



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 VODNÍHO CHLADIČE PRO FORMULOVÝ MOTOR

WATER COOLER FOR FORMULA ENGINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

DANIEL MALOVANÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. DAVID SVÍDA

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství
Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Daniel Malovaný
který/která studuje v **bakalářském studijním programu**
obor: **Stavba strojů a zařízení (2302R016)**

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

Návrh vodního chladiče pro formulový motor

v anglickém jazyce:

Water Cooler for Formula Engine

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Proveďte návrh vodního chladiče pro vůz Formula Student.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Proveďte rozbor chladičů a chladicích okruhů vhodných pro formulové vozy
- 2) Proveďte základní výpočtový a rozměrový návrh chladiče pro zadaný motor
- 3) Proveďte zhodnocení Vašeho návrhu a uveďte možnosti jeho dalšího zlepšení

Seznam odborné literatury:

- [1] Hofmann, Karel. Turbodmyhadla, vozidlové turbíny a ventilátory. :Přepřehování spalovacích motorů. / 2. vyd. Brno : VUT Brno, 1985. 134 s.
- [2] Kolektiv VÚNM a ČKD. Naftové motory čtyřdobé, 1díl. Státní nakladatelství technické literatury, n.p., Druhé vydání, Praha, 1962. L123-B3-IV-41/2490
- [3] KRATOCHVIL, C., ONDRAČEK, E. Mechanika těles - Počítače a MKP. Vysoké učení technické v Brně, 1987.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. David Svída

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 5.11.2010

L.S.

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je provést rozbor chladičů a chladících systémů použitých ve vozech účastnících se soutěže Formula Student/SAE. Dále na základě vstupních podmínek provést základní výpočtový a konstrukční návrh vodního chladiče a na závěr práce tento návrh zhodnotit.

Klíčová slova

Formula Student/SAE, Formule student, chladič, chladicí systém, CAD, Catia, přenos tepla

Abstract

The purpose of this thesis is to analyze the radiators and cooling systems used in cars participating in the competition Formula Student/SAE. Furthermore, based on input conditions to make a basic calculation and design of the water cooler and in the end of this work to evaluate the proposal.

Keywords

Formula Student/SAE, Formula Student, radiator, cooling system, CAD, Catia, heat transfer

Bibliografická citace

MALOVANÝ, D. *Návrh vodního chladiče pro formulový motor*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 41 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. David Svída.

Čestné prohlášení

Čestně prohlašuji, že bakalářskou práci na téma Návrh vodního chladiče pro formulový motor jsem vypracoval samostatně pod vedením svého vedoucího bakalářské práce pana Ing. Davida Svídy a s použitím zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně 27.5.2011

Daniel Malovaný

Poděkování

Děkuji Ing. Davidu Svídovi za vedení bakalářské práce a Ing. Aleši Horákovi Ph.D. za poskytnutí cenných rad a informací. Dále děkuji firmě Visteon-Autopal s.r.o., závod Hluk za data, které jsem mohl využít při vypracování této bakalářské práce a pracovníkům prototypové dílny v Hluku za výrobu chladiče.

Obsah

1. Úvod.....	9
2. Chlazení pístových spalovacích motorů.....	10
3. Uspořádání chladicí soustavy vozů Formula Student.....	10
3.1 Umístění chladičů na levé nebo pravé straně vozu.....	11
3.2 Umístění chladičů po stranách vozu.....	13
3.3 Méně obvyklá místa pro umístění chladičů.....	14
3.4 Celkové shrnutí použitých řešení.....	15
4. Teorie přenosu tepla.....	16
4.1 Přenos tepla vedením.....	16
4.2 Přenos tepla prouděním.....	16
4.3 Přenos tepla zářením.....	17
5. Vodní chladič.....	18
5.1 Čistá voda jako chladicí médium.....	19
5.2 Základní výpočet tepelného výkonu vodního chladiče.....	21
5.2.1 Vstupní hodnoty.....	21
5.2.2 Hmotnostní průtok vody.....	21
5.2.3 Hustota vzduchu při dané teplotě.....	21
5.2.4 Hmotnostní průtok vzduchu.....	22
5.2.5 Ověření fyzikální realizovatelnosti.....	23
6. Ventilátor.....	24
6.1 Výběr ventilátoru.....	24
7. 3D počítačové konstruování.....	26
7.1 Catia V5.....	26
7.2 Tvorba modelu chladiče.....	27
8. Výroba chladiče.....	30
9. Měření na kalorimetru.....	31
9.1 Princip měření.....	32
9.2 Výsledky měření.....	32
10. Závěr.....	34
Seznam použitých zdrojů.....	37
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	39
Přílohy.....	41

