujú jednotnú zmes pary paliva a vzduchu je nutné aby podiel pary ku vzduchu bol väčší o polovicu ako stechiometrický pre uspokojivé zapálenie a rozšírenie paliva.

Okrem toho, že má hodnotu minimálnu, kedy dôjde k uspokojivému naštartovaniu aj pri studenom štarte, taktiež je nutné prihliadať na hodnotu maximálnu aby pri vysokých teplotách nedošlo k sformovaniu bubliniek v palive, čo spôsobí zastavenie prísunu paliva tzv. vapor-lock. Ďalším problémom je ochrana životného prostredia, ktorá vyžaduje aby úniky pary boli, čo najnižšie. Odpariteľnosť je definovaná viacerými charakteristickými veličinami – stupňami krivky varu, tlaku palivovej pary a VLI. Tieto hodnoty sú tiež závislé na ročnom období – lete a zime.

2.1.3 HUSTOTA

Jedná sa o základnú fyzikálnu vlastnosť paliva, ktorá môže ovplyvňovať využitie paliva. Hustota zohráva rolu v spotrebe paliva motorom a ekonomike paliva (precestovaná vzdialenosť za jednotky objemu paliva). S narastajúcou hodnotou hustoty narastá hodnota ekonomiky. Taktiež ovplyvňuje vzdialenosť častice paliva, ktorú precestuje spaľovacou komorou kým nedôjde k začatiu horenia.

2.1.4 DOLNÁ VÝHREVNOSŤ PALIVA

Je definovaná ako množstvo tepla vyprodukované zapálením špecifického množstva paliva za teploty 25°C a privedenie produktov spaľovania na teplotu 150°C. Spaľovanie sa deje za podmienky konštantného objemu a celkové množstvo vody produktov reakcie sa zmení a zostane vo forme vodnej pary. Čím vyššia je dolná výhrevnosť tým vyššie je vygenerované teplo spaľovaním a to sa eventuálne prejaví v celkovej hodnote výkonu motora. Palivá s nízkou hodnotou výhrevnosti sú taktiež nevýhodné z dôvodu vyššieho znečisťovania okolia.[2],[3],[12],[13],[14]

2.2 BENZÍN

Benzín je dominantným palivom automobilov od začiatku 20. storočia. Má vysokú dolnú výhrevnosť a skvelé protidetonačné charakteristiky za relatívne nízku cenu. Jeho zloženie je kombináciou ľahkých destilovaných uhl'ovodíkov – parafínov, olefínov, nafténov, aromatických látok, alkoholov, éterov a ďalších aditív.

2.2.1 VÝROBA

Prvým krokom sú destilačné procesy a odsolenie ropy, kde dochádza k separácii uhl'ovodíkov podľa ich molekulovej veľkosti do rozličných frakcií. Destilačné procesy prebiehajú buď za atmosférického tlaku alebo za redukovaného tlaku – vákuové. Prvotné frakcie nespĺňajú požadované vlastnosti a je nutné ich ďalej spracovať. To sa deje konvertovaním ťažkých uhl'ovodíkov na ľahké, čo sa dosiahne zmenou ich chemickej kompozície a to zlepši ich charakteristiky. Princíp zmeny je založený na rozbíjaní veľkých molekúl na menšie buď teplotne alebo prítomnosťou katalyzátora. Veľkú rolu zohráva aj desulfurizácia, ktorou sa znižuje obsah síry, čo chráni pred koróziou, poškodením katalyzátora a nevyučuje sa do ovzdušia. Štruktúra molekúl je ďalej modifikovaná ďalšími procesmi. Jedným z dôležitých procesov je izomerácia pomocou ktorej dochádza k premene lineárnych molekúl na rozvetvené, čo zvyšuje oktánové číslo. Pridávaním biopalív ako bioetanol dokážeme ďalej navyšovať celkové oktánové číslo benzínu.

2.2.2 POŽIADAVKY PRE MODERNÉ BENZÍNY

Je nutné aby celkové oktánové číslo bolo čo najvyššie. Jeho následná distribúcia v celom objeme paliva musí byť rovnomerná. Benzín nesmie obsahovať vysoké počty olovnatých a kovových prvkov a obsah síry by mal byť čo najmenší. Jeho zloženie má mať vysoký obsah izoparafínov a redukované hodnoty zvyšných ľahkých uhl'ovodíkov. Je dôležité aby primiešavanie biokomponentov do paliva bolo možné a nevyžadovalo vysoké náklady. Benzín využívaný v automobilovej doprave by mal byť schopný sa podieľať na nízkej spotrebe paliva a byť kompatibilný s motorovým olejom. Finálnym produktom horenia musia byť relatívne ekologicky prijateľné zlúčeniny. [12],[15]

Tab. 1 Vybrané požiadavky pre benzíny podľa normy DIN EN 228. [12]

Požiadavky	Jednotka		
Kvalita		Super E10	Super
Oktánové číslo MON/RON	–	95/85 ¹	
Hustota (15°C) min/max	kg/m ³	720/775	
Síra max	mg/kg	10	
Obsah kyslíka max	% (m/m)	3.7	2.7
Obsah etanolu max	% (V/V)	10.0	5.0
Benzén max	% (V/V)	1	
Olovo max.	mg/l	5	
Volatilita			
Tlak pary v lete min/max	kPa	45/60	
Tlak pary v zime min/max	kPa	60/90	
Objem pary pri 70°C v lete min/max	% (V/V)	22/50	20/48
Objem pary pri 70°C v zime min/max	% (V/V)	24/52	22/50
Objem pary pri 100°C min/max	% (V/V)	46/72	46/71
Objem pary pri 150°C min/max	% (V/V)	75/–	
Maximálna teplota varu	°C	210	
Vapor lock index na jar a jeseň max		1 164	1 150

2.3 ETANOL

2.3.1 PRODUKCIA

Etanol sa často nazýva aj bioetanol, pretože jeho výroba je zabezpečená z organických materiálov a môžeme ho považovať za obnoviteľne palivo. V súčasnosti sa využívajú dva hlavné priemyselné spôsoby výroby etanolu. Jedná sa o alkoholovú fermentáciu a reakciu etánu s parou. Alkoholová fermentácia funguje na princípe premeny cukrov, ktoré sa vyskytujú v kukurici a iných plodinách, na etanol a iné vedľajšie produkty ako oxid uhličitý. Etán je vedľajším produktom ropnej rafinácii z ktorej sa izoluje a je posielaný ďalej do procesu kde reaguje s vodnou parou čo vyústi do tvorby etanolu.

2.3.2 SPRÁVANIE V ZÁŽIHOVOM MOTORE

Etanol ako palivo má vyššie oktánové číslo a to pozitívne ovplyvní zvyšovanie kompresného pomeru. Tiež to znamená, že je odolnejší proti detonačnému horeniu, ktoré je menej pravdepodobné ako pri benzíne kde dochádza k pozdržaniu zápalu, čo znižuje celkový krútiaci moment oproti motoru poháňanom na etanole. Pod túto skutočnosť sa podpisuje aj nižšia teplota plynu počas kompresie, ktorá vyústi z vysokého latentného tepla pri vyparovaní. Na druhej strane je hodnota objemovej účinnosti menšia o 2%, čo pramení z nižšieho pomeru vzduchu a paliva v porovnaní s benzínom preto je potrebné vstrekovat' väčší objem etanolu. Teplotná účinnosť sa u motorov poháňaných čistým etanolom pohybuje na vyššej hodnote ako u benzínu s vysokým oktánovým číslom. Pri rovnakom časovaní zápalu je teplotná účinnosť stále vyššia, čo môže spôsobovať nižšia strata tepla spojená s ochladzovaním v spaľovacej komore pri využití etanolu ako paliva. Ďalším faktorom, ktorý sa pod účinnosť podpisuje je nižšia teplota etanolu pri spaľovaní približne o 10°C oproti benzínu. Negatívom používania etanolu je vysoká merná efektívna spotreba paliva, ktorá je na tom oproti benzínu takmer o štvrtinu horšie. Primárne je za to zodpovedný fakt, že etanol má nižšiu hodnotu dolnej výhrevnosti takže pri rovnakom objeme palív je vyprodukované menšie teplo. Ešte vážnejší problém predstavuje zimné obdobie pre schopnosť naštartovania a šoférovania vozidla. Tým, že etanol je zložený len z jednej zložky tak má stály bod varu na teplote 78,5°C zatiaľ čo benzín sa skladá z viacerých zložiek medzi ktorými sú aj volatilné (nestále), ktoré nemajú konkrétny bod varu, ale rozsah teplôt. Takisto aj vysoké latentné teplo pri vyparovaní sa spolu s nízkou rýchlosťou plameňa podpisujú pod zlé fungovanie studeného štartu. Z hľadiska emisii dochádza k poklesu celkovej hodnoty uhl'ovodíkov na výfuku. To je spôsobené vyššou teplotnou účinnosťou a tiež vyšším podiel vodíka ku uhlíku oproti benzínu. Menšiu redukciu môžeme pozorovať aj u emisiách spôsobovaných oxidmi dusíku, čo je zapríčinené nižšou teplotou spaľovania. Momentálne neexistuje masovo vyrábané vozidlo, ktoré by dlhodobo dokázalo jazdiť na etanol. Je to primárne s koroziívnymi vlastnosťami etanolu, ktoré nenávratne poškadzujú motor. Na vyriešenie tohto problému by bolo nutné vylepšiť všetky materiály a plochy spaľovacej komory, ale aj všetky plastové materiály, ktoré prichádzajú do kontaktu s palivom a tiež vstrekovací systém. [16],[17],[18]

2.4 LPG

2.4.1 PRODUKCIA

Kompozícia kvapalného ropného plynu sa mení región od regiónu a takisto podľa ročných období. Primárne je, ale tvorený zmesou štyroch plynov: propán, propylén, izo-bután a n-bután. V súčasnosti prevažujú tri druhy produkcie LPG.

Prvým zdrojom je rafinácia ropy pri ktorej vzniká ako vedľajší produkt cez destiláciu, krakovanie a ďalšie procesy. Druhým spôsobom získania ropného plynu je pri extrakcii zemného. To sa deje z dôvodu prevencie kondenzovania plynu, čo neskôr vytvára problémy pri prevoze. Posledným zdrojom je extrakcia z oleja.

2.4.2 SPRÁVANIE V ZÁŽIHOVOM MOTORE

Každá súčasť LPG má oktánové číslo nad hodnotou 100, čo ho robí z hľadiska antidetonačných charakteristík lepším riešením ako benzín. Vyššie oktánové číslo v praxi znamená tiež možnosť navýšenia kompresného pomeru zážihového motoru. Kompresný pomer je úzko spojený s lepšou tepelnou účinnosťou ak dôjde k optimálnemu načasovaniu zapálenia pri podmienke predídania vzniku klepania. Pri plynnej fáze ropného plynu a jeho jednobodovom vstrekaní dochádza k dobrému zmiešaniu vzduchu a plynu. Nevýhodou je, že trpí nízkou objemovou účinnosťou podobne ako CNG. Ak namiesto toho privedieme potrubím skvapalnený plyn dôjde k jej navýšeniu. Z výkonnostného hľadiska je LPG na tom mierne horšie ako benzín. V prípade benzínu sa jedná o kvapalné palivo, ktoré vstupuje do spaľovacej komory ako para a tým pádom dôjde k navýšeniu hustoty zmesi, čo vyústi do nárastu objemovej účinnosti a má chladiaci efekt.

LPG je naopak pri teplote okolia vo forme plynu takže nemá chladiaci efekt a je to jedným z faktorov, prečo dochádza k zníženiu objemovej účinnosti. Za pokles je zodpovedný hlavne väčší objem paliva v zmesi na sání. Bežné načasovanie zážihu a nízka rýchlosť plameňa prispievajú taktiež k strate výkonu. Bod varu a tlak pary sú nižšie ako u benzínu a to umožňuje zvyšovať tlak vstreku, čo sa využíva hlavne pri jednobodových vstrekovaniach. Z hľadiska mernej efektívnej spotreby paliva je vhodnejší a efektívnejší LPG než benzín. To je spôsobené vyššou dolnou výhrevnosťou a vyšším stechiometrickým pomerom vzduchu k palivu. Vysoké hodnoty tepla je možné dosiahnuť pri menších množstvách paliva, čo sa prejaví pri krútiacom momente, ktorý bude väčší v porovnaní s benzínom. Uhlíkové emisie sú nižšie takmer o polovicu hlavne z dôvodu lepšej tvorby zmesi. Redukcia sa prejavila okrem HC aj pri CO emisiách pri využití či už kvapalnej alebo plynnej formy paliva. Hodnoty pevných častíc vylúčené pri spaľovaní klesli razantne oproti benzínu – v priemere až o 90%. [17],[19]

Tab. 2 Porovnanie vlastností rozoberaných kvapalných palív zážihových motorov.

Vlastnosti	Jednotky	Benzín	Etanol	LPG
Vzorec	[-]	C ₄ - C ₁₂	C ₂ H ₅ OH	C ₃ H ₈
Hustota pri 20°C	[kg/m ³]	720 - 780	809,9	1,89
Oktanové číslo (RON)	[-]	95 - 97	113	112
Dolná výhrevnosť	[MJ/kg]	43,0	26,7	45,5
Stechiometrický pomer	[-]	14,6	9	15,8
Teplota automatického zapálenia	[°C]	257	363	410 - 580
Limit horľavosti vo vzduchu	[%Vol]	1,4 - 7,6	3,0 - 19,0	0,5 - 8,7
Teplota adiabatického plameňa	[K]	2300	2193	1967
Maximálna rýchlosť plameňa	[m/s]	0,5	0,61	0,58

2.5 ZEMNÝ PLYN

Zemný plyn je fosílné palivo, ktoré sa vyskytuje v rezervách prírody. Je tvorený z 90% metánom, 3% etánom, 3% dusíkom, 2% propánom a ďalšími plynmi. Metán je vždycky dominantným prvkom zemného plynu a je známy ako prvý člen alkánovej skupiny. Má vysoký pomer H/C, čo robí zemný plyn najčistejším fosílnym palivom pretože vylučuje menšie CO₂ emisie. Taktiež sa dá považovať za obnoviteľné palivo pretože metán je možné recyklovať. Zemný plyn sa získava ako vedľajší produkt rafinácie ropy tým, že dochádza k jeho zbieraniu a transportu potrubím do miest ďalšieho použitia.

2.5.1 CNG

Zemný plyn má vysokú koncentráciu energie, ale na objemovom základe je to menej v porovnaní s benzínom. To má za následok kratší dojazd automobilov poháňaných CNG. Využitie skvapalneného zemného plynu dokáže zlepšiť maximálnu celkovú dráhu, ktorú je možno prejsť. Prítomnosť metánu spôsobí, že v porovnaní s benzínom je oktanové číslo vyššie a to umožňuje vyššie kompresné pomery. Nedostatok dlhých uhlíkových reťazcov v kombinácii jednoduchých a stabilných väzieb medzi uhlíkom a vodíkom vytvorí silnú odolnosť proti detonačnému horeniu.

Prítomnosť plynného paliva namiesto kvapalného pri procesoch tvorby zmesi znamená vznik zmesi viac homogénnej, čo ovplyvní emisie a prevažne tvorbu pevných častíc. Plynný stav má aj niekoľko nevýhod. Prekážkou začína byť pri objemovej účinnosti, ktorá je menšia v porovnaní s benzínom. Kvôli tomuto problému je krútiaci moment až o 16% menší. Ak dôjde k implementácii priameho vstrekovania je možné zlepšiť krútiaci moment o 30% v porovnaní s využitím jednobodového. Pri správnom nastavení systému DI a optimálnemu načasovaniu zážihu sa strata výkonu pri nižších rýchlostiach dá z dvoch tretín vykompenzovať. CNG motor pracuje s menšími tlakmi vo valcoch ako pri použití benzínu a to je hlavne z dôvodu nižšej hustoty oproti kvapalnému palivu. Pri plnom otvorení škrtiacej klapky zasa dochádza k nižším hodnotám mernej efektívnej spotreby paliva. Obrovským problémom je, že 90% nespálených uhl'ovodíkov je metán, ktorý je niekoľko násobne rizikovejší pre vznik globálneho otepľovania.

Keďže plynné skupenstvo sa nezdá byť tak výhodne, trendom testovania posledných rokov sa stáva skvapalnený zemný plyn tzv. LNG, ktorý dokáže kompenzovať niektoré hore zmienené problémy práve vďaka kvapalnému skupenstvu. [16],[17],[20]

2.6 VODÍK

2.6.1 PRODUKCIA

Napriek tomu, že vodík je najbežnejšie sa vyskytujúcim prvkom na svete, v prírode sa nevyskytuje vo svojom čistom stave. Zaťaženie životného prostredia pri využívaní vodíka ako paliva primárne závisí na spôsobe jeho produkcie. Na jednej strane je možné ho získavať z fosílnych zdrojov ako zemný plyn a uhlie.

