



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

SACÍ POTRUBÍ ZÁŽEHOVÉHO MOTORU NA CNG O VÝKONU 140KW

INTAKE MANIFOLD FOR 140KW CNG ENGINE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. RUDOLF WOJCIK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. DAVID SVÍDA, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Rudolf Wojcik

kteřý/kteřá studuje v magisterském navazujícím studijním programu

obor: **Automobilní a dopravní inženýrství (2301T038)**

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 diplomové práce:

Sací potrubí zážehového motoru na CNG o výkonu 140kW

v anglickém jazyce:

Intake Manifold for 140kW CNG Engine

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Proveďte návrh, nebo úpravu stávajícího sacího potrubí zážehového přeplňovaného motoru, který bude provozován na CNG. Zaměřte se na vefukování CNG do sání.

Cíle diplomové práce:

1. Proveďte dostupnou rešerši konstrukčních řešení palivových systémů u CNG motorů.
2. Vytvořte konstrukční návrh palivového CNG systému (vefukování CNG do sání) podle požadavků zadavatele a prostorového uspořádaní zadaného motoru.
3. Sestavte výpočtový model CNG spalovacího motoru.
4. Proveďte základní výpočtovou studii stacionárního průtoku nasávaného vzduchu sacím traktem a zhodnoťte získané výsledky.

Seznam odborné literatury:

- [1] Hofmann, Karel. Turbodmychadla, vozidlové turbíny a ventilátory. :Přepřívání spalovacích motorů. / 2. vyd. Brno : VUT Brno, 1985. 134 s.
- [2] Molnár, V.: Počítačová dynamika tekutin [online], 2009, poslední revize 24.10.2011. Dostupné z: <<http://www.cfd.sk/cfd-book>>
- [3] Lotus Engineering Software, Group Lotus Plc, Norfolk, United Kingdom. Dostupné z: <<http://www.lesoft.co.uk>>

Vedoucí diplomové práce: Ing. David Svída, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 19.11.2012

L.S.

prof. Ing. Václav Pištek, DrSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty



ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na konstrukční návrh vícebodového vefukování CNG do sacího potrubí přeplňovaného zážehového motoru VW 1.4 TSI. Na základě reálného sacího potrubí byl pomocí programu Autodesk Inventor Professional 2012 vytvořen 3D model, který sloužil jako základ CFD analýzám mísení CNG se vzduchem, které byly provedeny v softwaru STAR-CCM+.

KLÍČOVÁ SLOVA

CNG, sací potrubí, vícebodové vefukování, motor TSI, CFD

ABSTRACT

The master's thesis is focused on the design of the multi-point CNG injection for the VW 1.4 TSI intake manifold turbocharged spark ignited engine. The 3D model that was created using Autodesk Inventor Professional 2012 is based on the real intake manifold. This model served as an input for CFD analyses of mixing CNG with air. These were made in STAR-CCM+ software.

KEYWORDS

CNG, intake manifold, multi-point injection, TSI engine, CFD



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

WOJCIK, R. *Sací potrubí zážehového motoru na CNG o výkonu 140kW*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 64 s. Vedoucí diplomové práce Ing. David Svída Ph.D.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Davida Svídy Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 22. května 2013

.....

Rudolf Wojcik



PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Davidu Svídovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat rodičům za podporu a přítelkyni za trpělivost.



OBSAH

Úvod	10
1 Konvenční paliva spalovacích motorů	11
1.1 Benzín	11
1.2 Motorová nafta.....	11
2 Alternativní paliva spalovacích motorů.....	13
2.1 Paliva na bázi alkoholů	13
2.1.1 Metanol.....	14
2.1.2 Etanol.....	15
2.2 Bionafta.....	15
2.3 LPG (Liquefied Petroleum Gas)	17
2.4 Zemní plyn.....	18
2.4.1 LNG (Liquefied Natural Gas).....	19
2.4.2 CNG (Compressed Natural Gas).....	20
3 Konstrukční řešení palivových soustav motorů na CNG	23
3.1 Palivové soustavy se směšovačem plynu.....	23
3.2 Palivové soustavy s vefukováním plynu do sacího potrubí.....	24
3.2.1 Palivové soustavy s jednobodovým vefukováním plynu do sacího potrubí.....	24
3.2.2 Palivové soustavy s vícebodovým vefukováním plynu do sacího potrubí.....	25
3.3 Palivové soustavy s přímým vefouknutím plynu do spalovacího prostoru	26
4 Konstrukční prvky palivových soustav motorů na CNG	27
4.1 Plnicí ventil	27
4.2 Tlaková nádrž	27
4.3 Bezpečnostní ventil.....	27
4.4 Regulátor tlaku plynu.....	28
4.5 Směšovač	28
4.6 Palivová lišta s elektronickými vefukovači	29
5 Návrh vefukování CNG do sání	30
5.1 Popis motoru VW 1,4 TSI	30
5.1.1 Popis sacího traktu motoru VW 1,4 TSI	31
5.2 Tvorba 3D modelu sacího potrubí	31
5.3 Varianty vefukování CNG do sacího potrubí	33
6 CFD analýza mísení CNG se vzduchem	36
6.1 Základní fyzikální zákony proudění tekutin	36
6.1.1 Proudění.....	36
6.1.2 Rovnice kontinuity	37



6.1.3	Eulerova rovnice.....	37
6.1.4	Bernoulliho rovnice	37
6.2	Nastavení fyzikálního modelu, definice okrajových podmínek	38
6.3	Tvorba výpočetní sítě.....	40
6.4	Výsledky analýzy.....	42
6.4.1	Varianta A.....	42
6.4.2	Varianta B.....	44
6.4.3	Varianta C.....	45
6.5	Zhodnocení výsledků.....	47
7	Návrh úprav vefukování CNG do sání	48
7.1	Stávající řešení – rozšíření úlohy na kompletní sací soustavu.....	48
7.1.1	CFD analýza kompletního modelu Varianty C	49
7.2	Varianty úprav vefukování CNG do sacího potrubí	51
7.3	CFD analýza mísení CNG se vzduchem s použitím úprav.....	52
7.3.1	Výsledky analýzy	52
7.3.2	Zhodnocení výsledků.....	57
	Závěr.....	60
	Seznam použitých zkratk a symbolů	63
	Seznam příloh.....	64



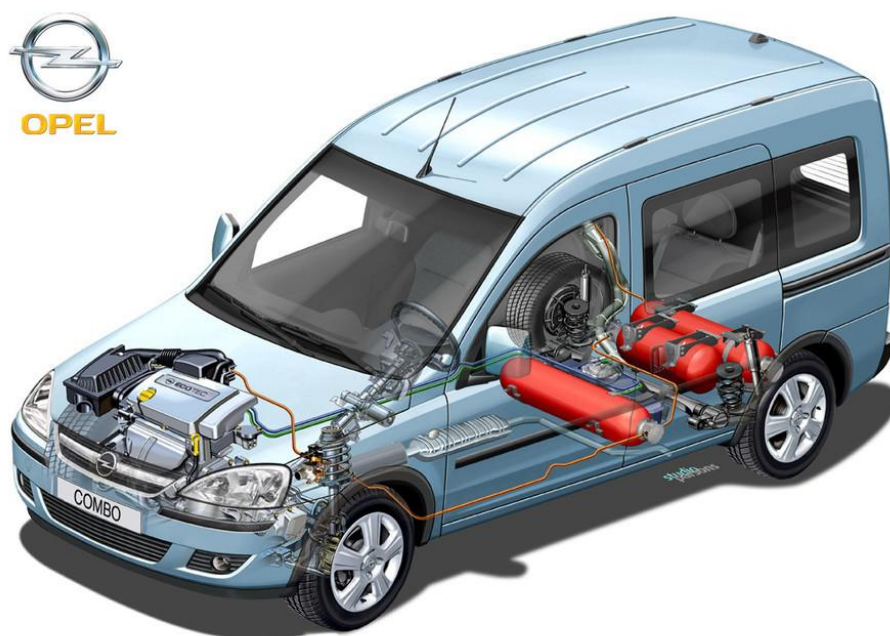
ÚVOD

V období, kdy zásoby ropy respektive konvenčních paliv spalovacích motorů jako je benzín či nafta rapidně ubývají, je snaha tyto paliva jakkoli ušetřit všudypřítomná. Asi každého by v souvislosti s šetřením paliva napadlo snížit spotřebu automobilu. Stejně uvažovaly i přední automobilky, čímž vznikla celá řada projektů s cílem redukce jízdních nákladů a růstu bezpečnosti vozidel, namátkou ULSAB (Ultra Light Steel Body) z čehož vzešly nové typy ocelí a technologií, které napomohly zejména k redukci hmotnosti a tím snížení spotřeby paliva automobilů. Ovšem postupem času již tato opatření sama o sobě nebyla dostačující a hledaly se další možnosti jak oddálit budoucí krizi spojenou s nedostatkem pohonných hmot.

A tak se začalo nahlas hovořit o nutnosti hledání paliv alternativních. Takových paliv již v dnešní době existuje celá řada. Od těch na bázi alkoholů (bioetanol), přes LPG až k CNG. Ačkoli pohon vozidla na LPG či CNG vyžaduje určitou úpravu automobilu, návratnost takové počáteční investice je vzhledem k nižší ceně těchto paliv vůči benzínu nebo naftě pouhou otázkou času.

Že nezůstalo pouze u možnosti využívání alternativních paliv, dokazují tzv. hybridní automobily, které kombinují klasickou konvenční pohonnou jednotku s elektromotory. Od takových typů vozidel je pak již blízko k elektromobilům a vozidlům na vodíkový pohon. Takovéto automobily by měly být hudbou blízké budoucnosti.

Cílem této diplomové práce je návrh vhodné vefukovací soustavy zážehového motoru na CNG, zejména řešení vefukování samotného CNG do sacího potrubí. Práce se opírá o CFD analýzy vefukovacího procesu.



Obr. 1 Schéma palivové soustavy automobilu s pohonem na CNG [29]



1 KONVENČNÍ PALIVA SPALOVACÍCH MOTORŮ

Ačkoli je to dnes již těžce představitelné, první automobily, vznikající na konci 18. století, byly poháněny parními stroji. A to zejména díky tomu, že samotná ropa a především její komerční využití zažila rozkvět až v polovině 19. století. Doslova o pár let později již Nicolaus Otto vyvinul první čtyřdobý spalovací motor. To se psal rok 1866. O dalších 31 let později sestrojil Rudolf Diesel první vznětový motor. Právě tyto vynálezy znamenaly přelom v tehdejší automobilové dopravě a společně s dalšími významnými objevy z let následujících se postaraly o dominantní postavení benzínu či motorové nafty na trhu s pohonnými hmotami.

1.1 BENZÍN

Benzín je kapalina ropného původu, skládající se z alifatických uhlovodíků (typicky se 4 – 12 atomy uhlíku v molekule) získávaných frakční destilací ropy. Dále se do benzínu přidávají isooktany, aromatické uhlovodíky toluenu nebo benzen a to za účelem zvýšení oktanového čísla. Pro zlepšení výkonu a snížení emisí motorů lze do benzínu přidávat také malá množství aditiv k tomu určených. Vyrábí se v ropných rafineriích. Používá se jako palivo zážehových motorů osobních automobilů nebo jako rozpouštědlo. [7] [14]

Co se týká vlastností tohoto paliva, nejzásadnější je schopnost benzínu odolávat detonačnímu hoření. V případě špatných antidetonačních vlastností by mohlo dojít dokonce až k destrukci motoru. K vyjádření antidetonačních vlastností paliva se využívá oktanové číslo, které udává kvalitu benzínu. Čím vyšší má benzín oktanové číslo, tím vyšší je jeho odolnost proti samovznícení při kompresi ve válci. [14] [16]

Oktanové číslo paliva vyjadřuje objemový podíl isooktanu (oktanové číslo 100) a n-heptanu (oktanové číslo 0). Měření se provádí na zkušebním jednoválcovém motoru s proměnným kompresním poměrem. Existují dvě metody stanovení oktanového čísla – metoda motorová a metoda výzkumná, která je v praxi používanější. Jak je již zmíněno výše, zkušební motor umožňuje postupnou změnu kompresního poměru. Toho se využívá v praxi tak, že u motoru běžícím na zkoušené palivo je zvyšován kompresní poměr tak dlouho, dokud nedojde k detonačnímu hoření. Takto nastavený kompresní poměr je zachován a motor je spuštěn na směs isooktanu a n-heptanu. Poměr směsi se plynule mění, dokud opět nenastane detonační spalování. Poměr isooktanu a n-heptanu, který je právě spalován udává oktanové číslo zkoušeného paliva. [16]

Odolnost paliva proti samozápalu nezávisí pouze na složení paliva, ale také na tvaru spalovacího prostoru či přidaných aditivech. Dříve se jako aditivum hojně využíval tetraethyl olova, který nejenže zvyšoval oktanové číslo, ale také snižoval opotřebení sedel ventilů. Bohužel při spalování olovnatého benzínu se do ovzduší uvolňovaly sloučeniny obsahující olovo, které je zdraví škodlivé a tak byla olovnatá aditiva nahrazena aditivou na bázi alkoholů a organických sloučenin. [14] [16]

1.2 MOTOROVÁ NAFTA

Motorové nafty jsou směsi kapalných uhlovodíků (typicky s 12 – 22 atomy uhlíku v molekule) získávané z ropy destilací a hydrogenační rafinací vroucí v rozmezí 150 až 370°C. Mohou obsahovat aditiva na zlepšení užitných vlastností, jako jsou mazivostní přísady a inhibitory koroze. Opět i motorová nafta je vyráběna v ropných rafineriích. Používá se jako palivo vznětových motorů osobních automobilů či traktorů. [7] [14]



Pro správný chod vznětového motoru je charakteristický tzv. průtah vznícení. Průtah vznícení je doba, která uplyne mezi vstřikem paliva do spalovacího prostoru a okamžikem vznícení. Aby byla tato doba přiměřená, záleží nejen na chemickém složení a destilačních vlastnostech paliva, ale i na konstrukci vstřikovacího zařízení a provedení spalovacího prostoru. Průtah vznícení motorové nafty je definován cetanovým číslem. Cetanové číslo udává kvalitu motorové nafty z hlediska její vznětové charakteristiky, tedy ochoty nafty po vstříknutí do spalovacího prostoru se vznítit. Čím vyšší je cetanové číslo, tím lépe motor pracuje. [14] [17]

Cetanové číslo paliva vyjadřuje objemový podíl cetanu (cetanové číslo 100 = krátký průtah vznícení) a 1 - methylnaftalenu (cetanové číslo 0 = dlouhý průtah vznícení). Měření cetanového čísla se provádí na jednoválcovém vznětovém motoru s přímým vstřikem paliva. Zkoušené palivo je vstřikováno do válce a pozoruje se průběh vznětu tohoto paliva. Poté je dané palivo nahrazeno směsí paliv referenčních. Poměr těchto paliv je měněn tak dlouho, dokud nedojde ke vznícení paliva ve stejném okamžiku jako u zkoušeného paliva. [17]

Většina motorových naft používaných v dnešní době má cetanové číslo v rozsahu 50 až 60 jednotek. Česká a evropská norma vyžaduje cetanové číslo o minimální hodnotě 51, což je spodní hranice z hlediska ekologie i potřeb moderních motorů. Nízká hodnota cetanového čísla znamená, že prodleva vznícení je dlouhá. To má za následek rozprášení velkého množství paliva, které se prakticky současně vznítí, čímž dojde k příliš rychlému nárůstu tlaku ve spalovacím prostoru motoru. Toto se projevuje tvrdostí chodu motoru a hlučností. Naopak příliš vysoká hodnota cetanového čísla znamená krátkou prodlevu vznícení. Tím dochází ke vznícení paliva velmi blízko vstřikovací trysky. To vede k tomu, že palivo je nedostatečně promíseno se vzduchem, čímž dochází k nedokonalému spalování a vzniku sazí. Tvorba centra plamene nedaleko od vstřikovací trysky má neblahý vliv na ni samotnou. Dochází k zapékání trysek, ucpávání vstřikovacích otvorů trysky či až k zadření jehly trysky. Obecně ale motor spalující palivo s vyšším cetanovým číslem lépe startuje, má lepší výkon, tišší a hladší chod a také příznivější obsah emisí ve výfukových plynech. Cetanové číslo lze zvýšit přidáním speciálních přísad – alkylnitrátů. [14] [17]



2 ALTERNATIVNÍ PALIVA SPALOVACÍCH MOTORŮ

V průběhu času se představa o tom co je alternativní palivo měnila. Na počátku automobilové historie byly alternativou právě dnes nejpoužívanější benzín a motorová nafta. Ottův spalovací motor byl totiž poháněn plynem. Jako pohonný plyn se používala řada hořlavých plynů, namátkou svítiplyn, důlní plyn, dřevoplyn nebo plyn kalový. Postupně se právě pohon na plynné médium stal alternativou.

Dnes je snaha využívat alternativní paliva všudypřítomná. Hlavním faktorem této snahy je dozajista omezená zásoba ropných paliv. Není to ovšem jediný důvod proč využívat jiné druhy pohonných hmot. Mnohdy je totiž pohon vozidla na alternativní palivo ekonomicky výhodnější, a co je v dnešní době skoro nejdůležitější, je ekologičtější. Proto mnoho států či jiných organizací zavádí programy pro podporu alternativních paliv. Sama Evropská unie zavedla akční program, který zahrnuje předpoklad 20% podílu alternativních paliv na trhu s pohonnými hmotami a to vše do roku 2020. Především proto musí automobilky ve svých portfoliích nabízet vozidla, která nevyužívají ke svému pohonu benzín a motorovou naftu.

Jako náhrada benzínu a motorové nafty pro pístové spalovací motory slouží především:

- paliva na bázi alkoholů
- bionafta
- zkapalněné ropné plyny (LPG)
- zemní plyn (LNG, CNG)

2.1 PALIVA NA BÁZI ALKOHOLŮ

Mezi významná paliva na bázi alkoholů vhodná pro spalovací motory patří metanol a etanol. Existují i další například isopropanol a terciární butanol, ale jejich praktické využití je v současnosti minimální. Alkoholová paliva jsou hojně používána především v Jižní Americe.

Alkoholy nižších skupin (např. etanol) mají obdobné vlastnosti jako ropná paliva – benzín a motorová nafta. Díky vyššímu oktanovému číslu lze při použití alkoholů zvýšit kompresní poměr zážehových motorů. Velké výparné teplo těchto paliv způsobuje vnitřní ochlazování směsi, čímž je dosaženo lepšího plnění válců. Na druhou stranu jsou alkoholy schopny vázat vodu a způsobovat tak korozi kovových částí motoru. V případě směsi alkoholu s benzinem způsobuje voda separaci frakcí benzínu a degradaci paliva.

Použití alkoholových paliv u zážehových motorů nevyžaduje jejich větší úpravy. Pouze je nutné zvýšit dodávku paliva tak, aby odpovídala směšovacímu poměru. Toto je způsobeno menší výhřevností alkoholových paliv. Také je potřeba nahradit ty části palivového systému a motoru, které podléhají korozi.

Vznětové motory je nutné vybavit pomocným zapalovacím systémem, což vyplývá z nízké vznětlivosti alkoholových paliv a s tím spojeným nízkým cetanovým číslem. Tyto problémy lze částečně odstranit pomocí aditiv, obdobné řešení lze aplikovat i pro zvýšení mazacích vlastností paliv na bázi alkoholů.



