



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

NÁVRH PALIVOVÉHO SYSTÉMU FORMULOVÉHO VOZIDLA

FORMULA CAR FUEL SYSTEM DESIGN

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. PAVEL RUBÍČEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PAVEL RAMÍK

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Pavel Rubíček

který/která 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:

Návrh palivového systému formulového vozidla

v anglickém jazyce:

Formula Car Fuel System Design

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Proveďte návrh palivového systému formulového vozidla kategorie Formule Student vyhovující požadavkům mezinárodních pravidel.

Cíle diplomové práce:

1. Proveďte rešerši konstrukčního provedení palivových systémů motorových vozidel.
2. Navrhněte uspořádání jednotlivých komponent a konstrukci dílů palivového systému.
3. Vytvořte simulační model a proveďte analýzu chování vybraných součástí palivového systému.
4. Posuďte možnosti výroby navržených komponent a začleňte je do celkové konstrukce vozidla.
5. Zhodnoťte dosažené výsledky a vyslovte se k vhodnosti navržené konstrukce.

Seznam odborné literatury:

- [1] JAN, Zdeněk a ŽDÁNSKÝ, Bronislav. Automobily (4): Příslušenství. Brno: Avid, spol. s r.o., 2009. ISBN 978-80-87143-08-7.
- [2] Formula Student web page [online], 2014, poslední revize 22. 10. 2014. Dostupné z: www.formulastudent.com
- [3] PTC Learning Connector [online], Parametric Technology Corporation, 2014, poslední revize 28. 10. 2014. Dostupné z: <http://www.ptc.com/services/training/elearning/learning-connector>
- [4] ANSYS Workbench, ANSYS Inc., Canonsburg, USA 2014, poslední revize 17. 6. 2014. Dostupné z: <http://www.ansys.com/Products/ANSYS+14.5+Release+Highlights/ANSYS+Workbench>
- [5] JANÍČEK, P., ONDRÁČEK, E., VRBKA, J. Pružnost a pevnost I, VUT Brno 1992

Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Ramík

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015. V Brně, dne 19.11.2014

L.S.

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty



ABSTRAKT

Palivový systém je velice důležitou součástí vozidla a motoru. Jeho hlavní funkcí je dodávat do motoru palivo, které se mísí se vzduchem. Tato práce se zabývá návrhem palivového systému pro vůz kategorie Formule student. V první části práce je seznámení se soutěží Formula student. V další části jsou popsány možnosti konstrukce palivových systémů a možné volby jednotlivých komponent. Tyto možnosti nám omezují pravidla FSAE, která jsou v další kapitole. Následují hlavní kapitoly, které se zabývají samotným návrhem palivového systému a analýzou vybraných komponent. Poslední částí práce jsou kapitoly, které pojednávají o možnostech výroby dílů a následném zakomponování palivového systému do vozu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Palivový systém, palivo, nádrž, uhlíkový kompozit, Formule Student

ABSTRACT

The fuel system is a very important part of the vehicle and the engine. The main function is to deliver the fuel- air mixture into the engine cylinder. This thesis describes the design of the Formula student car fuel system. The first part is an introduction to Formula Student competitions. The next section describes the options of the fuel systems structure and options for individual components. Those rules limit the possibilities for us FSAE that in the next chapter. The following parts are major chapters dealing with the actual design of the fuel system and analysis of selected components. The last part are chapters that deal with the production possibilities of parts and subsequent incorporation into the fuel system of the car.

KEYWORDS

Fuel system, fuel, fuel tank, carbon fiber composite, Formula Student



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

RUBÍČEK, P. *Návrh palivového systému formulového vozidla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 74 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Ramík.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 29. května 2015

.....

Bc. Pavel Rubíček



PODĚKOVÁNÍ

Zde bych rád poděkoval Ing. Pavlu Ramíkovi za odborné vedení této diplomové práce. Jeho cenné a užitečné rady mi pomohly k jejímu vypracování. Dále děkuji své rodině za podporu během mého studia a týmu TU Brno Racing, u kterého jsem členem.



OBSAH

Úvod	10
1 Formule student	11
1.1 Závod formule student	11
1.1.1 Technická kontrola (scrutineering).....	11
1.1.2 Statické disciplíny	13
1.1.3 Dynamické disciplíny	14
2 Konstrukční provedení palivových systémů.....	16
2.1 Příprava směsi paliva se vzduchem	16
2.1.1 Karburátor.....	16
2.1.2 Vstřikování benzínu.....	17
2.2 Rozdíl proti formulovým vozidlům	23
2.3 FSAE.....	23
2.3.1 Externí čerpadlo.....	23
2.3.2 Čerpadlo v nádrži.....	24
2.4 Materiály palivové nádrže.....	24
2.5 Motory	25
2.6 Paliva	26
2.6.1 Benzin.....	27
2.6.2 E-85	27
2.6.3 Srovnání.....	27
3 Pravidla FSAE pro palivový systém.....	28
4 Návrh palivového systému	31
4.1 Motor a jeho spotřeba	31
4.2 Měření paliva E-85	35
4.3 Volba materiálu nádrže	36
4.4 Návrh a výběr komponent.....	39
4.4.1 Uspořádání.....	39
4.4.2 Vstřikovací ventily	41
4.4.3 Čerpadlo	42
4.4.4 Regulátor tlaku paliva.....	43
4.4.5 Housing regulátoru	44
4.4.6 Filtry	44
4.4.7 Hadice a spojení.....	45
4.4.8 Přepážky palivové nádrže.....	47
4.4.9 Lambda sonda.....	48



5	Simulace a analýzy	49
5.1	Zahřívání od výfuku.....	49
5.2	Držáky.....	53
5.3	Příruba palivové nádrže	55
5.4	Housing pro palivový regulátor	57
6	Výroba součástí	59
6.1	Obrábění.....	59
6.2	Řezání laserem	59
6.3	Svařování	60
6.4	Formy na laminování	60
6.5	Laminování	61
7	Zakomponování do vozidla	63
8	Zhodnocení	64
8.1	Testování.....	64
8.2	Hodnocení hmotnosti	64
8.3	Cenová kalkulace	64
8.4	Spolupráce motoru a palivového systému	65
8.5	Změny na finální verzi nádrže	65
	Závěr.....	67
	Seznam použitých zkratk a symbolů	72
	Seznam příloh.....	74



ÚVOD

Úkolem palivového systému je získávat palivo z nádrže a dodávat jej do motoru, kde je rozstříkáváno do sání, aby se smísilo se vzduchem cestou do válce, ve kterém se tato směs zapálí, aby vytvořila krouticí moment. Palivo musí být dodáno do vstřikovacích trysek při správném tlaku, aby mohlo být množství vstřikované směsi přesně měřeno. Tlak paliva je regulován palivovým regulátorem. Palivový systém je tedy navržen pro získávání paliva pod tlakem a k jeho regulování než se dostane ke vstřikovacím ventilům. Palivový systém začíná palivovou nádrží, která se nachází uvnitř formulového vozu mezi pilotem a motorem. Palivová nádrž je vyrobená z tuhého materiálu a je zásobníkem na palivo. Palivo je uvnitř nádrže kvůli zatáčení, akceleraci a brždění vystavováno příčnému a bočnímu přetížení. Proto se rozlévá po nádrži. V důsledku toho může být náročné nasávat palivo, když se palivo pohybuje uvnitř nádrže, obzvláště když je ho méně a je nutné tomuto jevu zabránit konstrukcí přepážek. Palivo je dodáváno dávkami, které ovládá elektromagnet ve vstřikovacím ventilu. Vstřikovací ventil je ovládán řídicí jednotkou. Pod vysokým tlakem se dostává palivo do nasávaného vzduchu v přesně daném okamžiku motorového cyklu, aby bylo dosaženo optimálního plnění válce a přípravy směsi pro efektivní spalování a tudíž i výkonnost motoru.



1 FORMULE STUDENT

Formula SAE je konstrukční soutěž pro studenty vysokých škol technického zaměření. Vznikla v USA v roce 1981. Od roku 1998 existuje také evropská odnož projektu, Formula Student. Obě soutěže mají stejný cíl a téměř stejná pravidla. Každý rok se v rámci Formula Student/SAE pořádají soutěže po celém světě. V současné době v seriálu Formula Student/SAE soutěží téměř 600 univerzitních týmů z celého světa v kategorii spalovacích a elektrických vozů.



Obr. 1 Společné foto účastníků [6]

1.1 ZÁVOD FORMULE STUDENT

Aby se tým mohl zúčastnit závodů, tak první podmínkou je postavit nový vůz, případně vůz, který bude mít minimálně novou modifikaci rámu. Druhou podmínkou je registrace na daný závod. Registrace na závody může být na základě testu z pravidel či inženýrských dovedností nebo na základě prezentace, kde se snažíte dokázat, proč zrovna váš tým by se daného závodu měl zúčastnit. Závodní víkend se skládá ze statických a dynamických disciplín. Ve statických disciplínách se již podle názvů nezávodí, ale hodnotí se inženýrské schopnosti a prezentace vozu. Vrcholem víkendu jsou dynamické disciplíny, kde už jde o čas na trati. Výsledkem celého víkendu je bodové hodnocení za všechny disciplíny. Celkem lze získat až 1000 bodů.

1.1.1 TECHNICKÁ KONTROLA (SCRUTINEERING)

Maximální počet bodů: 0



Technickou kontrolou se zjišťuje, zda vozidlo splňuje všechna pravidla a požadavky FSAE a zda vozidlo jako celek splňuje účel těchto pravidel. Každé vozidlo musí projít všemi částmi technické kontroly a získat za ně kontrolní nálepky. Bez technické kontroly vozidlo nesmí soutěžit v dynamických disciplínách. Všechny kontrolované části vozidla musí být pro inspektory viditelné.

Kontrolované položky:

- Vozidlo
- Formulář technické kontroly
- Pneumatiky (suché a mokré)
- Vybavení řidiče – zádržný systém, helma, kombinéza, rukavice, ochrana očí, kukla, ponožky a boty
- Hasicí přístroje
- Push-bar
- Kopie SES nebo SRCF, které odpovídají vozidlu
- Kopie zprávy o testování deformačního členu
- Kopie dotazů týkajících se pravidel a jejich odpovědi, které tým obdržel
- Všichni řidiči musí být při kontrole přítomni

Technická kontrola se skládá ze tří částí:

1. Elektrická a mechanická kontrola
2. Test náklonu
3. Test na hluk, kontrola brzd a test hlavního vypínače



Obr. 2 Test náklonu [6]



1.1.2 STATICKÉ DISCIPLÍNY

CENA (COST REPORT)

Maximální počet bodů: **100**

V této disciplíně se hodnotí výrobní náklady jednotlivých dílů a přesnost zpracování dokumentu, který obsahuje výčet všech těchto dílů. Zpráva o nákladech je navržena pro výrobu 1000 kusů vozu za rok.

Prezentace se skládá ze tří částí:

1. Informace o nákladech
2. Diskuze
3. Odlišnosti v dokumentu vůči realitě

Zpráva o nákladech musí obsahovat:

- Celkové náklady na vozidlo
- Seznam všech součástí vozidla
- Náklady na každou položku z tabulky materiálů, všechny použité materiály ve zprávě v tištěné i elektronické podobě, která bude předložena k posouzení
- Tabulka spojovacího materiálu
- a další...

Bodování:

- 0-40 bodů – nejnižší cena
- 0-40 bodů – přesnost, jasnost a přehlednost (bude posuzováno z hlediska přesnosti informací)
- 0-20 bodů – diskuze

BUSINESS PREZENTACE

Maximální počet bodů: **75**

Prezentace jsou hodnoceny podle obsahu, organizace, demonstrace a reakce na otázky posluchačů. Maximální doba prezentace je 10 minut. Pro tuto disciplínu je sestaven tým, který prezentuje a poté odpovídá na dotazy komise. Na otázky mohou odpovídat pouze členové této skupiny.

DESIGN PREZENTACE

Maximální počet bodů: **150**

Tuto disciplínu vyhrává tým, který zkonstruuje vůz nejlépe splňující záměr trhu a cíle návrhu, vozidlo je rychlé a má nízké náklady na výrobu. Konstrukční zpráva nesmí přesahovat 8 stran, z toho 4 strany jsou text, 3 strany výkresy a 1 strana je obsahově volitelná. Dokument by měl obsahovat stručný popis vozu s přehledem konstrukčních cílů týmu a seznam různých analýz při vývoji a testování.



1.1.3 DYNAMICKÉ DISCIPLÍNY

AKCELERACE

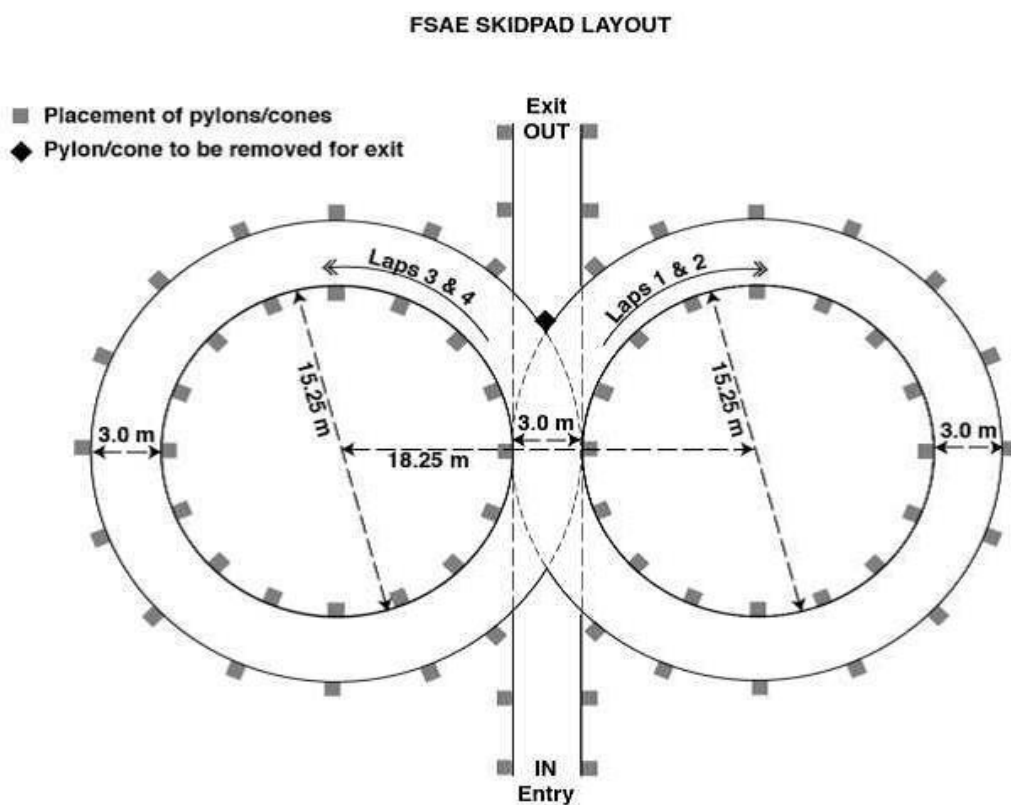
Maximální počet bodů: 75

Disciplína se jezdí na rovné trati dlouhé 75 m. Řidič má na zvládnutí akcelerační dva pokusy. Zelená vlajka zahajuje start závodu, ale čas se měří až po průjezdu startovní čarou. Za každý shozený kužel okolo tratě jsou strhávány body.

SKIDPAD (KRUHOVÝ TEST)

Maximální počet bodů: 50

Měří se průjezd dvou „osmiček“, tuto disciplínu jedou dva jezdci a každý má dva pokusy. Mezi středy obou kruhů je vzdálenost 18,25 m a jejich průměr je 15,25 m a šířka dráhy je tedy 3 m.



Obr. 3 Schéma disciplíny SKIDPAD [8]



AUTOCROSS (AUTOX)

Maximální počet bodů: **150**

Tato disciplína se zaměřuje na ovladatelnost vozu. Prověřuje se zde zrychlení, brždění a průjezd zatáčkami. Průměrná rychlost v autokrosu bývá (40 až 48) km/h. Trať obsahuje rovinky maximálně 60 m dlouhé, plynulé zatáčky s průměrem 45 m, ostré zatáčky s průměrem 9 m a slalomy z kuželů dlouhé 7,62 m s roztečí 12,19 m.

VYTRVALOST A SPOTŘEBA (ENDURANCE & EFFICIENCY)

Maximální počet bodů: **300 (100)**

Hodnotí se zde celkový výkon, odolnost a spolehlivost vozu. Trať je dlouhá 22 km a obsahuje rovinky dlouhé maximálně 77 m, plynulé a ostré zatáčky a nechybí ani slalom z kuželů. Po 11 km následuje výměna řidiče, na výměnu mají řidiči 3 minuty. Trať je podobná AutoX, ale je zde propojen start s cílem, takže tvoří okruh. Jsou zde navíc předjížděcí zóny. Spotřeba vozu se hodnotí společně s vytrvalostní disciplínou, lze za ni získat až 100 bodů. [2]



Obr. 4 Různé podmínky na trati [6]

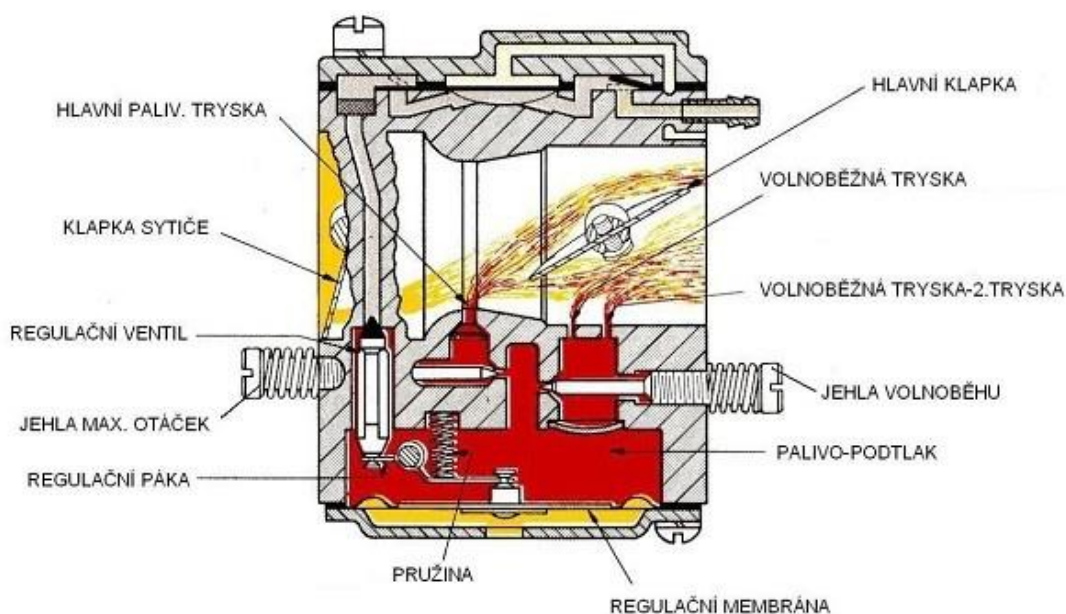
2 KONSTRUKČNÍ PROVEDENÍ PALIVOVÝCH SYSTÉMŮ

2.1 PŘÍPRAVA SMĚSI PALIVA SE VZDUCHEM

V dnešní době je prakticky u většiny zážehových motorů vstřikování elektronické pomocí vstřikovacího ventilu (vstřikovače). Ojediněle je možné se ještě setkat se systémem, kde vzduch s palivem je mísen pomocí karburátoru. Jedná se o dvoudobé motory a starší typy čtyřdobých motorů. Práce se bude zabývat výhradně motory čtyřdobými.

2.1.1 KARBURÁTOR

Obr. 5 ukazuje funkci karburátoru se sytičem. Plovák a jehla zajišťují stálou hladinu benzínu v plovákové komoře. Venturiho jev způsobuje nárůst rychlosti vzduchu a tím pokles tlaku v prostoru trysky.



Obr. 5 Membránový karburátor se sytičem [10]

Hlavním ventilem se reguluje, kolik paliva je tryskou vháněno do proudu vzduchu. Děje se tak díky rozdílným tlakům v plovákové komoře (atmosférický tlak) a zúženém místě sacího potrubí. Z toho plyne, že čím větší je proud vzduchu, tím více benzínu je do něj dodáváno. Nevýhodou tohoto systému je nelinearita spotřeby paliva, tato skutečnost je z části kompenzována použitím dalších ventilů a trysek. Další metodou jak kontrolovat správný poměr vzduchu a paliva je za pomoci proměnlivého Venturiho karburátoru, který udržuje konstantní tlak vzduchu ve Venturiho trubici, za použití kuželové jehly ke správnému dávkování přiváděného paliva. Každý karburátor pracuje na šest fází. S touto znalostí jsme schopni diagnostikovat závadu a zaměřit se na správnou oblast, ve které se problém nachází. Nejčastěji se jedná o zanesení trysky.

U jednoduchého karburátoru byl často problém s obohacováním směsi. Problém vedl ke konstrukci korigovaných karburátorů. Prvním typem byl karburátor SOLEX, který snižoval podtlak u trysky. Druhý typ ZENITH měl kompenzační trysku.



Pro dosažení vhodného složení směsi v nižších otáčkách je třeba malý průřez difuzéru, při vyšším zatížení zase nestačí. Proto se karburátory začali dělat vícestupňové. Druhý difuzér byl připojen do činnosti v případě potřeby. [8]

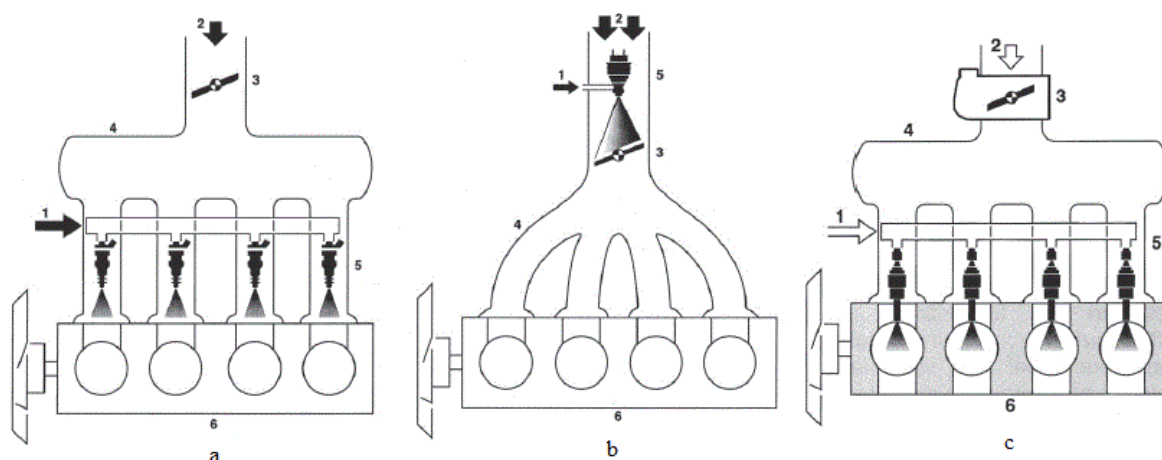
Ve Formuli Student nemá karburátor žádné využití. Z pohledu týmů nelze nijak rozumně kontrolovat bohatost směsi a všechny týmy používají systém elektronického vstřikování paliva. Přesto bylo možno už několik týmů na závodech s karburátorem vidět. Jedná se o týmy z Indie s nízkým rozpočtem.

2.1.2 VSTŘIKOVÁNÍ BENZINU

Palivo je rozprašováno vstřikovačem do proudícího vzduchu přetlakem pomocí vstřikovací trysky (vstřikovače). Vstřikováním se se zlepši rovnoměrnost naplnění válce. Výsledkem je zvýšení litrového výkonu v porovnání s karburátorem o cca 20%.