Využíva sa pri tom proces zvaný parný metánový reforming. Tento spôsob produkcie tvorí 90% všetkého vyrobeného vodíka. Parný metánový reforming spočíva v reakcii metánu a pary stlačenej pod 3-25 baru v prítomnosti katalyzátora. Produktom okrem vodíka je aj oxid uhoľnatý a v menšom rozsahu oxid uhličitý. Existujú aj spôsoby získavania šetrnejšie pre planétu ako gasifikácia biomasy alebo elektrolýzou z vody. Gasifikácia prebieha za vysokých teplôt bez spaľovania a s kontrolovaným množstvom kyslíka.

2.6.2 SPRÁVANIE V ZÁŽIHOVOM MOTORE

Podobne ako pri predošlých palivách aj vodík má vyššie oktánové číslo oproti benzínu. Vyššie číslo v praxi znamená možnosť navýšenia kompresného pomeru, čo vo všeobecnosti zvýši účinnosť motora. Vodík na rozdiel od kvapalných palív netrpí problémami ako vapor lock, hasenie plameňa o zimné steny valca, nedostatočné vyparovanie a horenie chudobnej zmesi. Limit horľavosti vodíka je tak široký, že umožňuje operácie bez škrtiacej klapky aj pri spaľovaní chudobnej zmesi. Laminárna rýchlosť plameňa sa u H_2 pohybuje okolo 1,9 m/s a u uhl'ovodíkových palív je to 0,5 m/s. Tieto charakteristiky spôsobia, že v porovnaní s konvenčným motorom bežiacim na benzíne bude tepelná účinnosť mierne vyššia, ak sa využije ako palivo vodík. Problémy nastávajú pri strednom efektívnom tlaku. Ten je ovplyvnený vysokou teplotou vo valci, kde bude dochádzať k nárastu šírenia tepla proti stenám valca. To a posunutie vzduchu pri vstrekaní vodíka do sánia spôsobí, že stredný efektívny tlak bude nižší ako pri použití benzínu.

Prejavy sú viditeľné na poklese celkového výkonu o 20%. Tým, že na zapálenie vodíka je nutných len 0,02 MJ energie na rozdiel od 0,24 MJ pri benzíne je možné využívať pri spaľovaní aj veľmi chudobné zmesi, ktoré sú hodnotovo veľmi vzdialené od regiónu stechiometrických zmesí. Na strane druhej sa táto skutočnosť prejavuje aj negatívne a to vo forme predbežného zapáľovania alebo spätného plameňa, ktorý vzniká vo výfukovom potrubí. Bod varu je u vodíku extrémne nízko čo vedie k menej problémom v zimnom období.

U vstrekovania vodíka nie je potrebný dlhý predstih, čo pomôže k vylepšeniu účinnosti a výkonu motora. Výhodou vodíka je, že má čisté spaľovanie pretože jeho horením vzniká len voda. Z hľadiska emisii je očakávaním nulová prítomnosť uhl'ovodíkov na výfuku, čo nie je úplne pravda. V porovnaní s benzínom sú ich hodnoty niekoľko násobne menšie a dôvodom ich výskytu je spaľovanie oleja. Prevládajúcim znečisťovateľom sú oxidy dusíku, ktoré závisia na zaťažení motoru, teplote a pomere vzduchu a paliva. Pri plnom výkone bola hodnota NO_x emisií štyrikrát vyššia ako u motoru poháňanom benzínom.

Ich zníženie je možné použitím ešte chudobnejšej zmesi, čo bude limitovať celkový dostupný krútiaci moment alebo využiť zachytávač NO_x emisií. Ak dôjde k nárastu vzniku vodnej pary spaľovaním to spôsobí nárast pravdepodobnosti kondenzácie vody v motore. To znamená, že teploty spaľovacej komory a výfukových potrubí budú redukované chladiacim efektom vody.[16],[17],[21]

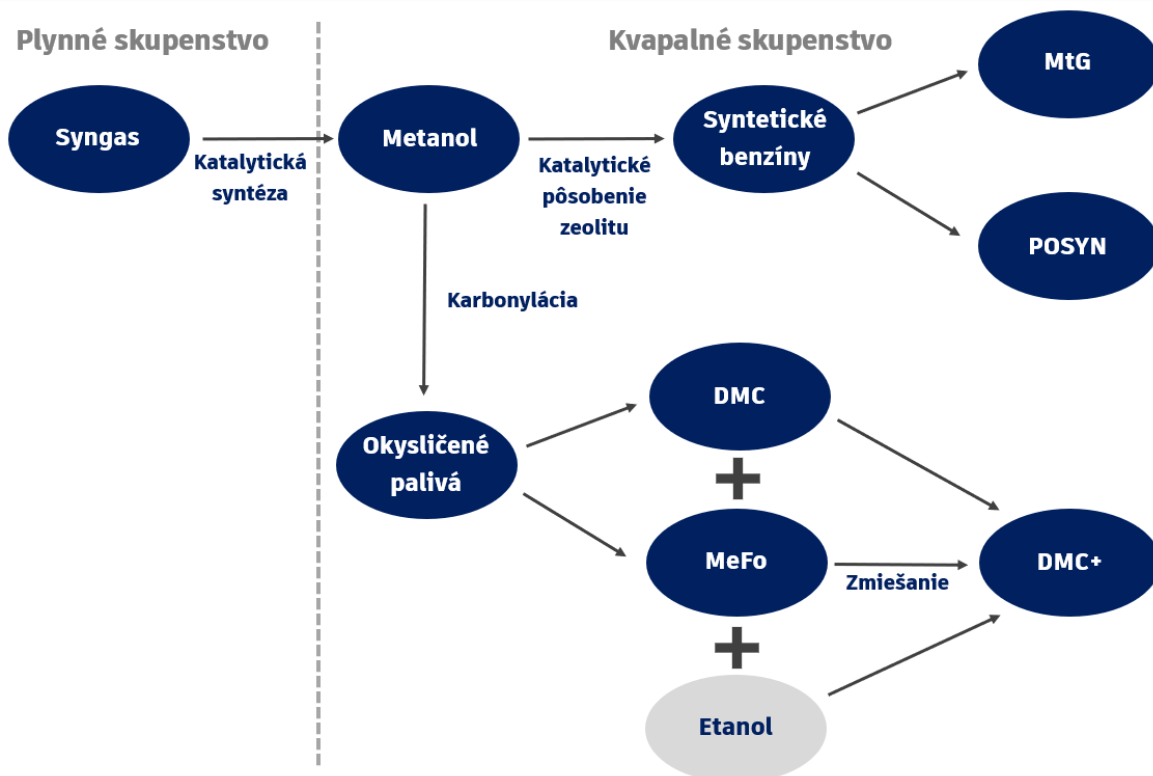
Tab. 3 Porovnanie vlastností rozoberaných plynných palív zážihových motorov.

Vlastnosti	Jednotky	CNG	Vodík
Vzorec	[-]	CH ₄	H ₂
Hustota pri 20°C	[kg/m ³]	0,65	0,08
Oktanové číslo (RON)	[-]	105	130
Dolná výhrevnosť	[MJ/kg]	49,9	120,0
Stechiometrický pomer	[-]	17,2	34,3
Teplota automatického zapálenia	[°C]	540	572
Limit horľavosti vo vzduchu	[%Vol]	5,3 - 15,0	4,7 - 5,0
Teplota adiabatického plameňa	[K]	2320	2400
Maximálna rýchlosť plameňa	[m/s]	0,42	3,5

3 SYNTETICKÉ PALIVÁ

Pojem syntetické palivá sa v literatúre objavuje pod rozdielnymi názvami ako napríklad synpalivá, PtL (Power-To-Liquid) alebo PtX (Power-To-X). Jeho význam sa za posledných pár rokov mierne zmenil. V minulosti toto označenie pokrývalo celú škálu palív bez orientácie na znižovanie nimi produkovanými emisiami. Preto medzi nimi bolo možné nájsť aj naftové, kerosínové alebo benzínové palivá, vytvorené za pomoci termochemickej reakcie z uhlíkatých surovín. V súčasnosti sa pri používaní termínu syntetické palivá naráža na e-palivá, ktorých názov je skratkou obnoviteľných palív vyrábaných za pomoci čistej elektrickej energie. Tie sa v literatúre objavujú čoraz častejšie pomenované ako uhlíkovo-neutrálne palivá, ktoré sú získavané výsledkom kombinácii (syntéz) vodíka získaného ekologickým spôsobom elektrolýzou z vody a CO₂ zachytávaného z prostredia s vysokou koncentráciou (napr. výfukové plyny z priemyselnej továrne) alebo priamo z ovzdušia pomocou uhlíkového zachytávania. Následne pokračuje proces, ktorý bol rozoberaný už v prvej kapitole.

Požiadavky, ktoré sú na syntetické palivá kladené vychádzajú z noriem EN228 a EN590. Je nutné aby boli použiteľné ako drop-in palivá, čiže boli okamžite aplikovateľné do súčasných spaľovacích motorov alebo ako prímеси do uhlíkovodíkových palív. Očakávaním je priblíženie sa čo najviac k ropným palivám či už vlastnosťami alebo ich schopnosťami pri použití v spaľovacích motoroch. To sa dá dosiahnuť skrz vhodný výber a optimalizáciu tých najdôležitejších vlastností palív. Technológie výroby umožňujú ovplyvňovať výsledné vlastnosti a tým pádom je uskutočniteľný vznik paliva, ktoré bude mať simultánne vysokú účinnosť motora a znížené hodnoty škodlivých výfukových plynov. Jedna s možností je ovplyvňovanie pomeru C/H/O a aromatického obsahu. Konkrétnym príkladom je nárast počtu molekúl vodíka a kyslíka, čo sa podpíše na redukcii množstva toxických látok, ktorých výfukom by dochádzalo k poškodzovaniu životného prostredia.



Obr. 7 Schéma vzťahov medzi skúmanými palivami.

Na Obr.7 je možné vidieť syntetické palivá, ktorými sa táto práca zaoberá a ich výrobné prepojenia a vzťahy medzi sebou. V následnej tabuľke sa nachádzajú základne vlastnosti všetkých skúmaných palív.[22]

Tab. 4 Vlastnosti skúmaných palív.

	Oktanové číslo (RON)	Dolná Výhrevnosť	Hustota	Stechiometrický pomer
Jednotky	[-]	[MJ/kg]	[kg/m ³]	[-]
Syngas	91	16,5	0,77	4,2
MtG	96,7	41,4	739,6	14,0
POSYN	100	42,8	718,4	14,5
Metanol	111	19,9	792,0	6,4
DMC	109	15,8	1079	4,6
MeFo	115	15,8	957	4,6
DMC+	117	15,8	1041	4,6

3.1 SYNGAS

3.1.1 VÝROBA

Syngas je syntetické palivo masovo produkované v súčasnosti gasifikáciou prevažne z uhlia, biomasy alebo odpadkov v prostredí o vysokej teplote, ak neberieme do úvahy nastupujúci trend uhlíkovo neutrálnych palív. Operačné podmienky sú kontrolované a nedostatkom kyslíka dôjde k zapríčineniu oxidácie, ktorá vytvorí plynné palivo zvané syngas. Gasifikácia pozostáva zo sekvencie piatich procesov, ktoré sa dejú v rámci jedného splynovača. Jedná sa o procesy sušenia, pyrolýzy, spaľovania, molekulárneho rozpadu a redukcie pri ktorej dôjde k formovaniu vodíka a CO z vody a oxidu uhličitého vzniknutých pri predchádzajúcich procesoch. Počas výroby dochádza k tvorbe dechtu, ktorý musí byť odstránený inak jeho prítomnosť spôsobí jeho kondenzáciu a vznik lepkavého dechtu, čo by poškodilo trubky motora. Veľkú rolu zohráva aj kompozícia splynovača, ktorá prispieva ku kvalite a chemickému zloženiu syngasu. Mimo gasifikácie je možné získať syntetický plyn o podobných zloženiach aj pri procese tvorby aquafuel-u v tom prípade, ale nesie názov powergas. Aquafuel je produkovaný počas elektrického výboja skrz oblúk medzi dvoma uhlíkovými elektródami ponorenými v destilovanej, čerstvej alebo morskej vode.

3.1.1.1 ZLOŽENIE

Syngas pozostáva prevažne z vodíka, oxidu uhoľnatého a metánu ako hlavných chemických prvkov a malé množstvo zbytkových ťažkých uhlíkovodíkov. Ďalšie zlúčeniny, ktoré sa môžu vyskytovať vo finálnom produkte sú závislé hlavne na použitých surovinách v splynovači. Okrem možnosti výskytu ťažkých kovov, stôp ortute, amoniaku alebo chlorovodíku. Syngas sa riedi z 50% inertnými plynmi hlavne dusíkom, vodnou parou alebo CO₂, ktorých výsledné objemy záležia na použítom splynovacom činidle.

Tab. 5 Zloženie typicky vyrábaných syngasov. [23]

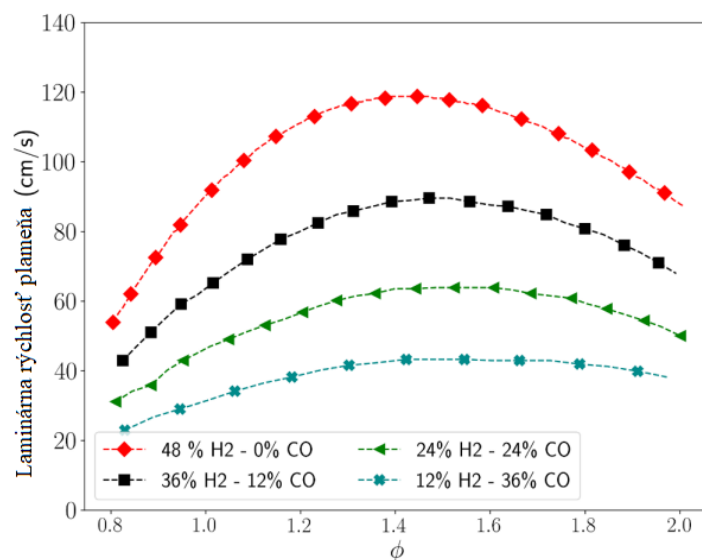
Zloženie syngasu			
H ₂	CO	CH ₄	CO ₂
25 - 30 %	30 - 60 %	0 - 5 %	5 - 15 %

V práci bol primárne rozoberaný syngas o zložení CO 39%, H₂ 40%, CH₄ 11% a CO₂ 10%.

3.1.2 SPRÁVANIE V ZÁŽIHOVOM MOTORE

FYZIKÁLNE VLASTNOSTI

Hodnota dolnej výhrevnosti je v porovnaní s benzínovými palivami nižšia, čo by vyústilo do drastickej redukcie výkonu, ale nižšie AF zmesi syngasu a vzduchu pri stechiometrických podmienkach spôsobí, že celková energetická hustota je v porovnaní s benzínom takmer totožná. Niekoľko vlastností chemického zloženia tohto syntetického paliva sú podstatne rozdielne oproti fosílnym palivám. Prvým príkladom je relatívne vysoká laminárna rýchlosť plameňa, ktorá má vplyv na celkový výkon a jej hodnoty je možné sledovať v *Grafe 6*. Ak chceme docieľiť pri syngase navýšenie tejto vlastnosti je nutné zasiahnuť do chemickej kompozície, teploty alebo tlaku. Pri náraste podielu vodíka v palive dochádza k zvýšeniu rýchlosti pre bohaté zmesi. V prípade, že syngas obsahuje isté percento metánu, ktorý nahradí CO nárast nie je až taký efektívny. Okrem metánu predstavujú problém aj prítomné inertné plyny, ktoré ju značne zhoršujú.



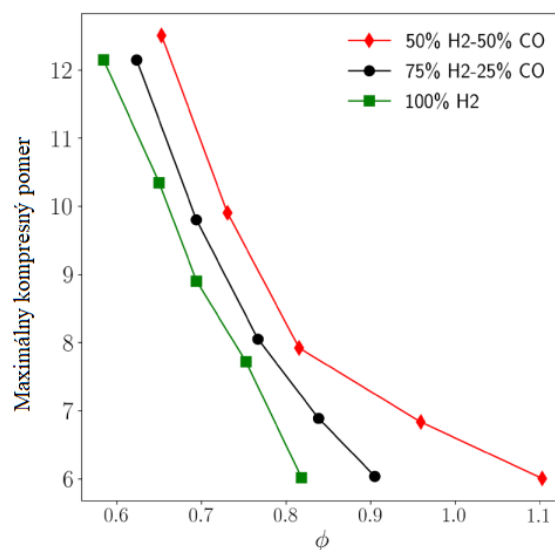
Graf 6 Laminárna rýchlosť plameňa syngasu bez prítomnosti CH₄. [23]

Ďalšou dôležitou vlastnosťou je široký rozsah horľavosti, čo umožňuje využívať toto palivo aj pri aplikáciách, ktoré vyžadujú využitie ďaleko od stechiometrických podmienok. Podľa štúdií je rozsah paliva vo vzduchu približne od 20-60% čo je širšie ako u benzínu alebo zemného plynu. Limity horľavosti pri chudobných zmesiach sú do istej miery ovplyvňované teplotou nespálených plynov. Väčšiu, ale nie významnú rolu zohráva zloženie inertného obsahu paliva ak sa vo väčšom množstve vyskytuje oxid uhličitý.