2.1.1 METANOL

Metanol je bezbarvá, těkavá, jedovatá, hořlavá kapalina s charakteristickým alkoholovým zápachem. Po požití menší dávky způsobuje oslepnutí, v dávce větší dokonce smrt (do lidského těla je vstřebáván i pouhým kontaktem s kůží). Proto při manipulaci s touto kapalinou je nutné dbát zvýšené opatrnosti. [1] [3]

K výrobě metanolu jsou využívána především fosilní paliva, jako je ropa, uhlí a zejména zemní plyn. Lze jej ale také vyrábět zplyňováním biomasy, bohužel tato varianta je v současnosti příliš nákladná, což brání jejímu většímu využití. [1] [3]

Metanol se používá jako palivo především pro zážehové motory, jejichž vlastnosti jsou srovnatelné se zážehovými motory poháněnými benzínem. V případě užití ve vznětových motorech je nutné vozidlo vybavit pomocným zapalovacím systémem z důvodů, které jsou uvedeny výše. Možností je také upravit metanol pomocí aditiv nebo jej používat ve směsi s motorovou naftou. [1] [3]

Tab. 1 Porovnání základních vlastností metanolu s benzínem [4]

	Výhřevnost		Výparné teplo [kJ/kg]	Bod varu [°C]	Oktanové číslo VM
	[MJ/kg]	[MJ/l]			
Benzín	42 - 43,5	31 - 32,9	290	80 - 160	91 - 100
Metanol	19,9	15,9	1110	65	111

Z Tab. 1 je patrná největší nevýhoda metanolu, kterou je velmi nízká objemová výhřevnost v porovnání s benzínem, což je jedna z příčin špatné ekonomičnosti provozu vozidla na metanol.

Výhody spalování metanolu:

- nižší emise
- vyšší oktanové číslo umožňující použití vysokých kompresních poměrů
- výhodný směšovací poměr, ve srovnání s benzínem 6,5:1

Nevýhody spalování metanolu:

- toxicita
- způsobuje korozi kovových materiálů, degradaci plastů
- poloviční objemová výhřevnost ve srovnání s benzínem a s tím spojená vyšší spotřeba
- vyšší cena než v případě benzínu



2.1.2 ETANOL

Etanol je alkohol nižších skupin, který se v přírodě vyskytuje jen zřídka a jehož požití v malém množství není pro člověka škodlivé (slouží jako protijed v případě požití metanolu). Je málo reaktivní a vyznačuje se vysokým oxidačním účinkem. [1] [3]

Etanol se vyrábí alkoholovým kvašením ze surovin obsahujících cukr, celulózu nebo škrob (např. obilí, brambory, kukuřice, cukrová řepa, cukrová třtina). Proces kvasné výroby etanolu je založen na zkvašování cukerných roztoků kvasinkami s následnou destilací pro oddělení etanolu od zbytku směsi. Takovýto proces výroby je doprovázen vznikem celé řady vedlejších produktů, které lze využít např. v potravinářství. [1] [3]

Samotný etanol lze použít pouze ve speciálně konstruovaných motorech nebo ve značně upravených zážehových motorech. Daleko rozšířenější je využití etanolu ve směsi s benzínem. Takto se dnes dá běžně natankovat palivo pod označením E85, což je směs složená z 85% etanolu a 15% benzínu. Takových směsných paliv existuje celá řada, liší se obsahem etanolu v nich obsažených. Mimo jiné je používán jako aditivum pro zvýšení oktanového čísla benzínu. [1] [3]

Tab. 2 Porovnání základních vlastností etanolu s benzínem [4]

	Výhřevnost		Výparné teplo [kJ/kg]	Bod varu [°C]	Oktanové číslo VM
	[MJ/kg]	[MJ/l]			
Benzín	42 - 43,5	31 - 32,9	290	80 - 160	91 - 100
Etanol	26,8	21,3	904	78	108

Z Tab. 2 vyplývá, že objemová výhřevnost etanolu je nižší než v případě benzínu, což vede ke zvýšení spotřeby paliva a poklesu výkonu motoru. Naopak větší oktanové číslo vyjadřuje lepší antidetonační vlastnosti etanolu v porovnání s benzínem.

Výhody spalování etanolu:

- vyšší oktanové číslo umožňující použití vysokých kompresních poměrů
- nižší emise (avšak vyšší v porovnání se spalováním metanolu)
- výhodný směšovací poměr, ve srovnání s benzínem 9:1
- výborné antidetonační a okysličovací schopnosti

Nevýhody spalování etanolu:

- nižší výhřevnost a s tím spojená vyšší spotřeba
- způsobuje korozi kovových materiálů

2.2 BIONAFTA

Jako bionafta jsou označovány nízkomolekulární estery vyšších mastných kyselin. Surovinou pro výrobu bionafty jsou olejnaté plodiny (sója, palmový olej, řepka, slunečnice). Jelikož se



dají všechny vedlejší produkty dále využít, výroba je v podstatě ekologická a bezodpadová. Čistá bionafta je netoxické ekologické palivo. Neobsahuje síru a aromatické látky. Je mastnější než klasická nafta, do níž se často přidává pro zlepšení mazacích a emisních vlastností. [1] [3]

Přímé použití rostlinných olejů není možné, díky jejich vysoké viskozitě. Řešením je úprava vylisovaného a vyčištěného oleje esterifikací na metylester oleje. Jedná se o proces, při němž jsou pomocí alkoholu štěpeny velké molekuly oleje na menší. Tímto procesem dojde ke snížení viskozity a tvorbě směsi paliva se vzduchem, která odpovídá použití motorové nafty. [1] [3]

Na evropském kontinentu je nejrozšířenější metylester řepkového oleje (zkráceně MEŘO), což je produkt vznikající při reakci řepkového oleje s metanolem. Čisté MEŘO se jako palivo používá např. v Rakousku či Německu a jde o tzv. bionaftu 1. generace. V České republice se používá jen tzv. bionafta 2. generace. Jedná se o směsnou naftu, která obsahuje minimálně 31% MEŘO, zbývající část tvoří klasická motorová nafta. Bionafta má vysoké využití v oblasti pohonu zemědělských strojů (např. traktory, mlátičky). [1] [3]

Tab. 3 Porovnání základních vlastností MEŘO s motorovou naftou [4]

	Výhřevnost		Výparné teplo [kJ/kg]	Bod varu [°C]	Teplota vznícení [°C]	Cetanové číslo
	[MJ/kg]	[MJ/l]				
Nafta	42,5	35,6	180	160 - 360	250	nad 51
MEŘO	38,5	34,3	260	320 - 360	300	58

Z Tab. 3 je patrné, že díky nižší objemové výhřevnosti MEŘO oproti motorové naftě naroste spotřeba motoru a výkon naopak poněkud poklesne. Na druhé straně vyšší cetanové číslo ztrátu výkonu plynoucí z nižší výhřevnosti MEŘO alespoň částečně kompenzuje.

Výhody spalování bionafty:

- nižší emise
- vyšší cetanové číslo a z toho plynoucí tišší chod motoru
- vysoká mazací schopnost

Nevýhody spalování bionafty:

- pokles výkonu motoru (přibližně o 5%)
- zvýšení kouřivosti motoru
- způsobuje korozi kovových materiálů, degradaci pryžových dílů
- ekonomicky náročná výroba



2.3 LPG (LIQUEFIED PETROLEUM GAS)

Zkapalněný ropný plyn, neboli LPG, v minulosti označoval ropné produkty o dvou až pěti atomech uhlíku v molekule. Dnes LPG označuje směs propanu (sumární vzorec C_3H_8) a butanu (sumární vzorec C_4H_{10}), která se získává zpracováním ropných plynů. Mimo propanu a butanu obsahuje směs minimální množství síry. Ropný plyn se získává jako zkapalněná frakce separovaná rafinací zemního plynu nebo jako vedlejší produkt při zpracování ropy. [1] [3]

Za normálních atmosférických podmínek se vyskytuje v plynné formě. Lze jej však stlačením snadno zkapalnit, čímž dojde k velkému snížení objemu, přibližně 260krát. Zkapalněné LPG je bezbarvá, silně těžká, nejedovatá kapalina specifického zápachu. [1] [3]

Tab. 4 Porovnání základních vlastností LPG s benzínem [4]

	Výhřevnost		Výparné teplo [kJ/kg]	Bod varu [°C]	Oktanové číslo VM
	[MJ/kg]	[MJ/l]			
Benzín	42 - 43,5	31 - 32,9	290	80 - 160	91 - 100
LPG	46	25,3	300	-11,7	105

Z tabulky vyplývá, že objemová výhřevnost LPG je nižší než v případě benzínu, což vede ke zvýšení spotřeby paliva a poklesu výkonu motoru. Oktanové číslo LPG je dáno výpočtem známých oktanových čísel jednotlivých složek a jejich poměru ve směsi. Oktanové číslo uvedené v Tab. 4 odpovídá směsi složené z 60% propanu a 40% butanu. [4]

LPG se používá k pohonu výhradně zážehových motorů, u nichž je nutné upravit palivovou soustavu. Existuje několik systémů upravujících palivovou soustavu zážehového motoru. Tím nejjednodušším je systém s centrálním směšovačem, který je určen pro vozidla vybavená karburátorem. Systém sekvenčního vefukování LPG využívá elektronického dávkování paliva benzínovou řídicí jednotkou pro každý válec zvlášť. Tento systém patří v současnosti k těm nejpoužívanějším. Takto upravené vozidlo je poté možné provozovat na benzín i LPG. Kromě vozidel upravených, lze zakoupit i sériový automobil s pohonem na LPG (např. Seat Ibiza 1.6 LPG či Škoda Octavia Combi 1.6 MPI LPG). [1] [2] [3]

Výhody spalování LPG:

- nižší emise
- nižší cena za ujetý km (i přes vyšší spotřebu), rozsáhlá síť čerpacích stanic
- delší životnost motorového oleje

Nevýhody spalování LPG:

- počáteční investice (v případě přestavby stávajícího motoru)
- zvýšení spotřeby (asi o 10%) a snížení výkonu (asi o 5%)
- omezené parkování v podzemních garážích



2.4 ZEMNÍ PLYN

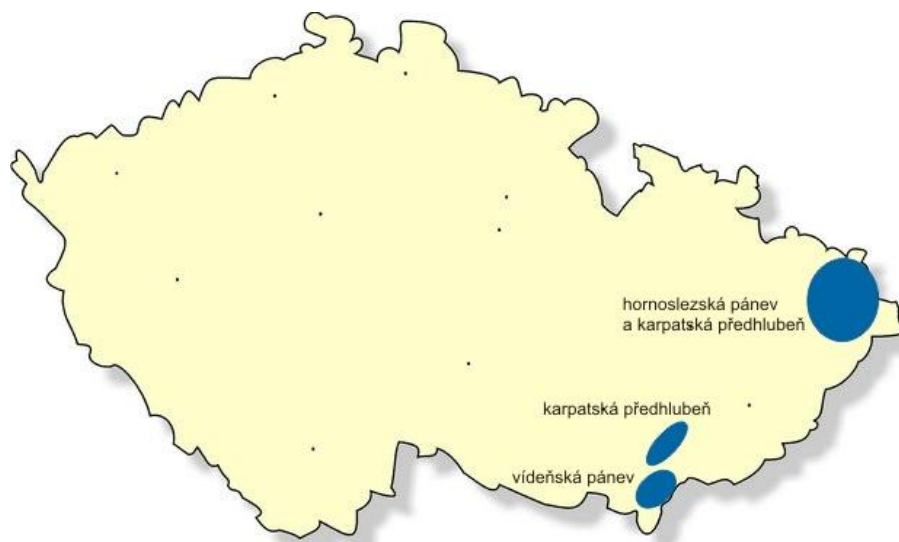
Zemní plyn je směs plynných uhlovodíků, jejichž hlavní složkou je metan. Obsah metanu se pohybuje v rozmezí od 82 do 95% v závislosti na nalezišti zemního plynu. Zemní plyn je hořlavý, bezbarvý plyn bez chuti i zápachu. Je nejedovatý a lehčí než vzduch. [1] [3]

V závislosti na změně obsahu metanu se mění i množství energie obsažené v zemním plynu. Z těchto důvodů rozlišujeme dva energetické typy zemního plynu:

- zemní plyn typu H (High) jehož energetický obsah je vysoký, hodnota spalného tepla se pohybuje v rozmezí 40 – 46 MJ/m³ a podíl nehořlavých složek je nižší než 5%
- zemní plyn typu L (Low) jehož energetický obsah je nízký, hodnota spalného tepla se pohybuje v rozmezí 33 – 38 MJ/m³ a podíl nehořlavých složek je vyšší než 10%

Nehořlavými složkami rozumíme N₂ a CO₂. Ve většině zemí Evropy, včetně České republiky, je využíván zemní plyn typu H, který obsahuje více než 90% metanu. [1] [3]

Zemní plyn je fosilním palivem obdobně jako ropná paliva benzín a motorová nafta. Je tudíž neobnovitelným zdrojem energie, avšak zásoby zemního plynu jsou větší než zásoby ropy. Zemní plyn je nejčastěji těžen z vrtů hlubokých 3 – 8 km (ložiska na pevnině nebo pod mořským dnem). Často je těžen společně s ropou. Takto získaný zemní plyn je následně nutné upravit, vyčistit na požadovanou kvalitu. V České republice bylo v roce 2008 těženo 41 ložisek s celkovou roční těžbou 168 mil. m³. Výskyt zemního plynu v ČR je na Obr. 2. [1] [3] [18]



Obr. 2 Naleziště zemního plynu v ČR [18]

Zemní plyn lze používat v motorech zážehových i vznětových. Časté je spalování zemního plynu ve vznětových motorech přestavěných na motory zážehové. Toho se využívá zejména z důvodu větších kompresních poměrů vznětových motorů, které lze díky vysokému oktánovému číslu zemního plynu plně využít bez problému s detonačním hořením paliva. Dalším důvodem je vysoká teplota vznícení zemního plynu. Ačkoli se jedná o fosilní palivo, vzniká při spalování zemního plynu velmi málo škodlivin. Produkce CO₂ je nižší o 25%, CO, HC a NO_x o 80%, pevné částice a S₂O₃ dokonce nevznikají vůbec (vše v porovnání



s benzínem a motorovou naftou). Provoz vozidla na zemní plyn je také levnější než v případě klasických ropných paliv. Díky tomu je dnes zemní plyn oblíbeným palivem flotil vozidel MHD velkých měst. [1] [2] [3]

Jedinou závažnější nevýhodou zemního plynu je jeho nízká výhřevnost. Obdobně jako u jiných alternativních paliv vede nízká výhřevnost ke snížení výkonu a mírnému nárůstu spotřeby motoru.

2.4.1 LNG (LIQUEFIED NATURAL GAS)

LNG neboli zkapalněný zemní plyn je první možností jak jej dostat k cílovému zákazníkovi. Kapalného skupenství je dosaženo zchlazením plynu na teplotu -162°C , přičemž dojde ke zmenšení jeho objemu přibližně 600 - krát. Jelikož je zkapalněný zemní plyn silně podchlazený, je nutné jej skladovat v kryogenních nádržích pod relativně nízkým tlakem 0,15MPa. Po zkapalnění se zemní plyn stává jasnou tekutinou bez barvy, zápachu i chuti. [1]

Zkapalňovací proces zemního plynu je velmi technologicky a především energeticky náročný, což je jedna z příčin jeho nízkého rozšíření mezi motoristy. Před samotným zkapalněním je nutné zemní plyn zbavit příměsí a nečistot, posléze je zkapalňován v soustavě výměníků, tvořících zkapalňovací kolonu. Zpravidla bývá zkapalňován ihned po vytěžení v blízkosti velkých přístavů, z důvodu následné dopravy LNG na odbytiště pomocí tankerů (Obr. 3). [2]



Obr. 3 Tanker sloužící k přepravě LNG [19]

Následná distribuce LNG je již prováděna klasickou formou pomocí cisteren. Jelikož doprava LNG není realizována potrubím, lze řešit čerpací stanice na LNG jako mobilní. Co se týká samotného tankování, tekuté LNG je nutné čerpat do kryogenní nádrže umístěné ve vozidle. Takováto nádrž musí mít velmi dobrou tepelnou izolaci, musí vyhovovat provoznímu přetlaku 0,6 až 0,8MPa. Nicméně kryogenní palivové nádrže jsou konstruovány na maximální tlak až 1,6MPa, poté dojde k otevření pojistného ventilu, který vypustí část tlaku do atmosféry. Dalším důležitým požadavkem je co možná největší doba zádrže, což je doba, za kterou vzroste tlak v nádrži na hodnotu, při níž se otevře pojistný ventil. [2] [3]

Kromě klasických LNG čerpacích stanic existují také tzv. LCNG čerpací stanice, do kterých je plyn přivezen v kapalném stavu, čerpadlem se dosáhne požadovaného tlaku a posléze se v odpařovači provede změna skupenství z kapalného na plynné. U takových čerpacích stanic mohou tankovat i vozidla poháněná CNG. [2]



Největší odlišností palivového systému vozidla provozovaného na LNG je kryogenní nádrž, která je podrobněji popsána výše. Další nutností palivového systému takového vozidla je odpařovač, do kterého je přiváděn kapalný zemní plyn z nádrže, je ohříván na teplotu okolí a dále veden v plynném skupenství do vstřikovacího systému. Každé vozidlo, které je poháněno LNG, musí být vybaveno detektorem plynu. A to z důvodu případného úniku kapalného plynu, který není odorizován (odorizace = přidávání páchnoucích látek do plynů). Další části palivového systému jsou shodné s palivovými systémy vozidel na CNG, které budou popsány blíže v následujících kapitolách. [1] [3]

Výhody spalování LNG:

- nižší emise
- srovnatelná doba plnění s benzínem či motorovou naftou
- větší dojezd vozidla v souvislosti s vyšší energetickou hustotou (v porovnání s CNG)

Nevýhody spalování LNG:

- nedostatek plnicích stanic
- náročná výroba
- odpařování paliva při delším odstavení vozu

2.4.2 CNG (COMPRESSED NATURAL GAS)

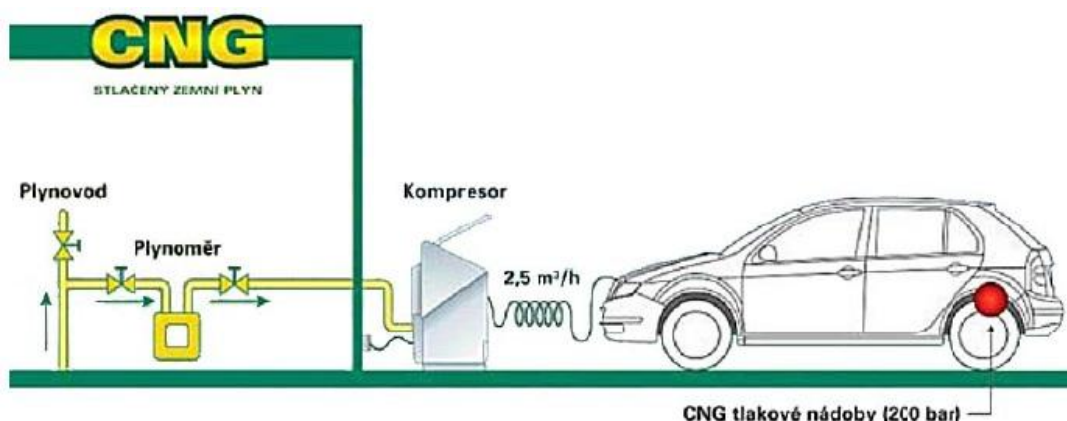
Technologie stlačeného zemního plynu užívaného k pohonu vozidel je založena na přechovávání plynu v plynné fázi za vysokého tlaku. Zemní plyn je pomocí kompresoru stlačen na tlak 20 – 30MPa. Pro stlačení se využívá zemní plyn z plynovodů o minimálním obsahu metanu 95%. Základní přehled fyzikálních vlastností CNG je uveden v Tab. 5. [1]

Tab. 5 Základní fyzikální vlastnosti CNG [4]

	Výhřevnost [MJ/m ³]	Výparné teplo [kJ/kg]	Hustota [kg/m ³]	Bod varu [°C]	Teplota vznícení [°C]	Oktanové číslo VM
CNG	34,09	555	0,69	-162	650	130

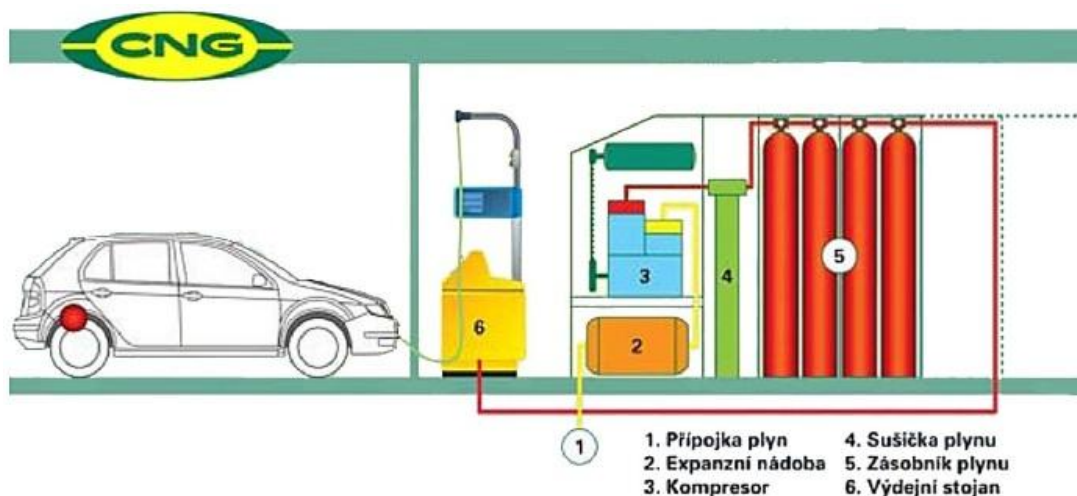
Z důvodu odlišných tlaků panujících v plynové nádrži vozu a běžném plynovém potrubí, je k čerpání CNG potřeba speciálních přečerpávacích stanic. V dnešní době existují dvě provedení těchto stanic – stanice pro pomalé plnění a stanice pro rychlé plnění CNG.