Podle toho, kde je tryska umístěna rozlišujeme:

- **Jednobodové vstřikování** (1 tryska do jednoho bodu společného potrubí)
- **Vícebodové vstřikování** (tryska do prostoru sacího ventilu každého válce)
- **Vstřikování do válce motoru** (přímo do spalovacího prostoru) [9]

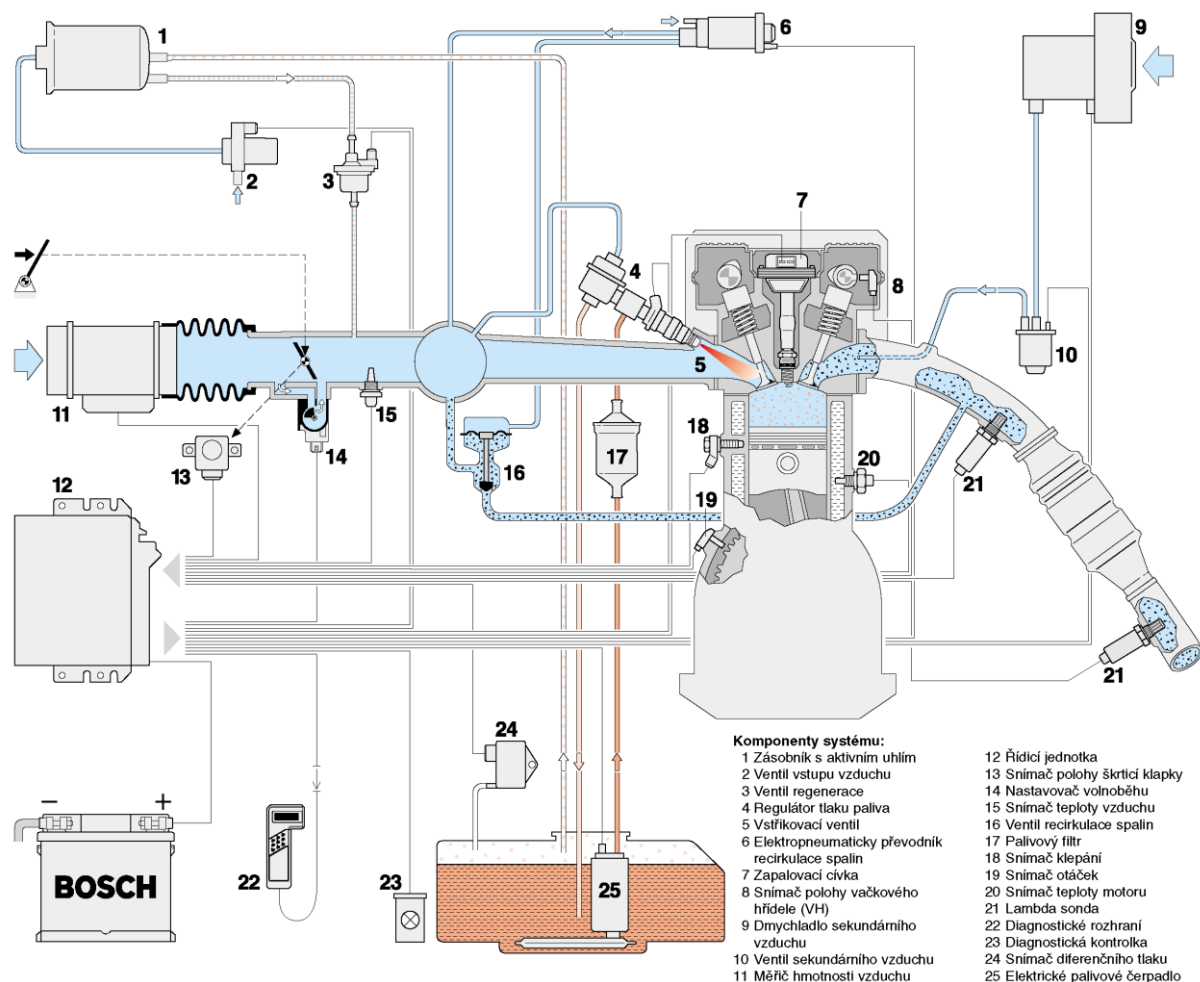


Obr. 6 Typy vstřikování: a)Vícebodové b)Jednobodové c)Přímé [12]

JEDNOBODOVÉ VSTŘIKOVÁNÍ

Prvky palivového systému:

- Palivové čerpadlo
- Regulátor tlaku paliva
- Vstřikovací jednotka
- Odvětrávání nádrže



Obr. 7 Schéma systému MOTRONIC [13]

Elektronické zapalování

Elektronické zapalování zabezpečuje ve všech režimech motoru optimální hodnotu předstihu zážehu, také je zajištěna optimální hodnota úhlu sepnutí přerušovače, k zajištění dostatečně dlouhé doby pro akumulaci energie potřebné pro vysokonapěťový výboj na elektrodách zapalovací svíčky. Zapalování je složeno z následujících prvků:

- Vysokonapěťový transformátor
- Koncový výkonový stupeň
- Kabely vysokého napětí
- Rozdělovač
- Svíčky



Snímání provozních dat

V okamžitém provozním stavu motoru je třeba snímat údaje následujícími snímači:

- Snímač otáček motoru
- Snímač úhlu a změny úhlové rychlosti natočení škrtkicí klapky
- Snímač teploty nasávaného vzduchu
- Snímač teploty chladicí kapaliny
- Snímač volnoběžné polohy škrtkicí klapky
- Lambda sonda



Obr. 8 Širokopásmová lambda sonda NGK [13]

Korekce vstřikovaného množství paliva

Podle zatížení motoru je určováno základní množství vstřikovaného paliva. Doba otevření vstřikovacího ventilu je určena z okamžité polohy škrtkicí klapky a otáček motoru z datového pole. Některé ustálené i přechodové režimy motoru ovšem vyžadují korekci vstřikované množství, jde o následující režimy:

- Spouštění motoru
- Zahřívání motoru
- Dynamické přechodové režimy
- Volnoběh
- Plný výkon
- Omezovač otáček
- Přerušování dodávky paliva při deceleraci [1]

VÍCEBODOVÉ VSTŘIKOVÁNÍ

Existuje několik systémů vícebodového vstřikování. Příkladem systému pracujícího přerušovaně je např. **L-Jetronic**. Doba vstřiku se řídí signálem zatížení motoru a otáček klikové hřídele. Výsledné množství paliva se určuje z teploty chladicího média, napětí akumulátoru nebo lambda sondy. Systém **K-Jetronic** pracuje kontinuálně s mechanicko-hydraulickým ovládáním množství paliva. Další systém je **Motronic**, zmíněný v předchozí kapitole.



Palivovou soustavu lze rozdělit podle způsobu dopravy ke vstřikovacím ventilům na:

- Soustavu se zpětným vedením
- Soustavu bez zpětného vedení

U palivové soustavy se zpětným vedením je přebytečné palivo z rozdělovače odváděno zpět do nádrže skrz regulační ventil. U systému bez zpětného vedení udržuje regulátor konstantní přetlak na vstupu do rozdělovače.

Komponenty palivového systému:

- Palivová nádrž



Obr. 9 Palivová nádrž osobního automobilu [15]

- Palivové čerpadlo



Obr. 10 Palivové čerpadlo [16]



Obr. 11 Palivový filtr [17]

- Regulátor tlaku paliva



Obr. 12 Regulátor tlaku paliva [19]

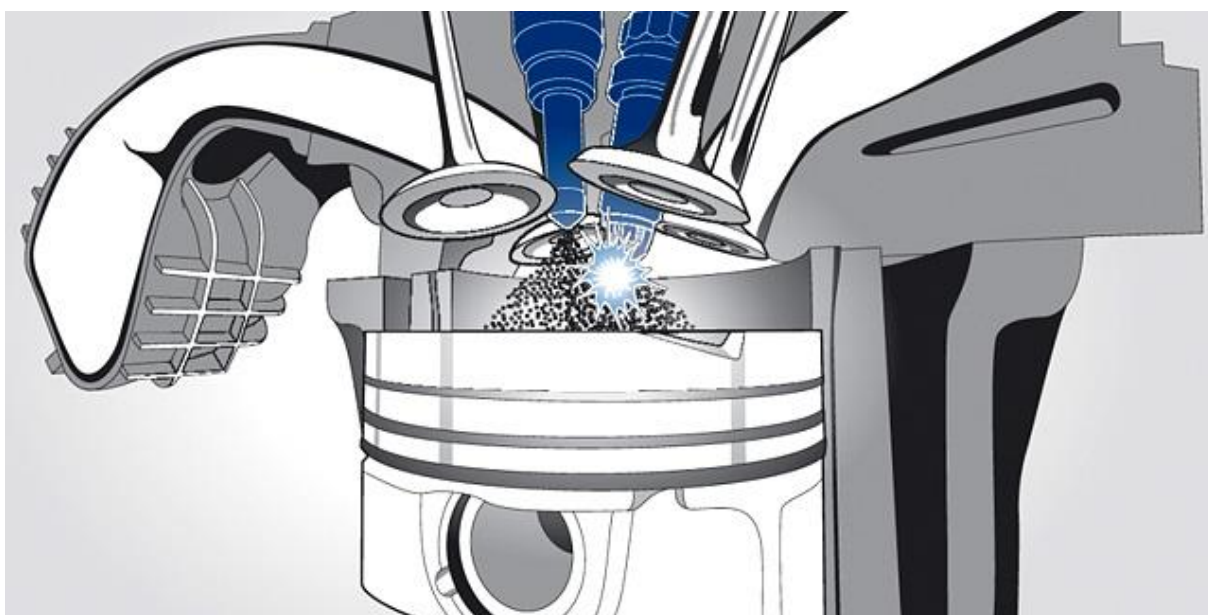
- Palivové potrubí
- Rozdělovač paliva
- Elektromagnetické vstřikovací ventily [9]



Obr. 13 Rozdělovač paliva se vstřikovači [18]

PŘÍMÉ VSTŘIKOVÁNÍ

Palivo je vstřikováno přímo do spalovacího prostoru motoru. Palivový systém zde tvoří nízkotlaký a vysokotlaký okruh. Je zde tedy navíc vysokotlakové čerpadlo. Tento systém není zatím pro motocykly příliš rozšířen, tedy ani ve Formuli Student. Přesto jeden tým touto technikou disponuje. Jedná se o přeplňovaný dvouválcový motor AMG. [1]



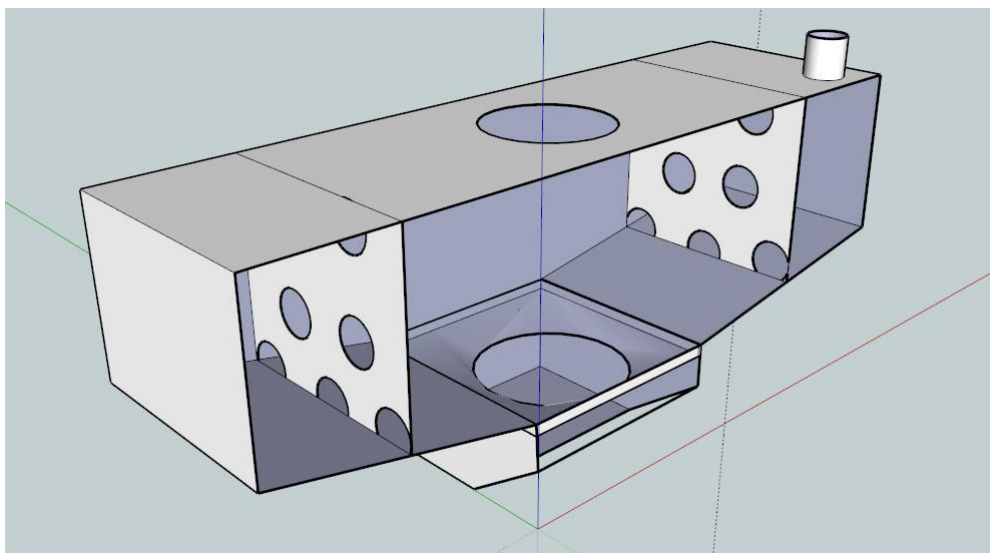
Obr. 14 Schéma přímého vstřikování [20]



2.2 ROZDÍL PROTI FORMULOVÝM VOZIDLŮM

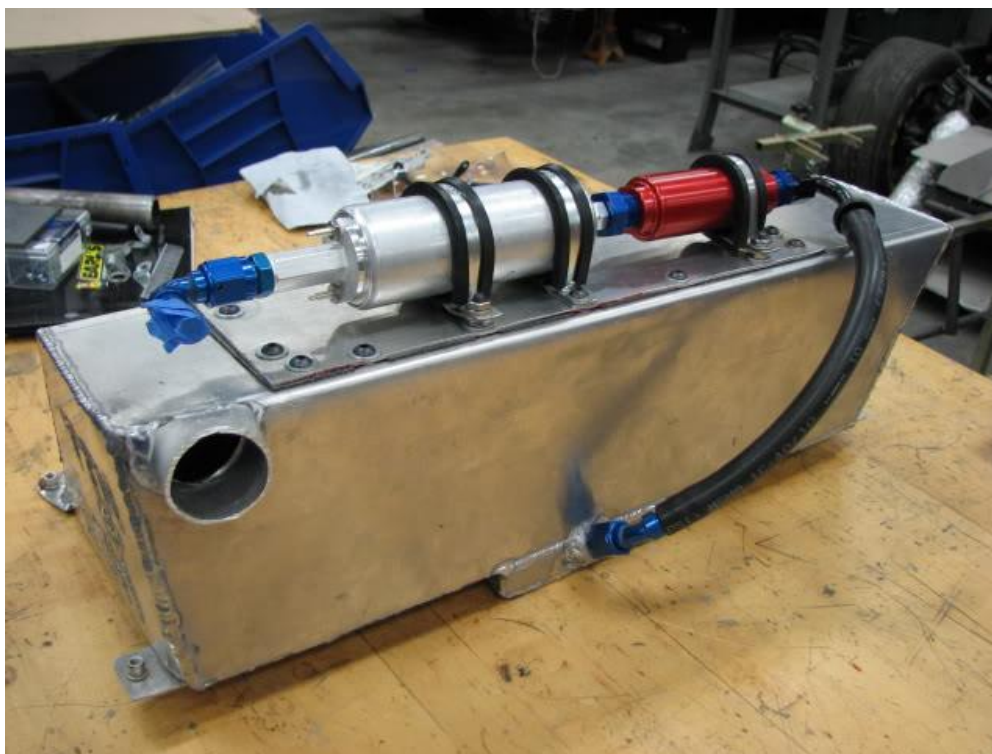
Hlavním rozdílem mezi palivovým systémem FSAE a osobním vozem nebo motocyklem je takový, že není stavěn na boční zrychlení. Motocyklový palivový systém vůbec, automobilový částečně. Běžné pneumatiky jsou schopny přenášet boční zrychlení pod 1G, což je zároveň hodnota koeficientu tření. Ve Formuli student jsou běžná zrychlení až 3G.

2.3 FSAE



Obr. 15 Chybně navržené přepážky [25]

2.3.1 EXTERNÍ ČERPADLO

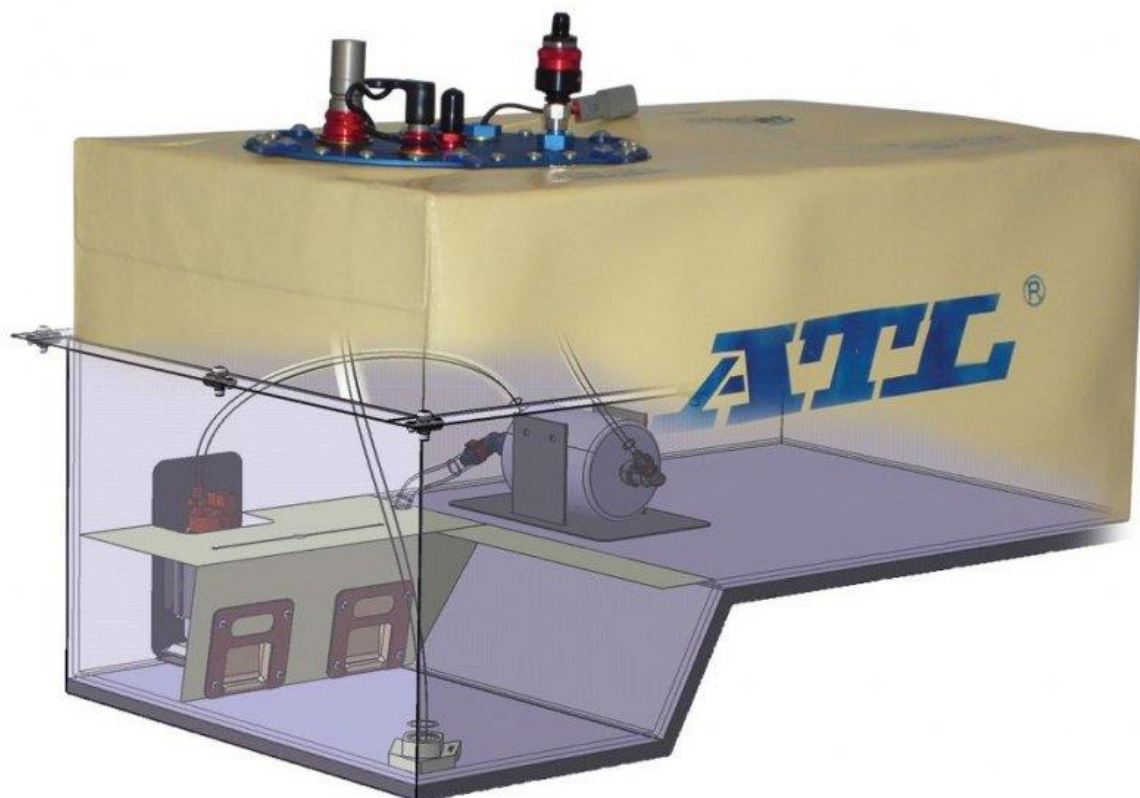


Obr. 16 Externí čerpadlo [26]



Při tomto uspořádání se nachází čerpadlo vně nádrže a palivo je nasáváno více sacími hadicemi, které se zpravidla nacházejí v rozích. Demontáž čerpadla je zde jednodušší než v druhém typu uspořádání, avšak při poruše vedení může palivo unikat mimo prostor nádrže. Čerpadlo má také větší rozměry a tím i váhu.

2.3.2 ČERPADLO V NÁDRŽI



Obr. 17 Systém s palivovým čerpadlem v nádrži [27]

Druhou možností uložení čerpadla je jeho umístění přímo v nádrži. V případě poruchy se musí palivová nádrž rozdělat a čerpadlo vyměnit. Ale naopak v případě poruchy na vedení nedojde k unikání paliva mimo nádrž. V nádrži je potřeba navrhnout soustavu přepážek, která dostává palivo k čerpadlu a zpět nikoliv. Palivové čerpadlo má zde menší rozměry.

2.4 MATERIÁLY PALIVOVÉ NÁDRŽE

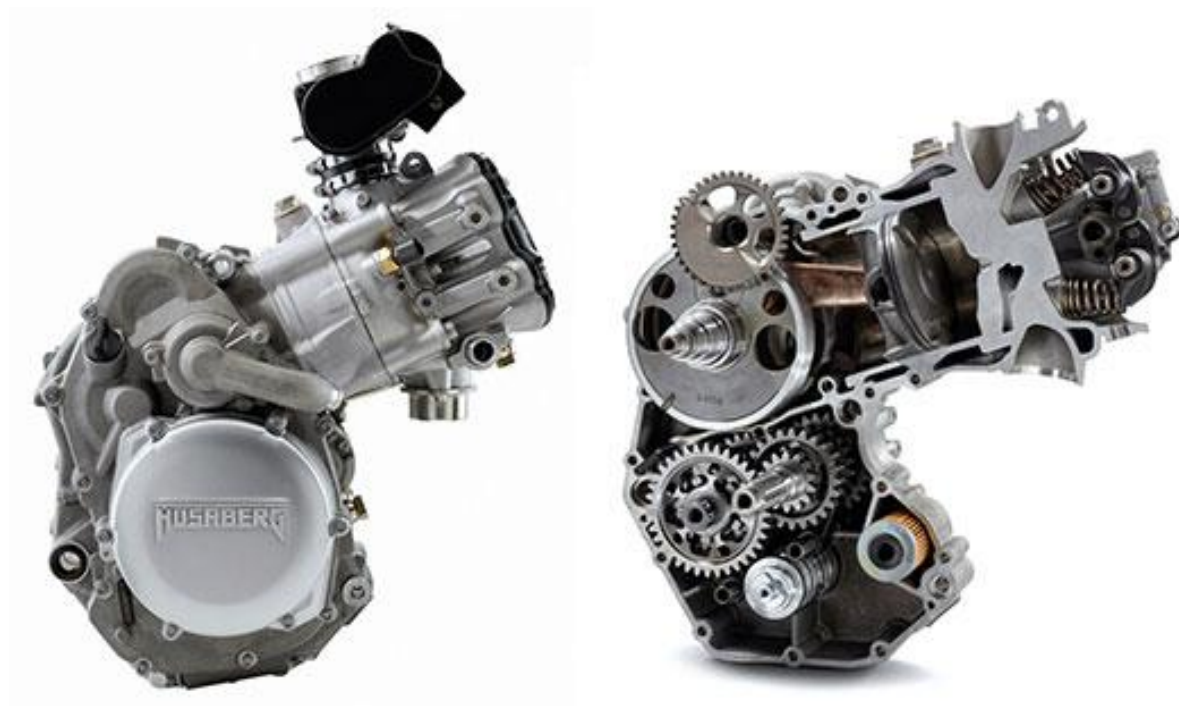
Ve Formuli Student se nachází několik typů materiálů. Hlavním materiálem je hliník. Další možností je pružný vak, který musí být podle pravidel uložen v pevném obalu. Jednoduchým řešením obalu může být kompozit. Toto řešení je ovšem těžší než řešení hliníkové. Je možno se také setkat s nádrží, která je metodou 3D tisku vyrobená z plastu. Poslední nejméně rozšířenou možností čistě kompozitová nádrž. U této možnosti je problém v tom, že paliva jsou obecně rozpouštědla, takže je nutné povrch chránit odolným nátěrem. Nátěry pro benzin v současné době existují, ovšem pro E-85 zatím žádný takový neexistuje, neboť toto palivo je ještě více agresivní a mění strukturu epoxidové pryskyřice, která je v kompozitech matricí.



Obr. 18 Nylonová palivová nádrž týmu GFR [24]

2.5 MOTORY

Týmy Formule Student mohou dle pravidel využít motor o maximálním objemu až 610 cm³. Převážně se proto využívají motory motocyklové, které mají dobrý výkon v poměru s hmotností a rozměry. Nejvíce se v současné době používají motory čtyřválcové, ale týmy pomalu začínají přecházet na motory jednoválcové. Čtyřválcové motory dosahují v sériové podobě výkonu přibližně v rozmezí 60 až 90 kW. Jednoválcové motory (35 až 45) kW. Pravidla Formule Student nařizují užití restriktoru pro omezení sání vzduchu o průměru 20 mm pro benzínové motory a 19 mm pro palivo E-85. Výkon je tedy omezen a mají tím všichni stejné podmínky. Výhodou jednoválcového motoru je jeho nižší hmotnost (cca o 20-30 kg oproti čtyřválcovému) a menší rozměry. Nevýhodou je vysoká úroveň vibrací. Nižší výkon je tedy kompenzován úsporou váhy za cenu vysokých vibrací. Proto je tedy důležité uložení motoru. Některé týmy používají dvouválcové motory jako kompromis, ovšem jsou omezeni servisem a náhradními díly k těmto motorům. Těchto týmů ovšem moc není. Posledním trendem je také přeplňování motorů jednoválcových. Ale tento vývoj je na začátku.



Obr. 19 Motor Husaberg FE 570 z předchozích generací Dragona [21]

Tab. 1 Přehled nejčastěji používaných motorů

Jednoválcové motory	Dvouválcové motory	Čtyřválcové motory
KTM EXC 450	Aprilia RXV 450	Honda CBR 600 RR
KTM EXC 500	Aprilia RXV 550	Honda CB 600F
Husaberg FE 570	AMG R2 Turbo	Yamaha YZF R6
Yamaha WR 450 F		Yamaha FZ6
		Suzuki GSX R600
		Kawasaki ZX-6R

2.6 PALIVA

Jak již bylo naznačeno v předchozí kapitole, tak podle pravidel jsou povoleny 2 druhy paliv. Motor může pohánět klasický *benzin* nebo *E-85*, což je ethanol s benzinem v poměru 85% ethanolu a 15% benzínu.



2.6.1 BENZIN

Hustota benzínu se pohybuje mezi (0,71 až 0,77) g/cm³, přičemž vyšší hustota znamená větší podíl arenů. Základní charakteristikou benzínu je jeho oktanové číslo, které označuje, jak je benzin odolný vůči detonačnímu hoření (tzv. klepání motoru). Oktanové číslo se měří podle směsi 2, 2, 4 - trimethylpentanu (izooktan, izomer oktanu) a n-heptanu. Existují různé možnosti vyjádření oktanového čísla. Proto stejné palivo může být označeno několika různými čísly, dle použitého systému značení. Například v České republice se používá výzkumná metoda a motorová metoda, oktanové číslo zjištěné motorovou metodou bývá vždy nižší. Benzin obsahuje cca U=46,4 MJ/kg energie, tedy 8,89 kWh/l. [37]

2.6.2 E-85

Palivo E-85 je palivo, které prošlo atestem a splňuje požadavky ČSN 636512 a emisní limity Euro 4. E-85 je směs skládající se z 85 % ethanolu a z 15 % naturalu 95. Tento poměr se může měnit podle toho jaké je roční období, ale minimální podíl ethanolu musí být vždy alespoň 70 %. Dle výrobců má E-85 oproti klasickému benzínu několik výhod, např. nárůst výkonu motoru nebo výrazné snížení emisí výfukových plynů. Je to z toho důvodu, že E-85 má vyšší oktanové číslo (105) a při jeho spalování vzniká až o 70% méně emisí CO₂ - tím se šetří životní prostředí. Co se týče výkonu, potřebuje motor více energie z paliva. To znamená vyšší spotřebu. Pokud zůstanou vozu výkonové limity, může to naopak znamenat nižší spotřebu. Surovinou pro výrobu bioethanolu bývá jakákoliv biomasa s dostatečným množstvím cukrů nebo látek, které lze na cukr převést. Bioethanol se vyrábí z cukrové řepy, cukrové třtiny, brambor, obilovin, nebo z dřevin obsahujících lignocelulózu. Ethanol má nižší spalovací teploty než benzín, čímž logicky zvyšuje životnost motoru – ventily, hlava, písty, olej i ostatní části motoru jsou vystaveny nižším teplotám a tím i menšímu teplotnímu namáhání či pnutí, tvoří méně znečišťujícího karbonu a usazenin. E-85 je rozpouštědlo a proto jsou všechny vstřikovací prvky udržovány v čistém stavu a stále fungují jako u nového motoru. [22]

2.6.3 SROVNÁNÍ

Tab. 2 Srovnání paliv [23]

Palivo	Benzin (OČ 100)	E-85	100% Ethanol
Hustota (kg/l)	0,744	0,784	0,791
Hmotnost vzduchu na 1 kg paliva při λ=1 (kg)	14,640	9,850	9,004
Energie v 1 kg paliva (MJ/kg)	44,53	31,98	29,76

Ve výsledku lze mít v motoru jedoucím s palivem E-85 vyšší kompresní poměr, protože je toto palivo více odolné vůči detonačnímu hoření než benzin. Tohoto faktu využívají týmy, které na svém motoru nějakým způsobem zvětšují kompresní poměr nebo svůj motor přeplňují. E-85 na rozdíl od benzínu obsahuje vzdušný kyslík. Znamená to tedy, že je potřeba méně přidaného kyslíku na 1 kg paliva.



3 PRAVIDLA FSAE PRO PALIVOVÝ SYSTÉM

Pozn.: IC=(Internal Combustion), tedy jedná se tedy o pravidla pro motory s vnitřním spalováním.

IC2.1 PALIVA

IC2.1 Základní palivo pro soutěže FSAE je bezolovnatý benzin. Ten by měl mít minimálně 95 oktanů. Jaký benzin bude k dispozici na danou soutěž použit, by mělo být oznámeno pořadateli, kteří mohou své rozhodnutí kdykoliv změnit. Organizátoři také rozhodují o možnosti použití jiných paliv.

IC2.1.1 Palivo na jednotlivých soutěžích zajišťuje pořadatel, není-li rozhodnuto jinak.

IC2.1.2 Palivo doplňují během dynamických disciplín jen osoby pověřené organizátory.

IC2.1.3 Do paliva je zakázáno přidávat jakékoliv aditiva, včetně rajského plynu či jiného oxidačního činidla.

Poznámka 1: Týmy by měli být poučeni o tom, že palivo dodávané v USA je předmětem různých federálních a státních předpisů a mohou obsahovat až 10% ethanolu. Přesné chemické složení a fyzikální vlastnosti dostupného palivem nemusí být známy před soutěží.