Pri využití syntetického paliva môže dochádzať k uhaseniu plameňa o steny valca z dôvodu jeho vysokej rýchlosti a nestability. Problém spočíva v turbulencii a takisto v tepelných stratách spôsobených radiáciou. Pri syngase o zložení 44% vodíka a 56% CO sa oktánové číslo pohybovalo okolo 91, čo je menej ako bežne používané benzíny.

ANALÝZA DETONAČNÉHO HORENIA A ZMENA KOMPRESNÉHO POMERU

Využívanie paliva s nízkou hodnotou dolnej výhrevnosti vedie k citeľnému poklesu maximálneho tlaku vo valci, hlavne u chudobných zmesí, čo spôsobí aj následnú redukciu stredného efektívneho tlaku. Výhodou syngasu je možnosť zvyšovať kompresný pomer bez nárastu výskytu detonačného horenia. Veľký podiel na hladkom fungovaní má prítomnosť vodíka, ktorý má vysokú rýchlosť horenia a istú rolu zohráva aj tvar spaľovacej komory. So zvyšovaním kompresného pomeru taktiež rastie účinnosť motora, ale len do určitej hodnoty nad ktorou začnú prevažovať trecie straty. Pri plnom zaťažení je risk vzniku klepania vyšší ak dôjde k dosiahnutiu maximálneho tlaku, ale väčší podiel na detonačnom horení nemá nárast tlaku vo valci, ale skôr nárast teploty. Odolnosť motora proti klepaniu okrem kompresného pomeru závisí aj na bohatosti zmesi, čo je vidieť z *Grafu 7*. Analýzy ukazujú, že maximálny kompresný pomer pri ktorom nedôjde k detonačnému horeniu klesá s ekvivalentným pomerom paliva ku vzduchu. Na druhej strane s nárastom podielu CO sa zvyšuje odolnosť paliva z dôvodu zníženia reaktivity zmesi vďaka prítomnosti oxidu uhoľnatého. Ak k tomu pridáme zvýšenie kompresného pomeru dokážeme navýšiť tepelnú účinnosť, ale za cenu zníženej účinnosti spaľovania, čo sa prejaví zvýšenými hodnotami toxických komponentov výfukových plynov.

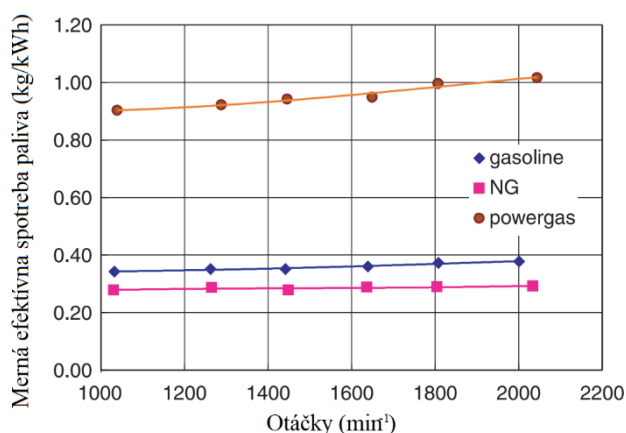


Graf 7 Maximálny kompresný pomer ako funkcia ekvivalentného pomeru paliva a vzduchu. [23]

VÝKON MOTORU

Zloženie syngasu je dôležité aj pri vzniku a rozširovaní vopred zmiešaného plameňa, čo ďalej ovplyvňuje výkon a účinnosť motora. Kľúčovú úlohu pri šírení plameňa znova zohráva vodík vďaka jeho vysokej náchylnosti k difúzii, nízkej molekulárnej váhe a vysokej laminárnej rýchlosti plameňa. V porovnaní s benzínom alebo zemným plynom syngas má najrýchlejšie šírenie plameňa pri všetkých rýchlostiach. Spôsobujú to H₂ a CO, ktoré zvyšujú produkciu radikálov O a OH, ktoré zasa zvyšujú tempo reťazových reakcií spaľovania oproti benzínu.

Napriek tomu, že syngas má nižšiu dolnú výhrevnosť ako zemný plyn, motor poháňaný týmto syntetickým palivom bude mať väčší krútiaci moment práve pre rýchlejšie spaľovanie a znížené pozdržanie zápalu, ktoré je možné pre prítomnosť vodíka. Ten spôsobí, že výskyt maximálnych tlakov bude až v blízkosti hornej úvrate takže je nutnosť pre optimalizáciu motora pozdržať zápal dlhšie ako pri využití benzínu. Spaľovanie syngasu je stabilné a cyklus od cyklu nedochádza k veľkým zmenám. Stabilitu spaľovania pozorujeme aj pri nižších rýchlostiach a zaťaženiach motoru. To umožní výhodné použitie pri chudobných zmesiach.



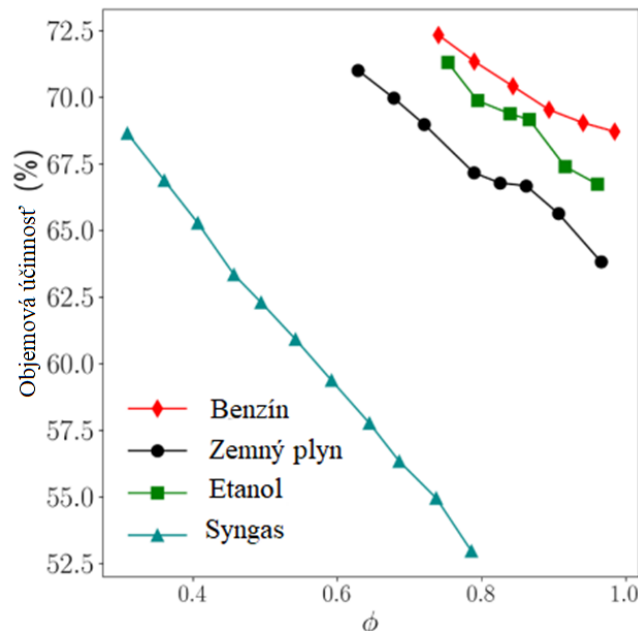
Graf 8 Závislosť mernej spotreby paliva na rýchlosti motoru. [24]

Z hľadiska výkonu pri zvyšovaní pomeru vzduchu k palivu dôjde k signifikantnému poklesu pri nepatrnom znížení účinnosti motora. V porovnaní so zemným plynom, ktorý je vhodný používať do AF 1,8 je u syngasu možné ísť až na hodnotu 3. Pri pozorovaní tepelnej účinnosti toto syntetické palivo vykazovalo najlepšie hodnoty pri využití chudobnej zmesi spomedzi benzínu, zemného plynu alebo etanolu. Ak ale chceme porovnávať najvyšší možný dosiahnuteľný výkon alebo krútiaci moment u syngasu bude menší ako pri využití fosilných palív. U špecifickej spotreby paliva je tiež možné pozorovať až 3 násobný nárast oproti benzínu za čo je zodpovedná veľmi nízka hodnota stechiometrického pomeru vzduchu k palivu (približne 4,2), čo je možné pozorovať v *Grafe 8*.

OBJEMOVÁ ÚČINNOSŤ

Presun tepla skrz steny valcov a pohyby tekutiny pri sání majú taktiež obrovský vplyv na výkon motora. Vstup je opísaný objemovou účinnosťou, ktorá závisí na obsahu ľahkých zložiek syngasu a jej závislosť je možné pozorovať v *Grafe 9*. Syngas má vo všeobecnosti nižšiu hustotu ako vzduch a to so spojením nízkeho stechiometrického pomeru zapríčiní, že obsah válca bude z veľkej časti tvorený palivom. Výsledkom čoho je nižšia objemová účinnosť ako pri benzíne alebo CNG, čo ovplyvní pokles krútiaceho momentu. Nižšia objemová účinnosť v kombinácii s nízkou dolnou výhrevnosťou sa ukáže na strednom efektívnom tlaku, ktorého hodnota je najnižšia spomedzi benzínu, etanolu alebo CNG. Tento fakt sa hlavne preukáže ak je syngas pod vyššou teplotou ako teplotou okolia. Ak sa podarí teplotu redukovať (napríklad latentným teplom vyparovania etanolu) dôjde k nárastu objemovej účinnosti, čo sa pretaví do zvýšeného výstupu výkonu a tepelnej účinnosti. Prítomnosť vodíka v palive napomáha chladeniu motora. Zatiaľ, čo prvá fáza spaľovania je kratšia z dôvodu znížených požiadaviek na zápal a celkového zlepšenia reaktivity zmesi, druhá je dlhšia pretože muselo dochádzať k ochladzovaniu nespálenej zmesi pozdĺž hraničných vrstiev, čo spôsobí tepelné straty a tie sa podpisujú na zníženej tepelnej účinnosti.

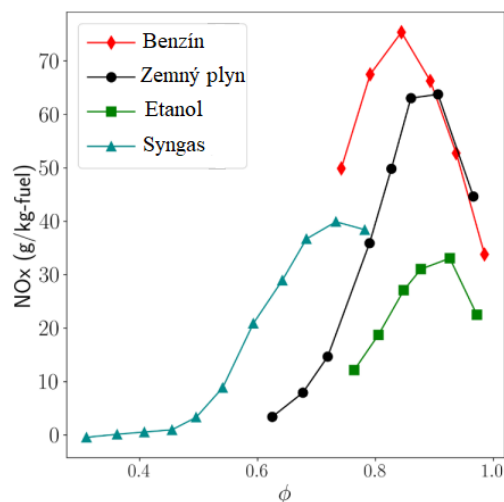
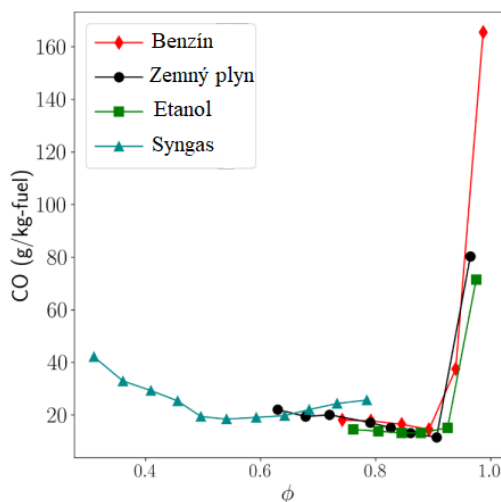
Efektívnym riešením je využiť technológiu priameho vstrekovania čím dôjde k zníženiu vplyvu tohto fenoménu na výkon. Objemová účinnosť by narástla ak by došlo k vstreku po zatvorení sacieho ventilu kedy by do motora vstúpilo zvýšené množstvo vzduchu počas sánia.



Graf 9 Objemová účinnosť ako funkcia ekvivalentného pomeru paliva a vzduchu. [23]

3.1.3 EMISIE

U emisií je veľkou výhodou, že syngas neprodukuje žiadne uhl'ovodíkové emisie keďže palivo neobsahuje žiadne uhl'ovodíkové zložky. Vznik CO emisii je výsledkom nedostatočného spálenia zmesi a napriek tomu, že syngas má vysokú účinnosť spaľovania jeho výsledky boli horšie ako u benzínu alebo zemného plynu pri rovnakom ekvivalentnom pomere ako je vidieť v *Grafe 10*.



Grafy 10 a 11 Emisie CO a NO_x pri ekvivalentných pomeroch paliva a vzduchu. [23]

Tým, že zloženie tohto paliva je prevažne z vodíku a oxidu uhoľnatého dochádza k tomu, že každé nespálené palivo sa ukáže na výfuku o tejto kompozície. Prítomnosť oxidu dusíku je pri rovnakých ekvivalentných pomeroch menšia v porovnaní s etanolom alebo benzínom hlavne kvôli stabilnému procesu spaľovania. Jedným z dôvodov vzniku NO_x emisií je zvýšené zloženie vodíka a tiež vyššie hodnoty teploty plameňa. H_2 je vysoko reaktívne a ovplyvniť tvorbu emisií oxidov dusíku je možné pridaním väčšieho množstva inertných plynov. Pri rovnakých výkonoch motora je možné pozorovať pokles CO emisií až o 30-90% v porovnaní s benzínom a to isté platí aj pre NO_x emisií, čo je možné pozorovať v *Grafe 11*, kde dôjde k poklesu od 50-80% pri použití syngasu. Trendy emisií je zložité zovšeobecniť pretože získane hodnoty sa líšia podľa operačných podmienok a tiež účinnosti spaľovacieho procesu. [23],[24]

3.2 METANOL

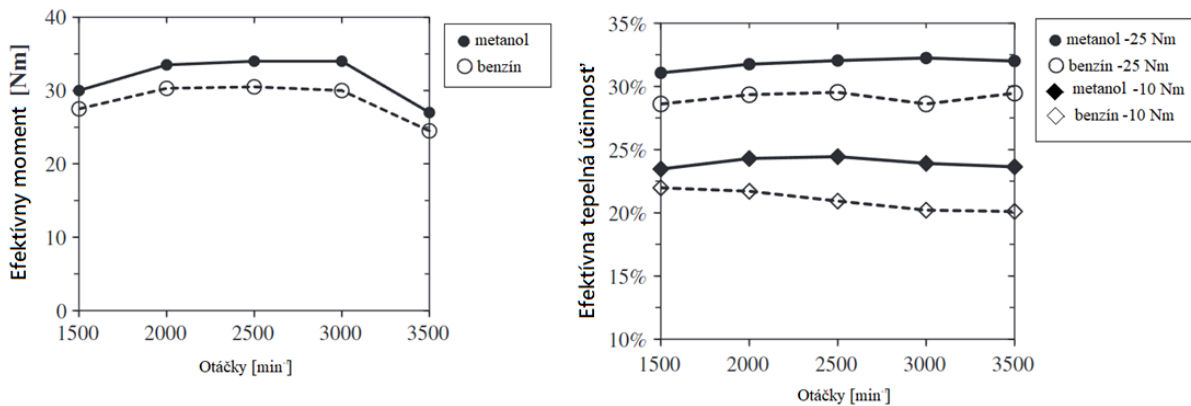
3.2.1 ZLOŽENIE

Metanol je ľahká, nestálá, bezfarebná, horľavá a jedovatá kvapalina so slabým zápachom. Užitie metanolu môže spôsobiť u človeka slepotu, ale aj smrť. Je produkován prevažne z fosilných zdrojov energie ako zemný plyn pomocou parného reformingu, a u uhlia gasifikáciou, takže jeho výroba nezabezpečí príspevok k redukcii CO_2 emisií. Produkcia primárne pozostáva z katalytickej syntézy plynu zloženého hlavne z CO a H_2 . Vytvorenie tohto plynu je možné aj bez využitia fosilných zdrojov napríklad gasifikáciou biomasy alebo procesom vysvetleným v prvej kapitole. Výsledným produktom gasifikácií alebo reformingu je syngas. Pred začatím procesu výroby je nutné očistiť syngas od zvyšných zložiek tak aby zostal len potrebný oxid uhoľnatý a vodík. Následne plyn je stlačený a poslaný do reaktora skrz výmenník tepla, kde je zohriaty. V reaktore dochádza k reakcii v prítomnosti katalyzátora, najčastejšie zinku alebo medi, odkiaľ horúca zmes putuje do kondenzátora, kde metanol kondenzuje a nevyužitý syngas sa vracia späť do procesu. Jedná sa o exotermickú reakciu, ktorá primárne závisí na tlaku a teplote. Metanol má rovnaký obsah alkoholu ako etanol, ale jeho korozívne účinky sú horšie pri kontakte so zliatinami železa. Problémom je aj veľmi jednoduché a rýchle zmiešanie s vodou. Plameň vzniknutý horením metanolu je takmer bezfarebný. Metanol horí na vzduchu a pritom produkuje oxid uhličitý a vodu.

3.2.2 SPRÁVANIE V ZÁŽIHOVOM MOTORE

Metanol pri využití v zážihovom motore má niekoľko výhod, ktoré sa pretavujú v celkový výkon motora. Pri odparovaní vstreknutého paliva vzniká vysoké teplo, čo pri spaľovaní blízkych stechiometrických zmesí vedie k značnému ochladzovaniu zmesi. Ďalej má zvýšenú odolnosť proti klepaniu motora, čo je viditeľné z vyššieho oktánového čísla ako u benzínu. Túto vlastnosť primárne zaručuje vyššie spomenutý chladiaci efekt, ktorý umožní využiť metanol pri motoroch s vyšším kompresným pomerom a taktiež posúvať zápal bližšie k HÚ. So zvyšujúcou sa úrovňou chladenia dochádza k nárastu objemovej účinnosti. To v kombinácii s odolnosťou proti detonačnému horeniu spôsobí vyšší maximálny výkon ako u benzínu (približne 10%). V *Grafe 12* je vidieť vyšší efektívny moment ako u benzínu. Rýchlosť spaľovania metanolu je vyššia takmer dvojnásobne, čo umožňuje presunúť zápal. Celková dodaná energia palivom je u metanolu nižšia ako u benzínu, ale aj napriek tomu je možné pozorovať lepšiu objemovú účinnosť pri metanole práve vďaka chladiacemu efektu.