Stanice pro pomalé plnění (Obr. 4) není vybavena velkými zásobníky stlačeného plynu. Plnění probíhá přímo z plynového potrubí pomocí kompresoru stlačujícího plyn do nádrže. Pro vybudování takovéto stanice stačí pouze přívod elektřiny a zemního plynu, což je její nespornou výhodou. Nevýhodou je zejména dlouhá doba plnění, která se může pohybovat i v řádech několika hodin. Plnění je poté nutné provádět v delších odstavkách vozu z provozu např. v noci. Stanice pro pomalé plnění jsou využívány především firmami nebo domácnostmi. [13]



Obr. 4 Schéma stanice pro pomalé plnění CNG [13]

Stanice pro rychlé plnění (Obr. 5) je vybavena velkými zásobníky stlačeného plynu, které jsou navíc doplňovány vícestupňovým kompresorem pro udržení stálého tlaku v nádobách. Doba naplnění nádrže tímto systémem se pohybuje v řádech minut (některé zdroje uvádějí čas naplnění do 5 – ti minut), což je srovnatelné s tankováním benzínu nebo motorové nafty. Ovšem z důvodu vysoké počáteční investice nutné pro vybudování rychloplnicí stanice je tento systém vhodný zejména pro veřejné plnicí stanice. [13]



Obr. 5 Schéma stanice pro rychlé plnění CNG [13]

Obliba CNG jako paliva pro pohon vozidel roste. Celosvětově patří toto alternativní palivo k těm nejrozšířenějším, což dokládá spousta sériově vyráběných vozidel s pohonem na CNG. Mezi nejvýznamnější automobilky zabývající se otázkou pohonu vozidel na CNG patří Mercedes – Benz, Volkswagen nebo Fiat.

V České republice bylo v roce 2011 provozováno 3250 vozidel na CNG (z toho bylo 336 autobusů), což v porovnání s rokem minulým znamenalo skoro poloviční nárůst. Co se týká plnicích stanic, těch bylo v obdobném roce v provozu 34. [15]



Výhody spalování CNG:

- nižší emise
- nižší provozní náklady
- jednoduchá distribuce
- vysoké oktanové číslo

Nevýhody spalování CNG:

- nižší výhřevnost a s tím spojený pokles výkonu motoru
- zmenšení zavazadlového prostoru (v důsledku instalace plynové nádrže)
- doba plnění (v případě stanice pro pomalé plnění)



3 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ PALIVOVÝCH SOUSTAV MOTORŮ NA CNG

Obdobně jako se postupně vyvíjí palivové soustavy běžných vozidel, dochází i k vývoji palivových soustav vozidel na CNG. Ačkoli dnes existuje několik systémů pracujících odlišným způsobem, všechny musí zajistit základní funkce palivové soustavy – dopravit palivo (v tomto případě plyn) z nádrže do spalovacího prostoru a zajistit jeho požadované promísení se vzduchem napříč všemi provozními režimy.

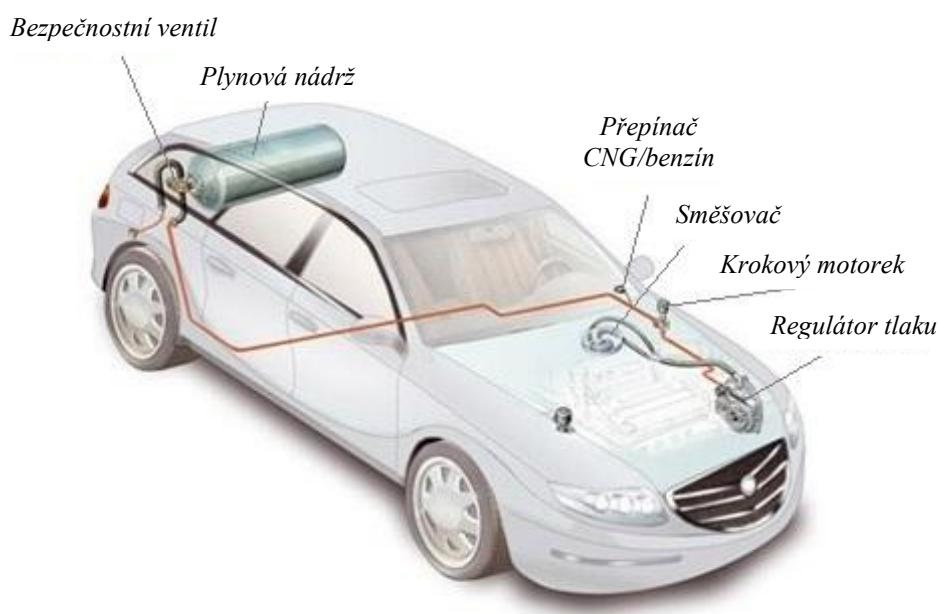
Většina sériově vyráběných vozidel umožňuje provoz na CNG i benzín. Jedná se tedy o automobily vybavené zážehovými motory se samostatnými (případně kombinovanými) palivovými soustavami pro benzín a CNG. Vozidla se vznětovými motory tuto možnost nenabízejí, jejich následný provoz je zajišťován pouze pomocí CNG.

Dle způsobu dopravy paliva lze palivové soustavy rozdělit na systémy:

- se směšovačem plynu
- s vefukováním plynu do sacího potrubí (jedno nebo vícebodové vefukování)
- s přímým vefouknutím plynu do spalovacího prostoru

3.1 PALIVOVÉ SOUSTAVY SE SMĚŠOVAČEM PLYNU

Palivové soustavy se směšovačem plynu (Obr. 6), jako nejstarší z existujících systémů, byly využívány na samém počátku vývoje motorů na CNG. Z jejich stáří také vyplývají jejich výhody a nevýhody. Výhodou je jednoznačně jejich konstrukční jednoduchost a také cena. Bohužel má tento systém celou řadu nevýhod, jako je vyšší spotřeba paliva či horší emise škodlivin ve výfukových plynech v porovnání se systémy modernějšími. Proto se tento systém v dnešní době příliš nepoužívá. [1] [2]



Obr. 6 Palivová soustava se směšovačem plynu [20]



Srdcem tohoto systému je směšovač, lze si jej představit jako jednoduchý karburátor, který je umístěn v sacím potrubí. Ve směšovači dochází k mísení plynu se vzduchem. Požadované množství plynu přiváděného do směšovače je dávkováno pomocí regulátoru tlaku plynu. Směšovač, spolu s ostatními částmi palivových systémů, bude podrobněji popsán v kapitole následující. [1] [2]

3.2 PALIVOVÉ SOUSTAVY S VEFUKOVÁNÍM PLYNU DO SACÍHO POTRUBÍ

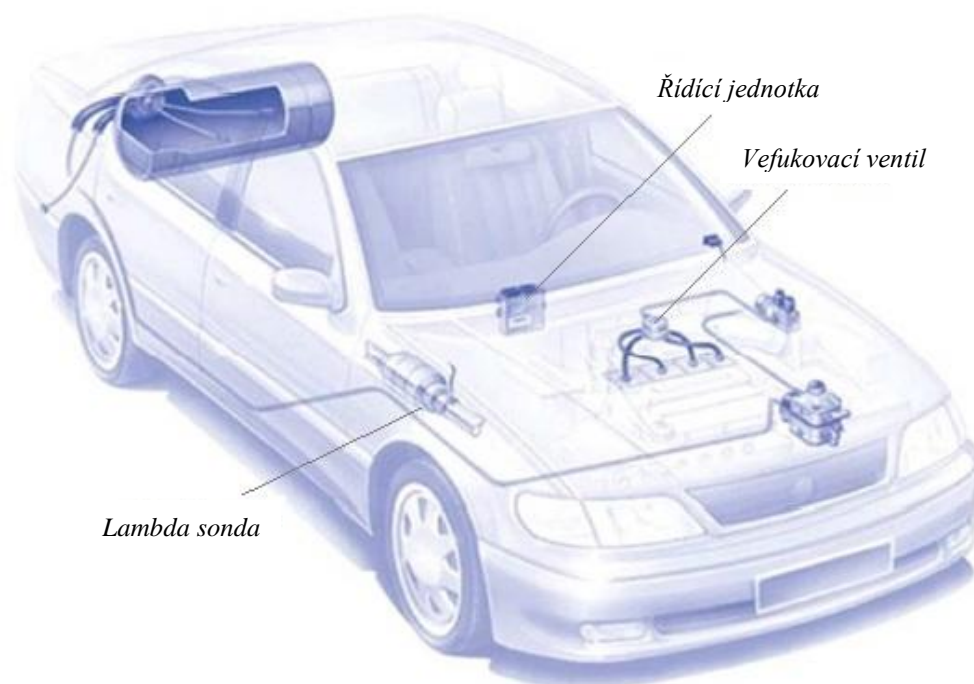
Dalším stupněm ve vývoji palivových soustav jsou systémy využívající vefukování plynu do sacího potrubí. Tyto systémy poskytují lepší složení směsi napříč všemi provozními režimy v porovnání se systémy využívající směšovač.

V současnosti existují palivové soustavy využívající:

- jednobodové vefukování plynu do sacího potrubí
- vícebodové vefukování plynu do sacího potrubí

3.2.1 PALIVOVÉ SOUSTAVY S JEDNOBODOVÝM VEFUKOVÁNÍM PLYNU DO SACÍHO POTRUBÍ

Základní změnou tohoto systému je náhrada směšovače jedním vefukovacím ventilem umístěným v sacím potrubí, který zajišťuje dodávku paliva pro všechny válce motoru. Další odlišností je řízení dávkování plynu, které je realizováno pomocí elektronické řídicí jednotky.



Obr. 7 Palivová soustava s jednobodovým vefukem plynu do sacího potrubí [10]

Důležitou roli v tomto systému hraje také lambda sonda umístěná ve výfuku vozidla, která předává signál o složení výfukových plynů řídicí jednotce. Řídicí jednotka na základě tohoto signálu a provozních podmínek automobilu ovládá množství vefukovaného plynu do sacího potrubí. Dané množství vefukovaného plynu je regulováno dobou otevření vefukovacího

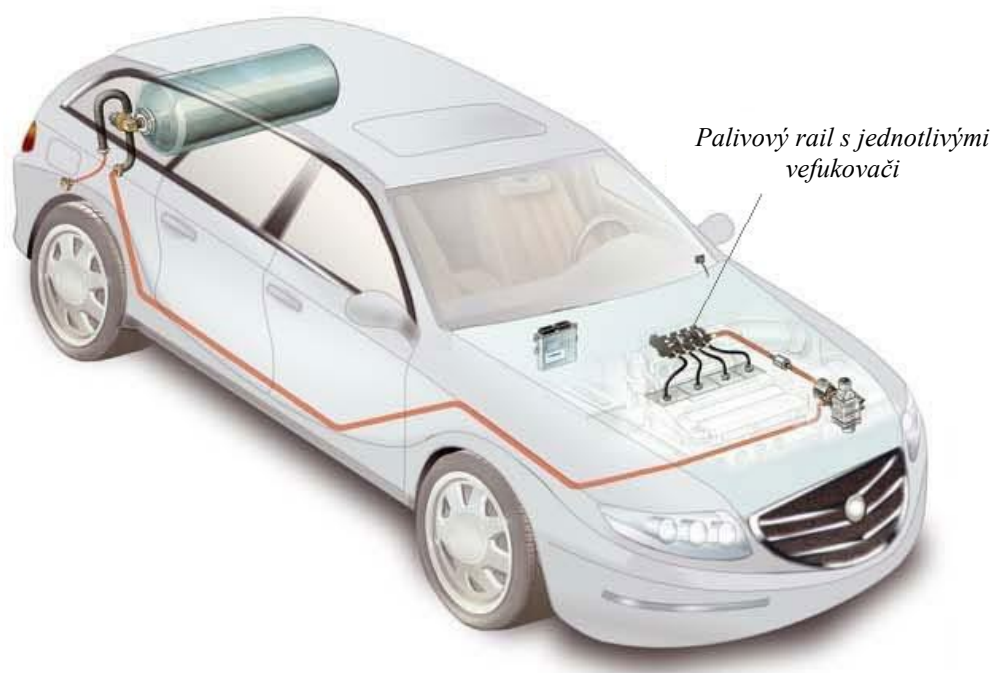


ventilu. Snahou této procedury je provozovat motor v režimu stechiometrické směsi ($\lambda=1$). [1] [2]

K výhodám tohoto systému patří zejména lepší možnost řízení složení směsi. Díky tomu je možné snížit spotřebu a emise škodlivin z výfukových plynů. Použití systému s jednobodovým vefukováním plynu do sacího potrubí skýtá i několik nevýhod. Tou hlavní je nerovnoměrné rozdělení směsi mezi jednotlivé válce motoru z důvodu vefukování plynu na začátku sacího potrubí jediným vefukovačem. K nevýhodám také patří nebezpečí tzv. zpětného zášlehu (vznícení směsi v sacím potrubí). [1] [2]

3.2.2 PALIVOVÉ SOUSTAVY S VÍCEBODOVÝM VEFUKOVÁNÍM PLYNU DO SACÍHO POTRUBÍ

Oproti systémům s jednobodovým vefukem tyto soustavy používají samostatný vefukovací ventil pro každý válec. Snahou vícebodového vefukování je optimální složení směsi pro každý válec.



Obr. 8 Palivová soustava s vícebodovým vefukem paliva do sacího potrubí [21]

Výhodou vícebodového vefukování je regulace množství vefukovaného plynu samostatně pro jednotlivé válce. Díky umístění vefukovačů v sacím potrubí nedaleko od sacích ventilů dochází k lepšímu řízení složení směsi, čímž lze uspořit ještě více paliva a snížit emise škodlivin z výfukových plynů. [1] [2]

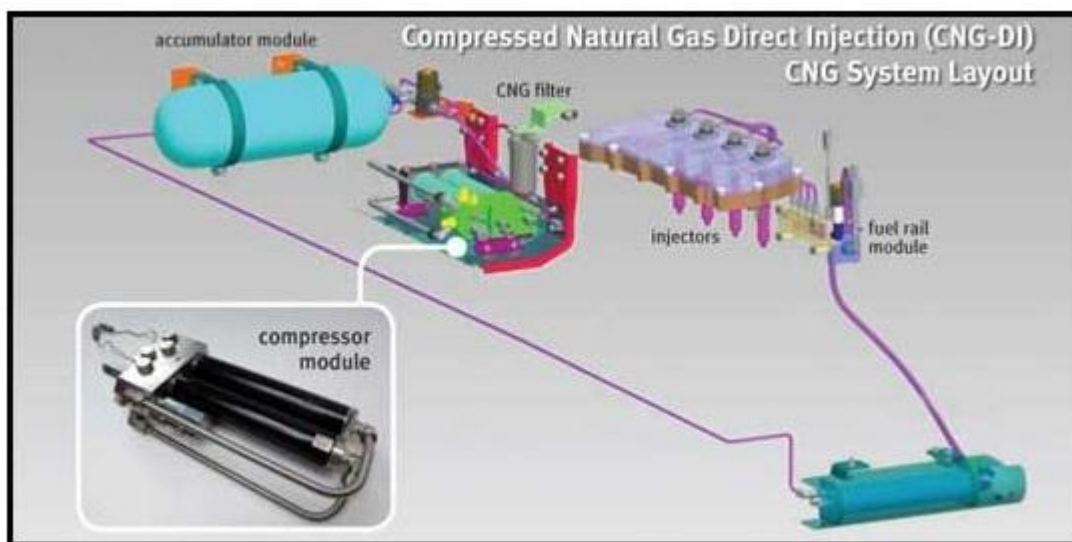
Ačkoli je tento systém složitější a tím samozřejmě nákladnější, patří v současnosti k nejpoužívanějším systémům palivových soustav. Je využíván ve většině vyráběných vozidel, které ke svému pohonu využívají CNG. Příkladem takových automobilů mohou být VW Passat 1.4 EcoFuel TSI CNG či Mercedes – Benz E – Class CNG.