Poznámka 2: Paliva poskytované na Formula SAE Michigan budou (93 až 100) oktanový benzin a E-85. Paliva, které budou poskytnuty na Formula SAE Lincoln nejsou předem určená. Předpokládají se 2 typy benzínu, buď (91 až 93) oktanového nebo 97 nebo 100 oktanů. Bude zde také E-85. Paliva se tedy mohou měnit.

Poznámka 3: Paliva poskytované na FSAE soutěžích závisí na dodavatelích, které palivo mají zrovna k dispozici. Přesto se pořadatelé budou snažit informovat o palivech na dané soutěži. Týmy by tedy měli také sledovat informace od daných dodavatelů.

IC2.2 ADITIVA

IC2.2.1 Žádné látky jiné než palivo (benzin nebo E-85) a vzduch nesmí být dodáván do spalovacího prostoru. Porušení tohoto pravidla může vést k vyloučení ze závodu.

IC2.2.2 Techničtí komisaři mají právo nahlížet do oleje.

IC2.3 Změna teploty paliva je zakázána

Teplota paliva zavedeného do palivového systému se nesmí měnit s úmyslem zlepšit účinnost spalování.

IC2.4 PALIVOVÉ NÁDRŽE

IC2.4.1 Palivová nádrž je definován jako nádoba na palivo, která je v kontaktu s palivem. Může být vyrobená z tuhého nebo pružného materiálu.

IC2.4.2 Palivové nádrže vyrobené z tuhého materiálu, nesmí přenášet zatížení konstrukce, např. z hlavního oblouku, podvozku, motoru nebo převodovky a musí být bezpečně připevněny k



nosné konstrukci vozidla pomocí držáků, které umožňují určitou pružnost, takže odpružení nemůže zatěžovat palivovou nádrž.

IC2.4.3 Každá palivová nádrž, která je vyrobena z pružného materiálu, např. vak musí být uzavřena do tuhého kontejneru, který je pevně připojen k nosné konstrukci vozidla. V tomto případě může být tato nádoba nosná.

IC2.4.4 Lze použít jakoukoliv velikost palivové nádrže.

IC2.5 POŽADAVKY NA UMÍSTĚNÍ NÁDRŽE

IC2.5.1 Všechny části nádrže musí ležet uvnitř plochy definované hlavními oblouky a vnitřní hranou čtyř pneumatik. Při bočním pohledu na auto, nesmí žádná část přesahovat přes spodní hranu rámu.

IC2.5.2 Všechny palivové nádrže musí být chráněny proti bočnímu a zadnímu nárazu. Každá palivová nádrž, která se nachází mimo boční strukturu, musí být chráněna zástavbou. Jakákoliv část palivového systému, která je níže než 350 mm (13,8 palce) nad zemí, musí být chráněna primární strukturou.

IC2.5.3 Protipožární štít musí oddělovat palivovou nádrž a řidiče.

IC2.6 PLNICÍ HRDLO PALIVOVÉ NÁDRŽE A INSPEKČNÍ TRUBICE

IC2.6.1 Všechny palivové nádrže musí být plnicí hrdlo, které mají:

- minimálně 38 mm (1,5 palce) vnitřní průměr
- nejméně 125 mm (4,9 palce) svislou výšku
- pod úhlem menší než 30 ° od svislice

IC2.6.2 125 mm vertikální výška plnicího hrdla paliva musí být nad nejvyšší úrovní nádrže a musí mít průhlednou (signalizační) trubici pro odečtení hladiny paliva.

IC2.6.3 Průhledná trubice musí mít minimálně 125 mm (4,9 palce) na výšku a minimální vnitřní průměr 6 mm (0,25 palce).

IC2.6.4 Průhledná (signalizační) trubice nesmí začínat na povrchu palivové nádrže.

IC2.6.5 Průhledné plnicí hrdlo může být použito jako signalizační trubice, pokud to nezakazují pravidla nebo techničtí komisaři na závodě.

IC2.6.6 Maximální hladina paliva – pevně umístěná značka hladiny paliva musí být umístěna (12,7 až 25,4) mm nebo (0,5 až 1) palec pod horní hranou signalizační trubice. Tato linka bude sloužit jako ryska pro Test náklonu, a před a po vytrvalostním závodu pro měření spotřeby paliva.

IC2.6.7 Signalizační trubice a ryska musí být jasně viditelné dvě osoby (jedna osoba k naplnění nádrže, druhá ke kontrole tankování), aniž by bylo třeba pomoci (např. umělé osvětlení, lupy apod.) nebo by bylo třeba některé díly vyjmout z vozu. Signalizační trubice musí být tedy kompletně viditelná.



IC2.6.8 K natankování paliva musí být úplný a přímý přístup k otvoru plnicího hrdla se standardním kanystrem o objemu 2 galony a typických rozměrech.

IC2.6.9 Plnicí hrdlo musí mít víčko, které dokáže odolat silným vibracím nebo vysokým tlakům, které by mohlo nastat při převrácení vozidla.

IC2.7 POŽADAVKY NA TANKOVÁNÍ

IC2.7.1 Palivová nádrž musí být schopna k naplnění kapacity bez manipulace nádrže nebo vozidla. Palivový systém musí být navržen tak, aby při čerpání pohonných hmot do vozu na rovné ploše nevznikaly vzduchové bubliny nebo jiné vlivy, které způsobují změnu hladiny paliva při pohledu na signalizační trubku při pohybu vozu, čímž by vedlo ke špatnému měření spotřeby. Během tankování nebo doplňování paliva do vozidla může s palivem manipulovat pouze osoba k tomu určená. Palivo se doplňuje po plnicí linku, případně lze použít systém automatického zastavení plnění. Pokud z nějakého důvodu změní hladina paliva při pohnutí vozu, nebude dočerpáno další palivo.

IC2.7.2 Palivový systém musí být navržen tak, aby se nemohlo dostat palivo při čerpání pohonných hmot k pozici řidiče, výfukovému systému, horkým částem motoru nebo systému zapalování.

IC2.7.3 Podlaha musí být odvětrávána, aby se zabránilo případnému hromadění paliva při netěsnosti. Alespoň 2 otvory musí být v podlaze, každý o minimálním průměru 25,4 mm, musí být v nejnižší části struktury umístěn takovým způsobem, aby se zabránilo hromadění těkavé kapaliny nebo par.

IC2.8 VENTILAČNÍ SYSTÉMY

IC2.8.1 Palivový systém musí být navržen tak, aby palivo nemohlo unikat při prudkém zatáčení nebo zrychlení. To je rozdíl proti motocyklům, které nejsou stavěny na takové boční zrychlení.

IC2.8.2 Všechny odvězdušňovací hadice musí být vybaveny zpětným ventilem, aby se zabránilo úniku paliva při převrácení vozidla. Veškeré odvětrávací systémy musí končit mimo karoserii.

[2]

4 NÁVRH PALIVOVÉHO SYSTÉMU

4.1 MOTOR A JEHO SPOTŘEBA

V letošní sezoně se náš tým rozhodl k výrazným změnám na motorové části vozu. V první řadě se jedná o samotnou pohonnou jednotku. Jde o motor KTM EXC 500/Husaberg FE 501/Husqvarna FE 501 (označení podle prodejce). Značka se liší pouze barvou víček. Jako v předchozích sezonách se jedná o jednoválcový vodou chlazený motor. Jeho zdvihový objem činí $V=510\text{ cm}^3$.

Tab. 3 Technická data motoru [38]

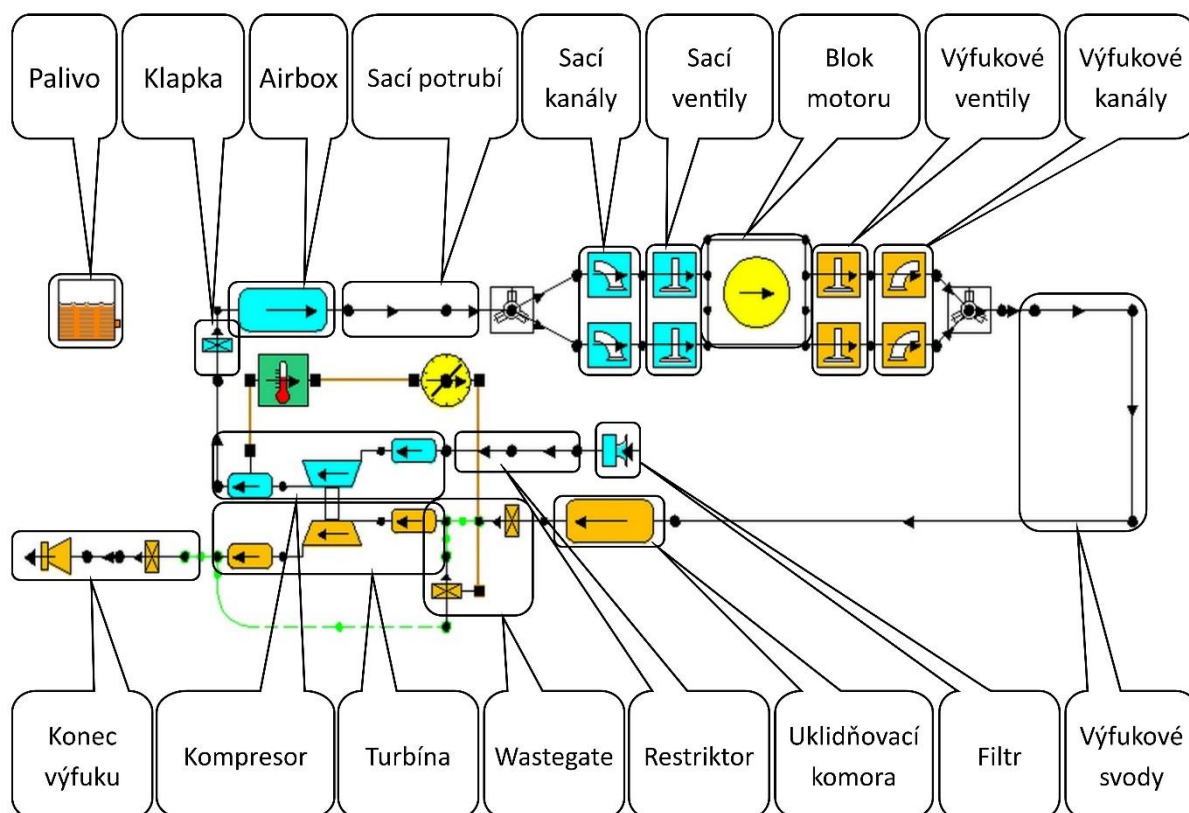


Obr. 20 Motor pro letošní sezonu [38]

Konstrukce	Jednoválec, vodou chlazený, 4-dobý
Zdvihový objem	510.4 cm ³
Vrtání	95 mm
Zdvih	72 mm
Výkon	40 kW
Kompresní poměr	11.8:1
Rozvod	OHC
Ventilů na válec	4
Startování	Startér
Mazání	2 olejová čerpadla
Primární převod	32:76
Sekundární převod	14:50 (13:50)
Chlazení	Chlazení vodou, pohon vodní pumpou
Spojka	Mokrá vícelamelová hydraulická DDS / Brembo
Zapalování	Bezkontaktní, plně elektronicky řízené s nastavitelným časováním

Údaje výše uvedené se vážou na sériový model. Tento motor bude kompletně předělán, jelikož se tým rozhodl pro zvýšení výkonu pomocí přeplňování. Jednoválcový motor má výhodu ve váze, ale zaostává výkonem. Tento fakt se nejvíce projevuje při akceleraci. Čtyřválcový motor pro nás nemá opodstatnění. Pro přeplňování přichází v úvahu kompresor či turbo. Kompresor má nevýhodu, že odebírá výkon z klikové hřídele a i plnicí tlak je závislý je jejich otáčkách. Turbo má nevýhodu turbo-efektu a nutnosti mazání.

Volba přesto padla na turbodmychadlo značky Garrett. Plnicí tlak se předpokládá maximálně $p = 0,6\text{ bar}$, aby se daly použít některé sériové komponenty. Zvýšením spalovacího tlaku se také předpokládá, že by mohlo docházet k detonačnímu hoření, proto jako palivo byl zvolen ethanol E-85, který je vůči těmto detonacím více odolný. Jeho oktanové číslo odpovídá hodnotě přibližně $OC=105$. V souvislosti s detonačním hořením se musí také zmenšit kompresní poměr a to na hodnotu $\varepsilon = 9,5$. Aby byla známá přibližná vnější otáčková charakteristika tohoto motoru, tak je třeba vytvořit matematický model, aby bylo zřejmé, jaké parametry a termodynamické charakteristiky bude mít.

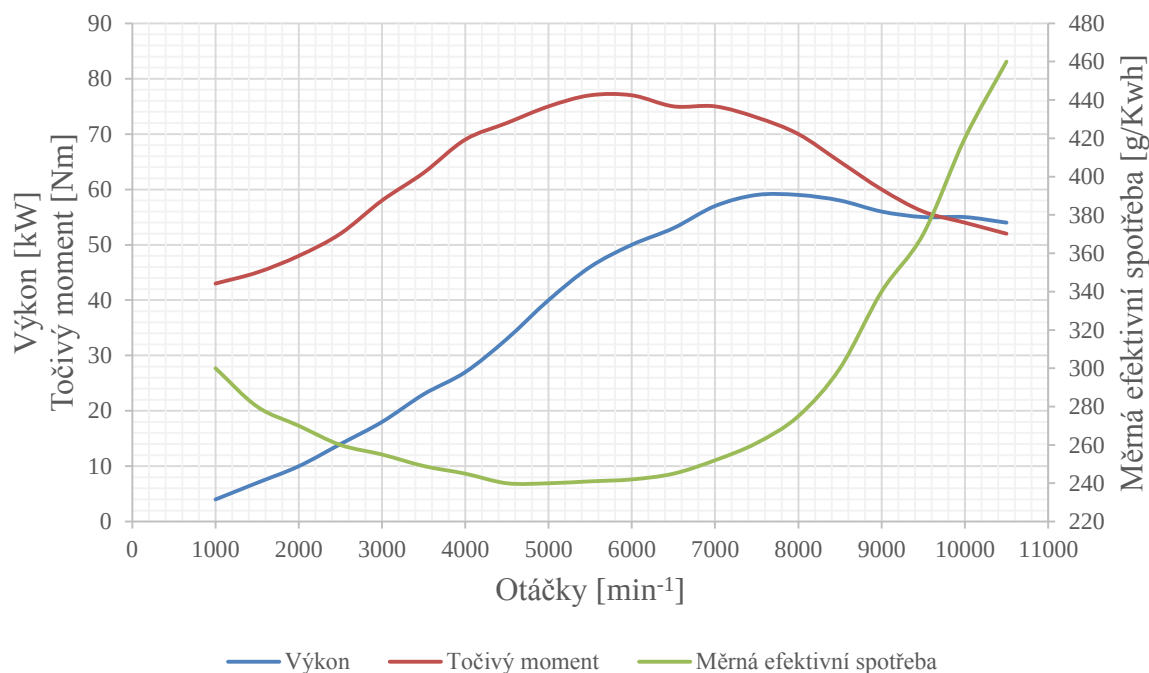


Obr. 21 Schéma modelu motoru v programu LOTUS

Model motoru byl vytvořen v programu LOTUS. Proti přirozeně plněnému motoru má motor přeplňovaný turbodmychadlem řadu změn. V první řadě se jedná o již zmíněné turbodmychadlo, které má za následek zvýšení tlaku nasávaného vzduchu. Díky tomu je třeba změnit výfukové i sací potrubí. Jelikož se jedná o jednoválcový motor, je nutné sací i výfukové potrubí opatřit uklidňovacími komorami, které zmírňují tlakové pulzace, které u tohoto motoru vznikají. Rozměry potrubí jsou získány z 3D modelu celé motorové jednotky a rozměry z hlavy motoru jsou naměřené. Jedná se o kanály a ventily. Restriktor se nachází podle pravidel FSAE před kompresorem a má průměr $d = 19 \text{ mm}$. První problém nastal v situaci, kdy bylo třeba definovat palivo E-85 a program LOTUS ho ve své databázi nemá. Má ovšem editační okno, kde lze přidat své vlastní palivo, lze definovat pomocí poměru kyslíku, vodíku a uhlíku obsaženého v tomto palivě. Dále je také třeba znát molární hmotnosti těchto prvků, což se jednoduše zjistí z periodické soustavy prvků. Tím definujeme poměr. Dále je třeba také znát výhřevnost a hustotu paliva. V neposlední řadě bylo třeba definovat tlaky v turbíně a kompresoru, kde se vycházelo z maximálního předpokládaného plnicího tlaku $p = 0,6 \text{ bar}$. Na následujícím grafu lze vidět vnější otáčkovou charakteristiku motoru:



Vnější otáčková charakteristika



Obr. 22 Vnější otáčková charakteristika motoru

Z grafu je zřejmý nárůst točivého momentu a zvýšení výkonu na $P = 60 \text{ kW}$. Z tohoto výsledku plyne fakt, že bude třeba některé sériové komponenty nahradit jinými. Bude třeba vyměnit píst, spojku a použít kratší ojnice (z důvodu zmenšení kompresního poměru). Také se předpokládá zvýšení spotřeby. Abychom měli představu o tom jaký je nárůst tlaku oproti atmosférickému motoru, tak vyjdeme z rovnice pro výpočet efektivního výkonu:

$$P_e = \frac{2p_e V_z n i}{\tau} \quad (1)$$

$$p_e = \frac{P_e \tau}{2V_z n i} \quad (2)$$

kde:

P_e – Efektivní výkon

p_e – Střední efektivní tlak

V_z – Zdvihový objem

n – Otáčky

i – Počet válců

τ – Taktnost motoru



$$p_{NA} = \frac{P_e \tau}{2V_z n i} = \frac{40 * 4}{2 * 0,51 * \frac{8800}{60} * 1} = \mathbf{1,1 MPa}$$

$$p_{TURBO} = \frac{P_e \tau}{2V_z n i} = \frac{60 * 4}{2 * 0,51 * \frac{7500}{60} * 1} = \mathbf{1,9 MPa}$$

Z výsledků je zřejmé, že střední efektivní tlak je o 42% větší než u sériového atmosférického motoru. Také je důležité zmínit, že nejvyšší výkon je u nižších otáček. Tyto výsledky nám ovšem nedávají pojednání o teoretické spotřebě paliva, která je důležitá při návrhu palivové nádrže a jejích rozměrech. Následující vztahy více pojednávají o spotřebě:

$$m_{pe} = \frac{M_p}{P_e} \quad (3)$$

$$M_p = V_p \rho_p \quad (4)$$

kde:

m_{pe} – Měrná efektivní spotřeba

M_p – Časová spotřeba

V_p – Potřebný objem paliva

ρ_p – Hustota paliva

Měrnou efektivní spotřebu a efektivní výkon známe z grafu při jmenovitých otáčkách, stejně tak známe hustotu paliva a zajímá nás časová spotřeba a objem spotřebovaného paliva.

$$M_p = P_e m_{pe} = 60 * 260 = \mathbf{15,6 kg/hod}$$

$$V_p = \frac{M_p}{\rho_p} = \frac{14700}{784} = \mathbf{19,9 l/hod}$$

Nyní víme, kolik by motor spotřeboval paliva při stacionárním běhu na plný výkon. Při závodní jízdě je ovšem běh nestacionární a mění se tím tedy výkon i spotřeba. Můžeme vycházet ze skutečnosti, že vůz musí ujet trasu $s = 22 km$ a zajetý čas je kolem $t = 25 min$. Pokud by tedy využíval maximálního výkonu, na této trase by byla spotřeba $V_p = 7.9 l$.

Dalším krokem bylo měření spotřeby paliva na motorové brzdě. Atmosférický motor zde měl spotřebu paliva $V_p = 4,5 l$, přeplňovaná verze nebyla v době psaní této kapitoly práce ještě změřena. S ohledem na předchozí zkušenosti a měření na motorové brzdě při nestacionárním běhu motorové brzdě volím objem palivové nádrže $V_{PN} = \mathbf{6,7 l}$.

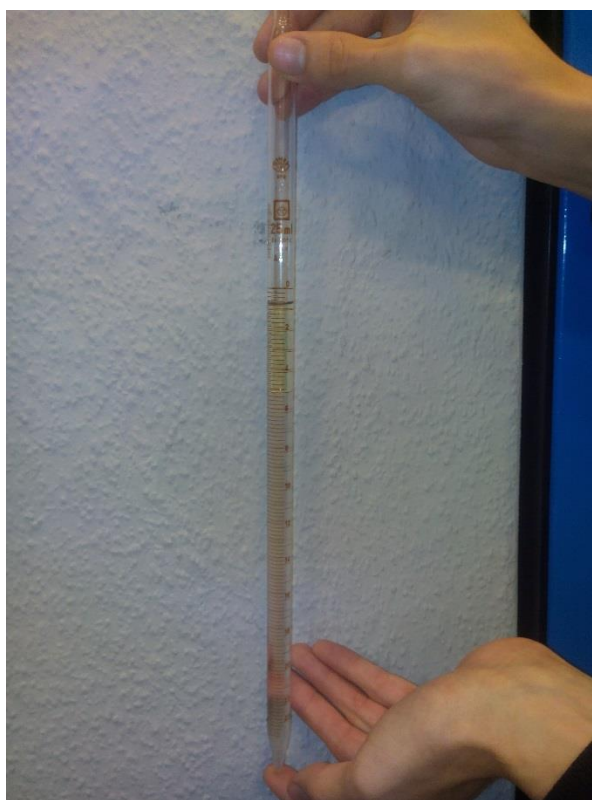


4.2 MĚŘENÍ PALIVA E-85

Podle pravidel FSAE může pořadatel měnit složení paliva dle podmínek či dodavatele. Mění se tím tedy poměr ethanolu a benzinu. Tento fakt může hrát roli při mapování motoru. Proto je třeba najít vhodnou metodu na měření tohoto poměru a zjistit tím skutečné složení paliva. Jedna z těchto metod, ke které není nutné mít chemickou laboratoř je metoda, kdy se odebere vzorek paliva do zkumavky a přimíchá se do něj voda. Ta se po čase naváže na líh a vytvoří se 2 oddělené sloupce. Objem každého z nich je jednoduché změřit odečtením, nesmíme zapomenout na objem paliva a vody. Poté jednoduše zjistíme poměr složek v palivu.

Tab. 4 Měření poměru složek v palivu

Objem E-85 (ml)	14,60	20,00	15,00
Objem přidané vody (ml)	10,40	5,00	10,40
Objem oddělené vrstvy (ml)	3,80	4,40	3,60
Poměr (-)	0,26	0,22	0,24
Celkový objem (ml)	24,00	24,40	24,60
Přesnost měření (ml)	0,10	0,10	0,10



Obr. 23 Měření poměru složek v palivu

Měření probíhalo v zimním období a z tabulky je zřejmé, že v průměru bylo benzinu v palivu 26%. Tato skutečnost byla ověřena v chemické laboratoři v lihovaru Tereos TTD v Dobrovicích. V laboratoři byla naměřena také hodnota 26%. Takže lze tuto metodu brát jako přesnou.



4.3 VOLBA MATERIÁLU NÁDRŽE

V této části práce bude objasněna volba materiálu nádrže. V kapitole o používaných materiálech je zmíněno několik variant materiálů. Zde se pokusím objasnit, proč jsem zvolil resp. nezvolil daný materiál.

Pružný vak

Tato varianta byla konzultována s firmou ATL, která se zabývá výrobou a nabídkou komponent pro palivové systémy. Hlavní nevýhodou je zvýšení hmotnosti, jelikož vak musí být uložen v tuhém obalu, který by mohl tvořit palivovou nádrž i samotný. Taktéž mi bylo výrobcem sděleno, že při použití paliva E-85 je třeba vak často vyjímat z obalu a pročišťovat ho čistým benzinem. Poslední nevýhodou je cena. Cena vaku je opravdu vysoká, jelikož byl vak původně vyvíjen pro Formuli 1. Takže tato varianta byla zamítnuta hned na začátku vývoje.

Plastová nádrž

Varianta plastové nádrže byla také zamítnuta. Některé plasty se v palivu E-85 rozpouštějí. Bylo by složité ověřit informace ohledně odolnosti vhodného plastu. Také by byl problém s výrobou nádrže. Drahá by byla výroba jak vstříkovací metodou, tak metodou 3D tisku. Hlavním problémem však zůstává umístění nádrže. Nádrž totiž bude umístěna blízko výfukového systému, jelikož díky zástavbovým rozměrům ji nelze umístit jinam. Proti volbě hraje také roli fakt, že u jednoválcové pohonné jednotky vznikají vibrace.

Hliník vs. kompozit

V úvahu tedy přicházejí 2 varianty materiálů. Nejběžnější hliníková varianta a méně běžná kompozitová. Jak již bylo zmíněno, tak kompozitovou nádrž je třeba chránit nátěrem zevnitř, neboť matrice v podobě epoxidové pryskyřice dochází do styku s palivem a mění své vlastnosti.

Tuto skutečnost jsem ověřil testem, který trval 3 měsíce. Vyrobil jsem malé nádoby z uhlíkového kompozitu o objemu asi 1,2 litru a opatřil je průhledným víkem, které jsem utěsnil silikonovým tmelem. Do nádoby jsem nalil palivo E-85 a každý týden zapisoval čistou váhu nádoby. Palivo E-85 rozpouštělo silikon rychleji než se předpokládalo a víko tedy přestalo těsnit. Hlavním zjištěním bylo to, že materiál nádoby absorbuje palivo a zvětšuje tím svou hmotnost. Na první pohled povrch vypadal beze změn, ale byl měkčí než před nalitím paliva. Šlo tedy do něj udělat lehce rýhu např. nehtem. Testem bylo tedy ověřeno, že materiál je třeba chránit nátěrem.

Tímto nastávají 2 problémy. Prvním problém je, že ochranný nátěr existuje pouze pro benzinová paliva a druhý problém je zvýšení hmotnosti celé nádrže, pokud by tento materiál pro E-85 existoval. Oslovil jsem spoustu společností a žádná mi nezaručovala odolnost proti tomuto palivu. Povedlo se mi získat vzorky od 2 společností.

Prvním vzorkem byl Fuel Tank Sealer od firmy POR-15. Tento jednosložkový nátěr se primárně používá na opravu a těsnění poškozených nádrží. Výrobce ovšem sliboval odolnost proti všem palivům. Tento nátěr jsem tedy nanesl na stěny nádoby, která byla stejná jako ta v předchozím případě. Výsledek se dostavil již po 14 dnech. Celý nátěr nasáknul a odlepil se od stěn nádoby.