1. Úvod

Formule SAE, logo viz Obr. 1, je konstrukční soutěž pro studenty technických oborů univerzit celého světa. Je to největší soutěž svého druhu, která vznikla v USA v roce 1981. Od roku 1998 existuje její evropská verze, Formula Student. Soutěž se stala velmi populární a v současnosti probíhá na mnoha kontinentech za účasti více než 270 univerzitních týmů z celého světa.

Principem tohoto prestižního týmového klání je, na základě požadavků vypsanych fiktivní automobilkou, postavit funkční jednosedadlové závodní vozidlo formulového typu pro víkendového závodníka. Vítězem se stává tým, který získá nejvíce bodů v přesně definovaných disciplínách jako jsou statické disciplíny, kde se hodnotí technická vyspělost vozu, cena, výroba vozu a marketingový plán. Další disciplínou jsou dynamické disciplíny, kde vozy soutěží v akceleraci, v jízdě na čas na tratích různé technické úrovně a vytrvalostní závod Endurance na 22 km, kde se hodnotí mimo jiné i spotřeba paliva [1].

Účast v této soutěži je obrovským přínosem nejen pro studenty, ale i pro celý automobilový průmysl. Studenti zde získávají řadu praktických zkušeností, které mohou později využít ve svém zaměstnání.

Cílem mé bakalářské práce je řešit na téma chladicí systémy použité ve vozech Formule Student/SAE, základní výpočtový a konstrukční návrh chladiče dle daných parametrů pro vůz vyvíjený studenty Vysokého učení technického v Brně.



Obr. 1 Oficiální logo Formule Student [12]

2. Chlazení pístových spalovacích motorů

Pro správnou funkci jednotlivých dílů a konstrukčních skupin spalovacího motoru musí být zajištěna odpovídající provozní teplota. Požadovanou teplotu zajišťuje chladicí systém, který odvádí přebytečné teplo především ze stěn pracovního prostoru, pístu, stěny válce, hlavy motoru, ložisek a dílů rozvodového mechanismu do okolního prostředí. Vedení tepla je zajišťováno buď přímo prostřednictvím materiálů vhodně uzpůsobených stěn válce, hlavy a klikové skříně motoru (přímé chlazení vzduchem), nebo nepřímo prostřednictvím teplotnosného média, které předává teplo do okolního prostředí pomocí výměníků tepla (nepřímé chlazení pomocí chladicí kapaliny). V některých případech se používá kombinace obou systémů [2].

Oba dva způsoby chlazení musí být u motorů vyšších výkonů regulovatelné, neboť příliš vysoká teplota motoru snižuje výrazně výkon a ekonomičnost práce motoru a vede k jeho havárii. Dlouhodobá práce motoru v podchlazeném stavu vede k výraznému nárůstu opotřebení pístní skupiny [2].

Pro zajištění normálního teplotního stavu je potřeba do okolí rozptýlit cca 30% tepla získaného spalováním paliva. U zážehových motorů je množství tepla odváděného do okolí o něco vyšší než u motorů vznětových [2].