3.3 PALIVOVÉ SOUSTAVY S PŘÍMÝM VEFOUKNUTÍM PLYNU DO SPALOVACÍHO PROSTORU

Nejnovějším trendem ve vývoji palivových soustav jsou systémy využívající přímý vefuk CNG do spalovacího prostoru motoru. Toto řešení v současnosti představuje nejnáročnější systém jak po stránce konstrukční, tak i po stránce technologické. Výjimečností tohoto systému je možnost spalování CNG i v motorech vznětových, což umožňuje právě jenom palivová soustava s přímým vefouknutím CNG do válce motoru. [8] [22]

Díky vyšší zápalné teplotě CNG (přibližně 580°C) v porovnání s naftou (120°C) nastává problém se zapálením směsi jejím pouhým stlačením ve spalovacím prostoru. Je proto nutné zápal směsi iniciovat v místě o vyšší teplotě. K tomuto procesu slouží keramická destička, která po umístění ve spalovacím prostoru motoru udržuje teplotu dostatečnou pro spolehlivé vznícení směsi. Tato teplota se pohybuje v rozmezí 1200 - 1300°C. [8] [22]



Obr. 9 Palivová soustava s přímým vefukem CNG do spalovacího prostoru [22]

Další odlišností v porovnání s předchozími systémy je použití kompresoru, který vytváří potřebný tlak k překonání tlaku ve spalovacím prostoru. Z tohoto důvodu je použití kompresoru nutností. Jelikož je CNG relativně dobře stlačitelné, nastává problém s regulací tlaku v zásobníku paliva, díky čemuž není za provozu možné plynule měnit vefukovací tlak paliva v průběhu spalovacího cyklu. Tento problém je eliminován použitím vefukovačů s proměnným zdvihem, kdy změna zdvihu vefukovače umožňuje řídit množství vefukovaného paliva. [8] [22]

Hlavní předností tohoto systému je velice přesné řízení dodávky paliva do spalovacího prostoru. Díky tomu lze zvýšit účinnost motoru o 25% v porovnání s motory pracujícími v Ottově cyklu a snížit množství emisí o 75% v porovnání s konvenčními vznětovými motory. [8]

Navzdory tomu není v dnešní době tento systém mnoho rozšířen a to zejména díky své technologické náročnosti. Dalším problémem je nízká životnost keramických destiček iniciujících vznícení paliva. [8]



4 KONSTRUKČNÍ PRVKY PALIVOVÝCH SOUSTAV MOTORŮ NA CNG

Každý z výše uvedených systému by se neobešel bez několika základních prvků nutných pro správnou a bezpečnou funkci celé palivové soustavy. V textu níže budou tyto konstrukční prvky podrobněji popsány.

4.1 PLNICÍ VENTIL

Propojuje tlakové nádoby vozidel s plnicími systémy čerpacích stanic. Plnicí ventil bývá umístěn u čerpacího otvoru konvečních paliv nebo přímo v motorovém prostoru automobilu (zejména u vozidel po přestavbě). [2]

4.2 TLAKOVÁ NÁDRŽ

Palivové nádrže (Obr. 10) na CNG jsou konstruovány jako tlakové, z čehož vyplývá jejich robustnější tvar a tím náročnější prostorové požadavky. Obvyklý objem tlakových nádrží na CNG se pohybuje v rozmezí od 70 – 100 l a CNG je v nich uchováváno pod tlakem 20 MPa. [2] [23]



Obr. 10 Palivová nádrž na CNG [24]

U vozidel po přestavbě je umístění tlakových nádrží z pravidla v zavazadlovém prostoru, u sériově vyráběných automobilů s pohonem na CNG se palivové nádrže umísťují i pod podlahu vozidla. Nádoby jsou nejčastěji vyráběny ocelové, alternativou jsou nádoby z hliníkových a kompozitních materiálů. [2] [23]

4.3 BEZPEČNOSTNÍ VENTIL

Bezpečnostní ventil, označován také jako multiventil, plní funkci provozní a bezpečnostní. Zajišťuje, že CNG proudí z tlakové nádrže do motoru pouze za jeho chodu. Z hlediska bezpečnosti celého systému multiventil přerušuje dodávku CNG v případě náhlého poklesu tlaku v soustavě, v případě přetlaku vypustí plyn do okolí. Samozřejmostí je i tepelná pojistka, která v případě požáru vypustí plyn z tlakové nádoby. Bezpečnostní ventil je ovládán elektronicky a musí jím být vybavena každá tlaková nádrž. [2]



4.4 REGULÁTOR TLAKU PLYNU

Hlavní funkcí regulátoru tlaku plynu (Obr. 11) je redukce plynu přicházejícího z nádrže na pracovní tlak nízkotlaké části soustavy. Redukce tlaku plynu probíhá ve dvou stupních z důvodu zajištění konstantního tlaku za regulátorem i při změně tlaku v palivové nádrži. [2]



Obr. 11 Regulátor tlaku plynu [25]

Regulátor tlaku plynu je umístěn v motorovém prostoru a je napojen na chladicí okruh automobilu, z kterého odebírá teplo jako prevenci proti jeho zamrznutí, ke kterému by mohlo docházet z důvodu expanze plynu při redukcí tlaku. V systémech využívajících směšovač regulátor také řídí dodávku požadovaného množství plynu do směšovače. [2]

4.5 SMĚŠOVAČ

Jak je již zmíněno výše, směšovač si lze představit jako jednoduchý karburátor. Základní funkcí směšovače je co možná nejlépe promístit plyn se vzduchem. Je umístěn v sacím potrubí. Směšovač je tvořen jednoduchým, většinou hliníkovým odlitkem, který má ve svém středu otvor, po jehož obvodu jsou další malé otvory, kterými je přiváděn plyn. Ten je poté strháván proudem nasávaného vzduchu, čímž dochází k tvorbě směsi. [2] [23]



Obr. 12 Směšovač [26]



4.6 PALIVOVÁ LIŠTA S ELEKTRONICKÝMI VEFUKOVAČI

U systémů nevyužívajících směšovač je tato součást nahrazena palivovou lištou s elektronickými vefukovači (u jednobodového vefukování do sacího potrubí je použit pouze jeden vefukovač). Palivová lišta propojuje regulátor tlaku s jednotlivými vefukovači a akumuluje dostatečné množství plynu potřebné pro vefouknutí do všech válců.

Elektronické vefukovače pomocí signálů od řídicí jednotky dávkuje požadované množství plynu a vefukují jej do sacího potrubí (v případě vefukování do sání) nebo přímo do spalovacího prostoru (v případě přímého vefukování).



Obr. 13 Palivová lišta s elektronickými vefukovači [27]



5 NÁVRH VEFUKOVÁNÍ CNG DO SÁNÍ

Před samotným návrhem vefukování CNG do sacího potrubí je nutné přiblížit si pohonnou jednotku a konkrétní dílec, který je předmětem úpravy, kterou se zabývá tato diplomová práce. Snahou je navrhnout řešení vefukování CNG do sacího potrubí motoru VW 1,4 TSI.

5.1 POPIS MOTORU VW 1,4 TSI

První koncernové motory TSI (Twincharged Stratified Injection) spatřily světlo světa již v roce 2005. Tyto zážehové řadové čtyřválcové přinesly zajímavé řešení, jak již plný anglický název napovídá, dvojitého přeplňování. Tento dvojitý systém plnění válců vzduchem je zajišťován kombinací mechanicky poháněného Rootsova kompresoru spolu s turbodmychadlem. Díky tomu motor dobře pracuje ve všech jízdních režimech. Pokud motor pracuje v nízkých otáčkách, slouží k jeho plnění kompresor, který takto zásobuje válce vzduchem až do svého odpojení při otáčkách 2400 min^{-1} . Poté přebírá plnicí funkci kompresoru turbodmychadlo. Kompresor a turbodmychadlo jsou propojeny sériově. Prvním automobilem využívajícím tuto specifikaci motoru TSI byl Volkswagen Golf GT [11] [12]



Obr. 14 Motor VW 1,4 TSI [12]

Od roku 2008 se pod označením TSI (Turbocharged Stratified Injection) začínají objevovat motory odlišné konstrukce. Dvojitě přeplňování je zde nahrazeno jediným kompaktním turbodmychadlem, které se vyznačuje rychlou reakcí na pokyny řidiče. Tyto motory se také vyznačují slušnou pružností, maximální točivý moment je možné čerpat v rozmezí otáček $1500 - 3500 \text{ min}^{-1}$. Do podvědomí motoristů tyto motory vstoupily především díky použití rozvodových řetězů. Tento motor je ekonomicky výhodnější alternativou k technologicky náročným motorům s dvojitým přeplňováním. [11] [12]

Poté, co automobilka Volkswagen představila svou modulární podvozkovou platformu MQB (Modularer QuerBaukasten), došlo také k evoluci stávajících motorů TSI. Nová generace těchto motorů byla kompletně přepracována a díky modulární koncepci nabízí širokou variabilitu jednotlivých verzí. K největším rozdílům patří stálá absence kompresoru (motor je tedy přeplňován pouze turbodmychadlem), náhrada rozvodového řetězu za ozubený řemen se skelnými vlákny a redukce hmotnosti až o 22 kilogramů. Razantní snížení hmotnosti je



dosáženo změnou materiálu bloku motoru (nyní je používán hliníkový blok) a především novou konstrukcí pístů, ojníc i klikové hřídele. Samozřejmostí je čtyřventilová technika na válec s variabilním časováním ventilů. Prvním vozidlem využívajícím novou koncernovou techniku bylo Audi A3 v roce 2012. [12]

5.1.1 POPIS SACÍHO TRAKTU MOTORU VW 1,4 TSI

Sací trakt koncernového motoru TSI má klasické uspořádání přeplňovaných motorů. Nasávaný vzduch vstupuje do vzduchového filtru, aby postupně prošel přes turbodmychadlo, jednotku škrticí klapky, sací potrubí, sací kanály v hlavě válců a skončil ve válci motoru.

Jelikož tyto motory využívají přímého vstřiku paliva do válců, bylo po konzultaci s vedoucím diplomové práce zvoleno vícebodové vefukování CNG do sacího potrubí (Obr. 15). Tímto bude zajištěn provoz automobilu nejen na CNG, ale také na stávající palivo. Dalším důvodem je dobrá regulace vefukování CNG při změnách zatížení motoru.



Obr. 15 Sací potrubí motoru VW 1,4 TSI

5.2 TVORBA 3D MODELU SACÍHO POTRUBÍ

Prvním krokem v návrhu vefukování CNG do sacího potrubí je tvorba 3D modelu samotného sání. Pro potřeby CFD analýzy programem STAR-CCM+ je nutné vytvořit model objemu proudícího média tímto sacím potrubím, který se obecně nazývá modelem „vzduchu“ sacího potrubí. Jelikož sací potrubí, které bylo k dispozici, nemohlo být znehodnoceno, odpadla možnost tvorby velice přesného modelu pomocí 3D skeneru ATOS I, který je na Ústavu automobilního a dopravního inženýrství k dispozici a to z důvodu nemožnosti vyjmutí zhotoveného odlitku ze sacího potrubí.

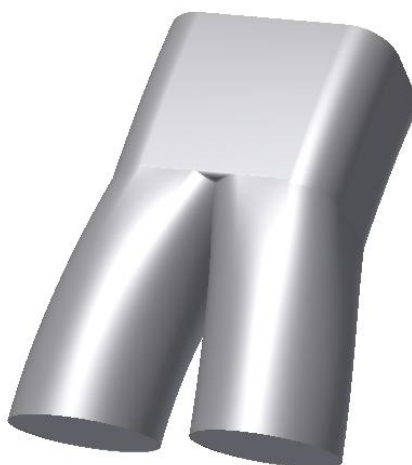
Byla tedy zvolena varianta tvorby přibližného modelu „vzduchu“ sacího potrubí s důrazem na přesné rozměry na vstupu a výstupu vzduchu ze sání. Všechny potřebné rozměry byly pečlivě změřeny přímo na dané součásti.

Samotný 3D model „vzduchu“ sacího potrubí byl vytvořen pomocí programu Autodesk Inventor Professional 2012.



Obr. 16 Základní model "vzduchu" sacího potrubí

Na Obr. 16 je základní model sacího potrubí. Pro potřeby simulace mísení CNG se vzduchem bylo nutné vyřešit ustálení výsledného proudění. Toho lze dosáhnout delší trajektorií proudění směsi CNG se vzduchem. Proto bylo nutné vytvořit i model sacího kanálu hlavy válců.



Obr. 17 Model sacího kanálu

Sací kanál hlavy válců byl opět modelován na základě reálného kanálu s důrazem na přesné rozměry výstupu vzduchu z kanálu. Výsledný model celé soustavy je zobrazen na Obr. 18.



Obr. 18 Výsledný model sací soustavy

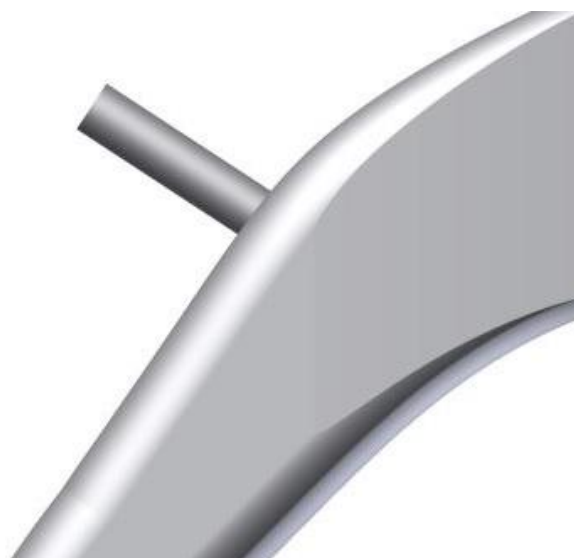
5.3 VARIANTY VEFUKOVÁNÍ CNG DO SACÍHO POTRUBÍ

Jak již bylo zmíněno výše, daný motor využívá přímého vstřikování benzínu do válce. Proto pro variantu vefukování CNG do sacího potrubí nebylo z čeho vycházet a celý návrh tak probíhal od prvopočátků.

První a zásadní otázkou byla volba vefukovačů. Z důvodu porovnatelnosti následných analýz mísení CNG se vzduchem bylo rozhodnuto, že skrz variantami bude použit jeden typ vefukovačů. Volba padla na vefukovače firmy Bosch o maximálním vefukovacím tlaku 9,3 barů a průměru vefukovací trysky 6,5 mm.

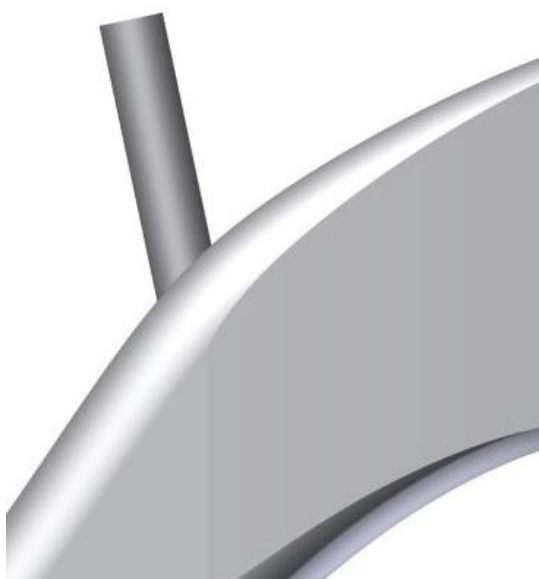
Následně bylo nutné vyřešit jejich umístění. Pro tyto potřeby byly navrženy tři varianty umístění vefukovačů. Ve všech případech jsou vefukovače shodně umístěny v ose jednotlivých větví sacího potrubí.

Na Obr. 19 je zobrazena Varianta A, jejíž hlavní koncepční ideou bylo, aby proud vefukovaného CNG mířil proti proudu vzduchu, čímž by mělo docházet ke značnému rozvíření směsi s následným ideálním promísením obou frakcí.



Obr. 19 Detail varianty A

V případě Varianty B (Obr. 20) není vefukovač tak ostře skloněn jako v předchozím případě. Díky tomu by nemělo po vefouknutí CNG do sacího potrubí docházet k tak intenzivnímu víření, čímž by mělo být CNG lépe strháváno proudícím vzduchem.



Obr. 20 Detail varianty B

U Varianty C (Obr. 21) je vefukovač umístěn tak, aby proud vefukovaného CNG měl shodný směr s proudícím vzduchem. Díky tomu by se měla zvýšit rychlost proudění výsledné směsi.



Obr. 21 Detail varianty C

Každá z uvedených možností umístění vefukovačů má své výhody i nevýhody. Která z nich je tou nejvýhodnější, by se mělo prokázat v následných CFD analýzách.

Pro zjednodušení výpočtů bude CNG vefukováno pouze do jedné větve sacího potrubí.



6 CFD ANALÝZA MÍSENÍ CNG SE VZDUCHEM

K CFD (Computational Fluid Dynamics) analýzám byl použit software STAR-CCM+ od společnosti CD-Adapco. Jelikož tento program využívá základních fyzikálních zákonů mechaniky tekutin, je pro správné pochopení jeho funkce nutná znalost teorie proudění tekutin.

6.1 ZÁKLADNÍ FYZIKÁLNÍ ZÁKONY PROUDĚNÍ TEKUTIN

Tekutiny jsou takové látky, které nejsou schopny odolat působení smykového napětí a začínají téct. Rozdělujeme je na látky kapalné a plynné. Jelikož se tato práce zabývá mísením dvou plynných složek, proudění kapalin nás v této chvíli nebude zajímat. [5]

Plyn je látka, ve které jsou vzdálenosti mezi jednotlivými molekulami tak velké, že přitažlivé síly mezi jednotlivými molekulami nedokážou udržet svůj tvar ani objem. Rozlišujeme plyny ideální a reálné. [5]

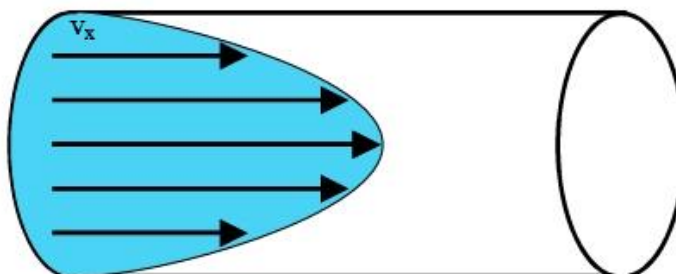
Ideální plyn chápeme jako soustavu dokonale elastických hmotných bodů, které mají nulový objem, nepůsobí na sebe přitažlivými silami a jsou neustále v pohybu. Fyzikální vlastnosti ideálního plynu jsou konstantní, neexistuje v něm vnitřní tření a je dokonale stlačitelný. [5]

Reálný plyn nemá konstantní fyzikální vlastnosti. Molekuly reálného plynu zauímají určitý objem, proto nemohou být dokonale stlačeny. Při pohybu molekul, které na sebe působí přitažlivými silami, vzniká mezi nimi tečné napětí. [5]

6.1.1 PROUDĚNÍ

Proudění je pohyb tekutiny, při kterém se částice tekutiny pohybují svým neuspořádaným pohybem za současného posouvání se ve směru proudění. Tekutina vždy proudí z místa o vyšším tlaku do místa o tlaku nižším, je tedy nutná existence tlakového spádu ve směru proudu. Rozlišujeme proudění laminární a turbulentní. [6]

Laminární proudění si lze představit jako pohyb viskózní tekutiny, při kterém nevznikají žádné turbulence ani příčné proudění. Tekutina proudí ve vzájemně rovnoběžných vrstvách, nedochází k přechodu částic mezi jednotlivými vrstvami. Rychlost proudění se pohybuje od nuly na stěnách až po maximální hodnotu ve středu průřezu. [6]

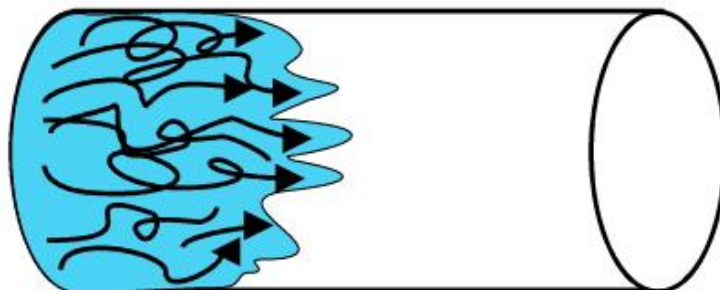


Obr. 22 Laminární proudění [28]