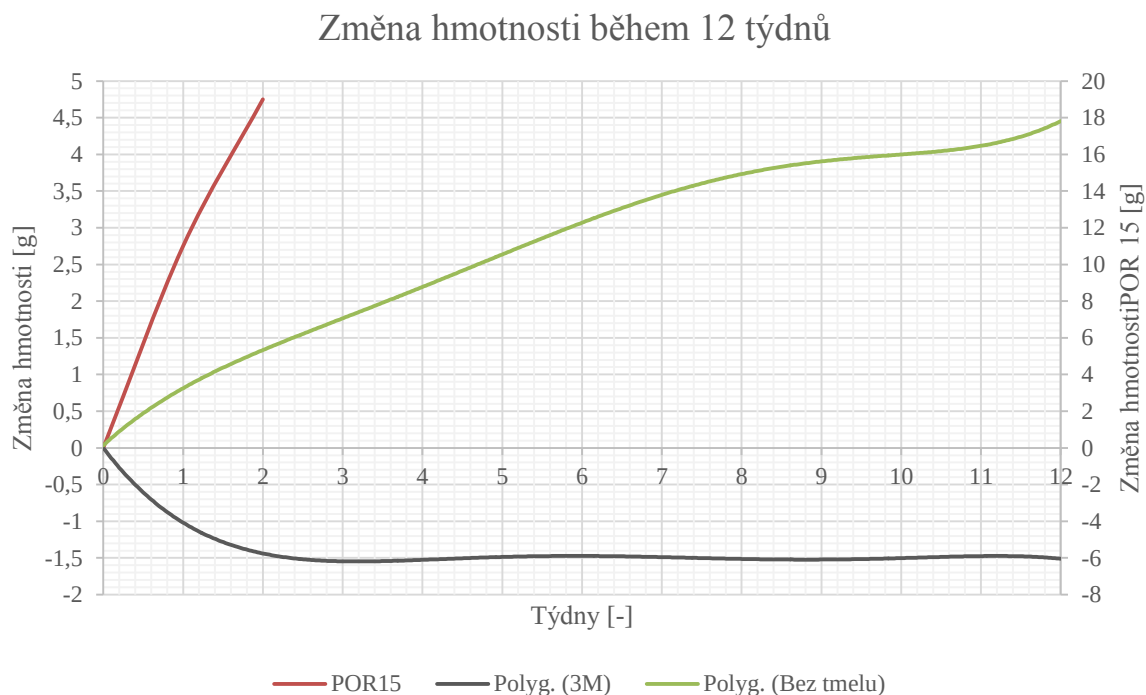
Obr. 24 Zkušební vzorky na test odolnosti

Druhý vzorek mi poskytla firma 3M pod názvem Fuel Tank Sealer AC-380 B-2. Tento dvousložkový tmel se používá do leteckých nádrží a je tedy velice odolný vůči palivům. Společnost ji testovala s mnoha palivy, ale podle jejich slov testy s E-85 ještě neproběhly. Nezbyvalo tedy, než si opět odolnost ověřit sám. Nátěr jsem opět nanesl na stěny nádoby. V tomto případě se během prvních 14 dní stalo to, že nádoba zmenšila svou hmotnost o asi 1,5 g z celkových 160 g celé prázdné nádoby. V dalších 10 týdnech již k žádným dalším změnám nedošlo. Proto jsem se rozhodl oslovit nějakého specialistu z Fakulty chemické VUT, který by blíže specifikoval změny v prvních 14 dnech. Ing. Miroslav Černý považil drobné vzorky, které byly opatřeny ochranným nátěrem v aparatuře typu Soxhlet. Vzorky byly ponořeny v laboratorní nádobě s E-85 při zvýšené teplotě 80°C po dobu 8 hodin a poté byly přeměřeny jejich změny hmotnosti. V počátcích docházelo v úbytku v průměru o 1% a s časem se úbytek zmenšoval k 0%. Takže výsledek v laboratoři byl podobný tomu, ke kterému jsem se dostal já.

V souvislosti s laboratorním testem vzorku opatřeného nátěrem bylo třeba ověřit i mé výsledky nechráněného kompozitu. I v tomto případě test opět dopadl podobně jako můj vlastní test mimo laboratoř. Dle slov Ing. Miroslava Černého samotný kompozit botná. Botnání je obvykle nežádoucí jev, protože může docházet k ovlivnění mechanických vlastností a dochází např. ke křehnutí. Absorbované rozpouštědlo může působit jako změkčovadlo, látka se stává elastičtější.



Všechny mé výsledky jsou shrnuté v grafu:

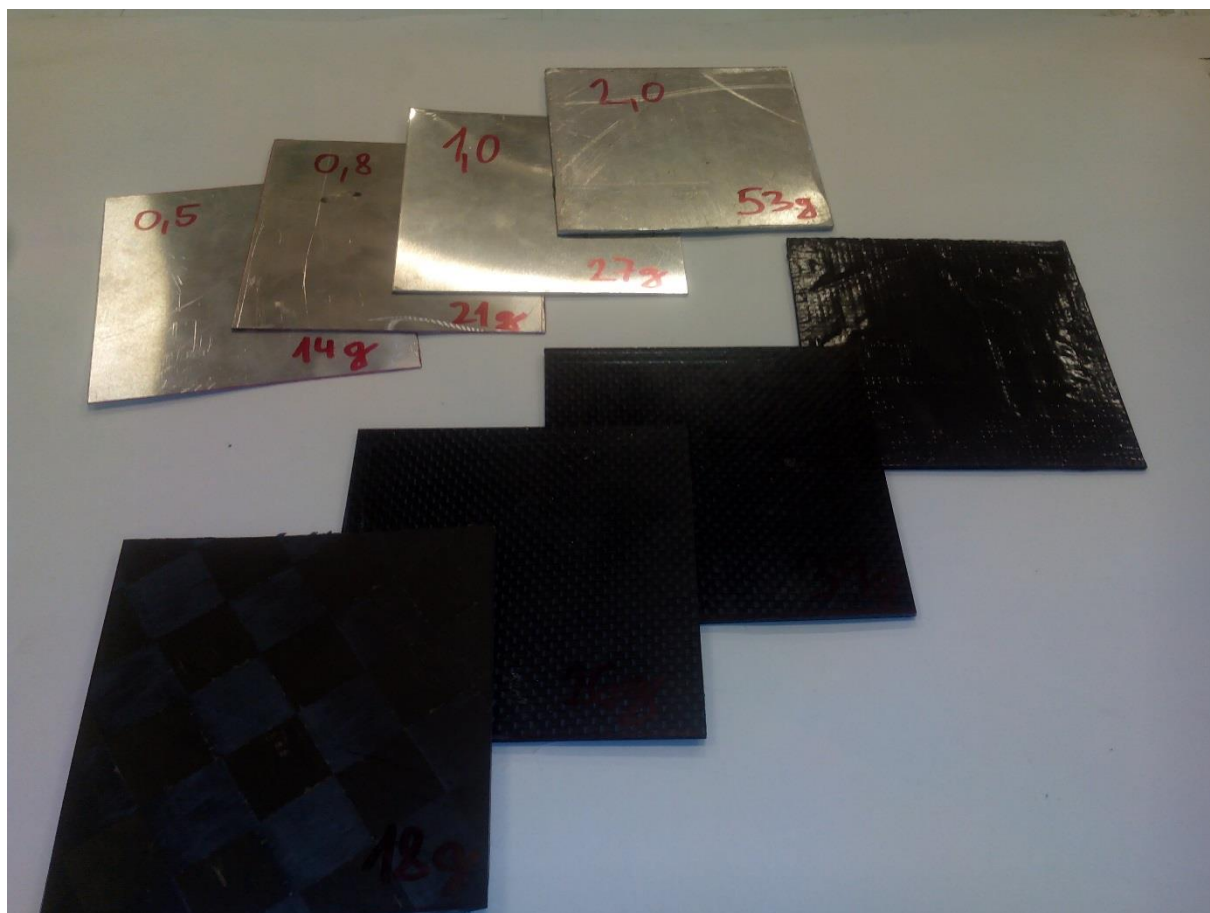


Obr. 25 Změna hmotnosti vzorků

Srovnání váhy hliníku a uhlíkového kompozitu:

Pro srovnání váhy bylo vytvořeno několik vzorků o ploše 1 dm^2 z hliníku a uhlíkového kompozitu. Byly využity různé tloušťky hliníku v rozmezí 0,5 mm až 2 mm. Stejně tak byly vytvořeny vzorky z uhlíku. Hliník v tloušťce 0,5 mm a 0,8 mm se v danou chvíli jevil jako nepoužitelný. Je to z důvodu tuhosti a složitého svařování. Tuhost dodá až hliník od tloušťky 1 mm a výše. Také svařování je jednodušší. Jelikož bude potřeba kompozit chránit, tak zde bude jisté navýšení váhy. Aby bylo výhodné použít kompozit, tak by váha 1 dm^2 měla být nižší než hodnota 27 g. Vzorek složený ze 4 uhlíkových tkanin a prosycený epoxidovou pryskyřicí, který by byl na nádrž vhodný vážil 14 g bez nátěru. Stejný kus vzorku jsem opatřil přiměřenou vrstvou tmelu a výsledná váha byla 18 g. Tmel tedy zvýší váhu o přibližně 4 g/dm^2 . Z modelu nádrže jsem následně vypočítal plochu potřebnou k nanesení nátěru. Velikost plochy vyšla 28 dm^2 . Výsledný nárůst váhy tedy bude minimálně 112g. Přesto se předpokládá úspora váhy až 33%. Vzorky je možno vidět na Obr. 26.

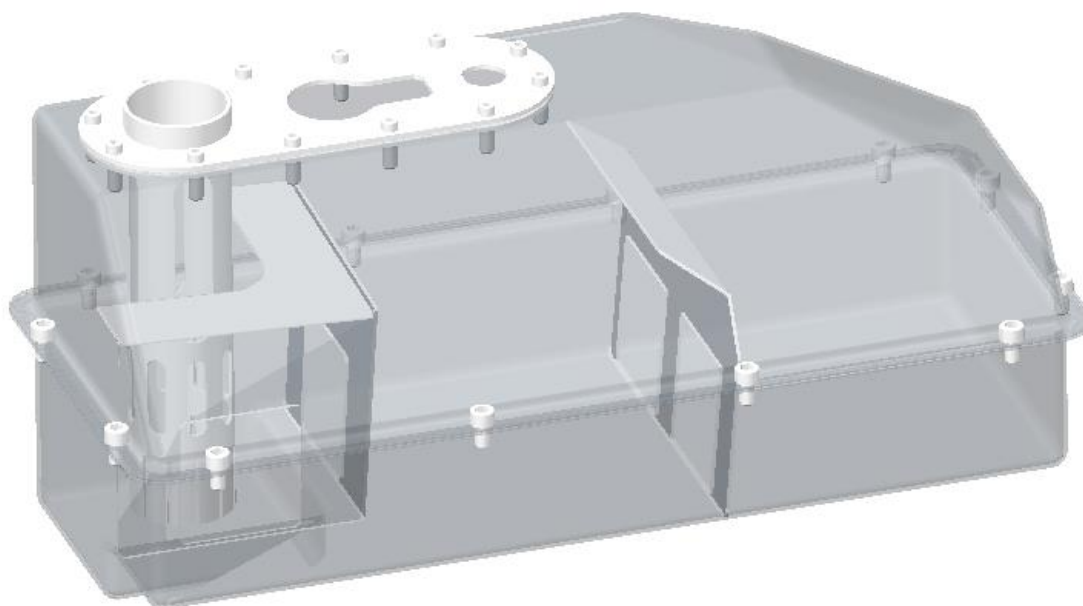
S ohledem na možnost ušetření velké váhy bude koncepce nádrže tedy založena na kompozitové variantě.



Obr. 26 Vzorky pro přezkoumání váhy

4.4 NÁVRH A VÝBĚR KOMPONENT

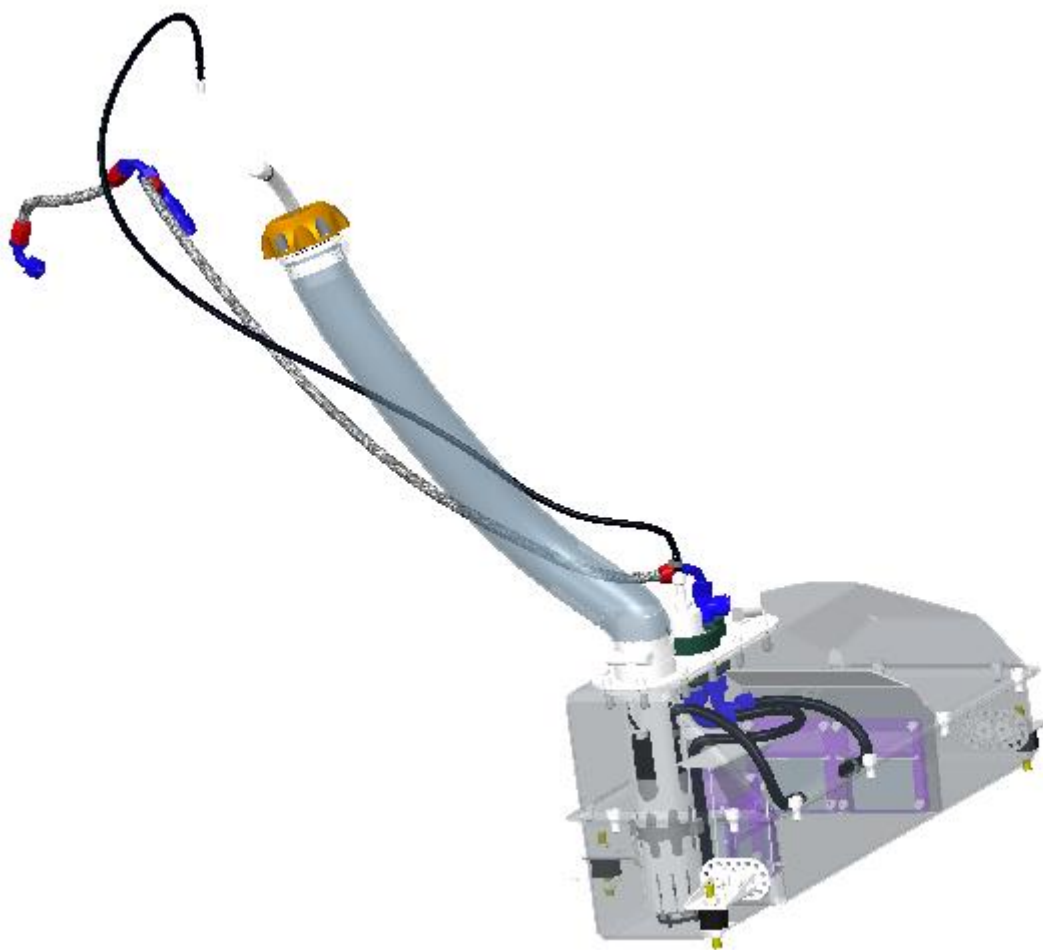
4.4.1 USPOŘÁDÁNÍ



Obr. 27 Uspořádání hlavních částí kompozitové palivové nádrže



Na Obr. 27 lze vidět předpokládané uspořádání palivové nádrže. Hlavní částí jsou horní a dolní polovina, které by měli být slepeny, sešroubovány a poté celý spoj přelaminován. Chtěl jsem se vyvarovat problémům s těsněním, a proto jsem volil jen jeden vstupní otvor, aby bylo těsnících ploch co nejméně. Další částí tvoří příruba s plnicí trubicí a přepážky. Celý palivový systém bude kompaktní, jelikož všechny komponenty budou uloženy ve zmíněné přírubě a bude tedy jednoduchá případná demontáž (Obr. 29). V přírubě se tedy bude nacházet čerpadlo, regulátor, konektor a termočlánek. Přepážky slouží ke zmírnění odlévání paliva a naopak dvířka v nich implementovaná dostávají palivo k čerpadlu v jednom směru a v opačném směru jsou zavřená a zabraňují odtoku paliva. Celý palivový systém je pak na Obr. 28.



Obr. 28 Kompletní model sestavy palivového systému



Obr. 29 Pohled na přírubu nádrže

4.4.2 VSTŘIKOVACÍ VENTILY

Vstřikovací ventily jsou poslední částí palivového systému, kde na konci procesu vstřiku se palivo mísí se vzduchem před sacími ventily. Motor má čtyřventilové rozvody, tedy 2 sací a 2 výfukové ventily, tak v úvahu připadá pouze vstřikovač, který palivo stříká ve dvou kuželech. Největší dvoukuželový vstřikovací ventil Bosch EV 14 ESxT je schopen dodávat až 429 g/min paliva. Zda by tento ventil stačil, zjistím z výpočtu časové spotřeby, kde budu brát v potaz největší spotřebu z matematického modelu při jmenovitém výkonu:

$$m_{pe} = 460 \text{ g/kWh}$$

$$P_e = 56 \text{ kW}$$

$$M_p = \frac{P_e m_{pe}}{60} \tag{5}$$

$$M_p = \frac{56 * 460}{60} = 430 \text{ g/min}$$



Nyní je zřejmé, že vstřikovací ventil je na maximu svého průtoku a v případě, že by se matematický model lišil od skutečného a bylo by potřeba více paliva, tak vstřikovač stačit nebude. Možné řešení jsou tedy pouze 2. Prvním řešením je použití jednokuželového vstřikovacího ventilu s průtokem 670 g/min. Toto řešení však není vhodné, neboť by směs byla nepravidelně rozstřikována mezi 2 sací kanály. Druhé řešení je sériové použití obou vstřikovačů, kde jednokuželový ventil bude umístěn před dvoukuželový a v případě potřeby dodá potřebné palivo. Druhý vstřikovací ventil bude tedy Bosch EV 14 CKxT.



Obr. 30 Vstřikovací ventil Bosch EV 14 [36]

4.4.3 ČERPADLO

Abychom navrhli velikost palivového čerpadla, tak lze vycházet z výpočtu maximálního průtoku paliva na jeden cyklus motoru a z maximálního průtoku vstřikovači. Pokud by bylo palivové čerpadlo určeno na základě maximálního průtoku vstřikovačů, teoreticky by nemělo mít žádný pokles tlaku, ten ovšem nastane při pulzaci těchto vstřikovačů.

Pro výpočet průtoku paliva potřebného pro čerpadlo (l/h) vycházíme tedy z parametrů maximálního hmotnostního toku na jeden cyklus (g/min) a maximálního hmotnostního průtoku vstřikovačem (g/min), tyto parametry převedeme také na (l/h), a přičteme k tomu dalších 20 % jako bezpečnostní faktor, aby se zohlednily ztráty v systému. Tlak v systému požadujeme 3,7 bar.

Tab. 5 Tabulka přepočtených hodnot

Palivo	Benzin	E-85
Maximální průtok vstřikovači (l/h)	46	66
Maximální průtok za jeden cyklus motoru (l/h)	27	35



Z tabulky je zřejmé, že pro palivo E-85 budeme potřebovat čerpadlo s průtokem více než 66 l/h. Z nabídky palivových čerpadel se jako nejlepší varianta jeví čerpadlo od značky Walbro, které má průtok až 100 l/h a pracovní tlak 7 bar. Čerpadlo má velkou výhodu v menších rozměrech a tedy i nižší váze.



Obr. 31 Palivové čerpadlo Walbro CFD-104 [28]

4.4.4 REGULÁTOR TLAKU PALIVA

Volba regulátoru tlaku paliva padla na Bosch MINI A, který má malé rozměry a velké možnosti nastavení. Výhodou tohoto regulátoru je schopnost měnit pracovní tlak v rozsahu $p=3,5-5$ bar. Takže je v případě nutnosti možné měnit pracovní tlak palivového systému v tomto rozsahu. Existuje ještě druhá varianta tohoto regulátoru, ale s pracovním tlakem pod $p=3,5$ bar ani nad $p=5$ bar se nepočítá. Další jeho výhodou je spojení se sáním, kde se bere hodnota referenčního tlaku, takže regulátor je schopen v případě potřeby měnit tlak paliva. Nevýhodou je pak vysoká cena. Výrobce nabízí pro tento regulátor i housing (skříň), ve které bude uložen. Tento výrobek je ovšem nevyhovující (rozměry, závity a koncepce). Pokusím se tedy navrhnout vlastní konstrukci, která bude mít kompaktnější rozměry a závity podle potřeby.

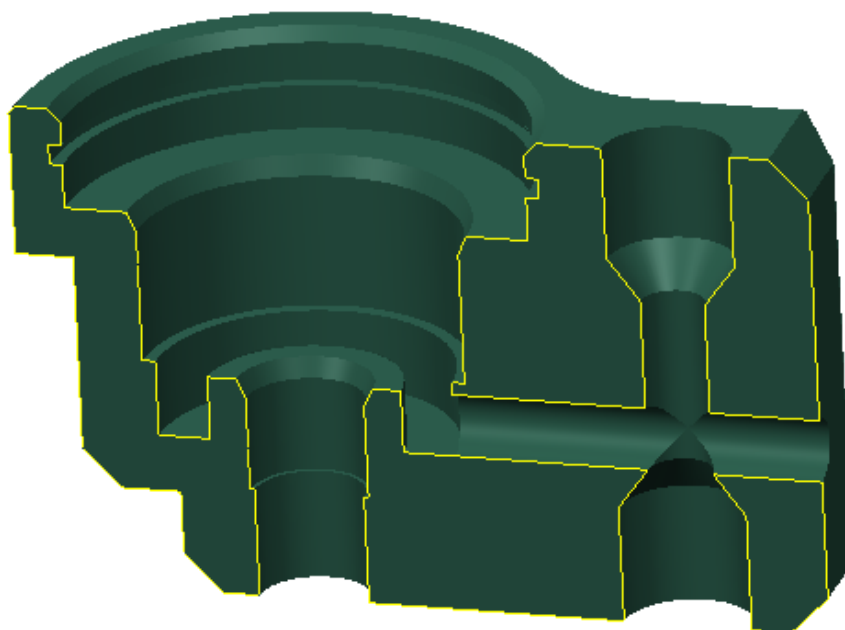


Obr. 32 Regulátor tlaku paliva Bosch MINI A [30]



4.4.5 HOUSING REGULÁTORU

Při návrhu uložení pro regulátor tlaku paliva vycházím z geometrie samotného regulátoru a možností připojení hadic. Návrh začíná odečtením geometrie regulátoru a návrhu os, kde budou otvory pro palivo. V první řadě je třeba přivádět palivo k regulátoru a také ke vstřikovacím ventilům. A v neposlední řadě odvádět přebytečné palivo zpět k čerpadlu. Jsou tedy potřeba 3 otvory. V prvním návrhu byla první díra rovnoběžná s podstavami obráběné součásti, druhá byla svislá, ale byla pouze částečná. Trasa paliva, tedy tvořila písmeno „T“. Tohle uspořádání bylo velmi nevýhodné, jelikož při pozdějším návrhu závitů docházelo ke kolizi přípojné hadice s přírubou. Proto byla svislá díra nahrazena průchozí dírou a díry tedy tvoří „+“. Čtvrtá díra je tedy pouze konstrukční a bude zaslepena. Díra pro odvod přebytečného paliva je ve stejné ose jako regulátor. Volba závitů bude objasněna v kapitole, která se zabývá spojovacími prvky. Regulátor bude jištěn pojistným kroužkem. Koncepce se dostala na váhu 89 g, což je oproti originálnímu uložení (195 g) více jak poloviční úspora váhy.



Obr. 33 Návrh housingu pro uložení regulátoru

4.4.6 FILTRY

Výběr filtru je pro správnou čistotu dodávaného paliva také důležitý. Většina filtrů je dnes v hliníkovém obalu a mají tedy vyšší váhu. Pro motocyklové motory, kde jsou nižší tlaky paliva vystačí filtr od firmy MAHLE, který se nachází v plastovém obalu, který odolává palivu E-85 a je schopený odolávat tlaku až $p=8$ bar. Hodnota nejmenší zachycené částice $x=40\mu\text{m}$ je také dostačující. Filtr se také dodává v sadě s předfiltrem pro čerpadlo, což je velice výhodné.



Obr. 34 Sada filtrů od firmy MAHLE [29]

4.4.7 HADICE A SPOJENÍ

Ke správné funkci vstřikovačů je třeba, aby bylo možné přepravovat dostatek paliva z palivové nádrže pomocí čerpadla. Pro spojení prvků palivového systému jsem se rozhodl využít nabídky firmy Goodridge. Bylo potřeba navrhnout správný průměr a tloušťku hadic. Hadice se spojkami se nabízejí v řadách, pro které pasují spojky (fittingy) na danou hadici. Velikost JIC -3 se většinou používají jako tlakové hadice pro brzdy či pro menší hydraulické obvody. Velikost JIC-3 by měla za následek zvýšení rychlosti potřebné pro dosažení stejného hmotnostního průtoku s menším průměrem a vedlo by to ke zvýšení třecí ztráty v tekutině z důvodu zvýšené turbulence, což má za následek snížení hmotnostního toku. Rozdíl ve výšce mezi nádrží a vstřikovači povede ke snížení průtoku, jelikož je zde zřejmý pokles rychlosti, protože je také mírný pokles tlaku. Tyto fakta nám ukazuje Bernoulliho rovnice a rovnice kontinuity [35]:

$$-\Delta v^2 = 2g\Delta z + \frac{2\Delta p}{\rho} \quad (6)$$

$$Q = Sv = konst. \quad (7)$$

Kde:

v – Rychlost proudění paliva

g – Gravitační zrychlení

z – Dopravní výška paliva

p – Tlak paliva

ρ – Hustota paliva



Q – Objemový průtok paliva

S – Průřez palivové hadice

Proto jsem se rozhodl k použití velikosti JIC-4 která nám nabízí dostatečný vnitřní průměr a spojovací prvky dosahují malých rozměrů a nízké hmotnosti.