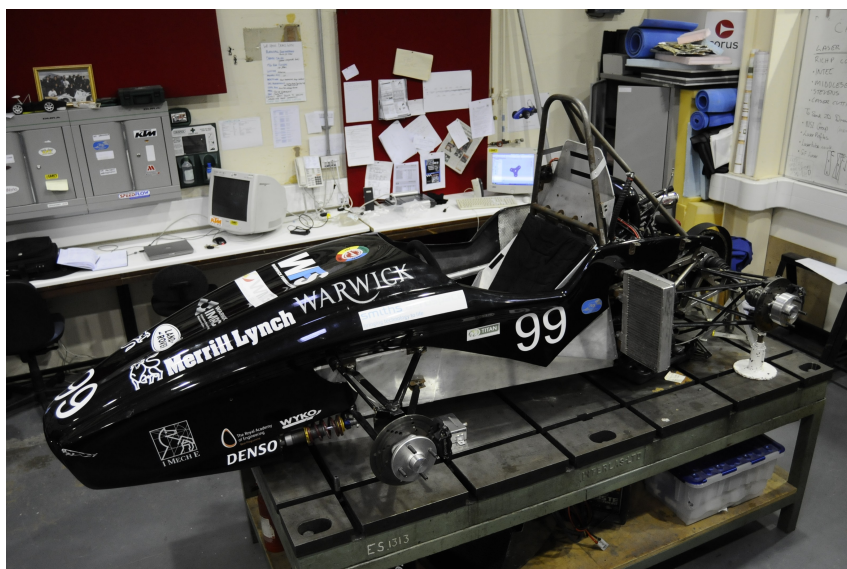
3. Uspořádání chladicí soustavy vozů Formula Student

U vozů Formula Student se setkáváme s několika způsoby uspořádání chladicí soustavy. Její konečné rozložení ovlivňuje celou řadu parametrů, které se můžou promítnout do celkového hodnocení týmu.

Správné rozmístění chladičů je velmi důležité, protože i přes kvalitní dimenzování, jejich špatná poloha na voze, důsledkem nedostatečného proudění vzduchu, negativně ovlivní chladicí výkon. Dalšími důležitými aspekty, které musí být během vývoje zohledněny a které můžou být ovlivněny rozložením chladicí soustavy jsou celková hmotnost vozu, jeho aerodynamika a v neposlední řadě jeho vzhled.

3.1 Umístění chladičů na levé nebo pravé straně vozu

Řada týmů využívá variantu s jedním chladičem na levé nebo pravé straně vozu pro chlazení jak čtyřválcových tak i jednoválcových motorů. Na Obr. 2 je řešení s jedním chladičem na levé straně vozu, které zvolil tým University of Warwick.



Obr. 2 Jeden chladič na voze týmu University of Warwick [3]

Chladiče můžou být různě natočené, viz Obr. 3 a Obr. 4, tak aby co nejlépe využily vzduch proudící kolem vozu. Jak je vidět na Obr. 3, chladič na voze týmu Joanneum Racing Graz je natočen směrem od vozu a ještě pod mírným úhlem k vozovce.



Obr. 3 Chladič orientovaný směrem od vozu [4]



Obr. 4 Chladič sklopený k vozovce [5]

Chladicí soustava pouze s jedním chladičem má nízký chladicí potenciál při nízkém průtoku vzduchu. Pro jeho zlepšení se osazují chladiče přídatnými ventilátory, jak ukazují Obr. 5 a Obr. 6. Jeho absence může velmi výrazně ovlivnit celkové výsledky týmu.

Chladicí systém je totiž jedna z částí, na kterou se zaměřuje porota během statických disciplín. Tým, který nepoužil přídatný ventilátor musí porotě podat přesvědčující vysvětlení proč tak neučinil, jinak ztratí body do celkovém hodnocení. Navíc chybějící ventilátor může způsobit havárii motoru v důsledku jeho přehřátí během horkých závodních dnů [10].



Obr. 5 Přídatný ventilátor na voze týmu University of Toronto [6]



Obr. 6 Přídavný ventilátor na sklopeném chladiči týmu Brunel University [7]

Použití pouze jednoho chladiče v okruhu chlazení má pozitivní vliv na hmotost vozu, avšak pouze jeden chladič, naplněný vodou, umístěný na jedné straně vozu, může negativně ovlivnit celkové rozložení hmotnosti a tím i jízdní vlastnosti.