Turbulentní proudění si lze představit jako pohyb viskózní tekutiny, při kterém se proudnice, tvořené jednotlivými částicemi proudu, vzájemně promíchávají. [6]



Částice se pohybují ve směru proudění a navíc konají vlastní složitý pohyb, při kterém dochází k tvoření vírů. Jelikož se rychlosti jednotlivých částic mění v čase, nejedná se o stacionární proudění. [6]



Obr. 23 Turbulentní proudění [28]

6.1.2 ROVNICE KONTINUITY

Rovnice kontinuity vyjadřuje zákon zachování hmotnosti tekutin. Pro jednorozměrné proudění je popsána rovnicí

$$\frac{\partial}{\partial s} \cdot (\rho \cdot S \cdot v) + \frac{\partial}{\partial t} \cdot (\rho \cdot S) = 0, \quad (1)$$

kde $\frac{\partial}{\partial s} \cdot (\rho \cdot S \cdot v)$ vyjadřuje konvektivní změnu hmotnosti a $\frac{\partial}{\partial t} \cdot (\rho \cdot S)$ vyjadřuje lokální změnu hmotnosti. [6]

Při ustáleném proudění je lokální změna hmotnosti rovna nule a rovnici tak můžeme zjednodušit na tvar rovnice (2), z které vyplývá, že hmotnostní tok v každém průřezu potrubí je konstantní

$$\rho \cdot S \cdot v = Q_m = konst. \quad (2)$$

6.1.3 EULEROVA ROVNICE

Eulerova rovnice vychází z druhého Newtonova zákona. Vyjadřuje rovnováhu sil objemových, které působí na tekutinu z vnějšku, tlakových, které působí v tekutině a setrvačných od vlastního pohybu částic tekutiny. [9]

Ve vektorovém tvaru lze Eulerovu rovnici definovat jako

$$\vec{A} - \frac{1}{\rho} \cdot grad(p) = \vec{v} \cdot grad(\vec{v}) + \frac{\partial \vec{v}}{\partial t}, \quad (3)$$

kde \vec{A} je objemové zrychlení, $\frac{1}{\rho} \cdot grad(p)$ je tlakové zrychlení, $\vec{v} \cdot grad(\vec{v})$ je konvektivní zrychlení a $\frac{\partial \vec{v}}{\partial t}$ je lokální zrychlení. [9]

6.1.4 BERNOULLIHO ROVNICE

Bernoulliho rovnice vyjadřuje zákon zachování mechanické energie pro ustálené proudění ideální kapaliny. [6]



Je dána kinetickou energií, změnou tlaku v závislosti na hustotě a potenciální energií. Je definována ve tvaru

$$\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} + g \cdot h = konst, \quad (4)$$

kde $\frac{v^2}{2}$ je energie kinetická, $\frac{p}{\rho}$ je energie tlaková a $g \cdot h$ je energie potenciální. [6]

6.2 NASTAVENÍ FYZIKÁLNÍHO MODELU, DEFINICE OKRAJOVÝCH PODMÍNEK

Po úspěšném importu a kontrole geometrie je nutné zvolit si vhodný fyzikální model pro danou úlohu. Nastavení fyzikálního modelu úlohy se provádí v záložce *Continua* přidáním položky *Physics Continuum*. Přehled kompletního nastavení fyzikálního modelu je uveden v Tab. 6.

Tab. 6 Zvolený fyzikální model

Physics models	
Space	Three Dimensional
Motion	Stationary
Time	Steady
Material	Multi Component Gas
Reaction Regime	Non-Reacting
Flow	Coupled Flow
Equation of State	Ideal Gas
Viscous Regime	Turbulent
Reynolds-Averaged Turbulence	K-Epsilon Turbulence

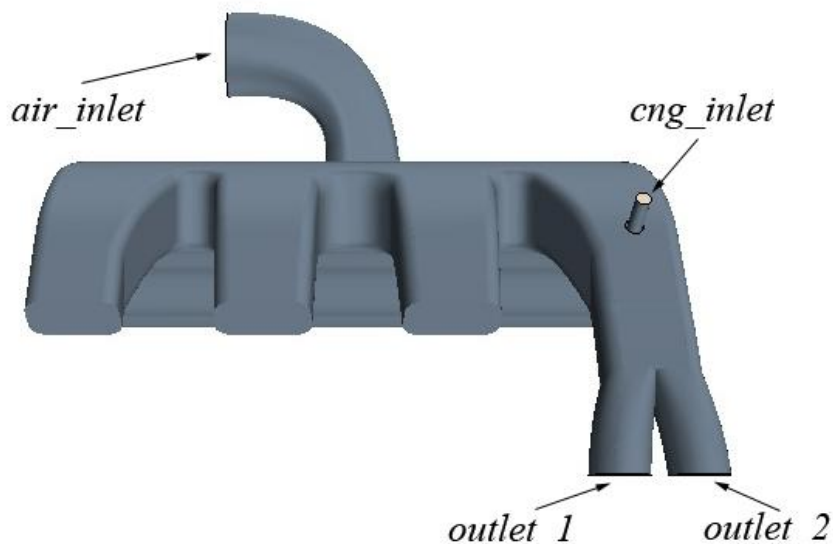
Z Tab. 6 jasně vyplývá, že se jedná o trojrozměrnou, stacionární úlohu nezávislou na čase. Důležitá je položka *Material*, která udává, že v úloze vystupuje více plynných složek – v tomto případě vzduch a metan, jako hlavní složka CNG. Co se týká jejich vlastností, byly ponechány ty přednastavené programem STAR-CCM+ (Tab. 7).

Tab. 7 Vlastnosti plynných složek

	Dynamická viskozita	Molární hmotnost	Měrná tepelná kapacita	Měrná tepelná vodivost
Vzduch	0,85508 E-5 Pa/s	28,9664 kg/kmol	1003,62 J/kgK	0,0260305 W/mK
Metan	1,11906 E-5 Pa/s	16,04 kg/kmol	2240,067 J/kgK	0,0348195 W/mK



Abychom mohli definovat okrajové podmínky na vstupu a výstupu jednotlivých plynných složek, je nejprve nutné rozdělit si importovanou geometrii. K tomu slouží příkaz *Split By Patch*, který rozdělí danou geometrii na jednotlivé plochy, z nichž si vyčleníme ty, na kterých je nutné definovat okrajové podmínky. Takto byla importovaná geometrie rozdělena na šest základních částí – *air_inlet*, *cng_inlet*, *outlet_1,2*, *injector* a *manifold*.



Obr. 24 Vybrané plochy k definici okrajových podmínek

Na Obr. 24 jsou vyznačeny plochy, na kterých je nutné definovat okrajové podmínky. Ty se nastavují v záložce *Boundaries*, která se nachází v záložce *Regions*. Okrajové podmínky na jednotlivých plochách jsou uvedeny v následujících tabulkách.

Tab. 8 Okrajové podmínky pro *air_inlet*

Okrajová podmínka	Mass Flow Inlet	
Hodnota okrajových podmínek	Mass Flow	0,172 kg/s
	Species Mass Fraction	Air 1,0 Metan 0,0

Tab. 9 Okrajové podmínky pro *cng_inlet*

Okrajová podmínka	Mass Flow Inlet	
Hodnota okrajových podmínek	Mass Flow	0,01 kg/s
	Species Mass Fraction	Air 0,0 Metan 1,0
	Static Pressure	5 bar



Tab. 10 Okrajové podmínky pro outlet_1,2

Okrajová podmínka	Pressure Outlet	
Hodnota okrajových podmínek	Species Mass Fraction	Air 1,0 Metan 0,0

Dále byl v záložce *Reference Values* nastaven referenční tlak na hodnotu 2 barů, což simuluje přeplňování motoru. Posledním bodem je nastavení počátečních podmínek. Ty se nastavují v záložce *Initial Conditions*. Byla zvolena počáteční rychlost -100 m/s v ose y a hmotnostní podíl jednotlivých frakcí v poměru vzduch 1,0 : metan 0,0.

Veškeré ostatní nastavení bylo ponecháno přednastavené programem STAR-CCM+.

Nastavení uvedené výše, bylo použito u všech řešených variant.

6.3 TVORBA VÝPOČETNÍ SÍTĚ

Po nastavení fyzikálního modelu a definici okrajových podmínek výpočtu je dalším krokem tvorba výpočetní sítě. Nejprve je nutné zvolit si požadované vlastnosti sítě. Nastavení vlastností sítě se provádí v záložce *Continua* přidáním položky *Mesh Continuum*.

Tab. 11 Zvolené vlastnosti sítě

Mesh models	
Surface Mesh	Surface Remesher
	Surface Wrapper
Volume Mesh	Polyhedral Mesher
Optional Meshing Models	Prism Layer Mesher

Z Tab. 11 vyplývá, že tvorba sítě probíhá ve dvou fázích. Nejprve je nutné vytvořit síť povrchovou, poté síť objemovou. Povrchová síť je tvořena pomocí nástrojů *Surface Remesher* a *Surface Wrapper*, které na povrchu modelu vytvoří trojúhelníkovou síť, která vymezuje hranice povrchu. Objemová síť je tvořena pomocí nástroje *Polyhedral Mesher*, který v celém objemu modelu vytvoří polyhedrální síť. Tato síť vychází ze sítě povrchové a díky svým vlastnostem, tvoří pětikrát méně buněk než síť tetrahedrální, snižuje nároky na výpočetní výkon počítače. *Prism Layer Mesher* rozdělí buňky na povrchu objemové sítě do několika tenkých vrstev, díky čemuž dosáhneme lepších výsledků.

Po volbě vlastností sítě následuje volba základních parametrů sítě. Nejdůležitější je definice základní velikosti buňky, od které se odvíjejí i další parametry sítě. Je nutné ji volit s ohledem na rozměry daného modelu, příliš velké buňky znehodnocují model, příliš malé zase zbytečně prodlužují výpočet. Byla zvolena základní velikost buňky 5 mm. Přehled základních parametrů sítě je uveden v Tab. 12.



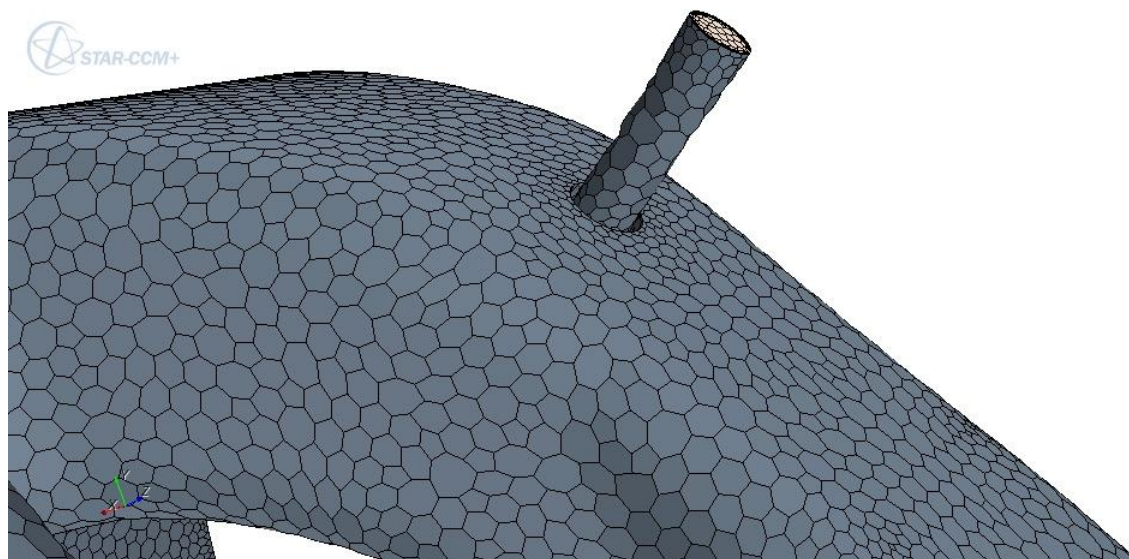
Tab. 12 Základní parametry sítě

Reference Values	
Base Size	5 mm
Number of Prism Layers	5
Prism Layer Stretching	1,3
Relative Minimum Surface Size	20%

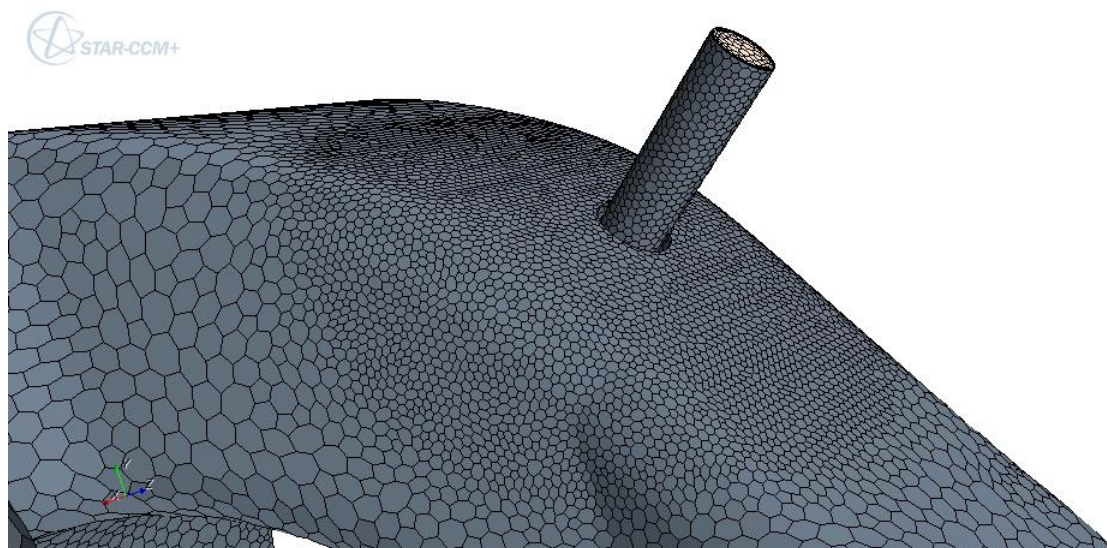
Na Obr. 25 je zobrazen detail objemové sítě vytvořené na základě výše uvedeného nastavení. Lze si povšimnout, že geometrie vefukovače je značně znehodnocena. Toto nastalo právě z nevhodně zvolené hodnoty základní velikosti buňky pro tuto oblast, která má v porovnání se zbytkem modelu mnohem menší rozměry. Bylo tedy nutné provést lokální zjemnění sítě v této oblasti. Nejprve je nutné vytvořit pomocný objem, pro který bude zjemnění nastavováno. Nový pomocný objem se vytváří v záložce *Volume Shapes*. Byl zvolen tvar koule o průměru 30 mm. V této oblasti byla nastavena velikost buňky na hodnotu 1 mm. Zjemnění sítě je zobrazeno na Obr. 26.

Síť byla zjemněna také v okolí hran a to na hodnotu 15% základní velikosti buňky sítě.

Nastavení sítě uvedené výše, bylo použito u všech řešených variant.



Obr. 25 Detail objemové sítě

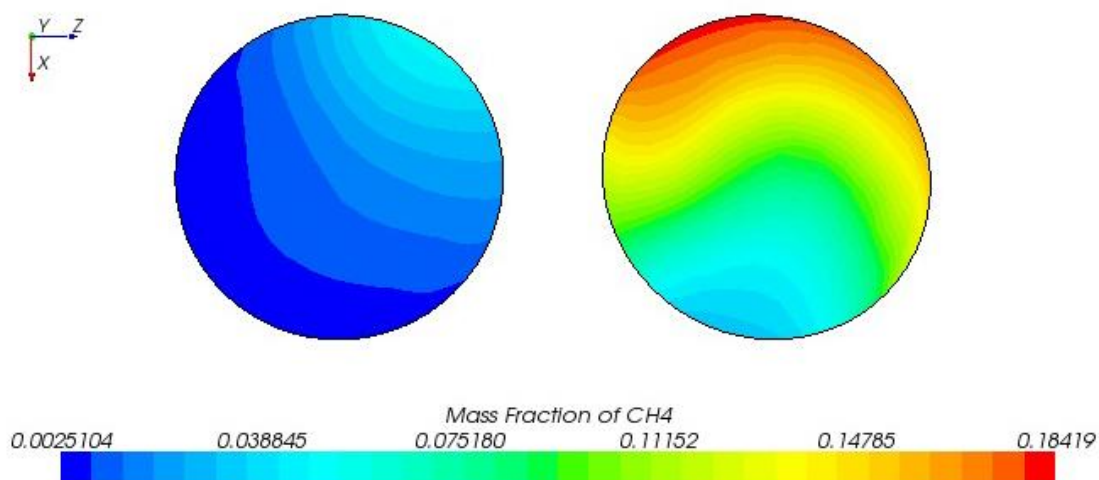


Obr. 26 Detail objemové sítě po zjemnění

6.4 VÝSLEDKY ANALÝZY

Z důvodu porovnatelnosti výsledků jednotlivých analýz, bylo u všech tří variant zvoleno stejné nastavení fyzikálního modelu, okrajových podmínek a výpočetní sítě, jak již je uvedeno výše. Prvním a nejdůležitějším sledovaným kritériem je hmotnostní podíl metanu na výstupu ze sacích kanálů, tedy na plochách *outlet_1* a *outlet_2*. Dále je na stejných plochách sledována rychlost výsledného proudění. Pro lepší představu proudění metanu po jeho vefouknutí do sacího potrubí, byly vytvořeny iso plochy hmotnostního podílu metanu.

6.4.1 VARIANTA A

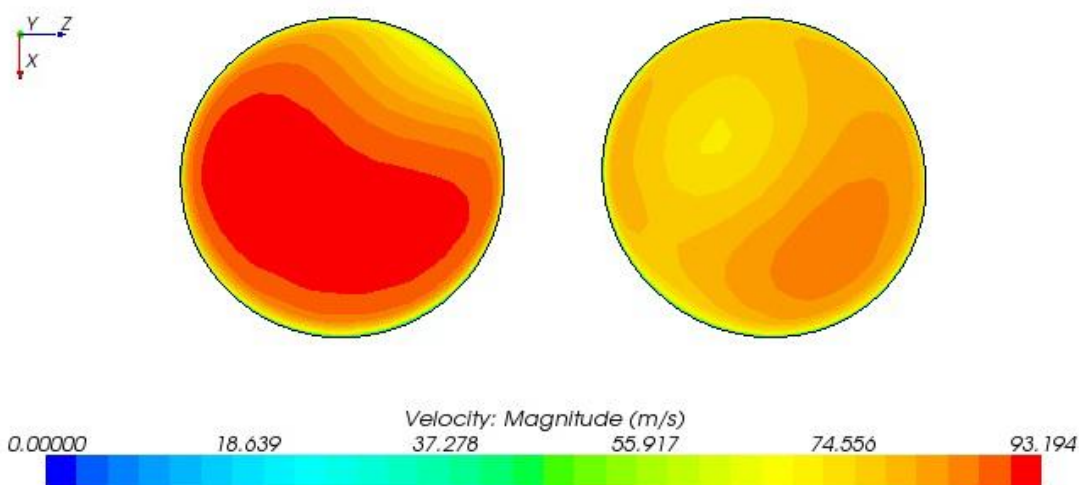


Obr. 27 Hmotnostní podíl metanu na výstupech ze sacích kanálů – Varianta A

Z Obr. 27 je zřejmé, že koncentrace metanu v sacích kanálech není shodná, což je způsobeno prouděním nasávaného vzduchu, který před vefouknutím metanu mění směr svého pohybu. Díky tomu má proud vzduchu na pravé straně sacího potrubí vyšší rychlost a strhává tím



značné množství metanu. Je také patrné, že nejvyšší koncentrace metanu je u horní stěny pravého sacího kanálu.