Pravidla FSAE nám upřesňují možnosti při návrhu hadic v odstavcích IC1.8 a IC1. Pravidla říkají, že všechny pryžové hadice musí obsahovat vnitřní ocelovou výztuhu. Goodridge hadice série 210 tyto požadavky splňuje. Tato série byla potvrzena dodavatelem jako použitelná pro všechny druhy paliv, včetně E-85 a benzínu. Tento typ hadice má také dobrou měrnou délkovou hustotu, takže k nárůstu hmotnosti oproti klasické gumové hadici nedojde. Důležitým prvkem je kromě jmenovité světlosti také tloušťka stěny hadice, na kterou působí tlak. K ověření správnosti výběru využijeme rovnice pro napětí na tenkou stěnu válce a tloušťku stěny z ní vyjádříme [5]:

$$\sigma = \frac{pA}{t} \quad (8)$$

$$t = \frac{pA}{\sigma} \quad (9)$$

Kde:

σ – Napětí pro tenkou stěnu válce

A – Průměr hadice

t – Tloušťka stěny hadice

Ve výpočtu uvažujeme dovolené napětí $\sigma = 10\text{MPa}$, tlak paliva s bezpečností $p = 8\text{ bar}$, tloušťka hadice je 11,2 mm. Výsledkem je minimální tloušťka $t = 4,5\text{ mm}$. Tato hodnota bude dodržena, jelikož reálná hodnota na hadici je $t = 5,6\text{ mm}$.



Obr. 35 Palivová hadice Goodridge 210 [31]



Jak je uvedeno v pravidlech FSAE, tak hadice, které tvoří palivový systém, nesmí být opatřeny sponami, které mají ostré hrany. Pro danou sérii existují všechny možné varianty fittingů, které budou potřeba pro tento palivový systém. Propojování hadic je tedy jednoduché, bez spony a případná výměna či demontáž hadice je velice jednoduchá. Celý systém těsní pomocí dosedacích ploch, které mají vrcholový kužel s úhlem $\alpha=74^\circ$.



Obr. 36 Fitting „90°“ JIC-4 [32]

Pozn.: JIC=[Joint Industry Council]

4.4.8 PŘEPÁŽKY PALIVOVÉ NÁDRŽE

Aby navržené přepážky splňovaly svou funkci, je potřeba, aby byly opatřeny dvířky, která se budou otevírat ve směru proudění paliva k čerpadlu a při opačném pohybu byla dvířka zavřena, a co nejvíce bránila odvodu paliva spolu s přepážkami. Tyto přepážky se v nádrži nacházejí 2. Primární přepážka uchovává palivo okolo čerpadla a sekundární zmenšuje trajektorii paliva k primární. Tedy prostor za druhou přepážkou považuji za škodný, jelikož je žádoucí, aby se palivo nejvíce zdržovalo v okolí čerpadla. Přepážky budou přilaminované k nádrži a zvětší tím i její tuhost. Dvířka v současnosti nabízí jen firma ATL. Tyto dvířka ovšem mají zbytečně velkou hmotnost (60 g) a rozhodl jsem se tuto hmotnost zmenšit. To jsem provedl uřezáním přebytečného materiálu a výsledná hmotnost je 49 g.



Obr. 37 Dvířka uložená v přepážce od firmy ATL

4.4.9 LAMBDA SONDA

Poslední součástí palivového systému je lambda sonda. Tento senzor, který měří množství kyslíku ve výfukových plynech je důležitý pro správné řízení bohatosti směsi. V dnešní době se už prakticky používají jen sondy, které měří přímo hodnotu součinitele přebytku vzduchu λ . Jde tedy o širokopásmovou lambda sondu. Skoková sonda pro naše využití nemá opodstatnění, jelikož se předpokládá běh motoru s bohatou směsí, takže je třeba znát přesnou hodnotu. Volba padla na senzor od firmy NGK, se kterou má náš tým několik let dobré zkušenosti. Obrázek této sondy je možno vidět v úvodní kapitole.

Abychom dostali z motoru maximální výkon, je třeba pomocí lambda regulace mít v motoru bohatou směs. Jak je směs bohatá či chudá nám říká součinitel přebytku vzduchu [9]:

$$\lambda = \frac{M}{M_o} \quad (10)$$

Kde:

λ – Součinitel přebytku vzduchu

M – Skutečné přivedené množství vzduchu

M_o - Teoretické množství vzduchu, v případě E-85 to je 9,85 kg

$\lambda > 1$ Chudá směs (vzduchu je více než 9,85 kg)

$\lambda = 1$ Stechiometrická směs (vzduchu je 9,85 kg)

$\lambda < 1$ Bohatá směs (vzduchu je méně než 9,85 kg)

Pozn.: Směs je zápalná pouze v intervalu $\lambda \in (0,7; 1,3)$

5 SIMULACE A ANALÝZY

5.1 ZAHŘÍVÁNÍ OD VÝFUKU

Velkou nevýhodou palivového systému je umístění palivové nádrže. Ta se nachází mezi sedačkou a výfukovým plenem (uklidňovací komorou). Díky zástavbovým rozměrům není jiné uložení možné. Proto je objem nádrže rozložený na celou šířku rámu, aby nádrž byla co nejdále od výfuku. Pokusím se udělat analýzu tohoto problému.

Přestup tepla stěnou výfuku se řídí touto rovnicí [34]:

$$Q_V^* = -\lambda S \frac{T_{w2} - T_{w1}}{h} \quad (11)$$

Kde:

Q_V^* - Tepelný tok při přestupu tepla vedením

λ – Součinitel přestupu tepla

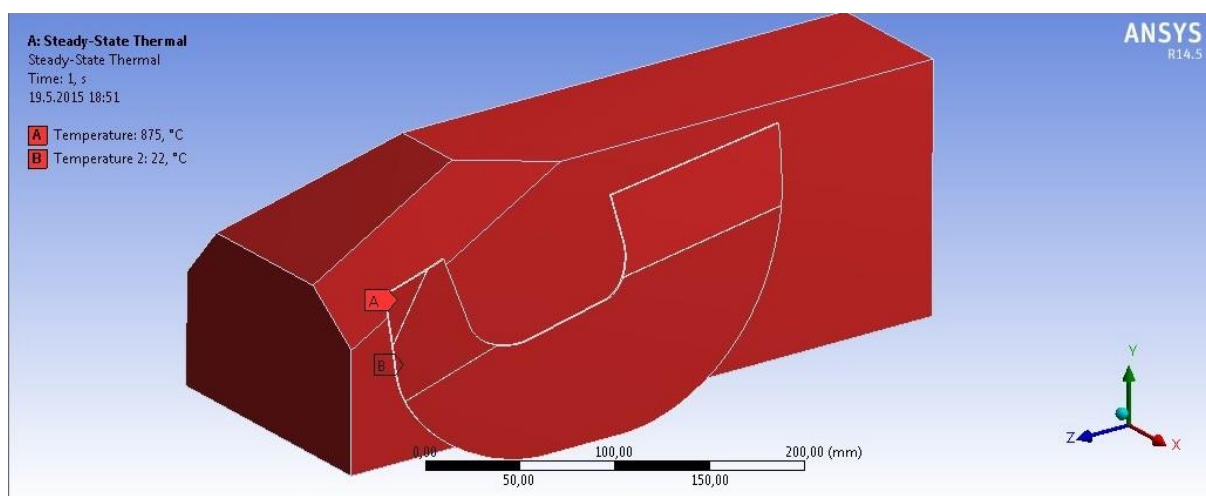
S – Plocha přestupu tepla

T_{w2} – Teplota na povrchu výfuku

T_{w1} – Teplota výfukových plynů

h - Tloušťka stěny výfuku

Pokud bychom chtěli vypočítat teplotu na povrchu výfuku, tak bychom museli znát tepelný tok. Ten bohužel neznáme. Takže v tomto případě nám vystačí měřená hodnota poblíž zahřátého výfuku, kde $t=875^\circ\text{C}$. Tato hodnota byla zjištěna pyrometrem na motorové brzdě a bude sloužit jako okrajová podmínka pro výpočet v ustáleném stavu. Teplota bude přiřazena nerezovému plechu, který je jednou stěnou výfuku. Pro jednoduchost ostatní stěny zanedbáme. Teplota nádrže je považována za pokojovou. Tento ustálený stav má vstupní parametry do výpočtu neustáleného stavu. Pro srovnání budeme uvažovat obě varianty palivové nádrže.



Obr. 38 Definice teplot pro ustálený stav



Při neustáleném stavu budeme pro zjednodušení počítat pouze s teplotami z předchozího výpočtu a budeme uvažovat radiaci. Pro výpočet je potřeba znát emisivitu (poměrnou zářivost) daných materiálů. Emisivita hraje velkou roli při přenosu tepla zářením, což je zřejmé z rovnice Stefan-Boltzmannova zákona [34]:

$$Q_Z^* = \varepsilon \sigma_o S T^4 \quad (12)$$

Kde:

Q_Z^* - Tepelný tok při přestupu tepla zářením

ε – Emisivita

σ_o - Stefan-Boltzmannova konstanta

T – Absolutní teplota

Emisivita nabývá hodnot $\langle 0; 1 \rangle$

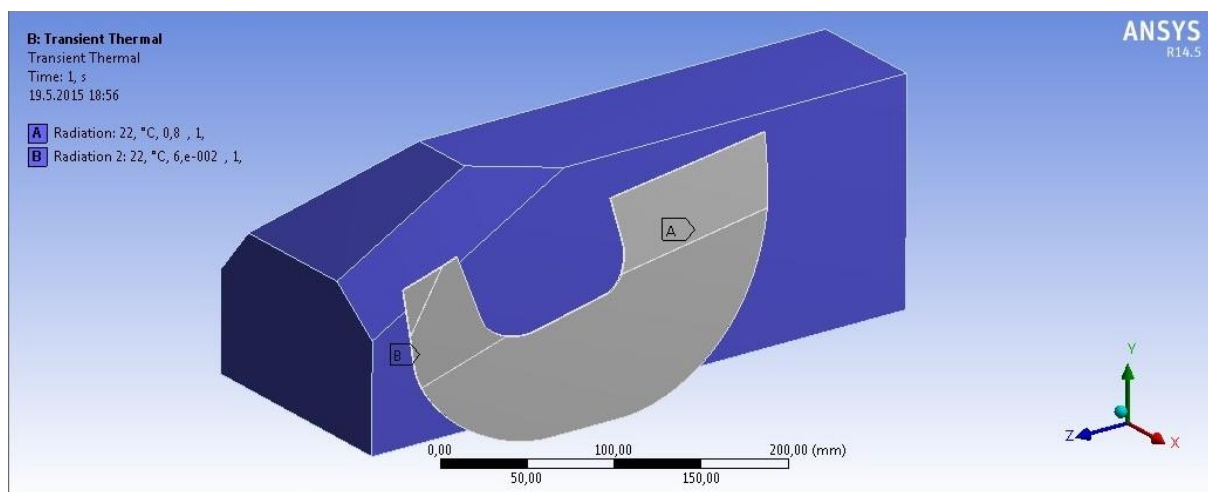
Kde:

$\varepsilon = 1$ - Dokonalý zářič (bílá barva)

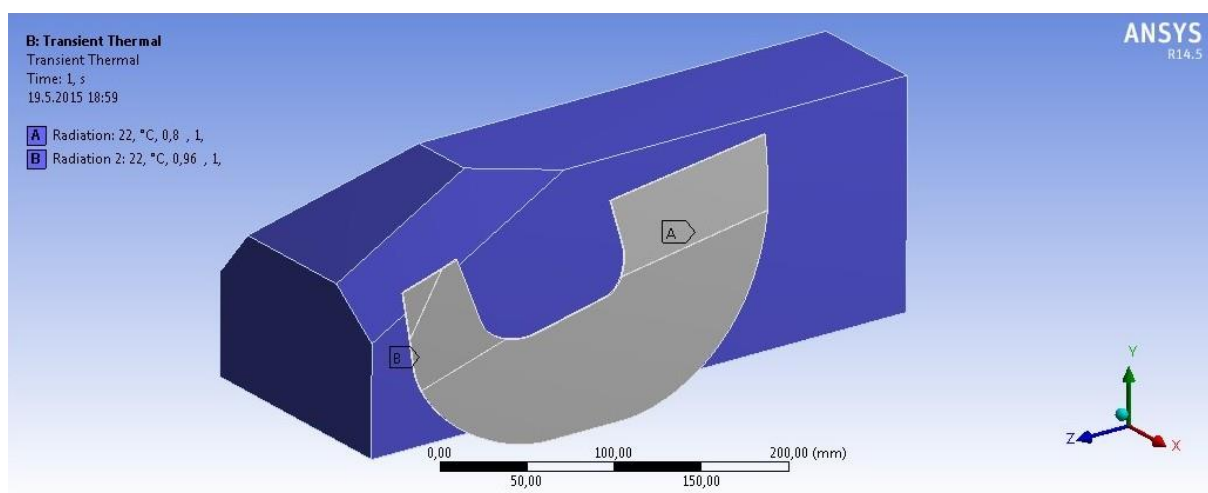
$\varepsilon = 0$ - Povrch nezáří (černá barva)

Tab. 6 Tabulka emisivit pro výpočet v MKP

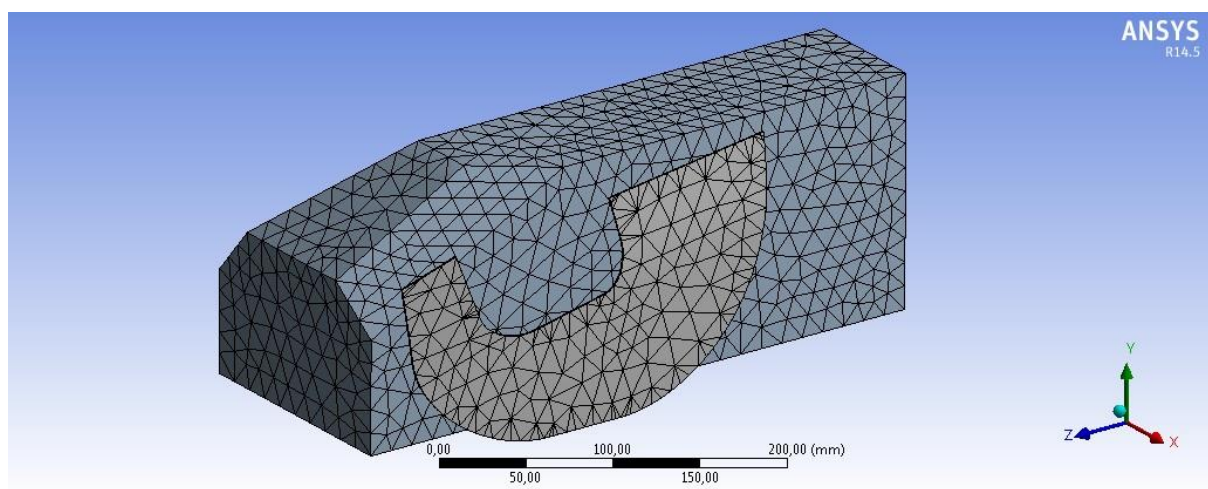
Materiál	Emisivita [-]
Nerezová ocel	0,8
Hliník	0,06
Karbon	0,96



Obr. 39 Definice radiace mezi výfukem a hliníkem



Obr. 40 Definice radiace mezi výfukem a uhlíkovým kompozitem

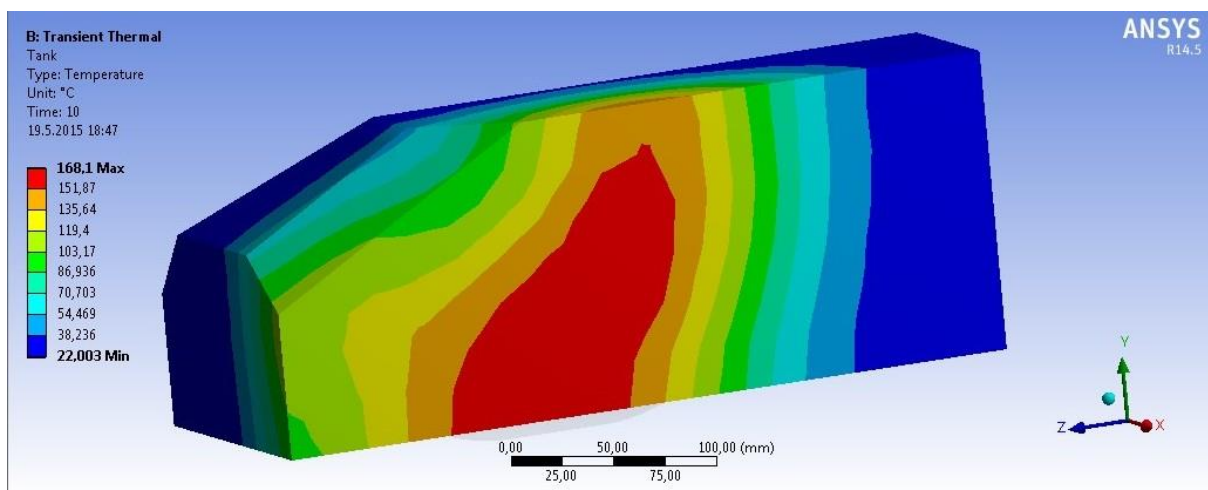


Obr. 41 Volba síť

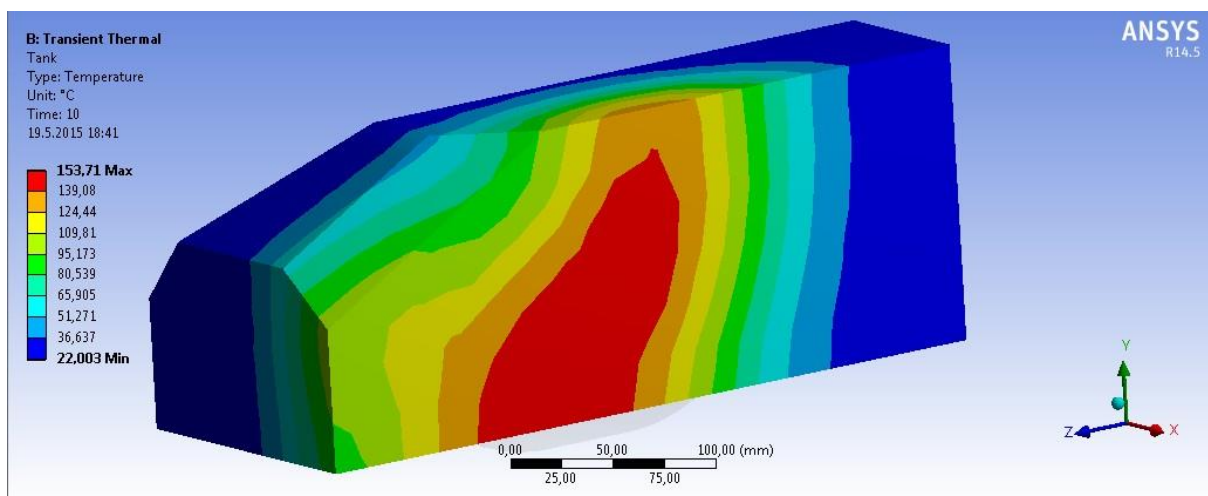


Jako typ prvku pro výpočet byly zvoleny čtyřstěny (tetrahedron) s velikostí prvku 15 mm. Velikost sítě je dostačující pro zjištění maximální teploty na povrchu nádrže. Rozložení teploty není pro úlohu až tak důležité. Výpočet s jemnější sítí by byl časově náročný. Přesto tato úloha bude řešena v řádu hodin.

Na následujících obrázcích lze vidět maximální teploty, které by na nádrž působily, pokud by nebyla chráněna. Jelikož má uhlíkový kompozit vyšší emisivitu, tak bude na jeho povrchu větší teplota o $t=14^{\circ}\text{C}$. To je při takové teplotě již zanedbatelná hodnota. Není ovšem zanedbatelná z pohledu nádrže, kde by docházelo k měknutí pryskyřice kompozitu a v případě obou variant k ohřívání paliva. Použitá epoxidová pryskyřice odolává teplotám do $t=180^{\circ}\text{C}$. Je tedy nutné změnit emisivitu kompozitové nádrže a vložit mezi výfuk a nádrž odstínění ke snížení teploty, aby se dostala alespoň pod $t=100^{\circ}\text{C}$. Výfuk bude opatřen keramickým povlakem, takže teplota na povrchu bude také silně snížena a teplo z výfukových plynů bude více odváděno přes stěny až za turbodmychadlem. Teplota by se tedy pod danou mez měla dostat.



Obr. 42 Výsledné zahřívání nádrže z uhlíkového kompozitu

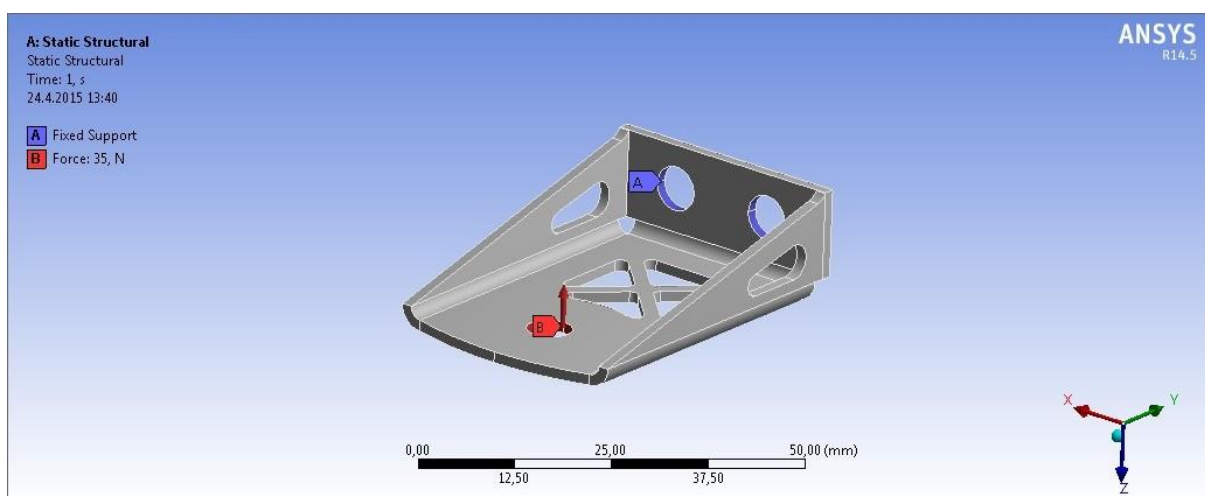


Obr. 43 Výsledné zahřívání hliníkové nádrže



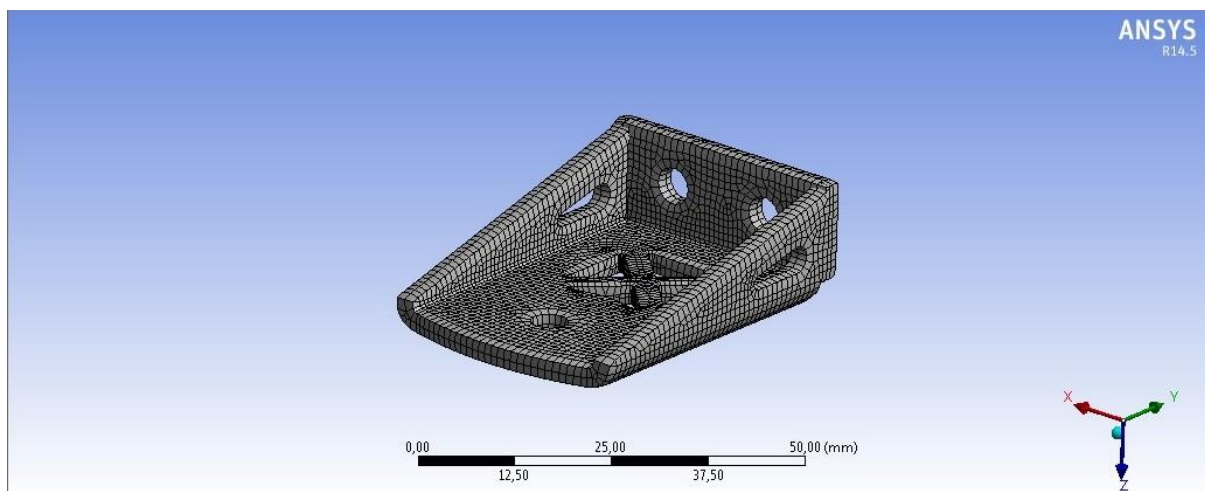
5.2 DRŽÁKY

Držák palivové nádrže je velice důležitou součástí, jelikož přenáší zatížení palivové nádrže na rám vozidla. Jeho selhání by mohlo mít velice fatální následky. Výsledný navržený držák má po několika úpravách vyztužené boční strany, aby nedocházelo k velkému ohybu. Při výpočtu uvažuji námi používanou ocel 1.0038 (11373) s mezí kluzu $\sigma_K = 220$ MPa. Držák je připevněn šrouby k nádrži a je zatížen silou od navazujícího držáku na rámu. Zátěžná síla zahrnuje přibližné zatížení od setrvačných sil nádrže s kapalinou při kombinovaném zrychlení vozidla.



Obr. 44 Okrajové podmínky pro zatížení držáku

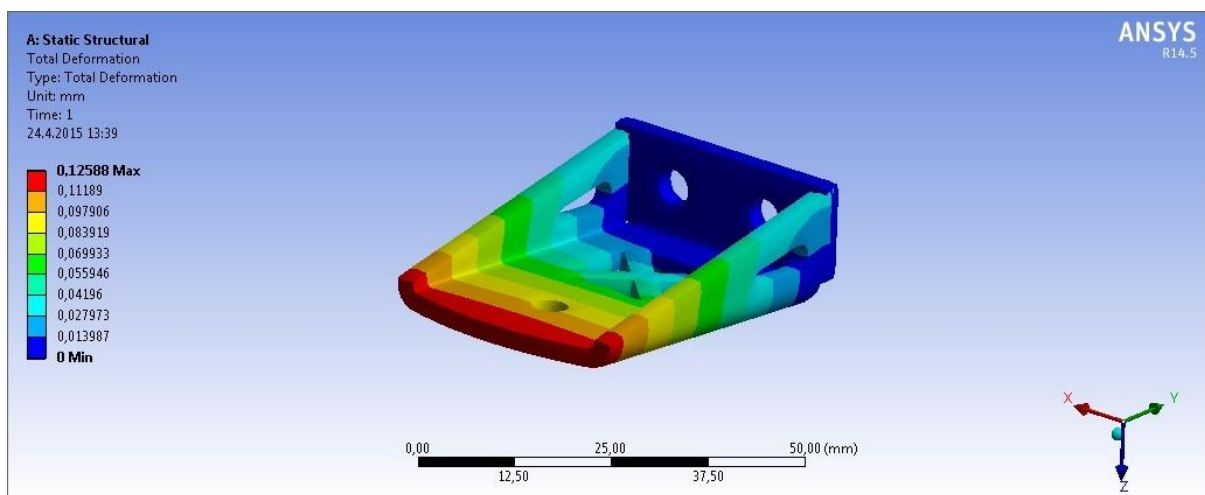
Pro výpočtovou síť bylo použito prvků typu čtyřúhelník (quadrilateral). Velikost prvku byla redukována na 1 mm, což je dostatečná velikost pro výpočet zatížení.