Takisto sú aj zredukované straty pri prúde oproti benzínu z dôvodu slabšieho prúdu vzduchu. Metanol z hľadiska tepelnej účinnosti dosahuje vyšších hodnôt ako je možné vidieť v *Grafe 13*. Straty pri chladení vo vnútri valca sú tiež nižšie. Chladiaci efekt zníži teplotu nespálených zmesí a vďaka vysokej tepelnej kapacite spáleného metanolu nastane pokles teplôt plameňa a tým pádom aj výfukových plynov. Pri takmer dvojnásobne nižšej hodnote výhrevnosti je nutné dodávať väčšie množstvo paliva, čo sa pretaví do vyššej mernej efektívnej spotreby.



Grafy 12 a 13 Závislosť efektívneho momentu a efektívnej tepelnej účinnosti na otáčkách. [25]

3.2.3 EMISIE

Metanol umožňuje používať aj chudobnejšie zmesi, čo sa pozitívne odrazí na výraznom poklese NO_x emisií. Najväčšiu zásluhu má na tom chladiaci efekt, ktorý zníži celkovú teplotu spaľovania. Kyslíkatá podstata metanolu pomáha pri zlepšení celkového spaľovania, čo mierne zníži CO hodnoty, ale nie signifikantne oproti benzínu. U CO_2 emisií je možné pozorovať takmer 10% pokles hodnôt pri využití metanolu. Zodpovedný je za to fakt, že pri spaľovaní je efektívna tepelná účinnosť vyššia. U emisií uhlíkovodíkov je značné zníženie keďže metanol v zložení takmer žiadne neobsahuje na rozdiel od benzínu. Na rozdiel od benzínu je možné sledovať nárast tvorby aldehydu, ktorý vzniká z nespálenej zmesi usadenej na stenách valcov. Pri využití chudobnejších zmesí dochádza taktiež k nárastu jeho vzniku. [3],[12],[25]

3.3 SYNTECKÝ BENZÍN VYROBENÝ Z METANOLU

3.3.1 ZLOŽENIE

V literatúre tiež nazývaný MtG, podľa pomenovania výrobného procesu, je syntetické palivo, ktorého vlastnosti po výrobe sa približujú bežne používanému benzínu v automobilovej doprave. V posledných rokoch sa priekopníkom tohto typu syntetických palív stalo Porsche, ktoré na trh prišlo zo svojou verziou MtG zvanou POSYN, ktorá sa vyrába úplne z obnoviteľných zdrojov. Jedinou odlišnosťou je, že POSYN ako palivo takmer neobsahuje aromatické látky, čo vyústí do signifikantne nižšieho bodu varu ako u MtG alebo benzínu. Podobne ako benzín tankovaný na čerpacích staniách aj MtG je možné miešať z 10% etanolu.

Tab. 6 Porovnanie zložení syntetických benzínov proti benzínu. [26]

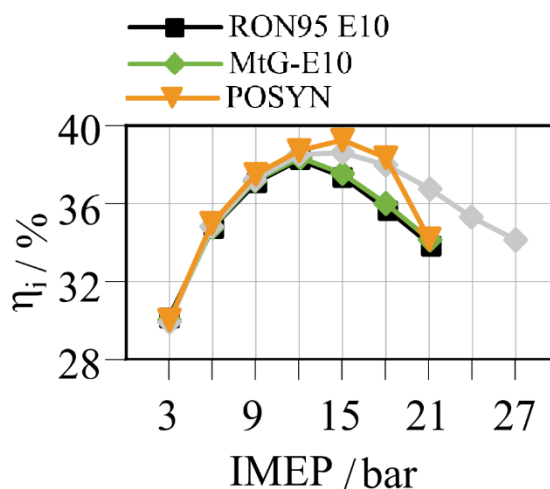
	Benzín RON 95 - E10	MtG - E10	POSYN
Obsah uhlíka	82,8%	82,9%	82,2%
Obsah vodíka	13,7%	13,5%	15,2%
Obsah kyslíka	3,5%	3,6%	2,7%
Obsah aromatických látok	26,3%	30,0%	<0,3%

3.3.2 VÝROBA

Proces výroby bol objavený vedcami z ExxonMobil v 70. rokoch 20 storočia a dostal názov Methanol to Gasoline. Tento proces selektívne premieňa metanol na uhľovodíky v rozsahoch benzínu skrz katalytické pôsobenie zeolitu. Mechanizmus na ktorom je priebeh reakcie založený pozostáva z prvotnej dehydratácie metanolu do rovnovážneho stavu zmesi pozostávajúcej z metanolu, vody a dimetyléru. Metanol spolu s DME sú následne dehydratované pomocou iného katalyzátora ako v predošlej reakcii. Dehydratáciou vznikajú ľahké olefíny a voda. Za podmienok, ktoré sa vyskytujú v MTG reaktore sú olefíny pomocou oligomerizácie premenené na vyššie olefíny, ktoré sa kombinujú medzi sebou skrz viacero reakcií na parafíny, naftény a metylové aromatické látky. Tým vzniká palivo o zložení a bodom varu podobnom benzínu. Veľký problém predstavuje udržiavanie stálej hodnoty teploty procesu, pretože sa jedná o exotermickú chemickú reakciu pri ktorej dochádza k uvoľňovaniu energie vo forme tepla.

3.3.3 SPRÁVANIE V ZÁŽIHOVOM MOTORE

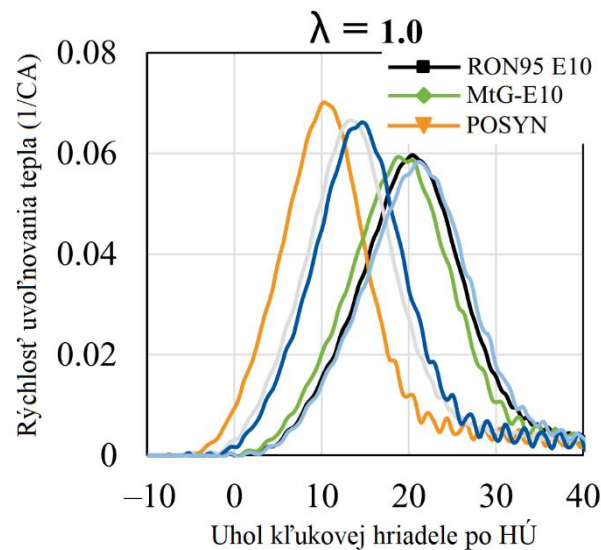
Skúmaním a porovnávaním týchto palív pri stálej rýchlosti a stechiometrických podmienkach bolo zistené, že pri zmene stredného efektívneho tlaku nedochádza k výraznejšiemu rozdielu spaľovacích charakteristík medzi MtG a benzínom. Môže za to primárne fakt, že pri porovnaní ich vlastností je evidentná ich podobnosť. Pri indikovanej účinnosti je možné pozorovať rovnaký jav, kedy sa obe paliva pohybujú pri rôznom zaťažovaní na rovnakých číslach a dosahujú maximálnu hodnotu 38%.



Graf 14 Závislosť indikovanej účinnosti na IMEP. [26]

POSYN pri využití ako palivo dosahuje mierne vyššie maximálne hodnoty účinnosti (39%), to je hlavne spôsobené jeho oktanovým číslom, ktoré je vyššie ako u benzínu alebo MtG. Tieto rozdiely je vidieť v *Grafe 14*. U fázovania spaľovania je možné udržať uhol kľukovej hriadele na úrovni 8° za hornou úvraťou v menšom rozsahu zaťaženia u MtG a benzínu ako u POSYN. Napriek tomu sa hodnoty u maximálneho zaťaženia pri použití POSYN nelíšia od hodnôt benzínu. Oktanové číslo je väčšie u POSYN, ale jeho celková oktanová senzitivita je v porovnaní MtG alebo benzínom nižšia. Senzitivita zohráva veľkú úlohu pri antidetonačných vlastnostiach jednotlivých palív. V tomto prípade u syntetického paliva od Porsche spôsobí, že fázovanie spaľovania bude oneskorené práve kvôli klepaniu motora spôsobeného u vyšších zaťažení. Z hľadiska doby spaľovania a oneskorenia horenia je možné pozorovať takmer rovnaké výsledky u všetkých zmienených palív.

Pri sledovaní správania motora pri konštantnej rýchlosti a konštantnom strednom efektívnom tlaku je stále evidentné, že POSYN dosahuje vyššie hodnoty indikovanej účinnosti ako MtG alebo benzín. POSYN takisto dosahuje vyššie maximálne hodnoty tlaku vo valci a takisto kratšie doby spaľovania a oneskorenia horenia pri stechiometrických podmienkach, čo je možné pozorovať v *Grafe 15*. Pri zvyšovaní chudobnosti zmesi dochádza k oneskoreniu fázovania spaľovania kvôli limitácii klepania. Z hľadiska uvoľnenia tepla dochádza k poklesu pri zvyšovaní λ u všetkých palív. Pri stechiometrickom pomere vychádza POSYN najlepšie, pretože dochádza ku spaľovaniu skôr a tým pádom je aj väčšie množstvo uvoľneného tepla.



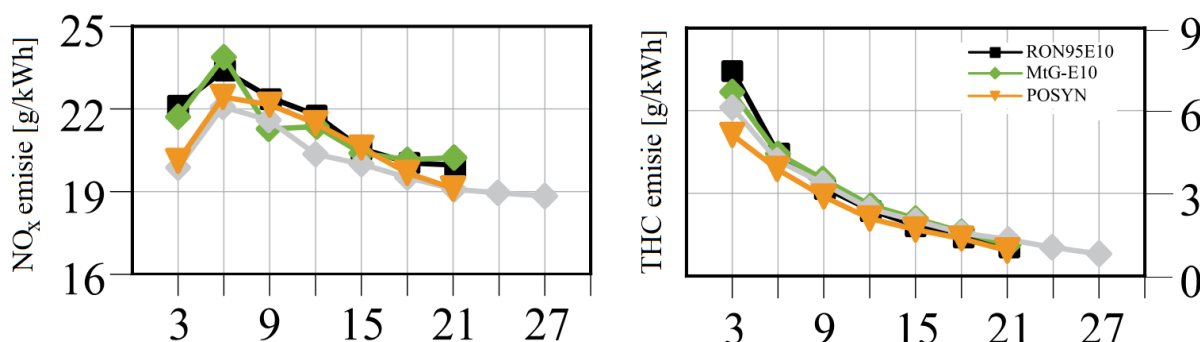
Graf 15 Rýchlosť uvoľňovania tepla. [26]

MtG a benzín sa správajú takmer totožne. Indikovaná účinnosť spaľovania mierne rastie pri využívaní chudobnejšej zmesi za čo je primárne zodpovedný pomer špecifických tepiel. Straty tepla zostávajú pri zmene pomeru vzduchu a paliva takmer rovnaké pretože nedochádza k výraznej zmene uhlu fázovania. Takisto dochádza k nárastu trvania spaľovania. Zvýšený podiel inertných plynov počas spaľovania chudobnej zmesi vyústi do nižších teplôt na výfuku a nižších tepelných strát. Na druhú stranu lineárne zníženie výfukových teplôt bude spôsobovať hasenie plameňa, čo zredukuje post-oxidáciu, ktorá vedie k nárastu strát kvôli nespálenému palivu.

3.3.4 EMISIE

POSYN z hľadiska THC emisii je mierne výhodnejším palivom oproti MtG alebo benzínu, vďaka jeho nižšej hodnote bodu varu za čo je zodpovedný nízky obsah aromatických látok. To je badateľné z *Grafu 16*. Tento fakt následne ovplyvní a zlepši formovanie zmesi a jej homogenizáciu. Lepšiu tvorbu emisii je možné pozorovať hlavne pri nižšom zaťažení motora, kde dochádza k rovnakému fázovaniu spaľovania. Pri vyššom zaťažení dochádza u MtG a benzínu k oneskoreniu fázovania, čo vyústi do poklesu THC emisii. Je to primárne spôsobené zlepšením post-oxidácie vo výfukovom systéme ako následok zvýšenej teploty výfukových plynov. Celková hodnota u POSYN nie je tak rozličná od súčasne používaného benzínu.

Pri stechiometrických podmienkach dochádza u POSYN k mierne nižším emisiám oxidov dusíku a to i napriek tomu, že neobsahuje okysličené látky, ktoré pôsobia ako posilňovač pre teplo vzniknuté vyparovaním. Takisto sú NO_x emisie závislé na zvyšovaní aromatického obsahu, ktorý je u syntetického paliva od Porsche násobne nižší. Z nárastom chudobnosti zmesi dochádza k oneskoreniu fázovania spaľovania, čo predlží dobu spaľovania a tým pádom aj zvýši spaľovaciú teplotu, ktorá negatívne ovplyvní tvorbu NO_x emisii, čo je vidieť v *Grafe 16*. [26],[27]



Grafy 16 a 17 Porovnanie emisií spôsobených syntetickými palivami z metanolu a benzínom. [26]

3.4 DMC A MEFO

3.4.1 ZLOŽENIE

DMC a MeFo sú okysličené palivá, ktoré sú vyrábané z metanolu pomocou karbonylácie. Jedná sa o chemickú reakciu pri ktorej sa do molekuly zlúčeniny pôsobením oxidu uhoľnatého zavádza karbonylová skupina. Dimetylkarbonát skrátene DMC je bezfarebná kvapalina klasifikovaná ako karbonátový ester, ktorý sa v súčasnosti využíva hlavne ako zelené rozpúšťadlo alebo metylačné činidlo. DMC je rozložiteľný v prírode a na rozdiel od metanolu z ktorého je vyrobený netoxický. Metylester kyseliny mravečej skrátene MeFo je tiež bezfarebnou kvapalinou využívanou prevažne ako chladiace činidlo alebo ako prekursor v chemickom priemysle. Spolu s DMC sa nepodieľajú na poškodzovaní ozónovej vrstvy a tiež nevykazujú potenciál pre zhoršenie globálneho otepľovania. Oba palivá vykazujú vysoké charakteristiky antidetonačného správania a majú totožné hodnoty stechiometrického pomeru (4,6) a tiež dolnej výhrevnosti (15,8 MJ/kg). Tieto hodnoty sa približujú k číslam, ktoré vykazuje metanol, ale sú o trochu nižšie.

Z hľadiska oktánového čísla, získaného výskumnou metódou, sa DMC pohybuje na úrovni 109 a MeFo má 115, čo je vyššie ako klasicky používaný benzín v zážihových motoroch.