Obr. 28 Rychlost proudění výsledné směsi na výstupech ze sacích kanálů – Varianta A

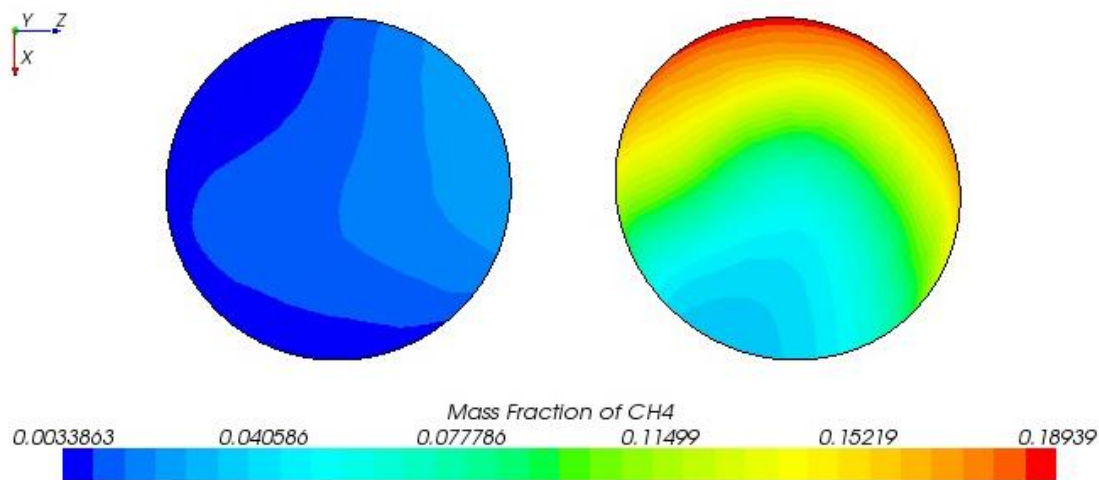
Na Obr. 28 je zobrazena rychlost výsledného proudění. Pokud si tento obrázek důkladně prohlédneme a porovnáme jej s obrázkem předchozím, zjistíme, že rychlost proudění nasávané směsi je nejvyšší v místě s nejnižší koncentrací metanu. Toto je způsobeno vefukováním CNG proti proudu nasávaného vzduchu. Oproti původnímu předpokladu vzniká příliš velké víření, které zpomaluje proudění směsi.



Obr. 29 Vizualizace proudění vefukovaného metanu – Varianta A

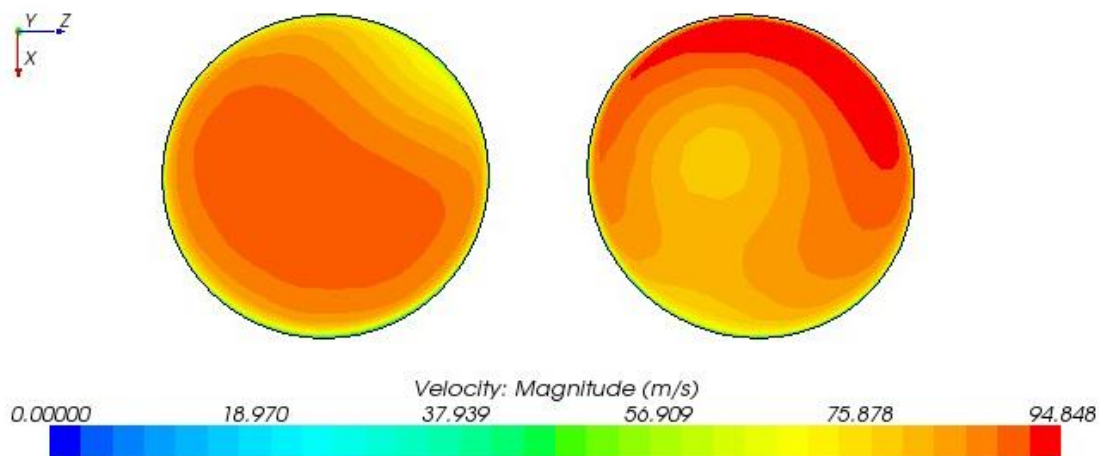


6.4.2 VARIANTA B



Obr. 30 Hmotnostní podíl metanu na výstupech ze sacích kanálů – Varianta B

Dle Obr. 30 nejsou patrné velké změny v koncentraci metanu v porovnání s předchozí variantou. Znovu není hmotnostní podíl metanu rovnoměrně rozložen mezi oba sací kanály, což je způsobeno obdobnými okolnostmi jako v případě Varianty A, jelikož i zde je vefukovač umístěn tak, že přivádí proud CNG proti proudu vzduchu, ačkoli jeho sklon je mírnější.



Obr. 31 Rychlost proudění výsledné směsi na výstupech ze sacích kanálů – Varianta B

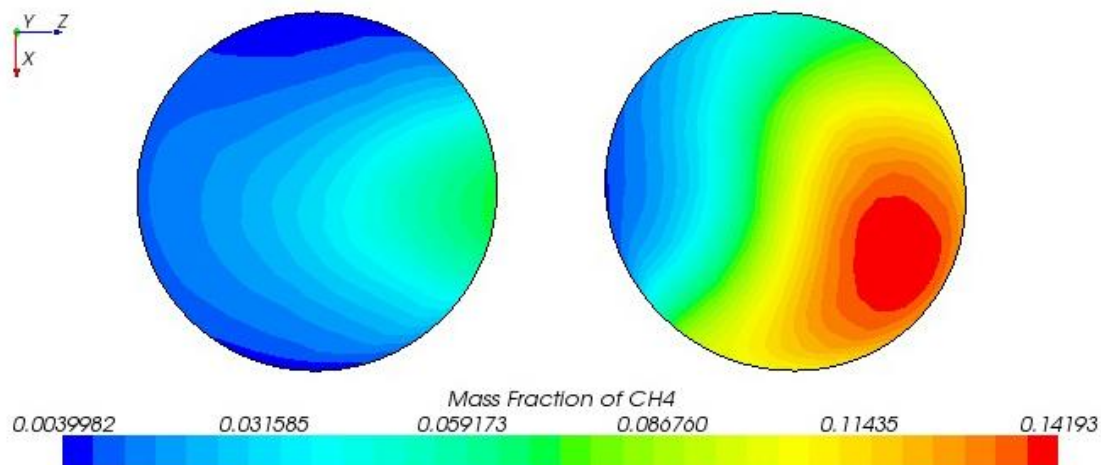
Na Obr. 31 již lze pozorovat změny. Nejvyšší rychlost proudění výsledné směsi je v totožném místě jako nejvyšší koncentrace metanu. Z toho vyplývá, že nedochází k tak intenzivním vírům, které by zpomalovaly proudění sacím potrubím.

Největší rozdíl mezi variantami A a B je zřejmý z vizualizace proudění vefukovaného metanu (Obr. 32), na které je viditelný zřetelný rozdíl v proudění metanu levým sacím kanálem. Ačkoli jsou koncentrace metanu v levém kanále v obou případech obdobné, v případě Varianty B je metan rozprostřen po větší ploše sacího kanálu.



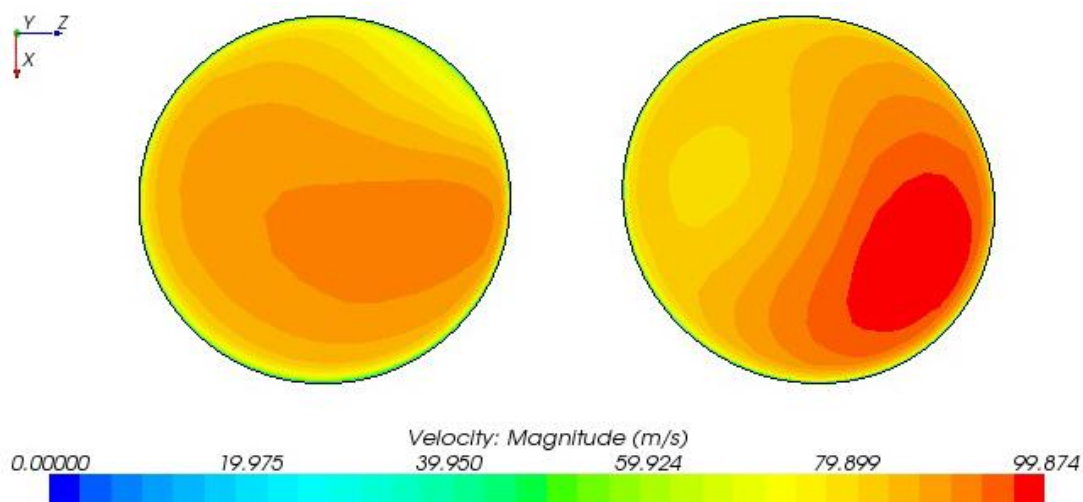
Obr. 32 Vizualizace proudění vefukovaného metanu – Varianta B

6.4.3 VARIANTA C



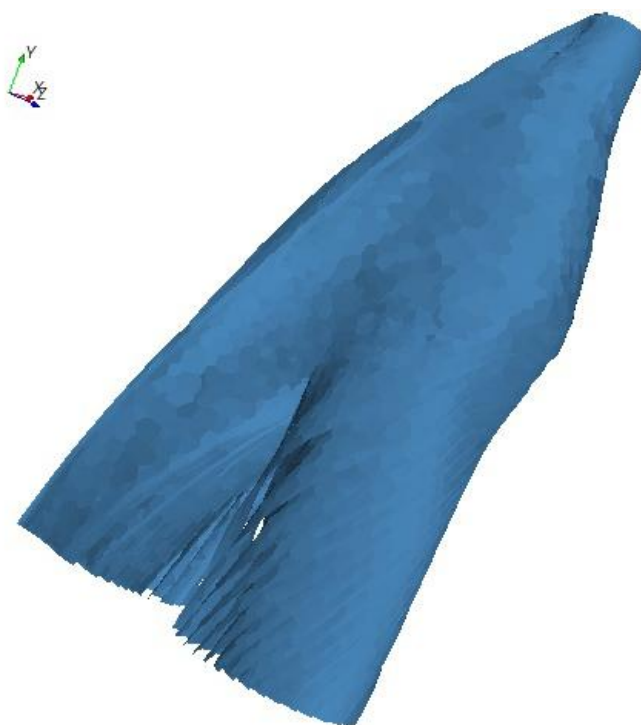
Obr. 33 Hmotnostní podíl metanu na výstupech ze sacích kanálů – Varianta C

Na Obr. 33 je zobrazen hmotnostní podíl metanu na výstupech ze sacích kanálů Varianty C. Nejvyšší koncentrace metanu je u pravé stěny pravého sacího kanálu, jelikož v těchto místech má proud vzduchu nejvyšší rychlost a strhává s sebou největší množství metanu. Ačkoli ani v tomto případě neproudí oběma kanály metan rovnoměrně, jeví se tato varianta nejlépe. Vhodnými úpravami by šlo dosáhnout rovnoměrnosti koncentrace metanu v obou kanálech.



Obr. 34 Rychlost proudění výsledné směsi na výstupech ze sacích kanálů – Varianta C

Z Obr. 34 je patrné, že u této varianty bylo dosaženo vůbec nejvyšší rychlosti proudění výsledné směsi, konkrétně 99,874 m/s a to v místě s nejvyšší koncentrací metanu. Děje se tak proto, že proud metanu je vefukován pod tlakem 5 barů do proudu nasávaného vzduchu, čímž se výsledné proudění stane rychlejší. Toto koresponduje s původním předpokladem tohoto návrhu.



Obr. 35 Vizualizace proudění vefukovaného metanu – Varianta C

Zejména díky vizualizaci proudění vefukovaného metanu (Obr. 35) lze tuto variantu považovat za nejvhodnější.



6.5 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Z dosažených výsledků vyplývá, že nejvhodnějším řešením umístění vefukovačů je Varianta C a to nejen z hlediska rozložení hmotnostního podílu v jednotlivých sacích kanálech, ale také z hlediska rychlosti proudění výsledné směsi. Díky tomu by docházelo k lepšímu plnění válce motoru a tím i k jeho lepšímu chodu v porovnání s ostatními variantami. Aplikací několika úprav by šlo dosáhnout ještě příznivějších výsledků.

Varianty A, B již takový potenciál nemají. V případě Varianty A se nenaplnily původní předpoklady a použití této koncepce není pro tuto aplikaci vhodné. Varianta B již vykazuje lepší výsledky, přesto v porovnání s řešením C nejsou výhodné a tak tato varianta nebude dále rozvíjena.

Tab. 13 Porovnání výsledků analýz jednotlivých variant

	Hmotnostní podíl CH ₄ [-]	Rychlost proudění [m/s]	Hmotnostní tok [kg/s]
Varianta A	0,18419	93,194	0,17563
Varianta B	0,18939	94,848	0,18143
Varianta C	0,14193	99,874	0,18327

V Tab. 13 je uvedeno shrnutí výsledků sledovaných veličin pro jednotlivé varianty, které potvrzují výše uvedená stanoviska. Zajímavostí jsou uvedená maxima hmotnostních podílů metanu, kdy pro Variantu C je tato hodnota nejnižší. I přesto rozložením koncentrací v kanálech, rychlostí proudění a celkovým hmotnostním tokem převyšuje Varianta C zbylé dva návrhy.

V následující kapitole bude úloha rozšířena tak, že CNG bude vefukováno do všech větví sacího potrubí. Pro vefukování CNG bude využito Varianty C.



7 NÁVRH ÚPRAV VEFUKOVÁNÍ CNG DO SÁNÍ

Pomocí CFD analýz bylo ze tří původních návrhů vybráno nejvhodnější řešení – Varianta C. Toto řešení nyní podlehne vývoji, který má za cíl dosažení lepších výsledků. Tento vývoj znamená návrh vhodných úprav vybrané varianty.

Původní návrhy byly s ohledem na následné CFD analýzy zjednodušeny. Výpočet probíhal pouze pro jeden pár sacích kanálů a to zejména z důvodu šetření času a výpočetního výkonu počítače. Pro lepší představu a transparentnost výsledků budou nyní CFD analýzy rozšířeny na celou sací soustavu, CNG tedy bude vefukováno do všech čtyř větví sacího potrubí. Z těchto důvodů bylo nejprve nutné domodelovat zbylé sací kanály a vytvořit tak model kompletní sací soustavy (Obr. 36).



Obr. 36 Model kompletní sací soustavy

Tento model slouží jako základ všem následně uvedeným řešením.

7.1 STÁVAJÍCÍ ŘEŠENÍ – ROZŠÍŘENÍ ÚLOHY NA KOMPLETNÍ SACÍ SOUSTAVU

Aby bylo možné zamyslet se nad návrhem úprav stávajícího řešení, je nutné podrobně rozebrat klady a zápory tohoto řešení. Jelikož původní analýzy Varianty C probíhaly pouze zjednodušeně za účelem volby nejvhodnějšího řešení umístění vefukovačů, bylo zapotřebí, s ohledem na aplikaci úprav na kompletní sací soustavu, úlohu rozšířit. Analýza mísení CNG se vzduchem tedy bude probíhat ve všech větvích sacího potrubí.

K tomu bude využit model dle Obr. 36 s vefukovači umístěnými podle návrhu C. Model odpovídající tomuto řešení je uveden na Obr. 37.



Obr. 37 Varianta C - kompletní model

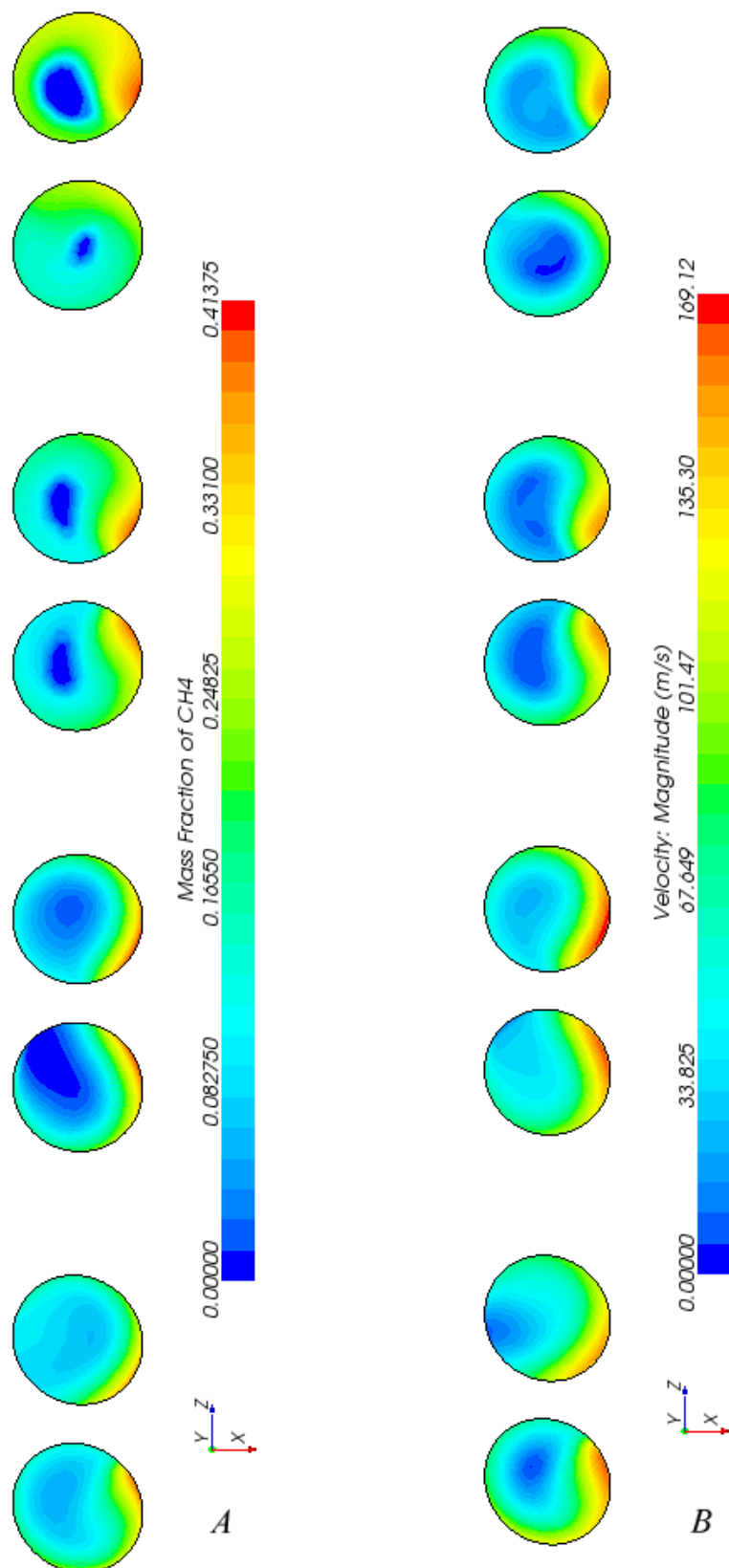
7.1.1 CFD ANALÝZA KOMPLETNÍHO MODELU VARIANTY C

Kvůli problémům s konvergencí úlohy bylo nutné provést jednu změnu v nastavení fyzikálního modelu, které je uvedeno v kapitole 6.2 Nastavení fyzikálního modelu, definice okrajových podmínek. V záložce *Equation of State* došlo ke změně původně zvolené položky *Ideal Gas* na *Constant Density*. V případě použití modelu *Ideal Gas* je hustota plynů definována jako funkce teploty a tlaku naopak v případě modelu *Constant Density* je hustota média v celém kontinuu invariantní, tedy neměnná. Další volené parametry (okrajové podmínky, výpočetní síť) zůstaly shodné s nastavením uvedeným výše.