3.2 Umístění chladičů po stranách vozu

Chladiče jsou umístěny na obou stranách vozu ve stejné poloze, viz Obr. 7. Stejně jako v předchozím případě mohou být chladiče různě natočené a sklopené. Mají větší chladicí výkon a jsou příznivější pro celkově lepší rozložení hmotnosti vozu. Jejich nevýhodou je, že zabírají více místa a jsou těžší [8]. I v tomto případě mohou být chladiče osazeny přídavnými ventilátory.



Obr. 7 Pohled na oba chladiče u vozu týmu Politecnico di Bari [9]

Několik týmů využívá ve svých vozech přeplňované jednoválcové motory. Tato varianta je stále více populárnější z hlediska vyšších nároků na snížení množství vypouštěných emisí. Při použití přeplňování se do chladicího systému zařazuje chladič stlačeného vzduchu (mezichladič). Ten se zpravidla umísťuje na jednu stranu vozu, na druhé je chladič motoru. Na obrázku Obr. 8 je ukázka rozmístění chladičů na voze týmu Joanneum Racing Graz. Na levé straně vozu je chladič motoru, na pravé chladič stlačeného vzduchu [8].



Obr. 8 Chladič a mezichladič na voze týmu Joanneum Racing Graz [4]

3.3 Méně obvyklá místa pro umístění chladičů

Kromě výše zmíněných způsobů rozmístění chladicí soustavy, existuje v soutěži Formula Student/SAE několik týmů, které používají u svých vozů poměrně neobvyklá řešení. Jelikož chladiče nejsou vystaveny přímému náporu vzduchu, je nutné je osazovat přidavnými ventilátory.



Obr. 9 Chladič za zadní nápravou [10]

Na Obr. 9 a Obr. 10 jsou ukázky takového netradičního řešení. Tato řešení nejsou příliš vhodná vzhledem k navýšení hmotnosti na zadní nápravě (chladič naplněný vodou) a dále kvůli vzduchu, který je při proudění ohříván motorem a takto ohřátý prochází chladičem, čímž se snižuje jeho chladicí výkon [10]. Vozy s tímto řešením mají ale lepší aerodynamické vlastnosti.



Obr. 10 Chladič za sedadlem řidiče [11]

3.4 Celkové shrnutí použitých řešení

V Tab. 1 jsou shrnuta nejčastější řešení rozmístění chladičů, která se objevují u vozů Formula Student. Tým VUT v Brně se v první sezoně rozhodl pro řešení s jedním chladičem na straně vozu i přes nevýhody, které jsou s tímto řešením spojeny. Do další sezóny tým hodlá nasadit přeplňovaný motor, takže druhá strana vozu bude využita pro umístění mezichladiče stlačeného vzduchu.

Tab. 1 Shrnutí nejčastějších řešení

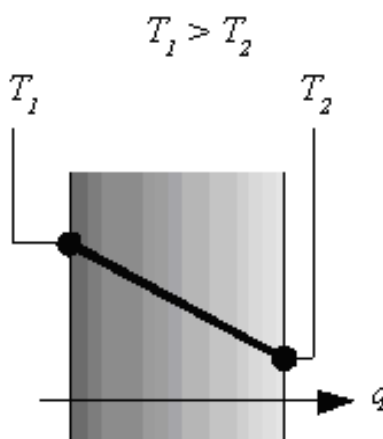
Zvolené řešení	Výhody	Nevýhody
1 chladič na straně vozu	Menší hmotnost	Negativní rozložení hmotnosti, horší jízdní vlastnosti, horší chladicí výkon
1 chladič u zadní nápravy	Lepší aerodynamika	Horší chladicí výkon, horší jízdní vlastnosti,
2 chladiče po stranách vozu	Lepší výkon	Větší hmotnost, horší aerodynamika
1 chladič a 1 mezichladič po stranách vozu	Lepší výkon, lepší vyvážení vozu	Větší hmotnost, horší aerodynamika

4. Teorie přenosu tepla

Termomechanika je nauka o šíření tepla v prostoru a čase. Podle druhého termodynamického zákona se teplo šíří samovolně z místa s vyšší teplotou do místa s nižší teplotou. Rozeznáváme tři základní typy přenosu tepla podle toho, v jakém prostředí a na jakých fyzikálních základech se tento pohyb tepelné energie uskutečňuje [13].