3.4.2 SPRÁVANIE V ZÁŽIHOVOM MOTORE

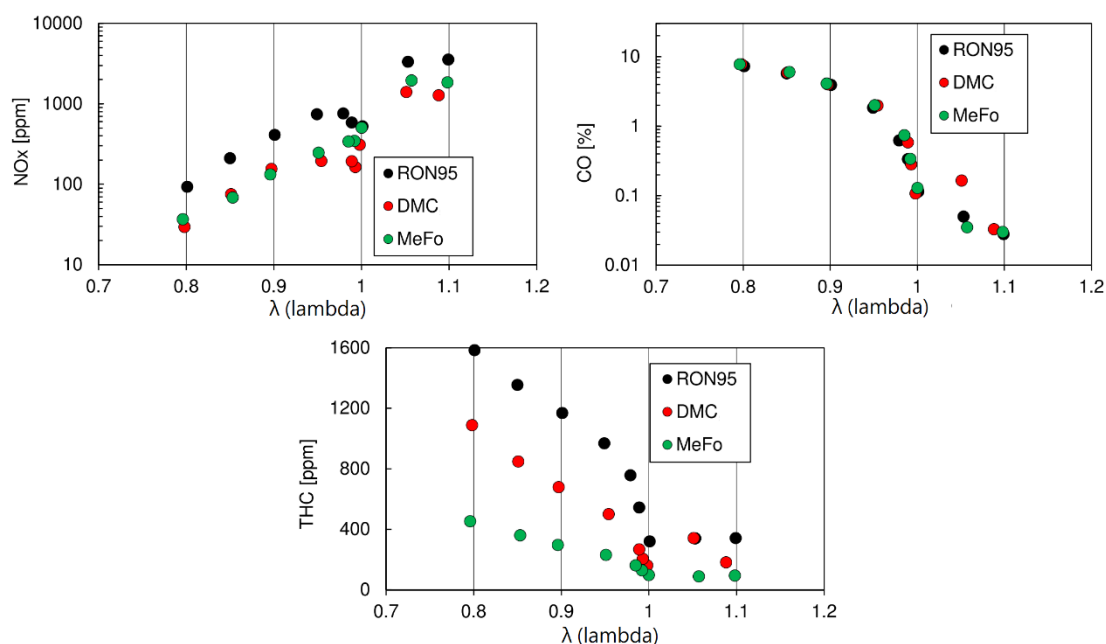
Pri testovaní vyššie zmienených palív pri konštantnom strednom efektívnom tlaku 6 baroch, pod stechiometrickými podmienkami a začatí vstrekovania pri rovnakom uhle kľukovej hriadele boli zistené výsledky, ktoré hovoria, že indikovaný tlak vo valci je u oksyločených palív nižší pri fázach sánia a kompresie ako u bežne používaného benzínu. Vysvetlenie za týmto javom je nižší sací tlak spôsobený viac zatvorenou pozíciou škrtiacej klapky, čo je spôsobené vysokou hodnotou výhrevnosti už vzniknutej zmesi vzduchu a DMC alebo MeFo (3,14 MJ/kg_{vzduchu}), ktorej čísla sa pohybujú vyššie ako u benzínu (3 MJ/kg_{vzduchu}). To spôsobí 13% pokles potrebnej masy vzduchu pre konštantný odvod tepla, čo vedie k vstrekú väčšieho množstva paliva ako je potrebné, čiže stechiometrický pomer vzduchu k palivu nadkompenzuje tento rozdiel v medziach vzduchovej hmoty. Tým pádom je potrebné dodávať viac paliva, čo sa prejaví nárastom spotreby, aby bolo z čoho kompenzovať. Nakoniec zážihový motor bude vďaka tomuto faktoru produkovať o 13% vyšší výkon ak bude bežať na DMC alebo MeFo pretože daná vzduchová hmota bude využitá viac efektívne. Na druhú stranu to vedie ku stratám na škrtiacej klapke pri čiastočnom zaťažení. Kvôli vysokým oktánovým číslam oboch palív sa natíska možnosť zvýšenia kompresného pomeru, čo pomôže vylepšiť výkon motora. Z hľadiska množstva uvoľneného tepla a hmotnostného zlomku spálenej zmesi sa DMC správa pri spaľovaní podobne ako benzín.

V porovnaní medzi sebou DMC a MeFo vykazujú podobné hodnoty laminárnej rýchlosti plameňa. U MeFo je možné pozorovať vyššie hodnoty odvedeného tepla ako u benzínu pri kratšom čase spaľovania a tiež vyššej úrovne premeny paliva. Toto správanie u MeFo je možné pozorovať aj pri zmene ekvivalentného pomeru. Zatiaľ čo pri využití DMC v porovnaní s benzínom dochádza k podobnému správaniu. DMC kopíruje doby spaľovania benzínu do stechiometrických podmienok po ktorých nastáva výraznejší nárast. Jedným z dôvodov pre tento rozdiel medzi MeFo a DMC môže byť jeho bod varu ktorý je u metylesteru 31,5°C, čo je násobne nižšia hodnota ako u DMC, ktoré má 90°C. Čistý dimetylkarbonát neobsahuje žiadne ľahké prchavé látky, takže jeho tvorba zmesi a spaľovanie sú spomalené nízkou teplotou chudobnej zmesi. Odchýlka od stredného efektívneho tlaku je nižšia pri spaľovaní MeFo a benzínu oproti hodnotám dosiahnutých pomocou DMC, čo potvrdzuje, že proces spaľovania je stabilnejší u chudobnejších a mierne bohatších zmesí pre motory poháňané pomocou MeFo. Za tento fakt môže byť taktiež zodpovedná aj homogenizácia.

3.4.3 EMISIE

Z hľadiska tvorby NO_x je využitie oksyločených palív výhodnejšie ako benzínu, čo je vidieť v *Grafe 18*, pretože dochádza k takmer polovičnému poklesu vyprodukovaných emisií. To je možné vysvetliť základným zložením týchto palív, čo spôsobí po spaľovaní väčší vznik oxidu uhličitého a vody ako u uhlíkovodíkového paliva - benzínu. Podobne ako pri recirkulácii výfukových plynov, to vedie k zvýšenej tepelnej kapacite pracovného plynu a k efektu lokálneho zriedenia, čo zredukuje maximálnu lokálnu teplotu a zamedzí tvorbe vyššieho množstva oxidov dusíka.

Ďalším dôvodom je aj takmer dvojnásobné vstriednuté množstvo paliva oproti používaniu benzínu, čo spôsobí nárast entalpie vyparovania a tým dôjde k ochladeniu valca. Ak sa použijú chudobnejšie zmesi nastane nárast NO_x emisií. CO emisie sú následkom nedostatočného spaľovania bohatých zmesí a hodnoty získané použitím okysličených palív sú podobné ako pri benzíne. S prechodom za stechiometrické podmienky smerom k chudobným zmesiam dochádza k ich významnému poklesu ako je badateľné v *Grafe 19*. Celkové emisie uhlíkov namerané na výfuku sú nižšie pre okysličené palivá v porovnaní s benzínom či už pri chudobnej alebo bohatej zmesi. Pri využití DMC dochádza k vzniku mierne vyššieho množstva emisií oproti motoru poháňanom pomocou MeFo. Rovnako je možné pozorovať nárast THC emisií pri navyšovaní bohatosti zmesi ako je to možné vidieť v *Grafe 20*. Počet pevných častíc je u okysličených palív násobne nižší ako u benzínu. [28]



Grafy 18, 19, 20 Závislosť emisií NO_x , CO a THC od ekvivalentného pomeru vzduchu k palivu. [28]

3.5 DMC+

3.5.1 ZLOŽENIE

Jedná sa o zmes viacerých zložiek a to 60% DMC, 35% MeFo a 5% etanolu. Prítomnosť etanolu vylepšuje stabilitu spaľovania v motore. Palivo je charakteristické svojou vysokou odolnosťou proti detonácii, dobrými odparovacími vlastnosťami, odolné voči chladnému počasiu, odolné voči hydrolýze (rozklade pri pôsobení vody), spaľovaním bez vzniku sadzí a nulovým obsahom síry.

3.5.2 SPRÁVANIE V ZÁŽIHOVOM MOTORE

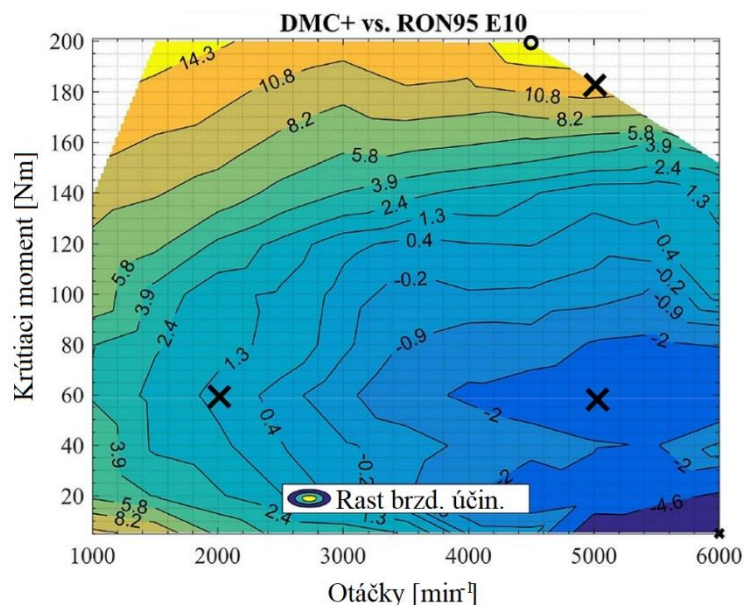
ZHODNOTENIE VLASTNOSTÍ

DMC+ má viac ako dvojnásobne nižšiu dolnú výhrevnosť ako benzín, čo spôsobí nutnosť dodávať väčšie množstvo paliva do systému za účelom dosiahnutia rovnakého výkonu. V praxi to znamená, že bude veľká kvantita paliva dostupná na odparovanie, čo má priamy efekt na vzduch zo sánia, ktorého teplota sa výrazne ochladí.

Na druhej strane je objemová spotreba motoru poháňaného DMC+ nižšia primárne pre jeho hustotu, ktorá je skoro o 40% väčšia v porovnaní s benzínom. Pri vzatí do úvahy oboch faktorov je evidentná nutnosť navýšenia objemu nádrže vozidla približne 1,5- násobne aby došlo k vyrovnaniu dojazdu pri využití benzínu. Na stechiometrickom pomere AF, ktoré je rovnaké ako u DMC alebo MeFo, je vidieť, že pri použití tohto syntetického paliva je spotreba vzduchu nižšia pri rovnakej palivovej energii, čo znamená, že nižšie množstvo vzduchu je potrebné vychladiť. Z porovnania oktánových čísel je očividné, že pri DMC+ je možnosť väčšieho zvyšovania kompresného pomeru ako u benzínu, čo ešte viac dokáže zlepšiť výkon motoru. U laminárnej rýchlosti plameňa sa dá očakávať podobné správanie ako pri DMC alebo MeFo, ktorých hodnoty sú podobné. Prítomnosť etanolu v zmesi spôsobí menšie vylepšenie tejto rýchlosti, ale v porovnaní z benzínom budú hodnoty stále u DMC+ mierne nižšie, čo sa negatívne podpíše pod účinnosť motora. Pri zmene ekvivalentného pomeru smerom k chudobným zmesiam nedochádza k tak strmému poklesu ako pri využití benzínu, čo umožňuje využiť DMC+ ako palivo pre chudobné spaľovanie.

SPALOVANIE

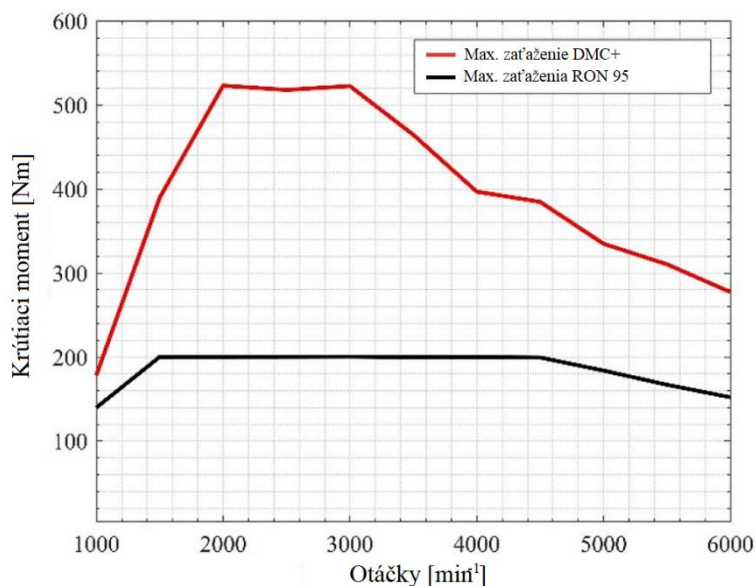
Pri bežnom použití DMC+ budú nutné zmeny pri vstrekovacích systémoch hlavne pri čase vstrekovania, ktorý musí byť dlhší ako u benzínu. Testovaním DMC+ a benzínu pri stechiometrických podmienkach a rovnakom kompresnom pomere bola zistená zvýšená účinnosť pri vyššom zaťažení motoru pri využití DMC+. Zodpovedná je za to väčšia odolnosť proti klepaniu motora, ktorá sa hlavne prejaví za nízkych otáčok a pri nízkom krútiacom momente. Zo zvyšovaním otáčok pri nízkom krútiacom momente nastáva pokles účinnosti motoru oproti benzínu. Pri plnom zaťažení je možné pozorovať výrazne nižšie hodnoty energetického obsahu výfukových plynov ako u benzínu. To sa deje vďaka lepšej kontrole procesu spaľovania, ktorá je spôsobená lepšími antidetonačnými vlastnosťami. Tým, že nedochádza k takmer žiadnemu klepaniu je možné u DMC+ posunúť optimálny fázovací uhol spaľovania bližšie k hornej úvrati, čo sa u benzínu nedá. To navýši tepelnú stratu o malú hodnotu a u energie paliva dôjde k premene jej veľkej časti na mechanickú prácu, ktorá je ekvivalentná k efektívnej účinnosti.



Graf 21 Zavislost' krútiaceho momentu na rýchlosti s porovnaním efektívnej účinnosti DMC+ oproti benzínu. [29]

V porovnaní s benzínom DMC+ dosahoval pri plnom zaťažení takmer 12% navýšenie účinnosti, čo je vidieť v *Grafe 21*. Pri 2000 otáčkach za minútu a krútiacom momente 60 Nm pri DMC+ došlo k podobnému správaniu ako pri využití benzínu. Účinnosť u DMC+ bola približne o 1% vyššia čo bolo spôsobené vyšším prívodom paliva do systému a to vyústilo do chladenia spaľovacej komory pri jeho odparovaní. Pri vyšších otáčkach a podobnom krútiacom momente ako v predchádzajúcom príklade nastávajú straty pri spaľovaní. Za tento jav je zodpovedná nižšia laminárna rýchlosť u DMC+ ako u benzínu, čo zapríčiní dlhšie trvanie spaľovania. Plameň za celú dobu cyklu spaľovania nikdy nedosiahne steny valca. To zapríčiní pokles účinnosti o 2%. So zvyšujúcim zaťažovaním dochádza k poklesu doby spaľovania kvôli bližšie orientovanému fázovaciemu uhlu k hornej úvrati.

Výhodou DMC+ je, že pri rovnakom objeme vzduchu dokáže vytvoriť väčší krútiaci moment ako pri použití benzínu, čo je možné pozorovať v *Grafe 22*. Kvôli vlastnostiam paliva je možné vyprodukovať približne o 11% viac energie z paliva. Zodpovedné je za to zloženie paliva, ktoré obsahuje DMC a MeFo – obe oksyločené palivá, ktoré obsahujú viac kyslíku ako benzín vo svojej štruktúre.



Graf 22 Krivka plného zaťaženia. [29]

To už z hore zmieneným skorším začatím spaľovania spôsobí lepší krútiaci moment. Nižší stechiometrický pomer môže byť problémom hlavne z hľadiska prípravy vstreku a zmiešania zmesi. Nevýhodou je takisto, že u preplňovaného motoru nie je možné maximálne využiť turbodúchadlo kvôli menším hodnotám entalpie na výfuku. Z emisného hľadiska je možné očakávať podobné výsledky ako u DMC a MeFo, čiže DMC+ bude vykazovať priaznivejšie hodnoty ako benzín. Ďalším rozdielom je maximálna rýchlosť plameňa je nižšia u benzínu ako u DMC+, čo sa v emisiách prejaví na menších číslach oxidov dusíka. [29]

3.6 ZHRNUTIE SYNTECKÝCH PALIV PRI POUŽITÍ V ZÁŽIHOVOM MOTORE

Prvým skúmaním syntetickým palivom bol syngas. Z pohľadu na vlastnosti tohto paliva je viditeľné výrazne nižšie číslo dolnej výhrevnosti v porovnaní s benzínom aj oktánové číslo. Väčšia prítomnosť vodíka v zmesi plynov, ktorý má vysokú rýchlosť horenia, ale zachraňuje možnosť spaľovania pri vysokej kompresii. Ak by sa uvažovalo výrazné navýšenie kompresného pomeru bolo by nutné znižovať bohatosť zmesi. Napriek možnosti skrátiť pozdržanie zápalu nebudú získane hodnoty výkonov a momentov produkovaných vďaka syngasu porovnateľné s benzínom pri stechiometrických podmienkach. U mernej efektívnej spotreby paliva nastane približne 3 násobný nárast kvôli nízkej hodnote stechiometrického pomeru.

Napriek nízkej hodnote dolnej výhrevnosti u metanolu je možné pozorovať mierny nárast výkonnostných charakteristík. Zodpovedné je za to latentné teplo, ktoré vzniká pri odparovaní paliva a ochladzuje zmes, čo umožní dodanie väčšieho množstva paliva ako u benzínu. Ďalšou výhodou je oktánové číslo, ktoré je vyššie ako má benzín, čo umožní vyššie kompresné pomery a taktiež posunúť fázovací uhol spaľovania bližšie k HÚ. Slabšie prúdenie vzduchu spôsobí pokles strát pri prúdení. Problémom, ale naďalej zostáva výhrevnosť kvôli ktorej je nutné dodávať väčšie objemy paliva. Dá sa očakávať, že budú menšie ako u syngasu.

Pri bežnom type syntetického benzínu (MtG) sú výkonnostne aj spotrebné charakteristiky takmer presnou kópiou benzínu. U POSYN sa vyskytuje vyššie oktánové číslo, čo umožní mierne zväčšiť kompresný pomer a taktiež posunúť zápal bližšie k HÚ. Nižšia oktánová senzitivita u POSYN ako u benzínu je problémom, ktorý sa prejaví hlavne pri vyšších zaťaženiach klepaním motora. To zapríčini pokles účinnosti spaľovania, ale len na úrovni benzínu. Tým, že sú hodnoty výhrevnosti a aj stechiometrický pomer odlišné oproti benzínu len minimálne je na mieste očakávať rovnakú mernú efektívnu spotrebu paliva.