VÝSLEDKY ANALÝZY

Na Obr. 38 je uveden hmotnostní podíl metanu a rychlost výsledného proudění směsi na výstupech ze sacích kanálů. Nedostatky proudění vefukovaného metanu krajními páry sacích kanálů zůstaly obdobné jako v předešlých analýzách. Metan zde proudí ve větší koncentraci vnějšími kanály. V případě zbylých dvou párů sacích kanálů není tento nedostatek majoritním problémem, zde je dosaženo relativně slušné rovnoměrnosti proudění, což vyplývá z proudění nasávaného vzduchu, který zde tolik nemění směr svého proudění. Ovšem u všech kanálů je viditelná nejvyšší koncentrace metanu u spodní stěny sacích kanálů, což není ideální z hlediska dostatečného promísení metanu se vzduchem.

Je snahou tyto nedostatky odstranit aplikací vhodných úprav. Návrh několika možných řešení bude rozebrán na následujících řádcích.



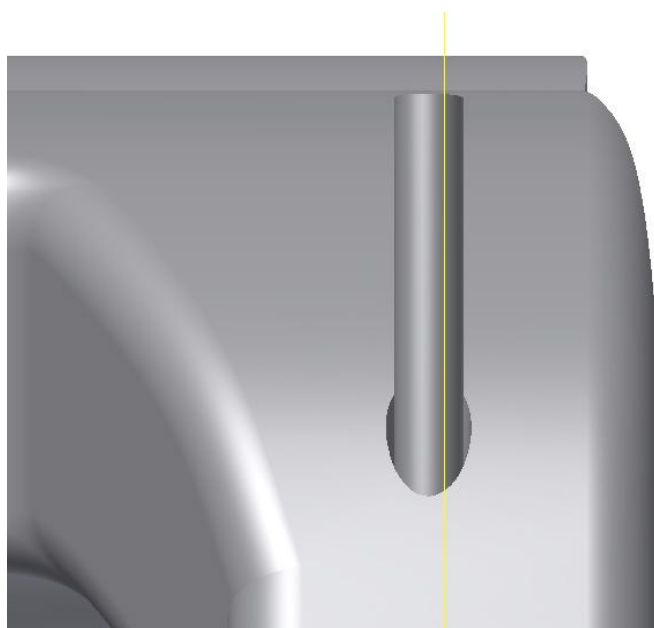
Obr. 38 Varianta C - A) Hmotnostní podíl metanu, B) Rychlost proudění



7.2 VARIANTY ÚPRAV VEFUKOVÁNÍ CNG DO SACÍHO POTRUBÍ

Z předchozích analýz vyplývá, že nejzávažnějšími nedostatky, které by bylo vhodné odstranit, jsou nerovnoměrné proudění metanu krajními páry sacích kanálů a proudění metanu podél spodní stěny kanálů.

První možnou úpravou, která by měla vyřešit nerovnoměrné proudění metanu krajními páry sacích kanálů, je vyosení vefukovačů v krajních větvích sacího potrubí o 1,5 mm směrem ke středu celé součásti (Obr. 39). Předpokladem je, že proud vefukovaného metanu bude strháván proudem nasávaného vzduchu blíže k vnitřním kanálům z dvojice kanálů krajních větví sacího potrubí, čímž by mělo dojít k lepším poměrům v rozložení koncentrací metanu v jednotlivých sacích kanálech krajních větví sacího potrubí.



Obr. 39 Detail vyosení vefukovače

Nevýhodou této úpravy je, že řeší pouze jeden nedostatek. Tuto nevýhodu ale naopak vyvažuje výhoda v podobě velké jednoduchosti tohoto řešení.

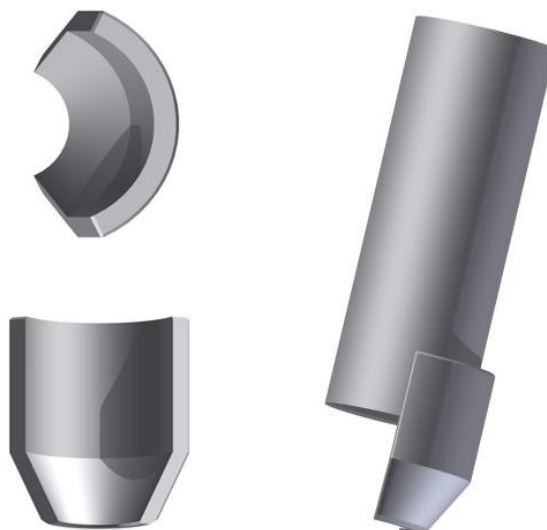
Druhou možnou úpravou je tvorba deflektoru, který by svým tvarem měl lépe usměřňovat tok vefukovaného metanu. Mělo by docházet k pozdějšímu strhávání metanu proudem nasávaného vzduchu, čímž se metan rozptýlí po větší ploše a dojde k lepšímu promísení CNG se vzduchem. Toto řešení by mělo odstranit zejména problémy s prouděním metanu podél spodních stěn sacích kanálů.

Toto řešení má obrovský potenciál. Díky výstupům ze simulací lze přizpůsobovat tvar deflektoru požadavkům daného řešení. Ačkoli je toto největší předností deflektoru, komplexnost a náročnost možných tvarů znamená také technologickou náročnost této úpravy. Díky těmto okolnostem je pro potřeby této práce vytvořen zjednodušený model deflektoru. Další nevýhodou je zásah deflektoru do sacího potrubí, čímž ovlivňuje proudění v sacím potrubí.



Dále je třeba vyřešit jakým způsobem deflektor do sacího potrubí umístit. Nabízí se jej umístit přímo na vefukovač, ovšem tato varianta není z nejjednodušších a hlavně nejlevnějších. Další možností je tvorba deflektoru na vložce, ve které je vefukovač v sacím potrubí umístěn. Tato vložka je vkládaná do vytvořeného otvoru pro vefukovač z důvodu utěsnění a lepšího uložení vefukovače.

Zjednodušený model deflektoru je uveden na Obr. 40.



Obr. 40 Deflektor

Třetí možnou úpravou je kombinace dvou předešlých variant. Svou komplexností by měla vyřešit oba hlavní nedostatky původního návrhu.

7.3 CFD ANALÝZA MÍSENÍ CNG SE VZDUCHEM S POUŽITÍM ÚPRAV

Opět jedinou změnou v nastavení výpočetního modelu je použití konstantní hustoty média v rámci celého kontinua. Nastavení všech ostatních parametrů zůstalo shodné s nastavením uvedeným v kapitolách 6.2 a 6.3.

7.3.1 VÝSLEDKY ANALÝZY

U všech navrhovaných úprav bylo z důvodu porovnatelnosti jednotlivých výsledků zvoleno stejné nastavení fyzikálního modelu, okrajových podmínek a výpočetní sítě. Sledovanými parametry jsou hmotnostní podíl metanu a rychlost výsledného proudění na jednotlivých výstupech ze sacích kanálů.

VARIANTA C S VYOSENÝMI VEFUKOVAČI

Na Obr. 41 je uveden hmotnostní podíl metanu a rychlostní profil výsledného proudění na výstupech ze sacích kanálů. Díky vyosení vefukovačů mělo dojít k výraznému nárůstu koncentrace metanu v sacích kanálech 2 a 7. Na první pohled je patrné, že vyosení o 1,5 mm bylo značně konzervativní volbou. Nicméně po podrobnějším prozkoumání zejména části obrázku zachycující hmotnostní podíl metanu, lze pozorovat nepatrné změny v koncentracích metanu v oblasti krajních větví sacího potrubí a to právě u sacích kanálů 2 a 7. Proto lze



očekávat, že s použitím většího vyosení dojde i k většímu nárůstu hmotnostního podílu metanu v sacích kanálech 2 a 7 a tím i k lepšímu naplnění vnějších válců.

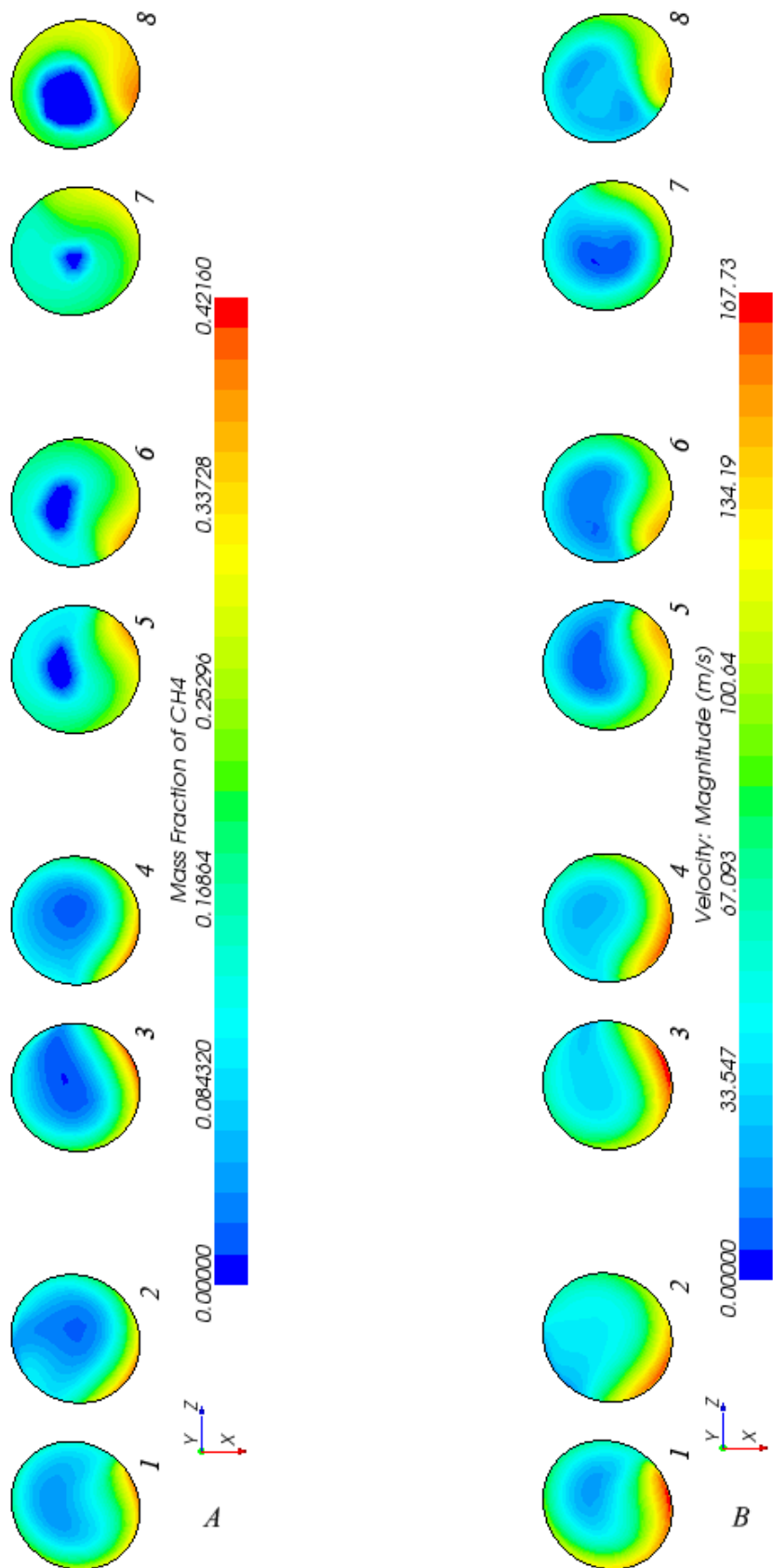
VARIANTA C S DEFLEKTOREM

Hmotnostní podíl metanu a rychlostní profil proudění směsi pro Variantu C s deflektorem je uveden na Obr. 42. V tomto případě je naopak hned na první pohled patrné, že došlo ke značným změnám jak v koncentracích metanu, tak v rychlosti proudění. Oblast s nejvyšším obsahem metanu se přesunula ze spodní části kanálů do části horní, také došlo k jejímu rozšíření. Nicméně došlo k výraznému poklesu hmotnostního podílu metanu v sacích kanálech, což je způsobeno značným rozšířením oblastí s nulovou koncentrací metanu, toto je patrné obzvláště u sacího kanálu 1.

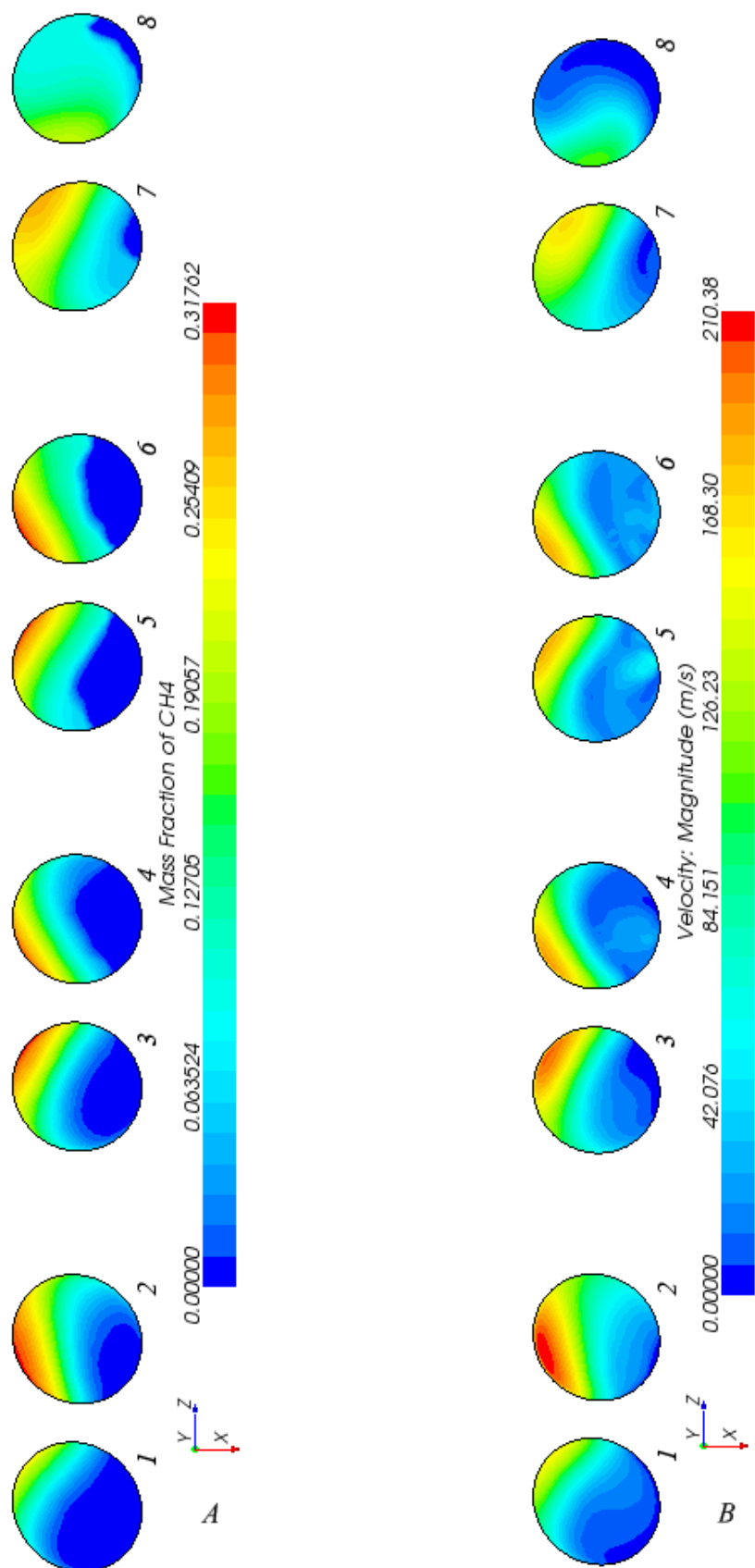
Naopak došlo k výraznému nárůstu rychlosti proudění směsi. Toto je způsobeno tím, že deflektor svým kónickým tvarem usměřňuje a zrychluje samotný proud vefukovaného metanu a lze se domnívat, že nedochází k tak intenzivnímu víření a narušování proudění.

VARIANTA C S DEFLEKTOREM I VYOSENÍM VEFUKOVAČŮ

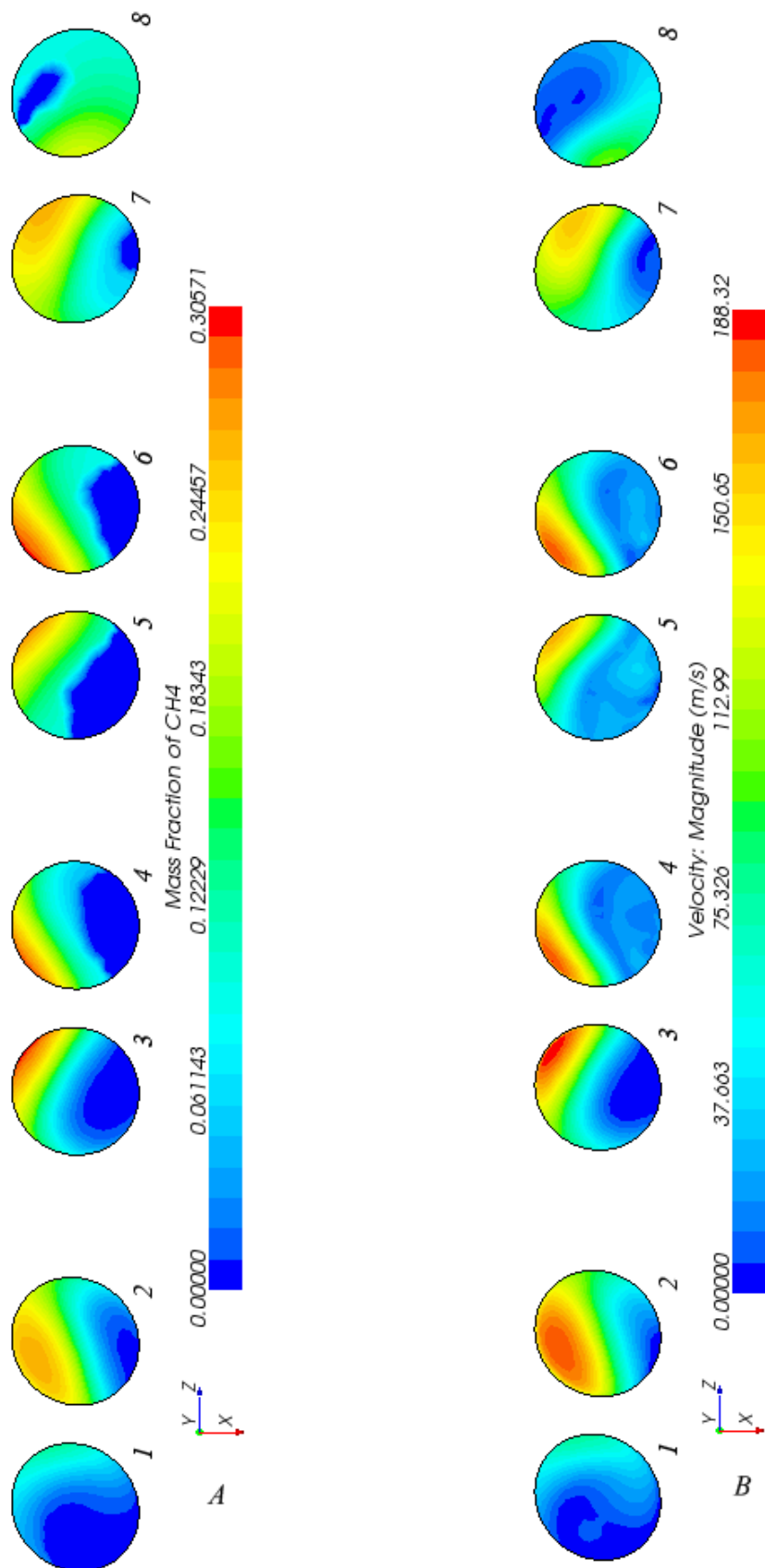
Hmotnostní podíl metanu a rychlostní profil proudění směsi pro Variantu C s deflektorem i vyosenými vefukovači je uveden na Obr. 43. Toto řešení se příliš neliší od předchozí varianty. Změna v koncentracích metanu a rychlosti proudění je patrná pouze u sacích kanálů 1,2 a 3,4. Obdobně jako předchozí řešení je i toto limitováno nevhodně zvoleným tvarem deflektoru pro tuto aplikaci.