4.1 Přenos tepla vedením

Přenos tepla vedením (kondukcí) je pohyb tepla v důsledku konečného rozdílu teploty v tuhé fázi hmoty nebo v klidové kapalně resp. plynné fázi hmoty. Typickým příkladem je časově stálé vedení tepla rovinou deskou s různou teplotou povrchů T_1 a T_2 , což je znázorněno na Obr. 11 [13].

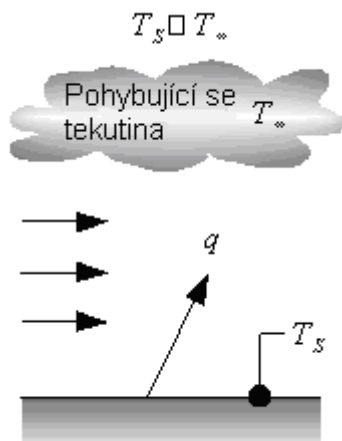


Obr. 11 Schematické znázornění kondukce pevnou stěnou [13]

4.2 Přenos tepla prouděním

Přenos tepla prouděním (konvekcí) je složen ze dvou mechanismů. Prvním z nich je náhodný pohyb molekul – difuze (jako u vedení v tekutinách). Ke sdílení tepla v proudících tekutinách přispívá i druhý – makroskopický mechanismus. Tzn. že v kterémkoliv okamžiku se pohybuje velké množství molekul kolektivně a dochází k mísení molekul hmoty o různé teplotě. Protože si molekuly v proudícím makro-objektu ponechávají svůj náhodný pohyb, je přenos energie důsledkem superpozice obou mechanismů.

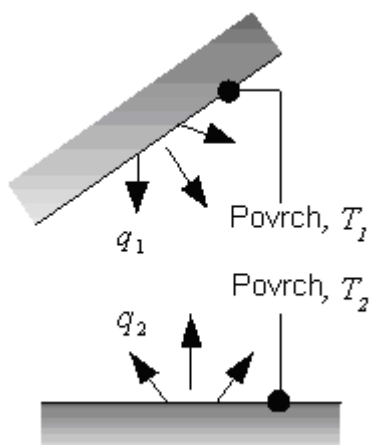
Konvekce je obvykle klasifikována podle povahy proudění na přirozenou, nucenou a kombinovanou. Na Obr. 12 dochází k přenosu tepla konvekcí z teplejšího pevného tělesa o teplotě T_s do proudící tekutiny T_∞ [13].



Obr. 12 Schematické znázornění konvekce z pevného tělesa do proudící kapaliny [13]

4.3 Přenos tepla zářením

Přenos tepla zářením (radiací) je tepelný proces uskutečňovaný elektromagnetickým vlněním určité vlnové délky. Teplo emituje každý povrch, jenž má nějakou konečnou teplotu. Radiace je tak jediný způsob, jakým se teplo může šířit i ve vakuu. Těleso může teplo současně vyzařovat i pohlcovat, viz Obr. 13 [13].

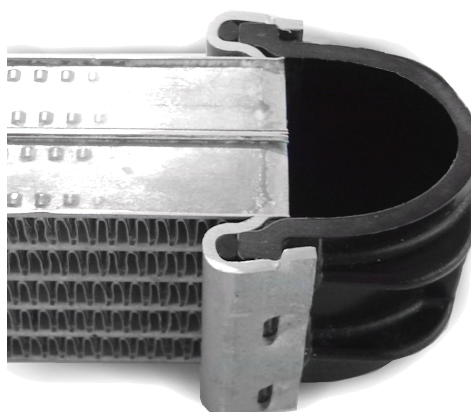


Obr. 13 Schematické znázornění radiace mezi dvěma povrchy [13]

V běžných technických případech se na přenosu tepla podílejí všechny tři způsoby současně, ale ne nutně rovnoměrně. V mnoha případech se stává, že jeden z výše uvedených způsobů převládá [13].