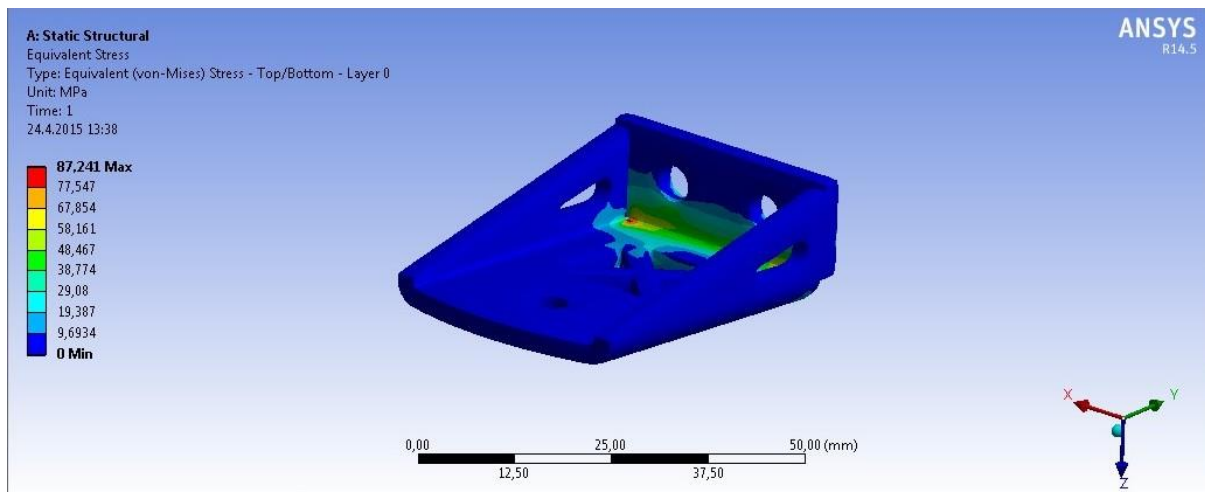
Obr. 45 Výpočtová síť držáku



Držák je díky nemožnosti připevnění šroubem přímo na rám o něco větší než prvotní návrh, ten ovšem neměl žebrovaní po bocích a docházelo k deformaci 1,2 mm, což je velice vysoká hodnota. Hodnota 0,13 mm na konci držáku je přibližně 10x nižší než původní varianta a lze ji považovat za uspokojivou.



Obr. 46 Výsledná deformace držáku



Obr. 47 Redukované napětí v držáku

Hodnota redukovaného napětí je $\sigma_R = 87$ MPa. Tato hodnota bude dosazena do poměru s mezí kluzu [5]:



$$k = \frac{\sigma_K}{\sigma_R} \quad (13)$$

Kde:

k – Koeficient bezpečnosti

σ_K – Mez kluzu materiálu

σ_R – Redukované napětí

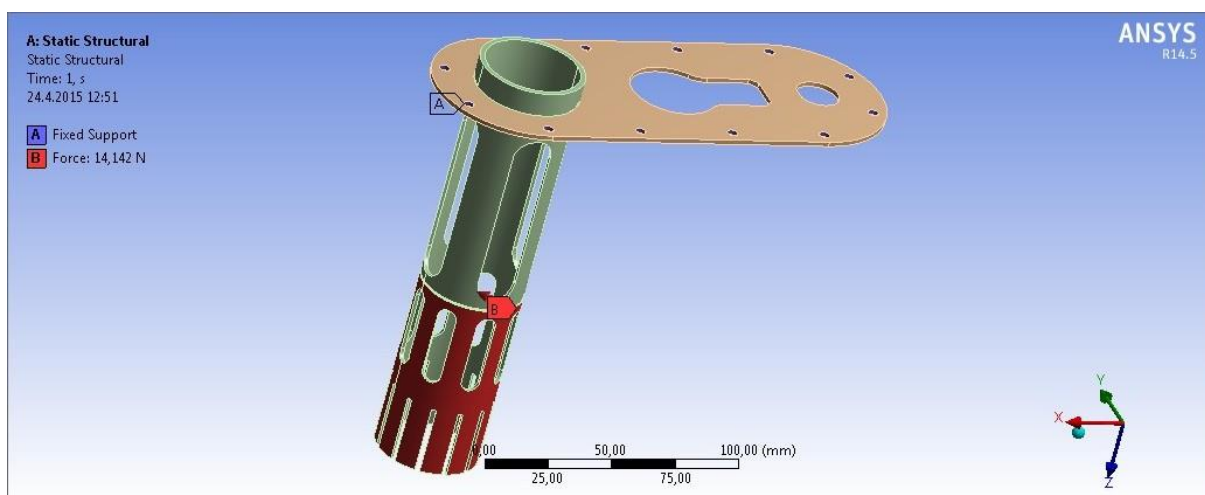
Po dosazení:

$$k = \frac{220}{87} = 2,5$$

Výsledný koeficient bezpečnosti je tedy dostatečný.

5.3 PŘÍRUBA PALIVOVÉ NÁDRŽE

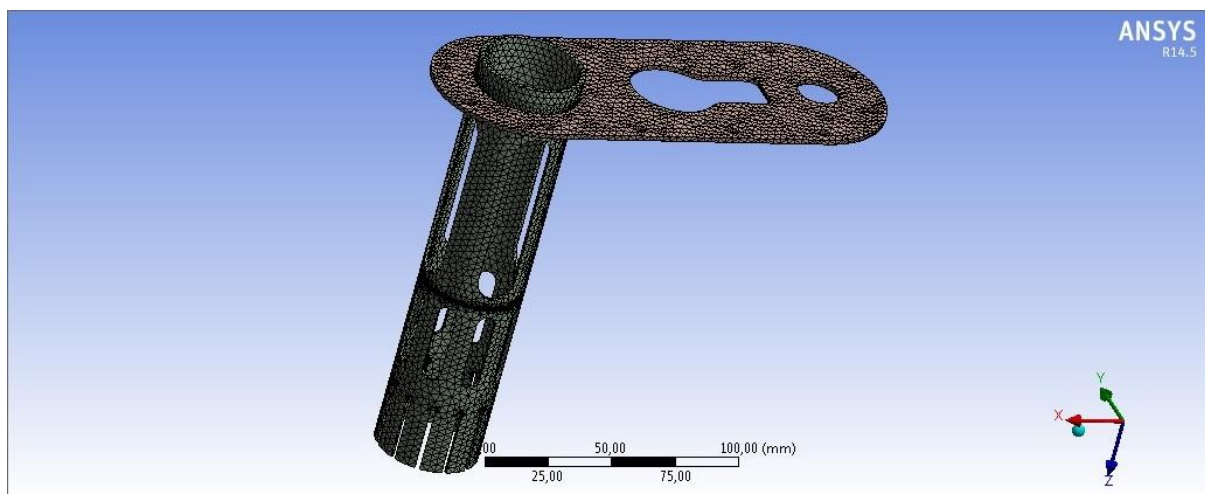
Příruba palivové nádrže s dolévací trubicí tvoří důležitý prvek, který je spojen pomocí sváru. Trubice také slouží k uložení palivového čerpadla a přenáší setrvačné síly jeho hmotnosti. Ohyb trubice, její prasknutí ve sváru či mimo něj by vedlo k pohybu čerpadla nebo k vytrhnutí kusu materiálu z příruby. Proto nesmí dojít k žádnému meznímu stavu. Návrh se skládá ze svařence z hliníkové slitiny. Při výpočtu uvažují hliník EN AW 6060 (AlMgSi0,5) s mezí kluzu $\sigma_K = 150$ MPa. Zátěžná síla zahrnuje přibližné zatížení od setrvačných sil palivového čerpadla při kombinovaném zrychlení vozidla.



Obr. 48 Okrajové podmínky pro výpočet

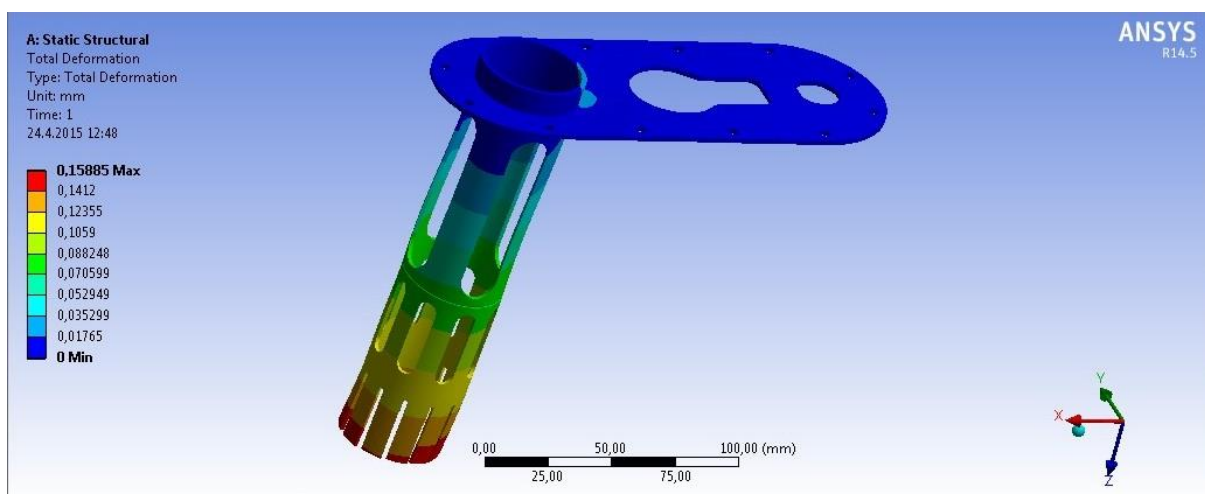


Pro výpočtovou síť bylo použito prvků typu čtyřstěn (tetrahedron). Velikost prvku byla redukována na 2 mm, což je dostatečná velikost pro výpočet zatížení.



Obr. 49 Výpočtová síť pro přírubu

Výsledná deformace 0,16 mm s ohledem na velký ohybový moment a tenkou stěnu trubice je velice dobrý výsledek.

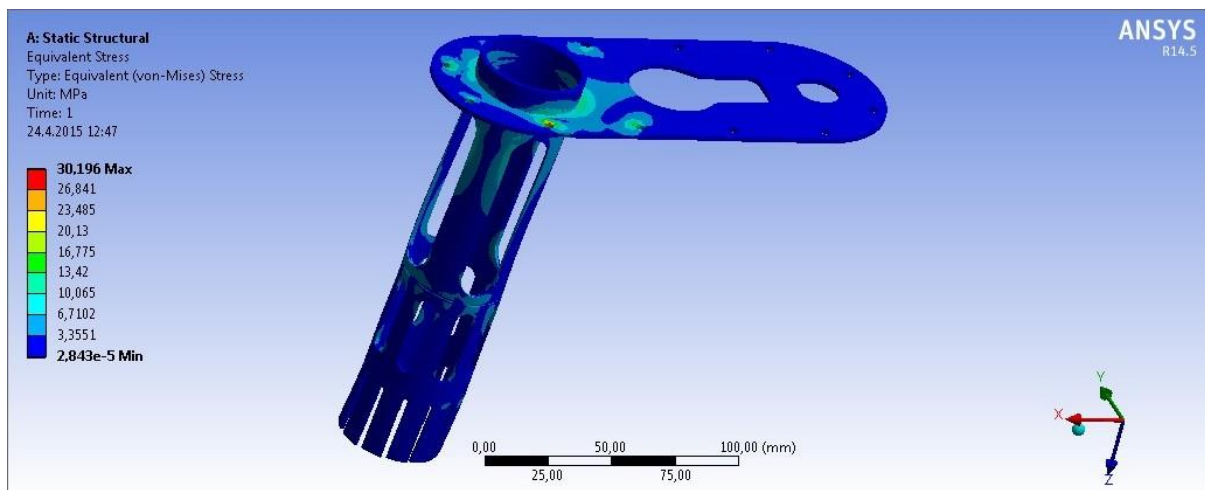


Obr. 50 Výsledná deformace dolévací trubice

Konečná hodnota redukovaného napětí ve svaru je $\sigma_K = 30$ MPa. Tato hodnota bude dosazena do poměru s mezí kluzu:

$$k = \frac{150}{30} = 5$$

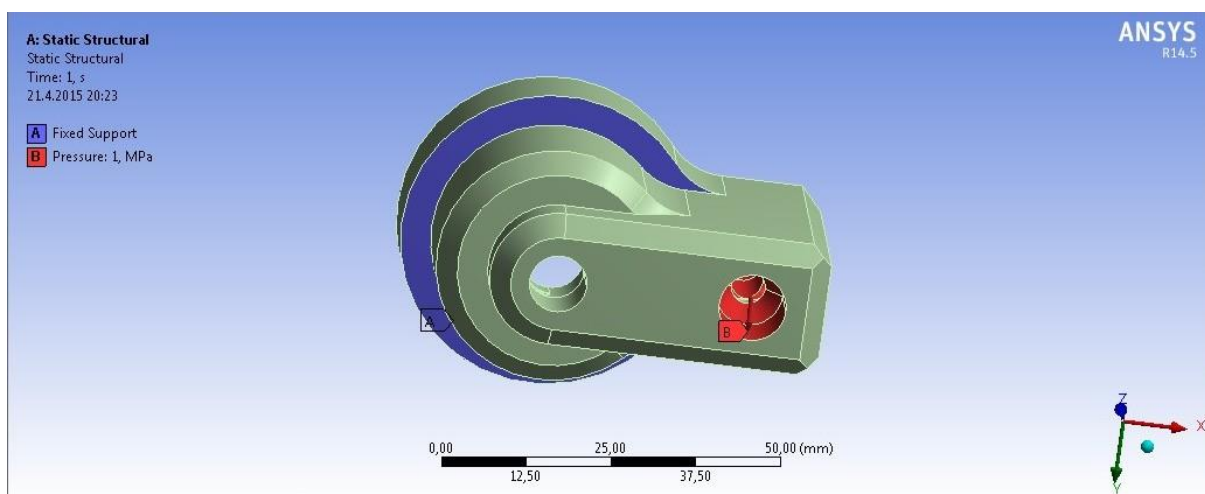
Výsledný koeficient bezpečnosti se zdá být výborný, ale je třeba brát v potaz, že zatížení bude cyklické.



Obr. 51 Redukované napětí ve svaru

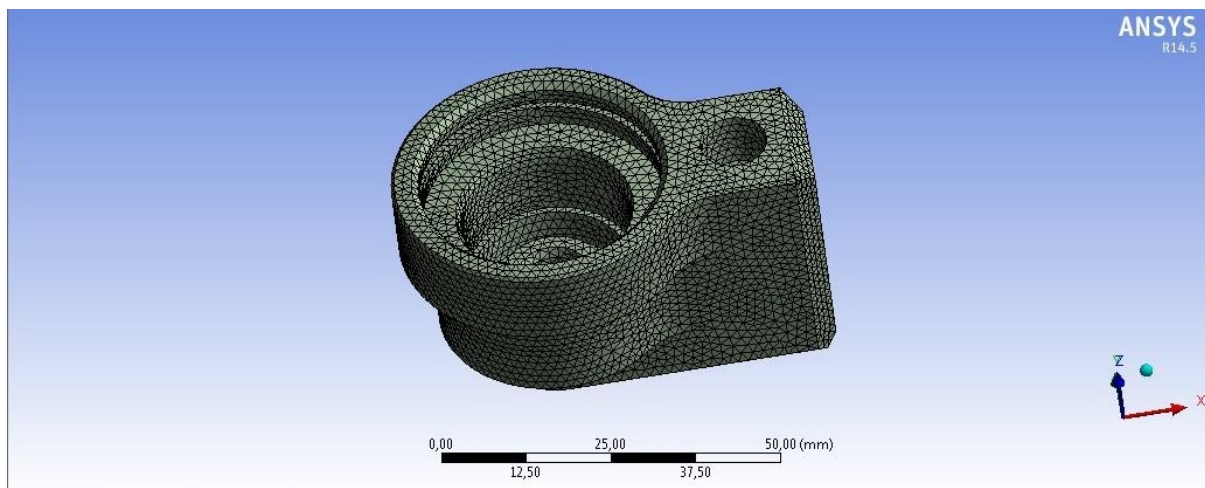
5.4 HOUSING PRO PALIVOVÝ REGULÁTOR

V uložení regulátoru dochází k velkému tlaku na stěny od tlaku paliva, které při pulzaci může mít tlak až $p = 0,8$ MPa. Uvnitř housingu se nacházejí tenké stěny a kritické místo může být i drážka na pojistný kroužek. Při výpočtu uvažuji hliník EN AW 6060 (AlMgSi0,5) s mezí kluzu $\sigma_K = 150$ MPa. Zátěžný tlak zahrnuje přibližné zatížení stěn s mírnou bezpečností.



Obr. 52 Okrajové podmínky pro výpočet napětí

Pro výpočtovou síť bylo použito prvků typu čtyřstěn (tetrahedron). Velikost prvku byla redukována na 1,5 mm, což je dostatečná velikost pro výpočet zatížení.

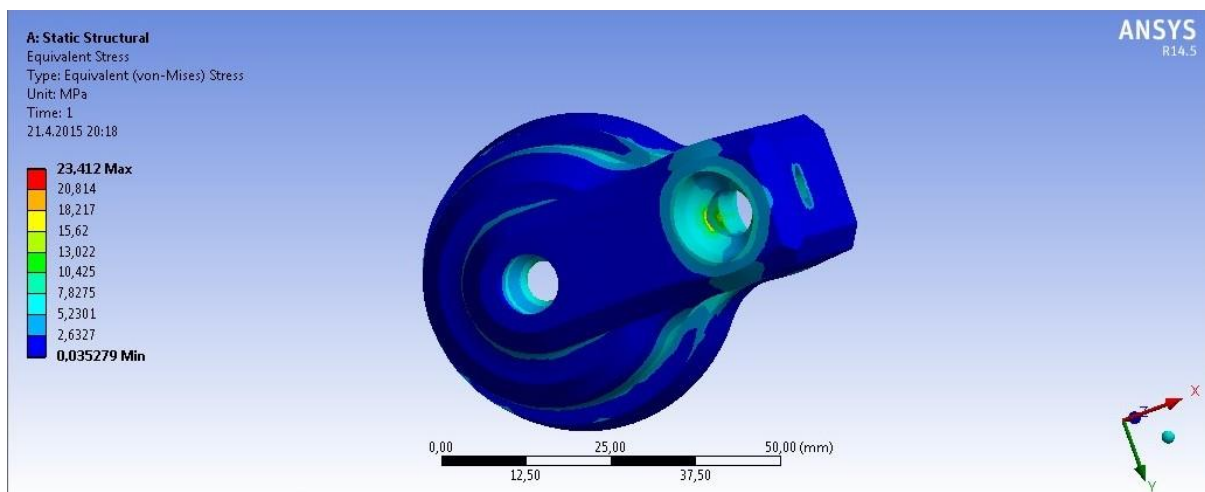


Obr. 53 Výpočtová síť

Konečná hodnota redukovaného napětí ve svaru je $\sigma_K = 23$ MPa. Tato hodnota bude dosazena do poměru s mezí kluzu:

$$k = \frac{150}{23} = 6,5$$

Výsledný koeficient bezpečnosti je tedy velký. Předpokládané místo ve střihu není tak namáhané jako místo výběhu těsnicí plochy kužele, kde je tenká stěna.



Obr. 54 Výsledné redukované napětí



6 VÝROBA SOUČÁSTÍ

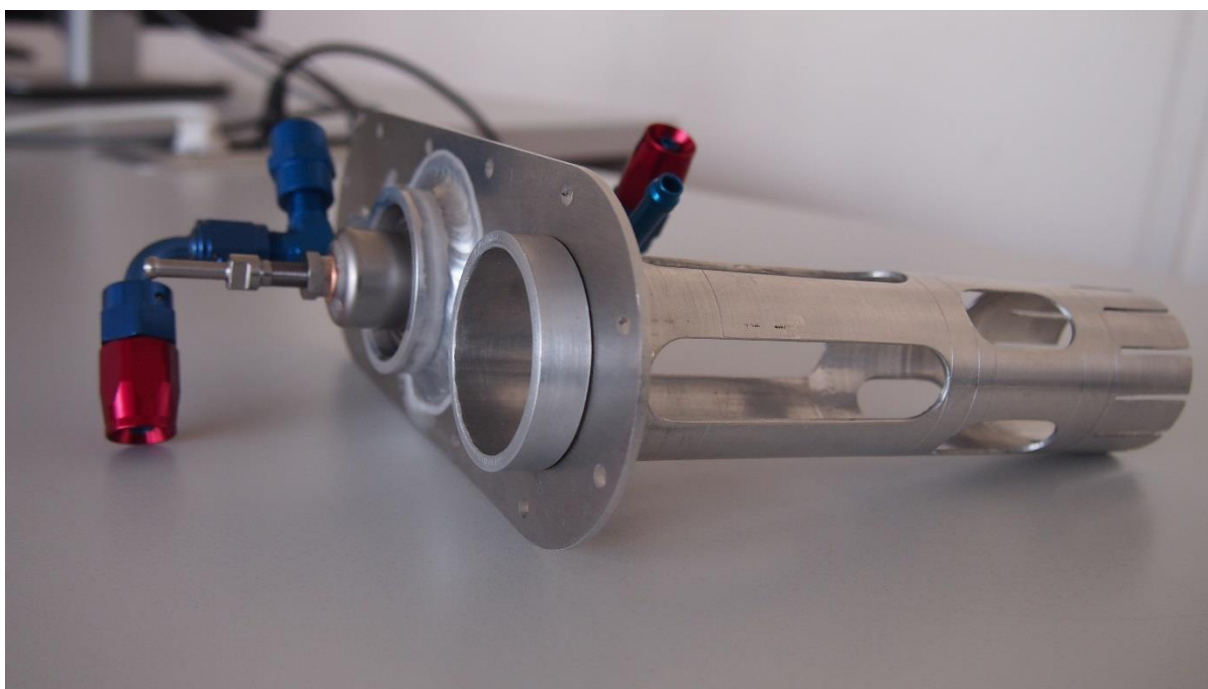
V této kapitole bude stručně pojednáno o výrobě navrhovaných komponent.

6.1 OBRÁBĚNÍ

V souvislosti s obráběním došlo k obrábění dvěma dílům palivového systému. V první řadě se jedná o uložení regulátoru tlaku paliva a také dolévací trubice, která nese setrvačné síly čerpadla při bočním a podélném zrychlení. Na výrobě trubice jsem se sám podílel. Nejprve bylo třeba upravit vnitřní průměr polotovaru na požadované tolerance čerpadla a poté se také upravit vnější průměr na daný průměr. Odlehčovací otvory, které zároveň slouží jako přístup k čerpadlu pro hadice a kabely, se zhotovily na frézce. Tyto otvory se následně brousily na dostatečnou drsnost, aby zde nepůsobily koncentrace napětí. Uložení regulátoru zhotovila externí firma. Při výrobě se klade důraz na dosedací a těsnící plochy regulátoru, proto se na výrobním výkrese zadává velký počet tolerancí. Výkres pro výrobu na CNC stroji se nachází v příloze.

6.2 ŘEZÁNÍ LASEREM

Ruční řezání a následné broušení součástí z hliníkového či ocelového plechu je v dnešní době překonané a součásti se výhradně řezou laserem či vodním paprskem. Výroba komponent je tedy přesnější, rychlejší a jednodušší. Komponenty palivového systému byly řezány laserem, kdy šlo především o přírubu a její protikus, ve kterém se budou nacházet nýtovací matice. Stejnou technologií bylo zhotoveno také těsnění, které je odolné palivu E-85. Laserem byly řezány také držáky, které byly řezány v rozvinutém tvaru a následně upraveny třemi ohyby. Posledním dílem je ocelový plech, který slouží jako plocha pro přenos zatížení z držáků a je uvnitř laminátu. Otvory v plechu slouží k prosycení pryskyřice a také jako odlehčení, které je v řádu gramů. Výkresy vypálených dílů se také nacházejí v příloze.



Obr. 55 Příruba před dokončením



6.3 SVAŘOVÁNÍ

Plech zmíněný v předchozí podkapitole přenáší zatížení díky šroubům, které jsou k němu přivařeny. Jedná se o pevnostní šrouby M6 s plochou hlavou a třídou pevnosti 12.9. K těmto šroubům bude přimontován držák z ohýbaného plechu, kde sousední hrany budou muset být také zavařeny. Hlavní komponentou na svařování je příruba nádrže. Samotnou přírubu tvoří kromě hliníkového plechu také, uložení regulátoru, dolévací trubice, její redukce na hadici a tenká trubka, ve které je uložen termočlánek na měření teploty nasávaného paliva. Prvním krokem při svařování bylo vytvoření vnějších tvarů z polotovaru na uložení regulátoru. Ten se poté obrobil a teprve se obrobily funkční plochy, jelikož při svařování dochází k deformaci svařovaných komponent. Nakonec došlo ke svařování zbylých komponent.