Obr. 41 Varianta C s vyosenými vefukovači - A) Hmotnostní podíl metanu, B) Rychlost proudění



Obr. 42 Varianta C s deflektorem - A) Hmotnostní podíl metanu, B) Rychlost proudění



Obr. 43 Varianta C s deflektorem i vyosením - A) Hmotnostní podíl metanu, B) Rychlost proudění



7.3.2 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Z dosažených výsledků vyplývá, že nejvhodnější úpravou Varianty C je použití vyosení vnějších vefukovačů. Ačkoli změny v proudění a rozložení koncentrací metanu nejsou tak markantní jak bylo předpokládáno, v této fázi návrhu lze toto řešení považovat za nejvhodnější, což potvrzuje i níže uvedená srovnávací tabulka.

Tab. 14 Porovnání výsledků analýz jednotlivých úprav s řešením bez úpravy

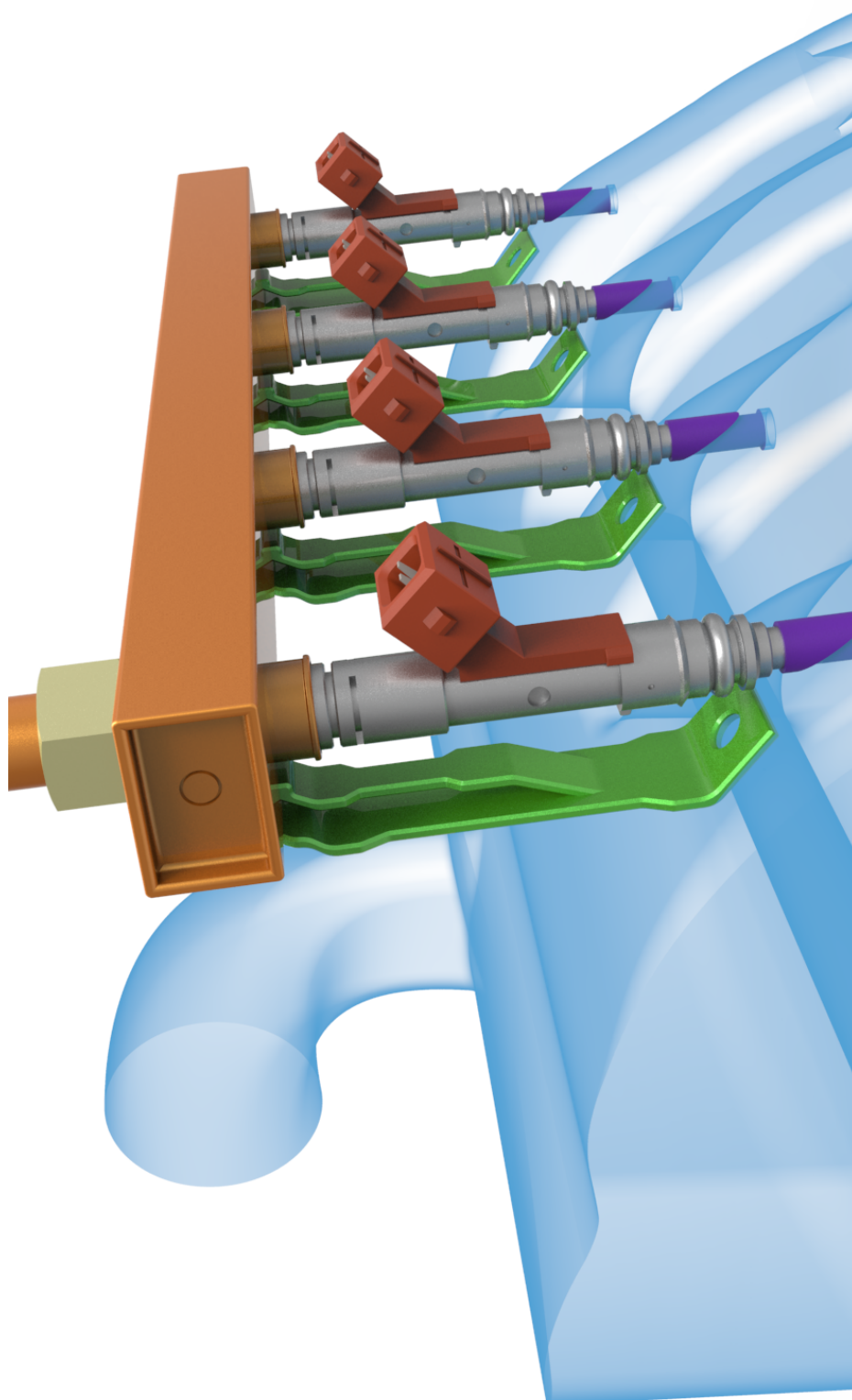
	Hmotnostní podíl CH ₄ [-]	Rychlost proudění [m/s]	Hmotnostní tok [kg/s]
Vyosené vefukovače	0,42160	167,73	0,20942
Deflektor	0,31762	210,38	0,22185
Deflektor i vyosení	0,30571	188,32	0,21325
Bez úpravy	0,41375	169,12	0,21115

Z Tab. 14 je patrné, že v případě aplikace vyosených vefukovačů došlo k nárůstu hmotnostního podílu metanu na výstupech ze sacích kanálů. I z toho tak lze usuzovat, že použití této úpravy je vhodné. Rozdíly v rychlosti proudění a tím také v celkovém hmotnostním toku směsi jsou zanedbatelné.

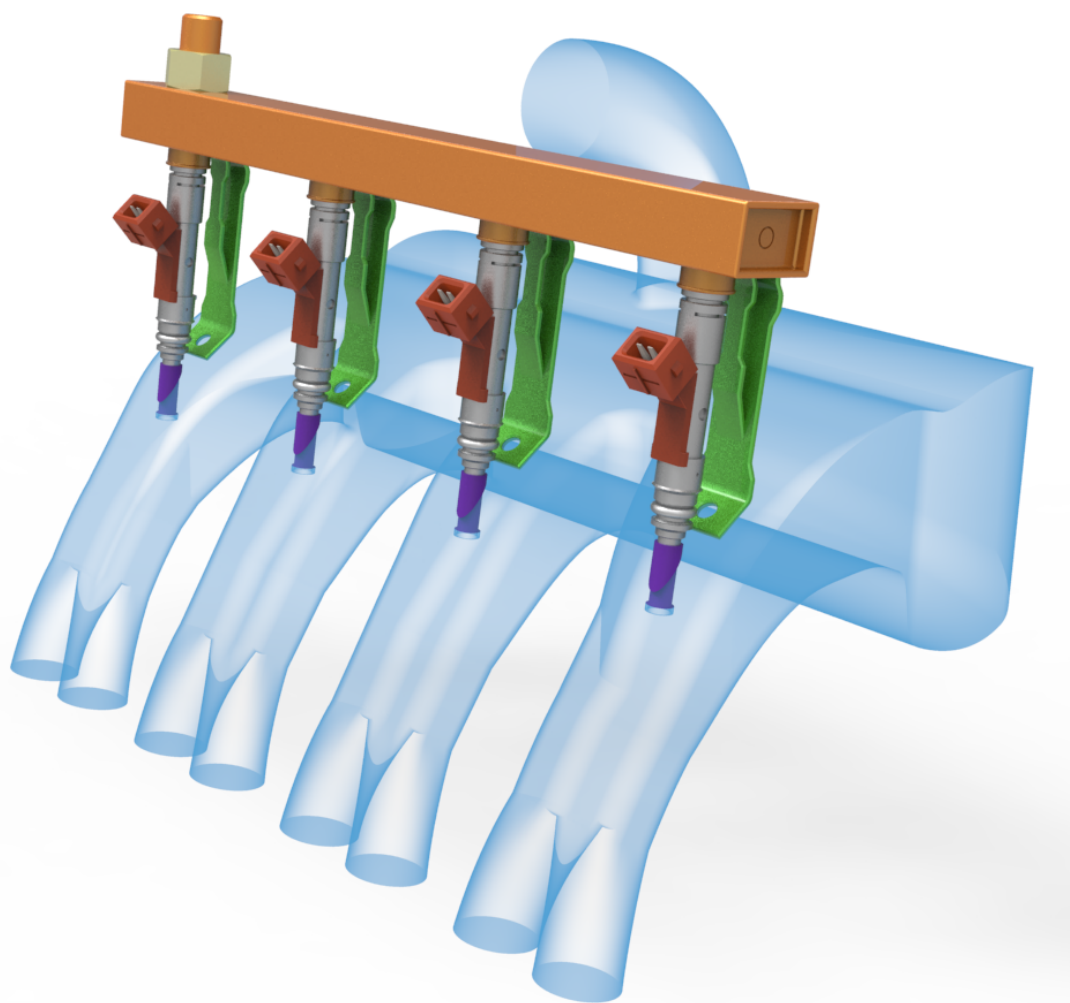
Z výsledků dále vyplývá, že v případě využití deflektoru sice dojde k výraznému nárůstu rychlosti proudění, ale pokles hmotnostního podílu metanu v sacích kanálech je natolik velký, že použití tohoto deflektoru není vhodné. Toto platí i pro variantu kombinující deflektor s vyosením krajních vefukovačů.

Ačkoli se ukázalo, že použití tohoto deflektoru by bylo krokem zpět, stále je důvod se domnívat, že využití deflektoru má obrovský potenciál. A to zejména z toho důvodu, že daný tvar deflektoru byl značně zjednodušený, sloužící k demonstraci toho, jak je schopen ovlivnit proudění v sacím potrubí. Optimalizace tvaru a umístění deflektoru by tak mohla být námětem k další práci.

Díky všem výše uvedeným návrhům, výpočtům a závěrům je k vefukování CNG do sacího potrubí motoru 1.4 TSI zvoleno umístění vefukovačů dle návrhu Varianty C s vyosenými vnějšími vefukovači. Pro lepší představu finálního umístění vefukovačů byla vytvořena sestava vefukovací jednotky včetně možného řešení palivového zásobníku. Vizualizace této sestavy je uvedena na Obr. 44 a Obr. 45.



Obr. 44 Detail kompletní vefukovací jednotky



Obr. 45 Sestava kompletní vefukovací jednotky



ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo vytvořit konstrukční návrh palivového CNG systému, zejména se zaměřením na oblast vefukování CNG do sacího potrubí, s následným sestavením a provedením výpočtové studie mísení CNG s nasávaných vzduchem. Vše bylo řešeno dle požadavků zadavatele a prostorového uspořádání daného motoru.

Prvním krokem bylo vytvoření 3D parametrického modelu sacího potrubí dle reálného sacího potrubí motoru VW 1.4 TSI. K tvorbě tohoto, a všech ostatních řešení, byl použit software Autodesk Inventor Professional 2012. Následně byly navrženy tři varianty umístění vefukovačů. Sestavy objemových těles (sací potrubí + vefukovač) vytvořily základ CFD analýzám.

Stěžejním prvkem této práce jsou CFD analýzy mísení CNG se vzduchem. Analýzy byly prováděny pro jednotlivé varianty vefukování CNG do sání za účelem volby nejvhodnějšího navrženého řešení. Nejlepším řešením umístění vefukovačů (vefukování CNG do sání) se ukázala Varianta C, kde jsou vefukovače umístěny tak, že proud vefukovaného metanu má shodný směr s proudem nasávaného vzduchu. Veškeré CFD simulace byly prováděny v programu STAR-CCM+.

Po provedení základních analýz vefukování CNG do sání byly navrženy tři možné úpravy zvolené varianty. Snahou bylo odstranit nedostatky tohoto řešení. Mezi možné úpravy patří vyosení vefukovačů vnějších větví sacího potrubí, použití deflektoru a kombinace těchto dvou řešení. K ověření vhodnosti jednotlivých úprav posloužily opět CFD analýzy průtoku nasávaného vzduchu s vefouknutím CNG. Jako nejvhodnější se ukázalo vyosení vnějších vefukovačů.

Jak je toto téma obsáhlé dokazuje možnost dalšího pokračování v této práci. Zejména v oblasti optimalizace tvaru deflektoru lze nalézt značný prostor k dalším realizacím. Dalším krokem také může být návrh palivového railu či dalších komponent palivové CNG soustavy.

Závěrem lze říci, že veškeré body zadání práce byly splněny.



POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] VLK, František. *Alternativní pohony motorových vozidel*. 1. vyd. Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc., 2004, 234 s. ISBN 80-239-1602-5.
- [2] ŽÁKOVEC, Jan. *Využití plyných paliv v dopravě*. 1. vyd. Praha: GAS, 2001, 70 s. GAS. ISBN 80-861-7686-X.
- [3] KAMEŠ, Josef. *Alternativní pohon automobilů*. 1. vyd. Praha: BEN, 2004, 231 s. ISBN 80-730-0127-6.
- [4] MATĚJOVSKÝ, Vladimír. *Automobilová paliva*. Vyd. 1. Praha: Grada, 2005, 223 s. ISBN 80-247-0350-5.
- [5] PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. Vyd. 3. přeprac. /. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. 284 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-2409-5.
- [6] ŠOB, František. *Hydromechanika: studijní materiál pro I. stupeň magisterského studia, 2. a 3. ročník*. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2002. 238 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-2037-5.
- [7] ZEHNÁLEK, Josef. *Chemie, paliva, maziva*. 2., nezměn. vyd. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2005, 176 s. ISBN 80-715-7900-9.
- [8] OKADA, Masaki. *Development of CNG Direct Inejction Diesel-Cycle Engine. Development of CNG Direct Inejction Diesel-Cycle Engine*. 2006.
- [9] MOLNÁR, Vojtech. *Počítačová dynamika tekutin* [online]. 2009 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://www.cfd.sk/new/index.php>
- [10] JANOUŠEK, Michal. *Zvýšení pružnosti zážehového přeplňovaného motoru na CNG*. Brno, 2012. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=54002. Diplomová práce. VUT Brno.
- [11] Třetí přírůstek do rodiny motorů TSI – tentokrát bez kompresoru. *Technický týdeník* [online]. 2006, č. 1 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: http://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/treti-prirustek-do-rodiny-motoru-tsi-tentokrat-bez-kompresoru_12991.html
- [12] TSI (Twincharged Stratified Injection). *Www.autolexicon.net* [online]. 2013 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://cs.autolexicon.net/articles/tsi-twincharger-stratified-injection/>
- [13] Technologie stanic. *Www.cng.cz* [online]. 2011 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://www.cng.cz/cs/technologie-stanic/>
- [14] PRAŽÁK, Václav. *Motorová paliva - historie a současnost. Česká rafinérská, a.s. - Odborné přednášky a publikace* [online]. 2003, č. 1 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: http://www.crc.cz/data/publications/motorova_paliva_historie_soucasnost.pdf



- [15] Statistika CNG vozidel k počátku roku 2011. *Www.cng.cz* [online]. 2011 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://www.cng.cz/cs/statiska-cr-evropa-svet/>
- [16] Oktanové číslo. *Www.autolexicon.net* [online]. 2013 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://cs.autolexicon.net/articles/oktanove-cislo/>
- [17] Cetanové číslo. *Www.autolexicon.net* [online]. 2013 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://cs.autolexicon.net/articles/cetanove-cislo/>
- [18] *Evidovaná ložiska nerostů České republiky* [online]. 2009 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: http://geologie.vsb.cz/loziska/loziska/loziska_cr.html
- [19] LNG (Liquefied Natural Gas). *Www.autolexicon.net* [online]. 2013 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://cs.autolexicon.net/articles/lng-liquefied-natural-gas/>
- [20] CNG Kits. *Muslim Engineering* [online]. 2009 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://muslimcng.com/kit1.html>
- [21] CNG Experience. *Www.trinituner.com* [online]. 2011 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://www.trinituner.com/v3/forums/viewtopic.php?f=2&t=249637&start=60>
- [22] Fuel Systems. *Motor Magazine* [online]. 2012 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: http://www.motor.com/newsletters/20120510/WebFiles/ID1_Ready4CNG.html
- [23] *Auta na plyn* [online]. 2004 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://www.autanaplyn.cz/>
- [24] CNG Cylinders for Vehicles. *Made-in-China.com* [online]. 2013 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://www.made-in-china.com/showroom/cssg-jbjx/offer-detailVevEHYPUagpK/Sell-CNG-Cylinders-for-Vehicles.html>
- [25] Regulator TN 1. *Landirenzo* [online]. 2013 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://www.landi.it/layout.jsp?idz=10068&idtp=166&lang=3&idcomponente=46&idprodotto=24>
- [26] CNG Components. *Www.mijoautogas.co.in* [online]. 2011 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://www.mijoautogas.co.in/cng-components.htm>
- [27] CNG Injector Rail. *Www.ec21.com* [online]. 2013 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: http://jialicng.en.ec21.com/CNG_Injector_Rail--3359481_3634265.html
- [28] Proudění kapalin. *Www.sszdra-karvina.cz* [online]. 2013 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://sszdra-karvina.cz/bunka/fy/02prou/prou1.htm>
- [29] Opel Combo 1.6 CNG Ecotec. *CNG Company s.r.o.* [online]. 2012 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: http://www.cngcompany.cz/31-opel_combo_1.6_cng_ecotec
- [30] CD - ADAPCO. *User Guide: STAR-CCM+ Version 4.04.011*. 2009.



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A	[N]	vnější objemová síla
h	[m]	poloha
p	[Pa]	tlak
Q_m	[kg/s]	hmotnostní tok
s	[m]	vzdálenost
S	[m ²]	plocha
t	[s]	čas
v	[m/s]	rychlost
λ	[-]	součinitel přebytku vzduchu
ρ	[kg/m ³]	hustota



SEZNAM PŘÍLOH