DMC aj MeFo vykazujú podobné správanie pri použití v zážihovom motore. To bolo možné očakávať primárne kvôli ich totožnej hodnote stechiometrického pomeru a aj dolnej výhrevnosti. U oboch týchto vlastností je možné pozorovať nižšie hodnoty ako u benzínu a aj ako u metanolu. Z čoho je možné usúdiť, že výsledná efektívna spotreba bude vyššia, ale nedosiahne až úrovne syngasu. Na druhej strane tieto palivá prekonávajú metanol ich oktánovým číslom, ktoré je dokonca u MeFo väčšie ako u DMC a je možné posunúť zážih a aj výrazne zvýšiť kompresný pomer. Ďalšou výsadou MeFo sú aj kratšie časy spaľovania. O oboch okysličených palivách platí, že majú vyššiu výhrevnosť zmesi ako benzín. Nastáva, preto pokles potrebného množstva vzduchu na konštantný odvod tepla čím sa začne dodávať viac paliva. To umožní zážihovému motoru poháňanom na týchto palivách ešte vyšší výkon ako u metanolu.

O DMC+ sa dá povedať, že je vylepšenou verziou predchádzajúcich dvoch palív. Ich kombináciou s etanolom dôjde k stabilizovaniu spaľovania. Výkon by sa mal mierne zvýšiť pre vylepšenú účinnosť spôsobenú stabilizáciou. Tá stále, ale nebude dosahovať hodnôt benzínu. Zároveň bude pretrvávajúť vyššia efektívna spotreba paliva. DMC+ využíva výhodu okysličených palív, že dochádza k ochladzovaniu v zmesi. To sa deje kvôli väčšiemu objemu dodávaného paliva. Do istej miery to, ale predstavuje aj problém, pretože zapríčini nízku entalpiu na výfuku, čo zamedzí maximálnemu využitiu turbodúchadla, ktoré je v súčasnosti hlavným spôsobom zvyšovania kompresných pomerov.

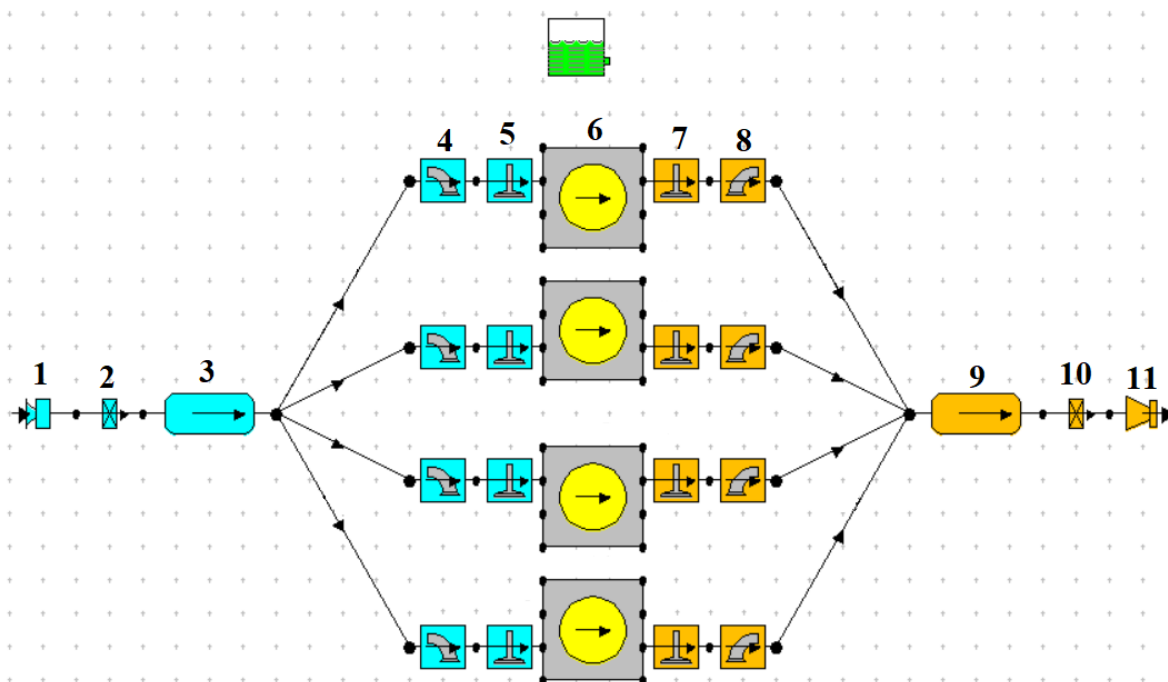
4 TESTOVANIE PALÍV POMOCOU SIMULÁCIE

4.1 LOTUS ENGINE SIMULATION

Na testovanie vyššie rozoberaných palív bol využitý softvér vyvinutý firmou Lotus nazvaný Engine Simulation. Hlavným dôvodom prečo došlo k výberu tohto softvéru je, že bol pre verejnosť dostupný zadarmo na rozdiel od široko používaného GT-Suite. Jedná sa o simulačný program, ktorý je schopný predikovať kompletne fungovanie systému spaľovacieho motora. Je možné ho využiť na kalkuláciu výkonu pod plným alebo miernym zaťažením motora pri ustálenom alebo prechodovom stave, prenose tepla vo vnútri valca, okamžité zmeny vlastností plynov vo vnútri potrubia a taktiež zodpovedajúce podmienky turbodúchadla. Výhodou tohto softvéru je preddefinovanosť parametrov motora od výrobcu programu, čo umožní spustenie simulácie aj bez znalosti všetkých parametroch skúmaného motora.

4.2 MODEL MOTORU

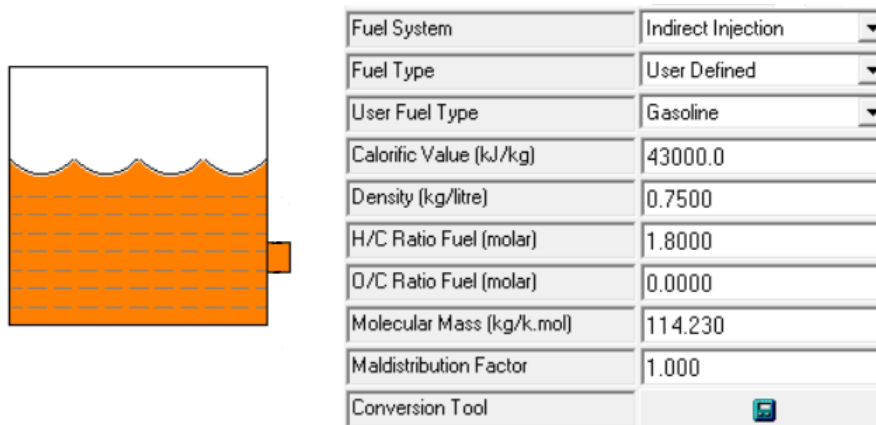
Model motora bol vypracovaný na predlohe štvorvalcového zážihového motora vybaveného nepriamym viacbodovým vstrekovaním o objeme 1l v minulosti komerčne využívaného v automobile Škoda Fabia I vyrobeného medzi rokmi 2000 až 2004. Nejedná sa o jeho presné prevedenie do softvéru, ale došlo k použitiu jeho niekoľkých parametrov a zvyšné boli ponechané na prednastavených hodnotách. Cieľom nebolo vytvoriť rovnako fungujúcu kópiu motora, ale skôr sa zoznámiť s prostredím a spoznať iné možnosti testovania výkonnostných parametrov spaľovacích motorov, ale aj definovania a testovania palív. Výsledný model, ktorý bol vytvorený v Lotus Engine Simulation je na Obr.8. Pôvodným plánom bolo aj na vyššie zmienenom motore testovať syntetické palivo. Od toho sa po diskusii z vedúcim bakalárskej práce upustilo pre nízky kompresný pomer vyššie spomínaného motora, pretože z rešeršnej časti práce vyplynulo, že u väčšiny syntetických palív je vhodný, čo najvyšší pomer. +



Obr.8 Model zážihového štvorvalcového motora.

1. Vstup do sacieho potrubia - jeho úlohou je simulovať tlakové a teplotné podmienky na ústi sánia. Je ponechaný na preddefinovaných hodnotách – 1bar a 20°C.
2. Škrtiaca klapka v sacom potrubí – priemer zmenený na 44 mm a zvyšné hodnoty a nastavenia ponechané.
3. Plénum v sacom potrubí – využíva sa na vyrovnanie tlakov v potrubí, čo zlepšuje rovnomernú distribúciu, ponechané v prednastavených hodnotách.
4. Sacie potrubie – jeho dĺžka a priemer ponechaný na navolených číslach, spôsob chladenia zmenený na vodné. Predlohový motor obsahuje jeden sací ventil na valec s priemerom 34 mm.
5. Nastavenie časovania a zdvihu sacích ventilov – ponechané v prednastavených hodnotách.
6. Valec motora – víťanie 72 mm, zdvih 61,2 mm, kompresný pomer 10, model spaľovania ponechaný na základnom. Zapaľovanie jednotlivých valcov prebieha podľa koncepcie 1-3-4-2.
7. Nastavenie časovania a zdvihu výfukových ventilov – ponechané v prednastavených hodnotách.
8. Výfukové potrubie – jeho dĺžka a priemer ponechaný na navolených číslach, spôsob chladenia zmenený na vodné. Predlohový motor obsahuje jeden výfukový ventil na valec s priemerom 30 mm.
9. Plénum vo výfukovom potrubí – slúži na ustálenie pulzácie výfukových plynov a vyrovnanie hmotnostného toku, hodnoty ponechané na prednastavených.
10. Škrtiaca klapka na výfuku – využité preddefinované hodnoty
11. Výstup z výfukového potrubia – jeho úlohou je simulovať protitlak pri ústi výfuku, ktorý je spôsobovaný stratami prúdenia plynov vo výfukovom potrubí.

4.3 DEFINOVANIE VLASTNÉHO DRUHU PALIVA



Obr. 9 Možnosti nastavenia paliva v Lotus Engine Simulation.

Po zakliknutí ikony paliva dôjde ku zobrazeniu rozhrania nastavenia charakteristík paliva, čo je vidieť na Obr. 9. Mimo programom preddefinovanými palivami (benzín, nafta, metanol, metán) je možné zdefinovať užívateľom aj iné palivo pomocou zmeny vstupných dát. Z palív rozoberaných v predchádzajúcej kapitole budú definované syngas, MtG E10, POSYN, DMC, MeFo a DMC+. Taktiež došlo k prispôsobeniu benzínu aby zodpovedal vlastnosťami bežne používanému RON 95 E10.

V kolónke *Fuel System*, ktorá určuje spôsob vstrekovania paliva bolo vybrané nepriame vstrekovanie na základe informácií o predlohovom motore. V *User Fuel Type* užívateľ vyberá podobnostný typ skúmaného paliva na základe palív preddefinovaných. Pre syngas sa vybral metán, primárne pre ich rovnaké plynné skupenstvo. U DMC, MeFo a DMC+ došlo k výberu metanolu, keďže všetky tieto palivá sú produktom karbonylácie metanolu a zdieľajú podobné vlastnosti. U MtG a POSYN bol zvolený benzín, pretože sú považované za syntetické náhrady benzínu o podobne zložitej chemickej štruktúre. Do kolónky *Calorific Value* bola vložená dolná výhrevnosť v kJ/kg, ktoré sú uvedené v predchádzajúcej kapitole. Ďalšou potrebnou vlastnosťou, ktorú treba doplniť je hustota v kg/l do riadku *Density*. U väčšiny palív bola použitá hodnota získaná z rešeršnej časti práce, ale u syngasu toto nebolo možné. Môže za to primárne naviazanosť hustoty na celkovom zložení týchto syntetických plynov. Výpočet celkovej hustoty pozostával z násobku podielu konkrétneho plynu (CO, H₂, CO₂, CH₄) na syngase a ich hustôt. V kolónke *Molecular Mass* je vložený údaj o molekulárnej hmotnosti jednotlivých palív v kg/kmol. Hodnota bola vypočítaná na základe ich sumárneho vzorca (u DMC aj MeFo – C₃H₆O₃), kedy došlo k pre násobeniu počtu konkrétneho prvku s jeho molekulárnou hmotnosťou. U syngasu nebol použitý sumárny vzorec, ale došlo k pre násobeniu podielu jednotlivých zlúčenín na celkovom zložení s ich molekulárnou hmotnosťou. U MtG a ani POSYN sa nepodarilo nájsť tabuľkovú hodnotu a tiež nebolo možné vypočítať pre ich komplikovanú štruktúru a tak došlo k zjednodušeniu a prevzatiu hodnoty molekulárnej hmotnosti benzínu uvedenú v rámci softvéru. Ďalším dôležitým parametrom je *Maldistribution Factor*, ktorý slúži na redukciu efektívnej výhrevnosti paliva z dôvodu fungovania motora na bohatej zmesi, disociatívnych efektoch a zlému miešaniu zmesi. Faktor o úrovni 0 znamená takmer dokonalé zmiešanie a tým pádom aj vysokú hodnotu efektívnej výhrevnosti, preto bol aplikovaný na plynné syntetické palivo. V prípade využitia faktoru 1 dochádza k prepočtu efektívnej výhrevnosti, čo program bežne využíva u palív ako benzín a metanol. Na tomto základe je preto u zvyšných palív volený tento faktor.

Conversion Tool	
User Fuel Type: Gasoline	
Select/define two values	
<input checked="" type="checkbox"/>	Carbon Mass (%): 85.230
<input checked="" type="checkbox"/>	Hydrogen Mass (%): 12.570
<input type="checkbox"/>	Oxygen Mass (%): 2.200
Results	
H/C Ratio Fuel (Molar): 0.0000	
O/C Ratio Fuel (Molar): 0.0000	

Obr. 10 Nástroj Conversion Tool.

Pri bežných údajoch o palivách je nezvyklé uvádzať ich H/C a C/O pomery, ktoré Lotus Engine Simulation vyžaduje pre správne simulovanie. Preto došlo k využitiu ich nástroja *Conversion Tool*, ktorý umožní prepočítať tieto pomery na základe percentuálnych zložení uhlíka, vodíka a kyslíka jednotlivých palív. Jeho rozhranie je na Obr.10. U MtG, POSYN a DMC+ boli použité zloženia získané v predchádzajúcej kapitole.

U DMC a MeFo použitím znalostí o ich sumárnych vzorcoch došlo k prepočtu podielu jednotlivých prvkov k celkovej molekulárnej hmotnosti čím bolo dosiahnuté percentuálne zloženie palív. Syngasy nemajú sumárny vzorec, takže percentuálne zloženie bolo zistené nasledovne. Jednotlivé zlúčeniny prítomné v týchto syntetických plynach boli rozložené percentuálne (napr. CO je z 43% tvorený uhlíkom a 57% kyslíkom) a následne prenasobené podielom, ktorý tvoria v celkovom zložení (CO u konkrétneho syngasu tvorí 39%), čím sa získala percentuálna hodnota napr. C z CO v syngase.

Tab. 7 a 8 Vkládané informácie o vlastnostiach palív do Lotus Engine Simulation.