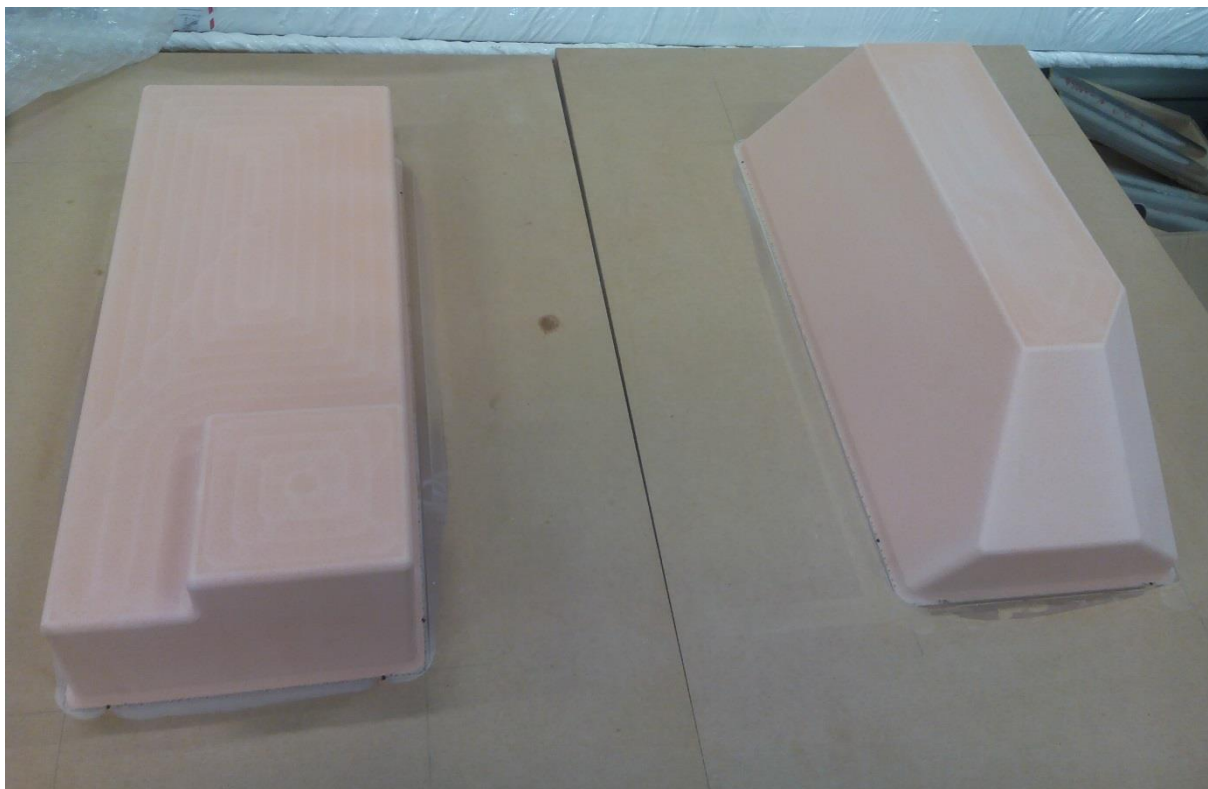
6.4 FORMY NA LAMINOVÁNÍ

Výroba kompozitové nádrže je finančně náročnější než výroba hliníkové nádrže. Aby byl laminát geometricky přesný podle modelu, je třeba nechat vyrobít formy z polyuretanu (PU). K výrobě těchto forem je nutné vytvořit 3D modely v softwaru Creo Parametric 2.0, aby bylo možné jednoduše tyto formy vyrobít na 3D obráběcím centru. Formy se vytvoří odečtením plochy výsledného modelu nádrže od plného materiálu a zůstane nám ořezané objemové těleso. Přesně tak bude vypadat i skutečná forma na laminování, která bude ještě umístěna na desce, pro snadnější laminaci. Budeme tedy potřebovat 2 kusy forem, pro spodní a horní část nádrže.



Obr. 56 Návrh formy pro frézování

Po výrobě forem přichází na řadu proces opracování povrchu forem. Jedná se o dlouhý proces, kdy se neustále nanáší vrstva plniče pórů či tmelu, v případě nalezení nerovností. Teprve po úpravě povrchu se může přejít na proces laminace. Laminace je tím jednodušší, čím je povrch hladší. Proto je snaha, o co nejlepší povrch, vyjmutí z formy je také jednodušší.



Obr. 57 Formy po vyfrézování

6.5 LAMINOVÁNÍ

Po opracování povrchu tedy přichází na řadu konečná laminace obou polovin nádrže. Před samotným procesem je nutné všechny plochy pokrýt separátorem, který nám umožňuje vyjmout laminát z formy a zamezuje možnému spojení zmíněného laminátu s formou. Dalším krokem je aplikace tzv. gelcoatu, který bude na budoucím výrobku tvořit hladkou plochu a zamezuje tvorbu nerovností na pohledové ploše. Ve výsledku ovšem pohledová plocha bude uvnitř nádrže a pokryta ochranným tmelem. Lamináty budou tvořeny metodou vakuové laminace. Bude tedy odsávána přebytečná pryskyřice, laminát bude mít větší pevnost a nižší hmotnost.

Horní polovina nádrže je na výrobu jednodušší. Pro výrobu budeme potřebovat 4 vrstvy uhlíkové tkaniny o plošné hustotě 160g/m^2 , která bude aplikována tak, že jednotlivé vrstvy budou střídavě otočeny o 45° , aby se zajistila pevnost ve čtyřech směrech zatížení. Výsledný laminát se nechává vytvrdnout ve vakuu s odsávací a strhávací vrstvou látky, která zachytává přebytečnou pryskyřici.

Spodní část nádrže má stejnou technologii, ale má v sobě implementovány zmíněné plechy pro přenos zatížení z držáků. Proto v tomto místě dochází k výztuhám v podobě menších kusů tkaniny. Plechy jsou vloženy mezi 2. a 3. vrstvu tkaniny a musí být zajištěná jejich přesná poloha a chráněn závit na šroubech.

Posledním výrobkem jsou přepážky, ve kterých jsou vložena dvířka. Všechny komponenty je nutné ořezat. Přepážky jsou následně vlamínovány do nádrže a všechny povrchy je nutné chránit tmelem. Nakonec se obě poloviny nádrže slepí odolným lepidlem, spojí šrouby a celý spoj se zvenčí přelaminuje. Spoj zevnitř se také ochrání tmelem.



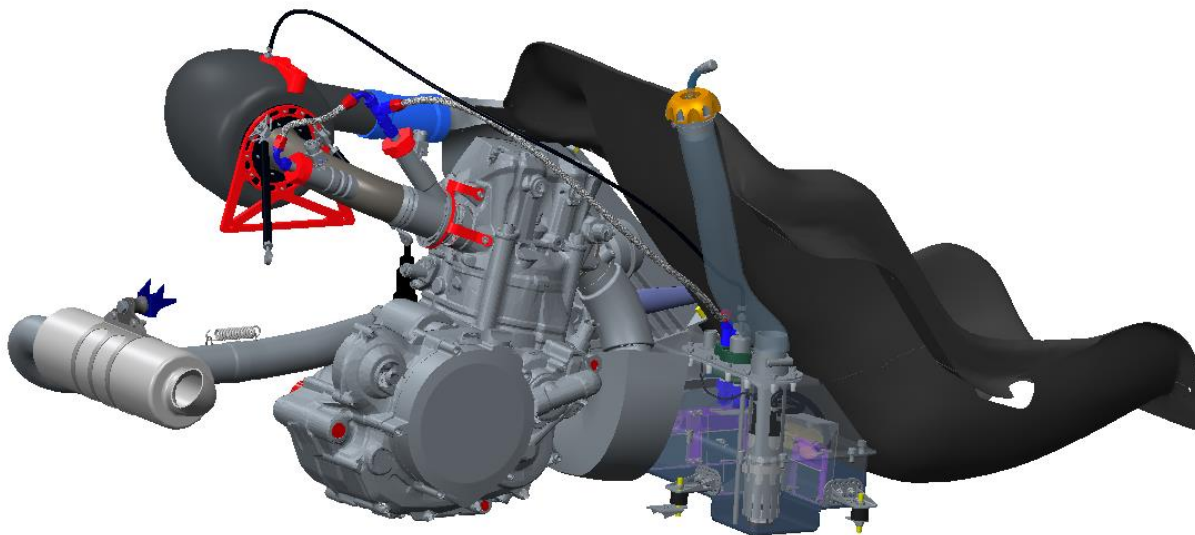
Obr. 58 Laminace spodní části nádrže

Laminace nádrže je časově náročná a podíleli se na ní kromě mě ještě další 2 lidé. Touto cestou bych jim rád poděkoval za pomoc při její výrobě.



7 ZAKOMPONOVÁNÍ DO VOZIDLA

Jak již bylo naznačeno, tak palivová nádrž se nachází mezi řidičem a motorem, respektive výfukem. Řešení je nevýhodné, nádrž ovšem nelze jinak umístit. Nádrž je uložena na třech shodných držácích, které byly analyzovány. Nádrž je uložena na gumových silentblocích, aby vibrace z rámu byly co nejméně přenášeny. Přístup k nádrži bude ze spodní strany auta nebo od sedačky, kde sedačku a nádrž odděluje tzv. firewall, který v případě požáru chrání řidiče. Z nádrže vede dolévací hadice, která je podle pravidel průhledná a nemusí tedy být použito inspekční hadice na zjišťování hladiny paliva. Na konci hadice je víčko a odvětrávací systém, víčko je v plánu ještě upravit osoustružením na menší vnější průměr, jelikož se na něm nachází zbytečné množství materiálu, očekává se úspora až 50% hmotnosti. Palivovou nádrž a motor spojují 2 hadice. První hadice vede palivo do sání ke vstřikovacím ventilům, pro které konstruktér sání vymyslel vlastní řešení uložení, jelikož palivový systém končí právě vstřikovacími ventily. Druhá hadice spojuje airbox a regulátor tlaku paliva, kde regulátor je řízen referenčním tlakem a může tedy měnit tlak paliva. Nesmím opomenout také elektroniku palivového systému. Regulátor pracuje čistě mechanicky pomocí pružiny. Palivové čerpadlo je napájeno z kabelového svazku, konektor je uložen v přírubě nádrže. Palivový systém snímá také veličiny, aby byla informace o nasávaném palivu. Blízko čerpadlu vede tenká trubice, která má na konci termočlánek, který měří teplotu nasávaného paliva a nad přírubou se nachází senzor tlaku paliva.



Obr. 59 Umístění palivové nádrže



8 ZHODNOCENÍ

8.1 TESTOVÁNÍ

V době dokončování této práce byla nádrž testována na motorové brzdě a splňovala dané požadavky. Spotřeba byla ověřena hmotnostně přímo na motorové brzdě a také z řídicí jednotky LifeRacing, která je schopna tuto spotřebu spočítat z délky vstřiku. Tato spotřeba by se při jízdě pohybovala na hranici $V=6,4$ l. Nádrž bohužel nestihla být otestována dynamicky, tedy při jízdě. Přesto si myslím, že by nedocházelo k poklesu tlaku paliva z důvodu nedostatku jeho nedostatku, protože navržené přepážky by zbylý objem dokázaly dopravit k čerpadlu.

8.2 HODNOCENÍ HMOTNOSTI

Tab. 7 Srovnání hmotností

	Hmotnost model [g]	Reálná hmotnost [g]	Celková hmotnost [g]
Hliník	1 213	1 254	2 361
Kompozit	711	752	1 859

Tabulka dává srovnání, jak se liší hmotnosti vůči předpokládaným hmotnostem v modelu. V modelu vychází dle tabulkových hodnot hustoty materiálu, že uhlíkový kompozit je asi o 0,5 kg lehčí než hliníková varianta. U kompozitové verze je připočtena hodnota hmotnosti nátěru 112 g. Reálná hodnota hmotnosti nátěru byla 125 g. Hliníková verze fyzicky nikdy nevznikla, ale její hmotnost je počítaná z reálné váhy čtverce o hranách 100x100 mm, také jsou zde připočítány přibližné přídavky hmotnosti, které vzniknou svařováním.

Výsledkem je tedy úspora váhy přibližně 500 g na samotné konstrukci nádrže.

8.3 CENOVÁ KALKULACE

K porovnání reálné a tabulkové ceny nádrže poslouží následující tabulka. Jsou zde uvedeny ceny hliníkové i kompozitní verze.

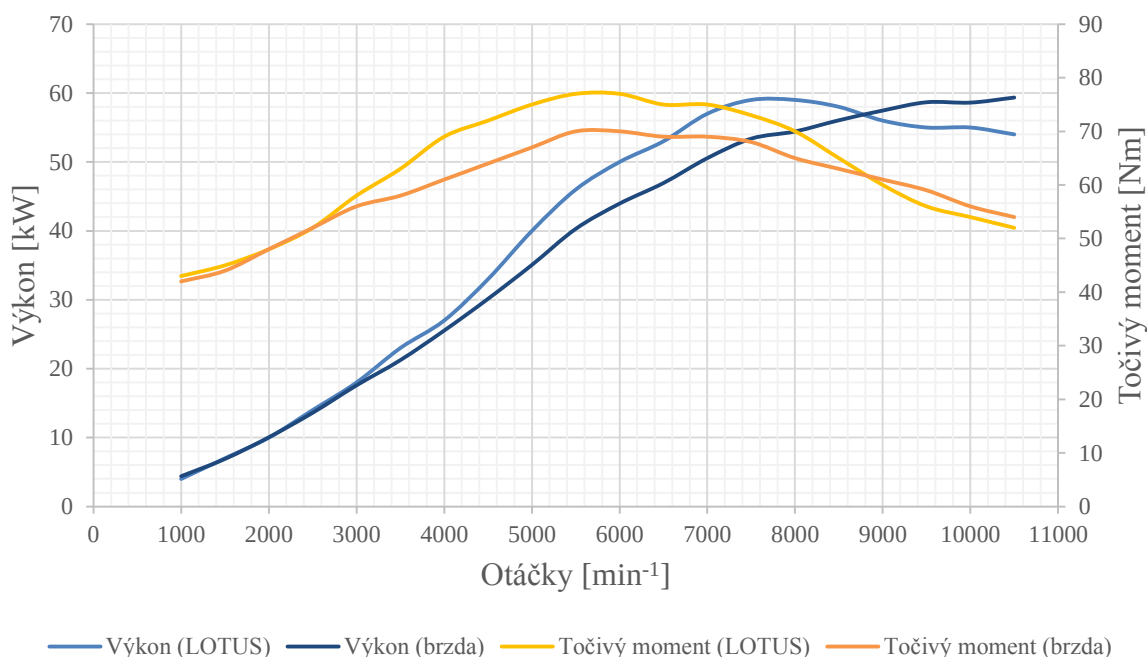
Tab. 8 Srovnání cen jednotlivých nádrží

	Cena COST REPORT [Kč]	Cena reálná [Kč]
Hliník	5 400	28 900
Kompozit	14 200	45 300

Z Tab. 8 je zřejmé, že teoretická reálná cena je několikanásobně dražší než cena, která je vykalkulována z tabulek pro statickou disciplínu COST Report. Tyto tabulky jsou určovány pro součásti, které by se vyráběly ve velké sérii. Každý výrobek ve formuli student je ovšem prototyp. Také je logické, že kompozitní verze je dražší než hliníková. Hraje zde roli ovšem hmotnost a ta je pro vozidlo velice důležitá.

8.4 SPOLUPRÁCE MOTORU A PALIVOVÉHO SYSTÉMU

Vnější otáčková charakteristika LOTUS vs. motorová brzda



Obr. 60 Srovnání matematického modelu s reálnými hodnotami

Graf říká, že reálné hodnoty křivek se od těch matematických liší. Rozdíly jsou dány zjednodušeními, která program LOTUS má. Jedná se například o třecí ztráty v ohybech a také nepřesnostmi v definici paliva, kde se vychází pouze z výhřevnosti a složení paliva. Matematický model má vyšší hodnoty točivého momentu, nejvyšší hodnoty jsou ve stejném otáčkovém spektru jako reálné hodnoty. U křivky výkonu je za nejvyšší hodnotou mírný propad u matematického modelu, měřený výkon naopak roste až do maximálních otáček.

8.5 ZMĚNY NA FINÁLNÍ VERZI NÁDRŽE

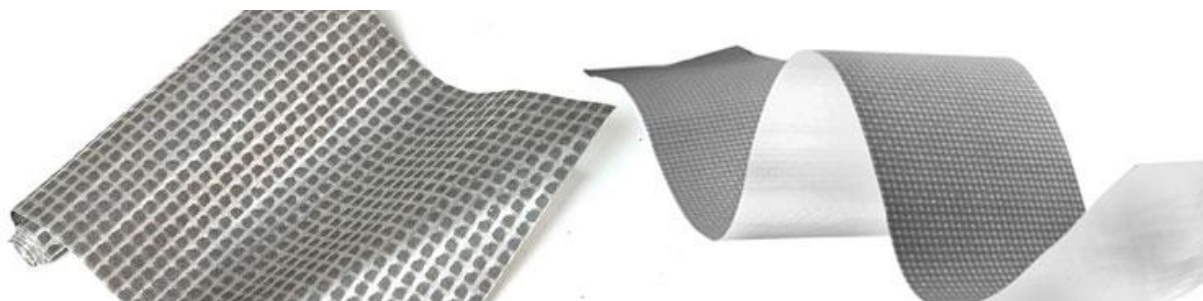
Zmíněné fotografie a fakta se vážou na testovací nádrž, která byla primárně určená k testování na motorové brzdě a prvním jízdním testům. Před instalací je tedy třeba udělat určité změny, aby finální verze palivové nádrže byla bezpečná a spolehlivá ještě více než nádrž testovací. Zde je tabulka změn:

Tab. 9 Tabulka změn

Změna	Důvod
Technologie nanášení ochranného tmelu	Jednoduchost; ušetření váhy
Odolnější materiál pryskyřice	Větší odolnost vůči teplu
Vložená odstiňovací deska mezi výfuk a nádrž	Zmenšení teploty nádrže
Ochrana nádrže folií ZircoFlex®	Zmenšení teploty nádrže



Simulací bylo ověřeno, že přítomností výfuku blízko nádrže dojde opravdu k vysoké radiaci tepla na povrch nádrže, což by mělo za následek možnost selhání laminátu a ohřívání paliva. Z tohoto důvodu je potřeba, co nejvíce zabránit průniku tepla k nádrži. Tento jevu má zabránit keramický povlak výfuku, vložený plech s odstiňovacími vlastnostmi a folie odrážející teplo.



Obr. 61 Ochranná folie ZircFlex® [33]

Další změnou je technologie nanášení ochranného tmelu, kdy tento tmel již nebude nanášen na hotový laminát, ale naopak před samotnou laminací. Zastává tedy funkci tzv. gelcoatu, který je první, resp. poslední pohledovou vrstvou a dělá ji hladší. Tato technologie je výsledkem dlouhodobého vývoje a má důsledek nižší váhu nádrže a pravidelnější vrstvu tmelu. Výroba celé nádrže je tímto také jednodušší.



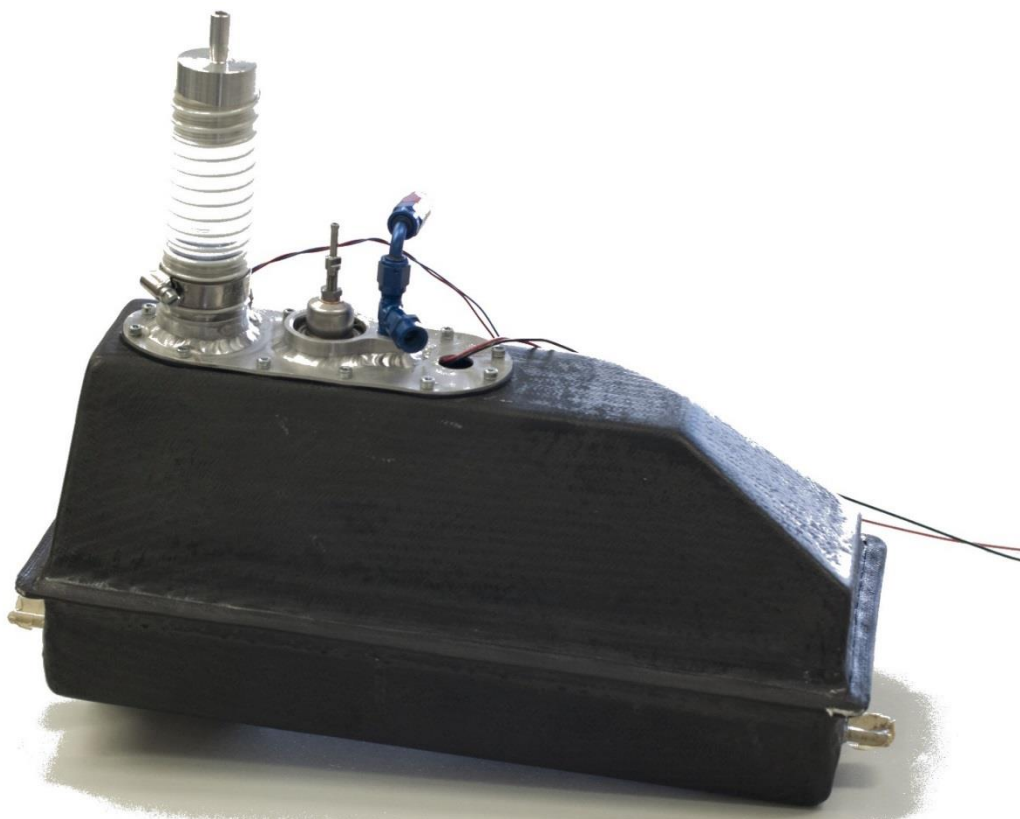
Obr. 62 Vzorek pro zhodnocení technologie



ZÁVĚR

Motivací ke zpracování této diplomové práce byl zájem o nahlédnutí do problému a jeho možné vylepšení. Předchozí generace palivových systémů se tomu mému v ničem nepodobají. Palivová nádrž byla výhradně tvořena z hliníku o tloušťce (2 až 3) mm a její váha byla vyšší než se požadovala. Také spolehlivost byla nízká, nádrže nikdy neměly systémy přepážek a někdy docházelo k situaci, že v nádrži byla polovina objemu a nastal pokles tlaku paliva.

Na začátku vývoje bylo důležité otestovat nové materiály. Testovaným materiálem byl uhlíkový kompozit, který má v motorsportu běžné užití, ale jako materiál palivové nádrže se vyskytuje zřídka. Problém je v odolnosti epoxidové pryskyřice vůči palivům. Bylo nutné tento fakt otestovat. Proto byly vytvořeny vzorky, které se nechaly dlouhodobě působit v prostředí paliva E-85, které bylo před sezónou zvoleno, z důvodu vyšší odolnosti vůči detonačnímu hoření a možnému přeplňování motoru. Podařilo se mi zajistit vzorek ochranného tmelu od firmy 3M a od firmy POR-15. Nechal jsem tedy dlouhodobě působit palivo E-85 přímo na uhlíkový kompozit a na kompozit chráněný dvěma druhy tmelu. První tmel po krátké době vypověděl službu, ale druhý zůstal po dobu 3 měsíců beze změn. První dva týdny došlo k hmotnostnímu úbytku 1,5 g, ale poté už ke změnám nedocházelo a tmel plnil svou funkci. Nechráněný kompozit botná, zvětšuje svůj objem a měkne. Tímto byla zajištěna ochrana nádrže, dalším krokem bylo zhodnocení hmotnosti vůči hliníku. Předpokládaná úspora měla být okolo 33 %. Rozhodl jsem se tedy k realizaci kompozitové palivové nádrže. Úspora váhy nakonec byla 500g, což je o 40% méně než hliníková varianta.



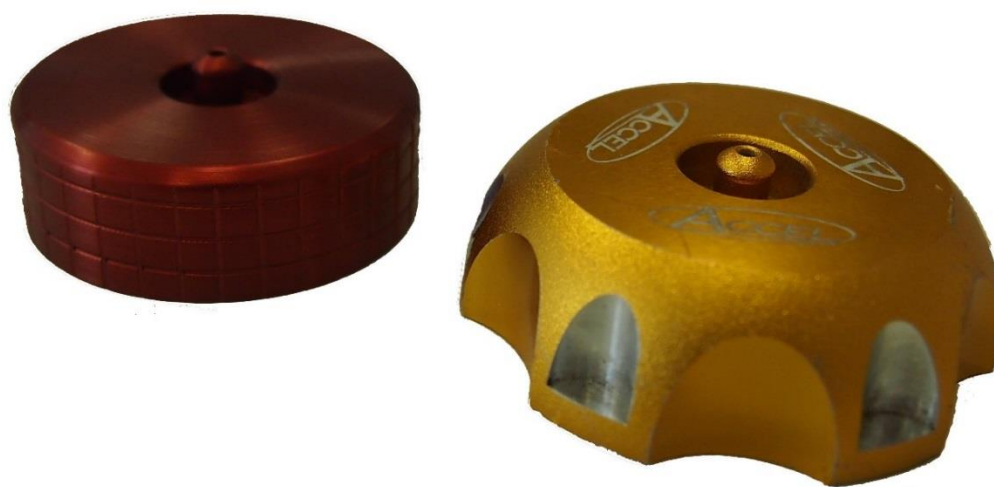
Obr. 63 Nádrž na motorovou brzdou před dokončením



Palivový systém není jen nádrž, ale řada na sebe navazujících komponent. Při návrhu komponent jsem se opíral o výpočty z matematického modelu nebo o negativní zkušenosti z předchozích generací. Nádrž tedy má jen jeden vstupní otvor a všechny komponenty jsou uloženy v přírubě. Demontáží příruby tedy dostaneme celý obsah nádrže ven. Pro spojení hadic jsem využil nabídky firmy Goodridge, od které jsem pořídil sadu fittingů JIC-4, což je nejmenší možný rozměr na palivové vedení. Tento rozměr byl také zvolen, neboť vyšel přijatelný rozměr hadic s vnitřním průměrem 5,46 mm. Jako pracovní tlak bylo zvoleno tlaku 3,7 baru, kde tento tlak je možný měnit v intervalu (3,5 až 5) barů regulátorem od firmy Bosch. Pracovní tlak vytváří čerpadlo Walbro, které je schopné dodávat tlak až 7 barů. Bylo nutné použití 2 vstřikovačů, které jsou v sání sériově uloženy. Maximální průtok vstřikovači je tedy až 1100g/min. Jako pohonná jednotka byl zvolen motor Husaberg FE 501, který má v sériové verzi výkon 40 kW. Přepočítáním se tato hodnota dostala na maximální výkon 60kW, což na první pohled odpovídá matematickému modelu, ale křivky se od vyšších otáček liší. Matematický model má jistá zjednodušení a ty se ve výsledku projeví. Jde např. o třecí ztráty, ohyby a definici vstřikování paliva. Nádrž ovšem na motorové brzdě plnila své parametry a spotřeba se nedostala přes hranici 6,4 litru. Což znamená, že navržený objem bude stačit.

Při návrhu byl při analýze zjištěn nedostatek v uložení nádrže. A tím je malá vzdálenost od výfuku. Docházelo by zde k velké radiaci a je třeba snížit emisivitu povrchu nádrže fólií ZircoFlex a dostat mezi nádrž a výfuk další odstíňovací prvek, jinak by teplota na povrchu mohla vystoupat až na hranici 160°C.

Při návrhu byl kladen důraz na snižování hmotnosti. Myslím, že to jsem dokázal více než dost. Pokud se ušetří váha např. 10% na každé komponentě, pak výsledná hmotnost systému komponent je také o 10% nižší. Snižování hmotnosti začíná u velkých komponent a končí u těch nejmenších. Největšího snížení jsem dokázal u dolévací palivové hadice, kde úspora je 75%. Přesněji 300 g uspořené váhy. Úspory 50% jsem dosáhl u víčka této hadice, kde došlo k jeho obrobení a následné eloxaci. Úspora váhy činí 32 g. Výsledkem je nižší váha celého palivového systému ve srovnání s předchozími systémy o 24% hmotnosti při zvětšení objemu palivové nádrže z 5,5 litru na 6,7 litru. Snižováním hmotnosti a použitím alternativních materiálů si myslím, že jsem posunul náš tým v Design prezentaci na závodech FSAE dobrým směrem. Kompozitová nádrž je ovšem z důvodu laminace a výroby forem o 36% dražší než hliníková.



Obr. 64 Konečná úprava víčka



POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] JAN, Zdeněk a ŽDÁNSKÝ, Bronislav. *Automobily (4): Příslušenství*. Brno: Avid, spol. s r.o., 2009. ISBN 978-80-87143-08-7.
- [2] Formula Student web page [online], 2014, poslední revize 22. 10. 2014. Dostupné z: www.formulastudent.com
- [3] PTC Learning Connector [online], Parametric Technology Corporation, 2014, poslední revize 28. 10. 2014. Dostupné z: <http://www.ptc.com/services/training/elearning/learning-connector>
- [4] ANSYS Workbench, ANSYS Inc., Canonsburg, USA 2014, poslední revize 17. 6. 2014. Dostupné z: <http://www.ansys.com/Products/ANSYS+14.5+Release+Highlights/ANSYS+Workbench>
- [5] JANÍČEK, P., ONDRÁČEK, E., VRBKA, J. *Pružnost a pevnost I*, VUT Brno 1992
- [6] FORMULA STUDENT GERMANY. *Visitors* [fotografie]. Visitors [online]. Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/fsg/visitors/>.
- [7] TU BRNO RACING. *FSH 2014* [fotografie]. FSH 2014 [online]. Dostupné z: <http://www.tubnoracing.cz/cs/media/foto/formula-student-hungary-2014-31.htm>.
- [8] SIMIONATO, I. *FSAE Skidpad layout* [fotografie]. Setup optimization for the FSAE car [online]. Dostupné z: <http://www.multibody.net/teaching/dissertations/setup-optimization-for-the-fsae-car-mg07-12/attachment/11-3/>.
- [9] VLK, F., RAUSCHER, J. *Příslušenství motorových vozidel*, Studijní opory, VUT v Brně
- [10] VLK, F. *Palivové systémy motocyklů*. Soudní inženýrství [online]. Dostupné z: <http://www.sinz.cz/archiv/docs/si-2005-01-24-37.pdf>.
- [11] KAMÍNEK, J. *Práce karburátoru se sytičem* [fotografie]. Babice nad Svitavou [online]. Dostupné z: <http://www.lmkbabice.cz/?p=216>.
- [12] PLŮCHA, M. *Elektronicky řízené automobilové systémy* [fotografie]. Typy vstřikování benzínu [online]. Dostupné z: <http://www.automobilove-systemy.wz.cz/img/vstik.gif>.
- [13] BOSCH. *Systém řízení motoru »Motronic«* [fotografie]. Plakát formule [online]. Dostupné z: http://aa.bosch.cz/download/formule/formule_plakat_2004_02.pdf.
- [14] AUTODÍLY MJ AUTO. *Lambda sonda* [fotografie]. NGK lambda sonda [online]. Dostupné z: <http://www.mjauto.cz/wp-content/uploads/2013/05/ngk-lambda-sonda.jpg>.



- [15] AUTODILY.CZ. *Palivová nádrž* [fotografie]. Palivová nádrž [online]. Dostupné z: http://www.autodilycz.cz/zbozifoto/is_60131_palivova-nadrz-diesel-benzin-inj-61l-32-34-225.jpg.
- [16] AUTODILY.CZ. *Palivové čerpadlo* [fotografie]. Palivové čerpadlo [online]. Dostupné z: http://www.autodilycz.cz/zbozifoto/is_233390_palivove-cerpadlo-bosch-bo-0580464008.jpg.
- [17] GLOBALMOTO. *Palivový filtr Glass* [fotografie]. Palivový filtr Glass [online]. Dostupné z: http://www.globalmoto.cz/files/mod_eshop/produkty/3011.jpg.
- [18] GOOD-WIN-RACING. *Fuel Rail Kit* [fotografie]. Cosworth Fuel Rail [online]. Dostupné z: http://www.good-win-racing.com/miata/images/items/Cosworth_Fuel_Rail.jpg.
- [19] TUNE. *Do You Really Need An Adjustable Fuel Pressure Regulator?* [fotografie]. Fuel pressure regulator [online]. Dostupné z: <https://stmtune.files.wordpress.com/2011/09/fuel-pressure-regulator.jpg>.
- [20] OLIVIK, P. *Přímé vstřikování benzínu: nejkratší cestou* [fotografie]. Autorevue [online]. Dostupné z: http://www.autorevue.cz/getthumbnail.aspx?q=100&crop=0&height=320&width=640&id_file=788835017.
- [21] PUKI. *Husaberg FE 570 pictures* [fotografie]. Engine [online]. Dostupné z: <http://img.index.hu/cikkepek/totalbike/tesztek/uj/husafe450570/pressfoto/.gdata/cikk/engine.jpg>.
- [22] MOTOEXPERT. *Co možná nevíte o ethanolu* [online]. Dostupné z: <http://www.motorexpert.cz/clanek011.htm>.
- [23] SPIDERCC. *Calculation of Ethanol/Gasoline Air / Fuel mixtures* [online]. Dostupné z: <http://www.maseratilife.com/forums/attachments/coupe-spyder-gs/8891d1309384594-ethanol-fuel-question-ethanol-gasoline-calc.pdf>.
- [24] GLOBAL FORMULA RACING. *Fuel tank* [fotografie]. OSUFuelTank [online]. Dostupné z: <http://nwrapidmfg.com/blog/wp-content/uploads/2011/12/NWR-OSUFuelTank-e1340060346331.jpg>.
- [25] LOTUS7. *Fuel tank design* [fotografie]. 3D view [online]. Dostupné z: http://aarons7.files.wordpress.com/2009/08/fuel_3d.jpg.
- [26] GIXXER. *Header Construction - FSAE Car* [fotografie]. Fuel tank [online]. Dostupné z: http://i72.photobucket.com/albums/i183/buderic/Misc%20Bull%20Honkey/IMG_1526.jpg.
- [27] ATL. *Fuel tank* [fotografie]. Motorsport [online]. Dostupné z: http://www.atltd.com/upload_files/7/NGTC_CADjpg.JPG.



- [28] SUMMIT RACING. *Fuel pump Walbro* [fotografie]. CFD-104 [online]. Dostupné z: http://static.summitracing.com/global/images/prod/mediumlarge/abt-cfd-104_ml.jpg.
- [29] ORCA RACING. *MAHLE filter set* [fotografie]. Fuel Kit KTM [online]. Dostupné z: <http://www.orca-racing.com/wp-content/uploads/2013/08/genuine-fuel-kit-KTM.png>.
- [30] BOSCH MOTORSPORT. *Fuel pressure regulator MINI A* [fotografie]. Regulator MINI A [online]. Dostupné z: http://www.bosch-motorsport.de/media/catalog_media/2777182347__Webjpg_w362.jpg.
- [31] MERLIN MOTORSPORT. *Hose 210 series* [fotografie]. Goodridge hoses [online]. Dostupné z: https://www.merlinmotorsport.co.uk/files/resized/large/G/img/g_210_10.jpg.
- [32] GIEFF RACING. *90° female swept tube* [fotografie]. Goodridge fittings [online]. Dostupné z: <http://www.giefferacing.com/images/prodotti/236-90.jpg>.
- [33] ZIRCOTEC. *ZircoFlex* [fotografie]. ZircoFlex [online]. Dostupné z: http://www.zircotec.jp/products/images/zircoflex_img11.jpg.
- [34] PAVELEK, M. a kol.: *Termomechanika*. Skripta. VUT Brno 2011.
- [35] MUNSON, B., R., YOUNG, D., F., OKIISHI, T., H., *Fundamentals of Fluid Mechanics*, 2006 John Wiley & Sons, Inc., ISBN 978-0-471-67582-2
- [36] BOSCH MOTORSPORT. *Injection Valve EV 14* [fotografie]. IV EV 14 [online]. Dostupné z: http://www.bosch-motorsport.de/media/catalog_media/2776019083__Webjpg_w362.jpg.
- [37] WIKIPEDIE. *Benzin*. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Benz%C3%ADn>.
- [38] HUSQVARNA. *Enduro* [fotografie]. FE 501 [online]. Dostupné z: http://www.husqvarna-motorcycles.com/cz_en/enduro/fe-501.html.



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

ATL		Aero Tec Laboratories
CNC		Computer Numeric Control
E-85		Palivo s poměrem ethanol/benzin 85/15
FSAE		Soutěž pořádaná organizací SAE
g	[m.s ⁻²]	Gravitační zrychlení
GFR		Global Formula Racing
h	[m]	Tloušťka stěny výfuku
i	[-]	Počet válců
IC		Internal Combustion (motor s vnitřním spalováním)
JIC		Joint Industry Council (Druh těsnění kuželovou plochou)
k	[-]	Koeficient bezpečnosti
M	[kg]	Skutečné přivedené množství vzduchu
MKP		Metoda konečných prvků
M _o	[kg]	Teoretické množství vzduchu
M _p	[g.h ⁻¹]	Časová spotřeba
m _{pe}	[g.kW ⁻¹ h ⁻¹]	Měrná efektivní spotřeba
n	[min ⁻¹]	Otáčky motoru
NGK		Výrobce zapalovacích svíček
OČ	[-]	Oktanové číslo
p	[bar]	Tlak paliva
p	[bar]	Tlak paliva
p _e	[MPa]	Střední efektivní tlak
P _e	[kW]	Efektivní výkon
p _{NA}	[MPa]	Střední efektivní tlak atmosférické verze
p _{TURBO}	[MPa]	Střední efektivní tlak přeplňované verze
PU		Polyuretan
Q	[l.h ⁻¹]	Objemový průtok paliva
Q _v [*]	[W]	Tepelný tok při přestupu tepla vedením
Q _v [*]	[W]	Tepelný tok při přestupu tepla zářením
s	[km]	Ujetá dráha
S	[m ²]	Plocha přestupu tepla
SAE		Society of Automotive Engineers
SES		Structural Equivalency Spreadsheet (Technický dokument)



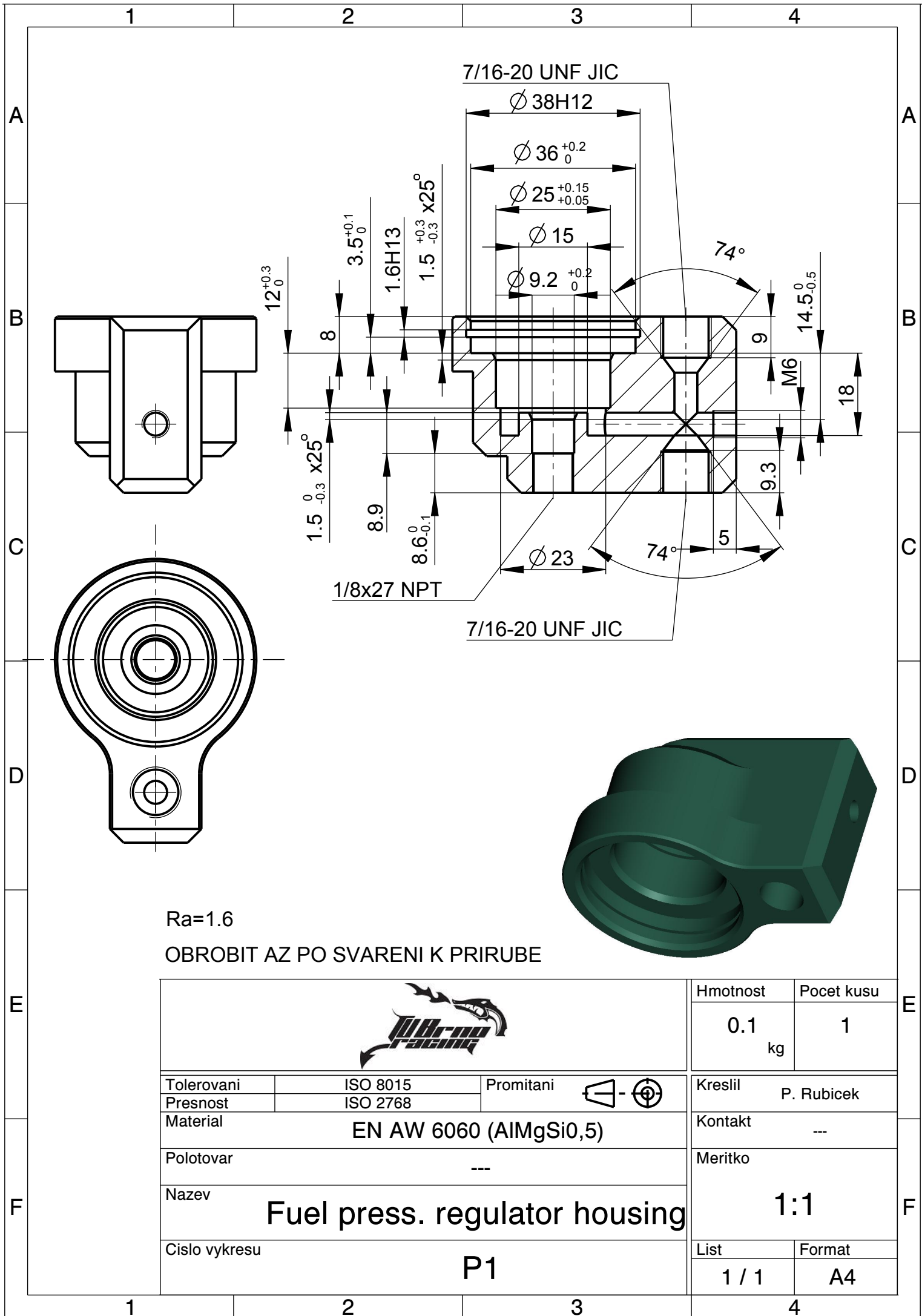
SRCF		Structural Requirements Certification Form
t	[min]	Čas jízdy ve vytrvalostním závodě
t	[°C]	Teplota výfuku
T	[K]	Absolutní teplota
T _{w1}	[K]	Teplota výfukových plynů
T _{w2}	[K]	Teplota na povrchu výfuku
U	[MJ.kg ⁻¹]	Výhřevnost paliva
v	[m.s ⁻¹]	Rychlost proudění paliva
V	[l]	Objem
V _p	[l]	Potřebný objem paliva
V _{PN}	[l]	Objem palivové nádrže
V _z	[l]	Zdvihový objem
x	[μm]	Velikost filtrované částice
z	[m]	Dopravní výška paliva
α	[°]	Úhel kužele dosedací plochy fittingu
ε	[-]	Kompresní poměr
ε	[-]	Emisivita
λ	[-]	Součinitel přebytku vzduchu
λ	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Součinitel přestupu tepla
ρ	[g.cm ⁻³]	Hustota
ρ	[g.cm ⁻³]	Hustota paliva
ρ _p	[g.cm ⁻³]	Hustota paliva
σ _k	[MPa]	Mez kluzu materiálu
σ ₀	[W.m ⁻² .K ⁻⁴]	Stefan-Boltzmannova konstanta
σ _R	[MPa]	Redukované napětí
τ	[-]	Taktnost motoru

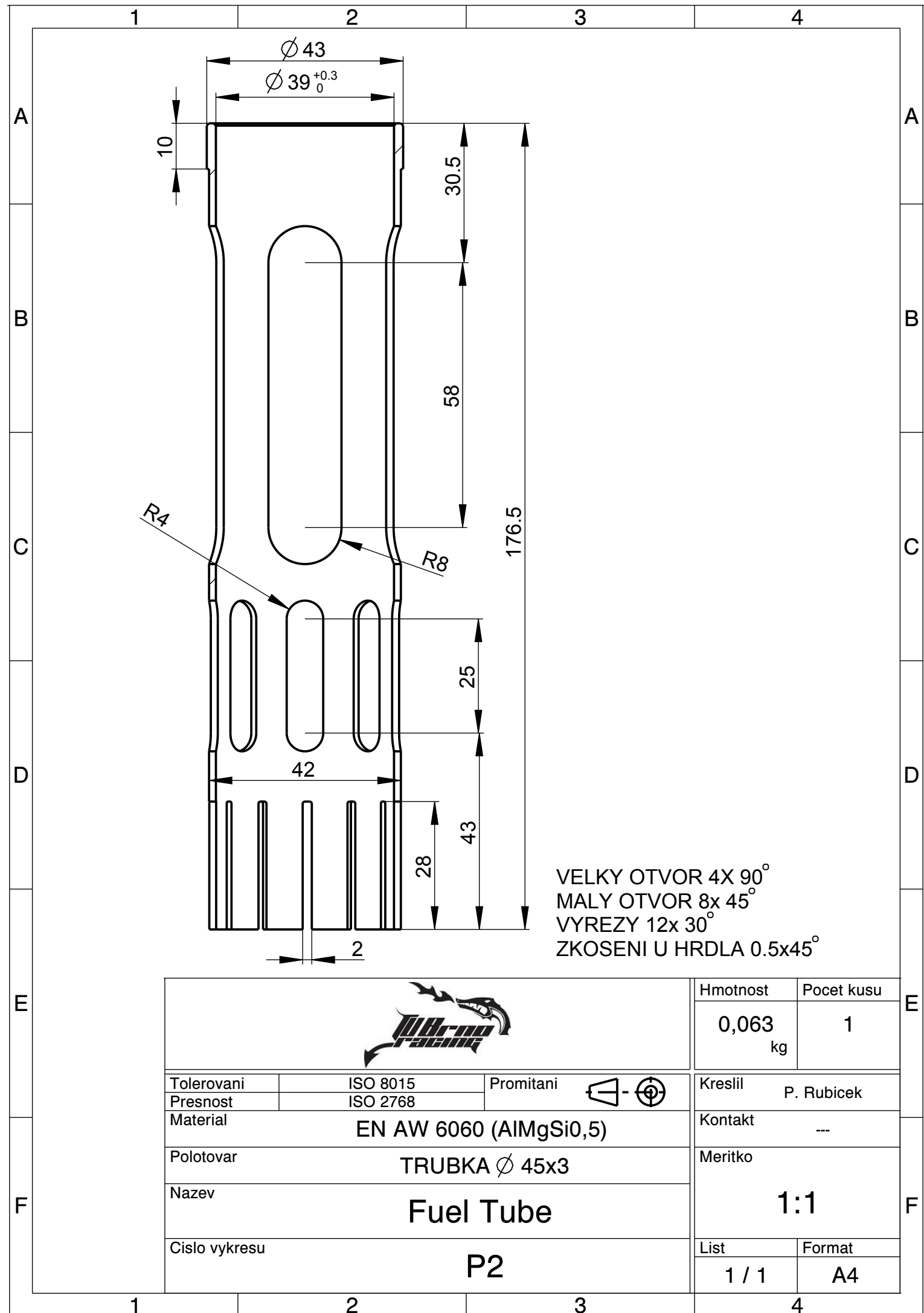


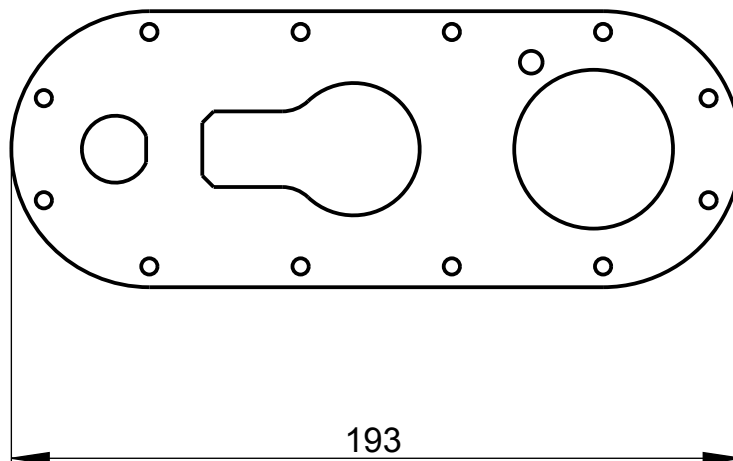
SEZNAM PŘÍLOH

P1	Výkres housingu palivového regulátoru
P2	Výkres dolévací trubice
P3	Výkres příruby palivové nádrže
P4	Výkres příruby pro nýtovací matice
P5	Výkres plechu vloženého do laminátu
P6	Výkres držáku

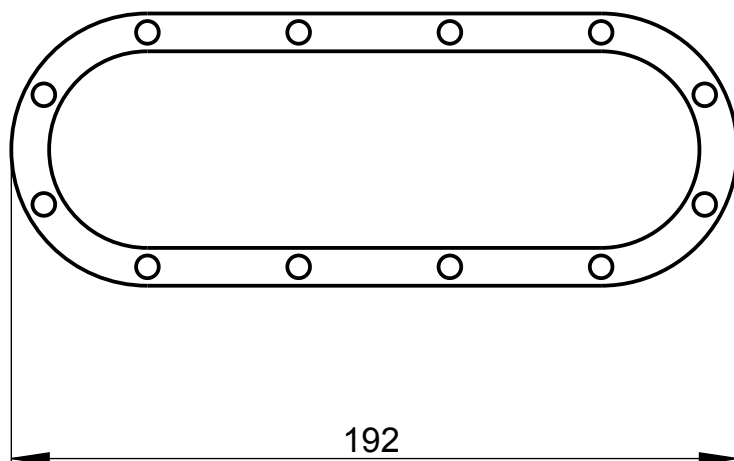
Pozn.: P3, P4, P5 a P6 mají jen kontrolní kóty

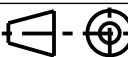


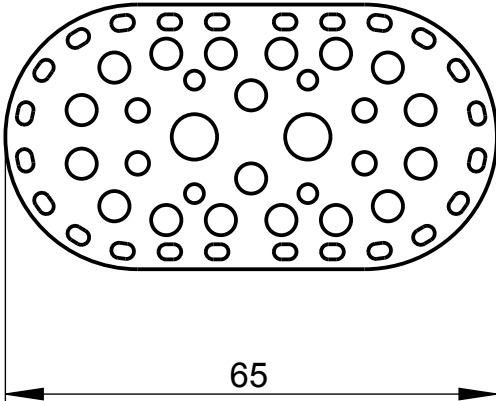


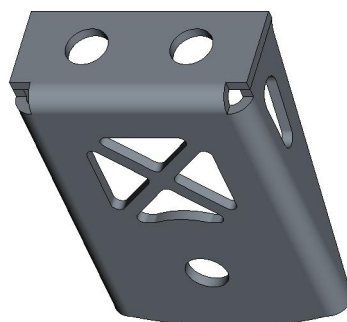
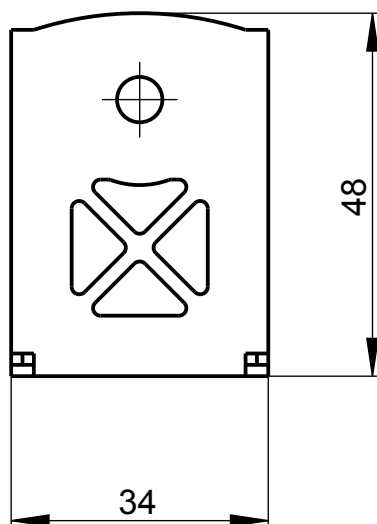
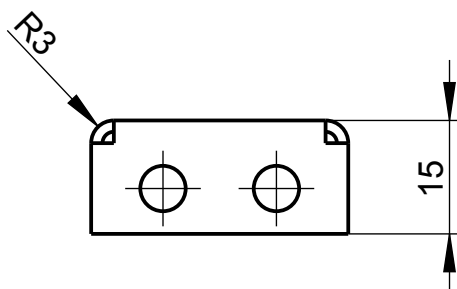


			Hmotnost	Pocet kusu
			0.04 kg	1
Tolerovani	ISO 8015	Promitani	Kreslil P. Rubicek	
Presnost	ISO 2768			
Material		EN AW 6060 (AlMgSi0,5)	Kontakt ---	
Polotovar		---	Meritko 1:2	
Nazev		Flange		
Cislo vykresu		P3		
			List	Format
			1 / 1	A4

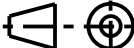


			Hmotnost	Pocet kusu
			0.01 kg	1
Tolerovani	ISO 8015	Promitani 	Kreslil P. Rubicek	
Presnost	ISO 2768			
Material EN AW 6060 (AlMgSi0,5)			Kontakt ---	
Polotovar ---			Meritko 1:2	
Nazev Rivet flange				
Cislo vykresu P4			List	Format
			1 / 1	A4

	1	2	3	4						
A					A					
B					B					
C					C					
D					D					
E				<table><tr><td>Hmotnost</td><td>Pocet kusu</td></tr><tr><td>0.01 kg</td><td>3</td></tr></table>	Hmotnost	Pocet kusu	0.01 kg	3	E	
Hmotnost	Pocet kusu									
0.01 kg	3									
	<table><tr><td>Tolerovani</td><td>ISO 8015</td><td rowspan="2">Promitani </td></tr><tr><td>Presnost</td><td>ISO 2768</td></tr></table>	Tolerovani	ISO 8015	Promitani 	Presnost	ISO 2768	<table><tr><td>Kreslil</td><td>P. Rubicek</td></tr></table>	Kreslil	P. Rubicek	
Tolerovani	ISO 8015	Promitani 								
Presnost	ISO 2768									
Kreslil	P. Rubicek									
	Material ocel 1.0038 (11373)		Kontakt							
	Polotovar ---		Meritko 1:1							
F	Nazev Fuel tank holder insert									
	Cislo vykresu P5			<table><tr><td>List</td><td>Format</td></tr><tr><td>1 / 1</td><td>A4</td></tr></table>	List	Format	1 / 1	A4		
List	Format									
1 / 1	A4									
	1	2	3	4						



3x OHYB R3
PO OHNUTI SVARIT

			Hmotnost	Pocet kusu
			0.05 kg	3
Tolerovani	ISO 8015	Promitani 	Kreslil P. Rubicek	
Presnost	ISO 2768		Kontakt ---	
Material ocel 1.0038 (11373)			Meritko	
Polotovar ---			1:1	
Nazev Fuel tank holder				
Cislo vykresu P6			List	Format
			1 / 1	A4