Dosadzované vlastnosti	Jednotky	Syngas	MtG	POSYN
User Fuel Type	[-]	Metán	Benzín	Benzín
Dolná Výhrevnosť	[kJ/kg]	16525	41400	42840
Hustota	[kg/l]	0,0008	0,7396	0,7184
Obsah uhlíka	[%]	28,00	82,85	82,18
Obsah vodíka	[%]	42,75	13,52	15,15
Obsah kyslíka	[%]	29,25	3,63	2,67
Molekulárna hmotnosť	[kg/kmol]	17,88	114,23	114,23
Maldistribučný faktor	[-]	0	1	1
Stechiometrický pomer	[-]	4,20	14,02	14,50

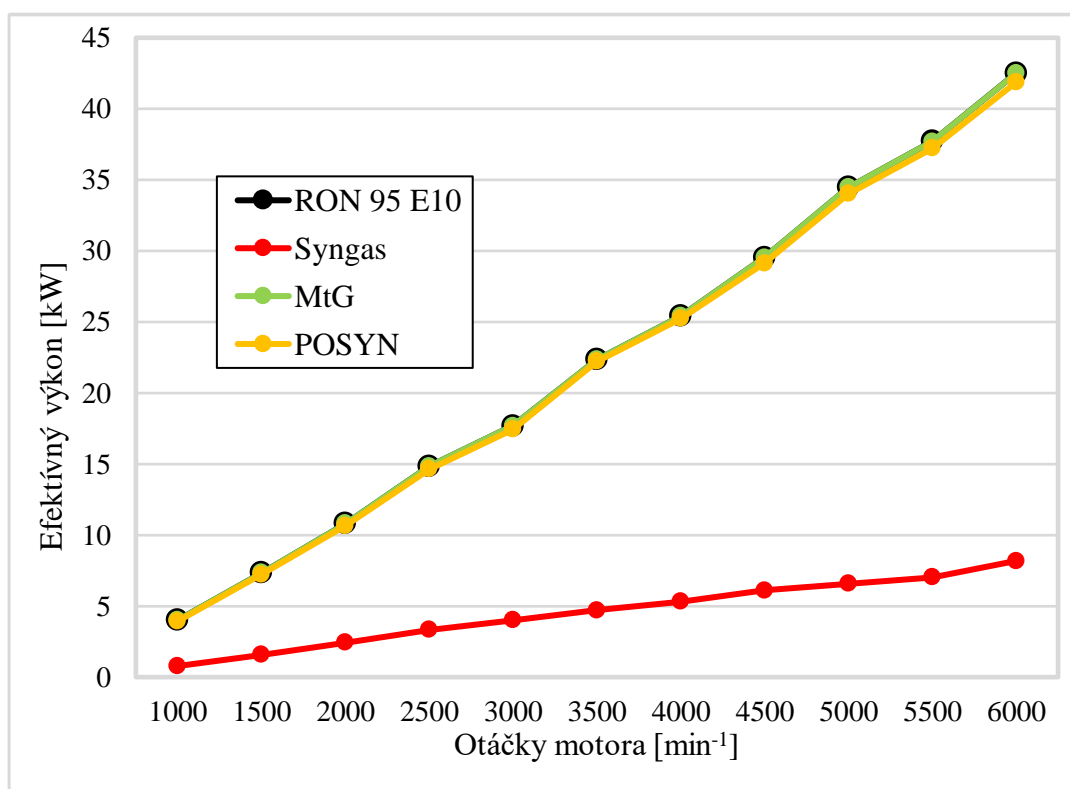
Dosadzované vlastnosti	Jednotky	DMC	MeFo	DMC+
User Fuel Type	[-]	Metanol	Metanol	Metanol
Dolná Výhrevnosť	[kJ/kg]	15800	15800	15800
Hustota	[kg/l]	1,079	0,957	1,041
Obsah uhlíka	[%]	40	40	40
Obsah vodíka	[%]	6,7	6,7	6,7
Obsah kyslíka	[%]	53,3	53,3	53,3
Molekulárna hmotnosť	[kg/kmol]	90,0	60,0	79,5
Maldistribučný faktor	[-]	1	1	1
Stechiometrický pomer	[-]	4,64	4,64	4,64

Simulácie boli prevedené za prednastavených podmienok softvéru pri stochiometrických pomeroch, ktoré boli získane v rámci predchádzajúcej kapitoly. Okrem vlastne definovaných palív boli využité aj preddefinované palivá benzín a metanol, ktoré sa nachádzajú priamo v programe. Výsledky boli posudzované medzi 1000 až 6000 otáčkami za minútu po 500 otáčkach.

4.4 ROZBOR VÝSLEDKOV SIMULÁCIE

Získané výsledky slúžia na ilustráciu správania skúmaných palív a ukazujú približné trendy hodnôtty dosiahnuteľného výkonu alebo mernej efektívnej spotreby paliva z dôvodu niekoľkých nedostatkov modelu. Prvým problémom je samotné zjednodušenie motora, ktoré má veľký vplyv na nasimulované výsledky. Pri skúmaní fungovania palív je veľmi dôležité, že dôjde k úprave fázovacieho uhlu spaľovania podľa potreby konkrétneho paliva. To je viditeľné v predchádzajúcej kapitole, kedy u palivách s vyšším oktánovým číslom došlo k zážihu bližšie pri HÚ, čo spôsobilo navýšenie ich maximálneho výkonu. Tým, že došlo k využitiu programom prednastaveného časovania ventilov tak táto skutočnosť nebola v získaných výsledkoch zahrnutá. Ďalším problémom bolo určovanie maldistribučného faktoru, ktorý bol volený na základe prednastavených palív, čo nemusí byť ideálne. Tento krok sa zvolil pre malé množstvo informácií na tému faktoru a týchto konkrétnych palív.

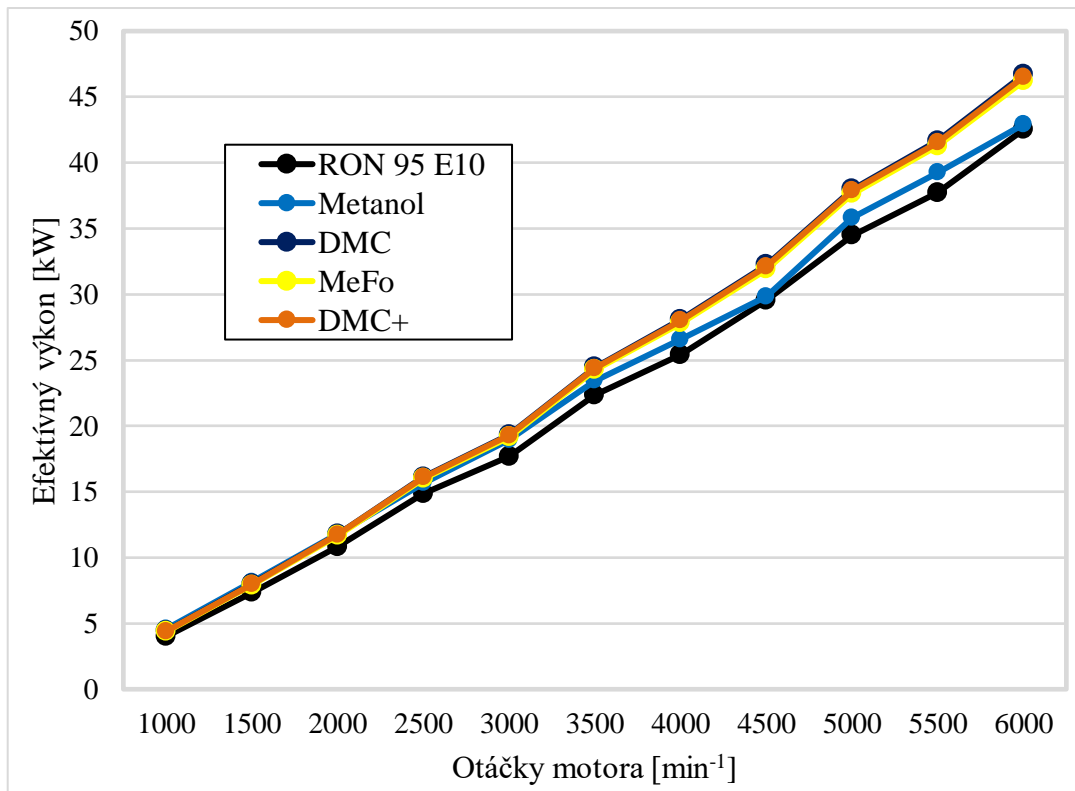
4.4.1 EFEKTÍVNY VÝKON



Graf 23 Závislosť efektívneho výkonu na otáčkách pre syngas a syntetické benzíny.

Graf 23 potvrdzuje získané informácie v predchádzajúcej kapitole, že plynné syntetické palivá vytvárajú násobne nižší výkon ako benzín. U syngasu sa jednoznačne prejavil nedostatok modelu a to vo forme fázovacieho uhlu spaľovania. Tým, že obsah vodíka je u syngasu vyšší by bolo možné posunúť bližšie k hornej úvrati a to by sa prejavilo na miernom zlepšení. Z grafu je ale na prvý pohľad evidentný veľký rozdiel medzi výkonmi syntetického plynu a benzínu, čím je možné konštatovať jeho nevýhodnosť z hľadiska výkonových parametrov. U MtG je možné sledovať takmer identické hodnoty výkonov ako u bežne využívaného benzínu, čo potvrdzujú nazbierané informácie v predchádzajúcej kapitole.

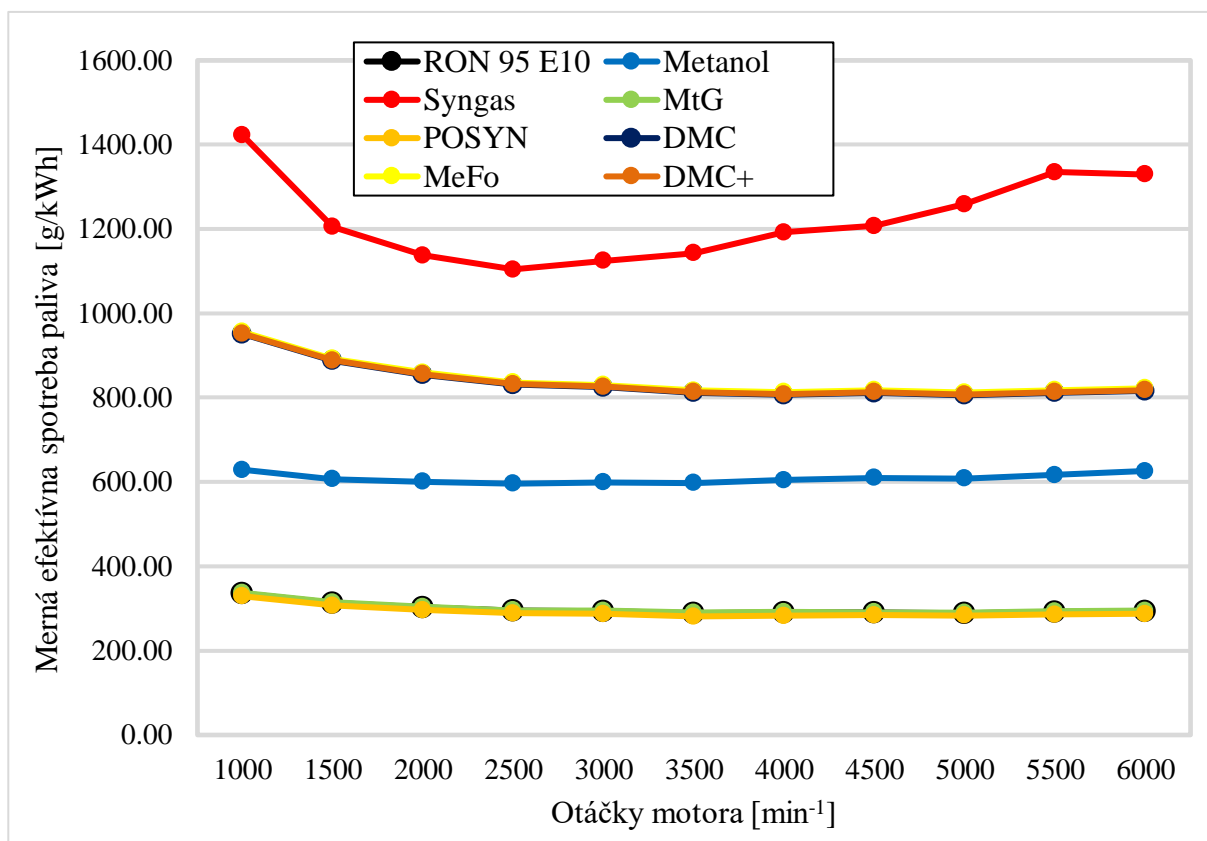
Pri definovaní oboch syntetických benzínov sa nepodarilo vyhľadať ich molekulárnu hmotnosť, preto bol využitý údaj zo softvéru pre benzín. To mohlo do istej miery ovplyvniť simulácie. Z výsledkov pre POSYN je vidieť mierne nižšie výkony ako u benzínu alebo MtG. POSYN má vyššie oktánové číslo, takže pri posunutí fázovacieho uhla spaľovania bližšie k HÚ by došlo k nárastu výkonu a prekonaniu benzínu, čo potvrdí predpoklady. Pri všetkých palivách, ktoré je možné vidieť v *Grafe 22* mohlo dôjsť k nepresnému určeniu maldistribučného faktora, čo bolo rozoberané vyššie.



Graf 24 Závislosť efektívneho výkonu na otáčkách pre metanol a okysličené palivá.

Simulácia metanolu bola prevedená použitím prednastaveného paliva softvérom čím sa eliminovala chyba pri definovaní. Z grafu sú viditeľné vyššie hodnoty výkonov oproti benzínu, čo koreluje so získanými informáciami a aj so znalosťami o alkoholových palivách. Podobne ako u syngasu platí, že výkon by narástol presunutím zápalu. U okysličených palív je už teraz možné sledovať vyšší výkon bez posunutého zápalu bližšie k HÚ. V rešeršnej časti bolo zistené, že napriek podobným vlastnostiam DMC a MeFo má metylester kyseliny mravčej kratšiu dobu spaľovania s ktorou sa v rámci simulácie nepracovalo. Pri definovaní DMC+ boli získané informácie len o palive bez prítomnosti 5% etanolu, ktorý pomáha stabilizovať spaľovanie a tým zlepšuje aj výkon. DMC+ sa výkonovo nachádza medzi DMC a MeFo a tým, že má vyššie oktánové číslo ako DMC by došlo pri posune zápalu k vyšším hodnotám výkonu. Výber podobnostného typu paliva ako metanolu, mohlo tiež ovplyvniť výsledky, keďže sa nejedná o alkoholové palivá, ale o okysličené. Podobne ako u palív zobrazených v *Grafe 23* a aj hodnoty získané simuláciou v *Grafe 24* mohol negatívne ovplyvniť maldistribučný faktor, ktorého presnú hodnotu sa nepodarilo vyhľadať.

4.4.2 MERNÁ EFEKTÍVNA SPOTREBA PALIVA



Graf 25 Závislosť mernej efektívnej spotreby paliva na otáčkách pre skúmane palivá.

Výsledky mernej efektívnej spotreby paliva v *Grafe 25* nevykazujú nič prekvapivé. Pri vypracovávaní predchádzajúcich kapitol vyplynulo, že spotreba závisí prevažne na hodnotách dolnej výhrevnosti a stechiometrického pomeru a do istej miery aj hustoty. Pri bližšom preskúmaní *Tab.8* je viditeľné prečo došlo k získaniu týchto výsledkov. Benzín spolu so syntetickými benzínmi mali najvyššiu hodnotu dolnej výhrevnosti vďaka čomu dosiahli najlepšie hodnoty. U všetkých benzínov sa hodnoty líšili minimálne. U POSYN je mierne vyššia hodnota dolnej výhrevnosti, čo sa prejavilo v takmer nebadateľnom poklese mernej spotreby. Metanol má oproti benzínu nižšiu hodnotu výhrevnosti, stechiometrický pomer a podobnú hustotu, čo sa prejavilo v náraste spotreby. U oksyložených palív je hodnota hustoty väčšia ako u benzínu, ale dolná výhrevnosť je ešte nižšia ako u metanolu a to sa ukáže ešte vyššími číslami mernej efektívnej spotreby paliva. Najhorším palivom z hľadiska spotreby boli syngas, ktorý sa výhrevnosťou približoval oksyloženým palivám. Faktom, ale je, že sa jedná o plyn ktorý má niekoľko násobne nižšiu hustotu. Všetky tieto palivá mali aj nižší stechiometrický pomer ako benzín. Ak sa vezmú do úvahy nedostatky spojené z jednoduchosťou modelu alebo nepresným definovaním palív, ktoré boli opísané vyššie tak ich prítomnosť v simulácii by neovplyvnila výsledky tak významne, pretože rozdiel medzi jednotlivými palivami je značný.

ZÁVER

V rámci bakalárskej práce som sa zaoberal syntetickými palivami, ich vlastnosťami a vplyvom na spaľovací proces. Zo získaných informácií vyplynulo, že palivo, ktoré má byť vhodnou alternatívou k benzínu musí spĺňať určité parametre. Je dôležité aby malo vysoké oktánové číslo, čím sa umožní využitie pri vysokej kompresii a posun fázovacieho uhla spaľovania. To spôsobí zlepšenie maximálne dosiahnuteľných efektívnych výkonov bez výskytu abnormalít vo forme predčasných zážihov alebo klepania motora. Pre zabezpečenie pohodlia vodiča je očakávaná vyššia hodnota dolnej výhrevnosti aby nemuselo dôjsť k zásahom do palivovej nádrže a k jej zväčšeniu z dôvodu vysokej mernej efektívnej spotreby paliva. Ďalšie vlastnosti, ktoré ovplyvňujú správanie paliva sú hustota, odpariteľnosť a aj stechiometrický pomer. Priaznivá hodnota odpariteľnosti umožní využitie syntetických palív aj počas zimných mesiacov. Keďže moderné motory pracujú prevažne na stechiometrických zmesiach z dôvodu využitia katalytického konvertoru je nutné aby došlo k dosiahnutiu týchto výsledkov pri fungovaní motora na palive pri stechiometrickom pomere.

V práci boli skúmané tieto syntetické palivá: syngas, metanol, syntetický benzín vyrobený z metanolu, syntetický benzín od Porsche, DMC, MeFo a DMC+. Syntetické plynné palivo dopadlo či už výkonovo alebo aj spotrebovo najhoršie. Napriek tomu, že mohlo dôjsť k posunutiu zážihu tak ani tento fakt nevylepšil výkon na toľko aby dokázal konkurovať benzínu. Metanol vďaka chladeniu zmesi síce generoval o niekoľko percent vyšší výkon, ale za cenu vyššej spotreby. Ďalším problémom sú jeho silné korozívne účinky, ktoré by vážne poškodzovali súčasti motora. MtG svojimi vlastnosťami a zložením kopíruje bežne používaný benzín z čoho je zrejmé, že dosiahnuté výsledky budú zhodné. POSYN vďaka nižšej hodnote aromatických látok má mierne rozdielne vlastnosti. Vyššie oktánové číslo ako u MtG umožní posun fázovacieho uhla spaľovania čím bude vznikáť väčší výkon ako u benzínu, ale len do vyšších zaťažení kedy nastane klepanie motora a jeho pokles na úroveň benzínu. DMC a MeFo majú podobné vlastnosti mimo väčšej hustoty u DMC. Preto je využitie ich kombinácie u DMC+ na mieste. Keďže pri spaľovaní okysličených palív je výhrevnosť zmesi ako takej vyššia ako u benzínu bude dochádzať k nadkompenzácii paliva a vzniku vyššieho výkonu. Tým, že majú DMC a MeFo nižšiu hodnotu dolnej výhrevnosti a stechiometrického pomeru v porovnaní s benzínom alebo aj metanolom bude dosahovaná spotreba paliva vysoká. Z emisného hľadiska je možné pozorovať pokles oproti benzínu takmer u všetkých palív mimo syntetických benzínov. U metanolu a okysličených palív sú výrazne menšie hodnoty NO_x emisii oproti benzínu. To neplatí o CO a CO₂ emisiách, ktoré sú na podobnej úrovni. Výber jedného paliva je pre začínajúce testovania nereálny. Z práce, ale vyplynulo, že väčšiu pozornosť sa oplatí upriamiť na syntetické benzíny a DMC+.

Mimo testovania automobilových palív na reálnom motore sa natíska možnosť využitia simulačných softvérov. Účelom nebolo vytvoriť presnú kópiu reálneho motora, ale skôr ukázať iný prístup testovania a vysvetliť, čo je potrebné na definovanie konkrétneho paliva v softvéri Lotus Engine Simulation. Aj pri značnej jednoduchosti vytvoreného modelu približne korešpondovali získane výsledky s informáciami získanými v rešeršnej časti. Okrem nedostatkov modelu vznikli ďalšie z dôvodu chýbajúcich informácií o určitých vlastnostiach palív. Simulácia nikdy nebude schopná nahradiť reálne preskúšanie daného paliva v zážihovom motore, ale dokáže poslúžiť ako odrazový nástroj pre výber toho najviac perspektívneho paliva.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] PAVELEK, Milan. Termomechanika. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4300-6
- [2] HEYWOOD, John B. Internal combustion engine fundamentals. Second edition. New York: McGraw-Hill Education, c2018. ISBN 978-1-26-011610-6. STONE, R. Introduction to Internal Combustion Engines. Fourth Edition. Basingstoke: Palgrave Macmillan, 2012. 516 s. ISBN 978-1-137-02829-5.
- [3] FERGUSON, Colin R. a Allan T. KIRKPATRICK. Internal combustion engines : applied thermosciences. Third edition. West Sussex: Wiley, c2016. ISBN 978-1-118-53331-4.
- [4] What are Air/Fuel ratio and Lambda?. OLDSKULLTUNING [online]. 2022 [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://oldskulltuning.com/special-functions-lambda-removal/>
- [5] ROSA, Rui. The Role of Synthetic Fuels for a Carbon Neutral Economy. *C* [online]. 2017, 3(4), 1-43 [cit. 2023-04-14]. ISSN 2311-5629. Dostupné z: doi:10.3390/c3020011
- [6] TAYLOR, Charles Fayette. The Internal-Combustion Engine in Theory and Practice: Volume II-Combustion, Fuels, Materials, Design. Second edition. Massachusetts: THE M.I.T. PRESS, c1985. ISBN 13 978-0-262-20052-3.
- [7] HEISLER, Heinz. Advanced Engine Technology. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. ISBN 1-56091-734-2.
- [8] VLK, František. Paliva a maziva motorových vozidel. Brno: František Vlk, 2006. ISBN 80-239-6461-5.
- [9] MATĚJOVSKÝ, Vladimír. *Automobilová paliva*. Praha: Grada, 2005. ISBN 80-247-0350-5.
- [10] Ceny benzínu a nafty v Evropě. *MBenzin.cz* [online]. 2023 [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: <https://www.mbenzin.cz/Ceny-benzinu-a-nafty-v-evrope>
- [11] Future Fuel: Porsche Sponsors Major eFuel Initiative—at \$45 a Gallon. *MotorTrend* [online]. 2022 [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: <https://www.motortrend.com/features/porsche-supercup-efuel-direct-air-carbon-capture/>
- [12] DIETSCHKE, Karl-Heinz, Konrad REIF et al. Automotive Handbook. Eleventh edition. West Sussex: Wiley, 2022. ISBN 978-1-119-91190-6.
- [13] Calorific Value of the IC Engine Fuels. *BrightHub Engineering* [online]. Bright Hub PM, 2017 [cit. 2023-01-19]. Dostupné z: <https://www.brighthubengineering.com/machine-design/14454-calorific-value-of-the-ic-engine-fuels/>

- [14] MUELLER, Charles J. a William J. CANNELLA et al. Fuels for Engines and the Impact of Fuel Composition on Engine Performance. *Encyclopedia of Automotive Engineering* [online]. 2014, **2014**(1-27), 25 [cit. 2023-01-19]. Dostupné z: doi:10.1002/9781118354179.auto125
- [15] HANCSÓK, Jenő. Gasoline Fuels for Spark-Ignition Internal Combustion Engines. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology* [online]. 2016, 1-60 [cit. 2023-01-19]. Dostupné z: doi:10.1002/0471238961.0701191508150308.a01.pub3
- [16] ILHAK, Mehmet Ilhan, Selim TANGOZ, Selahaddin Orhan AKANSU et al. Alternative Fuels for Internal Combustion Engines. In: *The Future of Internal Combustion Engines*. Londýn: IntechOpen, 2019. ISBN 978-1-83881-931-6.
- [17] BAE, Choongsik a Jaeheun KIM. Alternative fuels for internal combustion engines. *Proceedings of the Combustion Institute* [online]. 2017, **36**(3), 3389-3413 [cit. 2022-10-06]. Dostupné z: doi:10.1016/j.proci.2016.09.009
- [18] NAKATA, Koichi, Shintaro UTSUMI et al. The Effect of Ethanol Fuel on a Spark Ignition Engine. *SAE Technical Paper* [online]. 2006, **2006**(01-3880), 1-5 [cit. 2023-01-22]. Dostupné z: doi:10.4271/2006-01-3380
- [19] SULAIMAN, M. Y., M. Ra AYOB a I. MERAN. Performance of Single Cylinder Spark Ignition Engine Fueled by LPG. *Procedia Engineering* [online]. 2012, **2013**(53), 579-585 [cit. 2023-01-21]. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2013.02.074
- [20] TAHIR, Musthafah Mohd., M.S. ALI, M.A. SALIM a et al. Performance analysis of a spark ignition engine using compressed natural gas (CNG) as fuel. *Energy Procedia* [online]. 2015, **2015**(68), 355-362 [cit. 2023-01-20]. Dostupné z: doi:10.1016/j.egypro.2015.03.266
- [21] BRAYEK, Mohamed, Mohamed Ali JEMNI a Zied DRISS. Study of Spark-Ignition Engine Fueled with Hydrogen Produced by the Reaction Between Aluminum and Water in Presence of KOH. *Arabian Journal for Science and Engineering volume* [online]. 2018, **2019**(44), 695-705 [cit. 2023-01-21]. Dostupné z: doi:10.1007/s13369-018-3192-4
- [22] STEPIEŃ, Zbigniew. Synthetic automotive fuels. *Combustion Engines* [online]. 2022, **192**(1), 78-90 [cit. 2023-01-23]. Dostupné z: doi:10.19206/CE-152526
- [23] FIORE, M., V. MAGI a A. VIGGIANO. Internal combustion engines powered by syngas: A review. *Applied Energy* [online]. 2020, **2020**(276) [cit. 2022-10-05]. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2020.115415
- [24] RAN, Zhongnan, Deivanayagam HARIHARAN a et al. Experimental study of lean spark ignition combustion using gasoline, ethanol, natural gas, and syngas. *Fuel* [online]. 2019, **2019**(235), 530-537 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2018.08.054
- [25] VANCOILLIE, J., J. DEMUYNCK a et al. The potential of methanol as a fuel for flex-fuel and dedicated spark-ignition engines. *Applied Energy* [online]. 2013, **2013**(102), 140-149 [cit. 2023-03-11]. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2012.05.065

- [26] Wouters, C., Lehrheuer, B., Pischinger, S., Seifert, P. et al., "Evaluation of Synthetic Gasoline Fuels and Alcohol Blends in a Spark-Ignition Engine," *SAE Int. J. Fuels Lubr.* 15(3):333-347, 2022, , Dostupné z: doi: 10.4271/04-15-03-0017.
- [27] SANZ-MARTÍNEZ, A., J. LASOBRAS et al. Methanol to gasoline (MTG): Parametric study and validation of the process in a two-zone fluidized bed reactor (TZFBR). *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* [online]. 2022, **2022**(113), 189-195 [cit. 2023-01-29]. Dostupné z: doi:10.1016/j.jiec.2022.05.045
- [28] MAIER, Thomas, Martin HÄRTL, Eberhard JACOB a et al. Dimethyl carbonate (DMC) and Methyl Formate (MeFo): Emission characteristics of novel, clean and potentially CO₂ -neutral fuels including PMP and sub-23 nm nanoparticle-emission characteristics on a spark ignition DI-engine. *Fuel* [online]. 2019, **2019**(256), 50-58 [cit. 2022-10-06]. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115925
- [29] Wagner, C., Grill, M., Keskin, M., Bargende, M. et al., "Potential Analysis and Virtual Development of SI Engines Operated with Synthetic Fuel DMC+," SAE Technical Paper 2020-01-0342, 2020, Dostupné z: doi: 10.4271/2020-01-0342.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

p_e	[Pa]	Brzdny stredny efektivny tlak
THC		Celkové uhl'ovodíky
DME		Dimetyléter
DMC		Dimetylkarbonát
$DÚ$		Dolná úvrat'
LHV		Dolná výhrevnosť
N_2		Dusík
P_e	[kW]	Efektivny výkon
ϕ	[-]	Ekvivalentny pomer paliva a vzduchu
λ	[-]	Ekvivalentny pomer vzduchu a paliva
\dot{m}_f	[g·h ⁻¹]	Hmotnostny tok nasávaného paliva
\dot{m}_a	[g·h ⁻¹]	Hmotnostny tok nasávaného vzduchu
\dot{m}_{in}	[g·h ⁻¹]	Hmotnostny tok nasávanej zmesi
$HÚ$		Horná úvrat'
ρ_i	[kg·m ⁻³]	Hustota nasávanej zmesi zo sacieho potrubia
ITE		Indikovaná tepelná účinnosť
η_i	[%]	Indikovaná účinnosť
$IMEP$	[bar]	Indikovaný stredny efektivny tlak
P_i	[kW]	Indukovaný výkon
ε	[-]	Kompresny pomer
O_2		Kyslík
η_m	[-]	Mechanická účinnosť
$bsfc$	[g·(kW·h) ⁻¹]	Merná efektívna spotreba paliva
$MeFo$		Metylester kyseliny mravčej
V	[m ³]	Objem
V_1	[m ³]	Objem zmesi na DÚ
V_2	[m ³]	Objem zmesi na HÚ
e_v	[-]	Objemová účinnosť
N	[min ⁻¹]	Otáčky
NO_2		Oxid dusičitý
NO		Oxid dusnatý
CO_2		Oxid uhličitý

<i>CO</i>		Oxid uhoľnatý
<i>NO_x</i>		Oxidy dusíku
<i>PM</i>		Pevné častice
\overline{U}_p	[m·s ⁻¹]	Piestová rýchlosť
<i>WOT</i>		Plne otvorená škrtiaca klapka
<i>n_c</i>	[-]	Počet valcov
κ	[-]	Poissonova konštanta
<i>PHÚ</i>		Pred hornou úvraťou
<i>DI</i>		Priame vstrekovanie
<i>MTG</i>		Proces výroby benzínu z metanolu
<i>EGR</i>		Recirkulácia výfukových plynov
<i>FA</i>	[-]	Skutočný pomer paliva a vzduchu
<i>AF</i>	[-]	Skutočný pomer vzduchu a paliva
<i>FA_S</i>	[-]	Stechiometrický pomer paliva a vzduchu
<i>AF_S</i>	[-]	Stechiometrický pomer vzduchu a paliva
<i>c_v</i>	[J·K ⁻¹]	Tepelná kapacita pri stálom objeme
<i>c_p</i>	[J·K ⁻¹]	Tepelná kapacita pri stálom tlaku
η_t	[-]	Termodynamická účinnosť
<i>p</i>	[Pa]	Tlak
τ	[Nm]	Točivý moment
\dot{W}_f	[kW]	Trecí výkon
<i>C</i>		Uhlík
<i>HC</i>		Uhl'ovodíky
<i>CA</i>	[°]	Uhol kl'ukovej hriadele
<i>VLI</i>		Vapor-lock index
<i>H₂</i>		Vodík
<i>V_z</i>	[m ³]	Zdvihový objem
<i>NG</i>		Zemný plyn

SEZNAM PŘÍLOH

Príloha 1: Získané hodnoty efektívneho výkonu zo simulácií.....	P1
Príloha 2 : Získané hodnoty mernej efektívnej spotreby zo simulácií.....	P2

PRÍLOHY

PRÍLOHA 1: ZÍSKANÉ HODNOTY EFEKTÍVNEHO VÝKONU ZO SIMULÁCIÍ.

Efektívny výkon [kW]				
Otáčky motora [min^{-1}]	RON 95 E10	Syngas	POSYN	MtG
1000	4.01	0.78	3.94	4.01
1500	7.33	1.58	7.22	7.33
2000	10.82	2.42	10.66	10.81
2500	14.85	3.33	14.65	14.85
3000	17.68	4.00	17.44	17.68
3500	22.35	4.70	22.22	22.34
4000	25.41	5.31	25.24	25.41
4500	29.54	6.10	29.14	29.54
5000	34.48	6.58	34.02	34.46
5500	37.72	7.02	37.21	37.70
6000	42.51	8.18	41.87	42.50

Efektívny výkon [kW]					
Otáčky motora [min^{-1}]	RON 95 E10	Metanol	DMC	MeFo	DMC+
1000	4.01	4.58	4.41	4.36	4.40
1500	7.33	8.14	7.98	7.90	7.96
2000	10.82	11.78	11.76	11.67	11.74
2500	14.85	15.65	16.12	15.99	16.08
3000	17.68	18.93	19.32	19.15	19.27
3500	22.35	23.43	24.45	24.25	24.39
4000	25.41	26.56	28.08	27.80	28.01
4500	29.54	29.82	32.23	31.89	32.12
5000	34.48	35.81	37.97	37.64	37.88
5500	37.72	39.25	41.64	41.26	41.54
6000	42.51	42.91	46.68	46.19	46.51

PRÍLOHA 2: ZÍSKANÉ HODNOTY MERNEJ EFEKTÍVNEJ SPOTREBY ZO SIMULÁCIÍ.

Merná efektívna spotreba paliva [g/kWh]				
Otáčky motora [min ⁻¹]	RON 95 E10	Syngas	POSYN	MtG
1000	335.60	1422.28	329.11	337.03
1500	313.00	1205.37	306.74	314.37
2000	302.14	1137.31	296.10	303.50
2500	294.37	1104.29	288.43	295.68
3000	293.25	1124.52	287.37	294.55
3500	289.01	1142.70	281.13	290.32
4000	290.43	1192.04	282.60	291.73
4500	289.83	1207.58	284.12	291.13
5000	288.79	1258.98	283.07	290.09
5500	291.65	1334.88	285.92	292.98
6000	293.15	1329.67	287.52	294.46

Merná efektívna spotreba paliva [g/kWh]					
Otáčky motora [min ⁻¹]	RON 95 E10	Metanol	DMC	MeFo	DMC+
1000	335.60	629.04	951.03	955.73	951.92
1500	313.00	606.73	887.66	892.38	888.73
2000	302.14	600.43	854.60	859.26	855.57
2500	294.37	596.03	831.11	836.16	832.44
3000	293.25	599.08	824.42	830.15	826.26
3500	289.01	597.63	811.44	816.98	812.93
4000	290.43	604.70	806.61	813.23	808.12
4500	289.83	609.82	810.81	817.72	813.14
5000	288.79	608.11	805.52	812.23	807.30
5500	291.65	616.37	811.50	818.04	813.10
6000	293.15	625.54	815.44	822.73	818.00