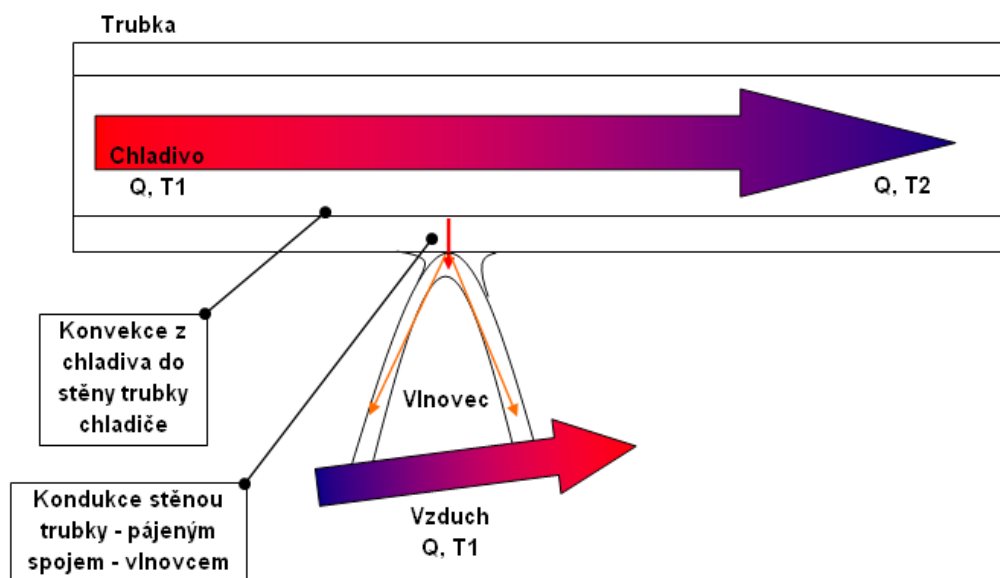
5. Vodní chladič

Vodní chladič se skládá ze vstupní a výstupní komory, těsnění a chladicí mříže, tzv. vložky chladiče. Komory jsou většinou vyrobeny z plastu s přidavkem skleněných vláken a k vložce chladiče jsou přes těsnění připojeny zalisováním okrajů, viz Obr. 14. Kapalina ohřátá v motoru je přiváděna do vstupní komory. Poté prochází vložkou chladiče, kde předává teplo proudícímu vzduchu a z výstupní komory je odváděna zpět do sání čerpadla [2].



Obr. 14 Řez komorou a vložkou chladiče

Jednou z nejdůležitějších částí chladiče je vložka, která zajišťuje výměnu tepla mezi chladivem a okolním vzduchem. Vložka chladiče je složena z trubek obvykle eliptického průřezu, používají se i trubky kruhové nebo obdélníkové. Trubky jsou osazeny a připájeny do víka chladiče a mezi nimi jsou připájeny tzv. vlnovce (tenké ohýbané pásy s max. plochou pro přestup tepla) s jejichž pomocí dochází k samotné výměně tepla s okolím.



Obr. 15 Princip výměny tepla mezi chladivem a okolím

Na Obr. 15 je zobrazen princip výměny tepla mezi chladivem a okolím. Při proudění horkého chladiva v trubkách, dochází k přenosu tepla konvekcí, viz kapitola 4.2, z chladiva do stěny trubky. Dále se teplo šíří kondukcí, viz kapitola 4.1, z trubky přes pájený spoj do vlnovce, který předává teplo proudícímu vzduchu (konvekce). Radiace je při teplotách do 100°C zanedbávána.

5.1 Čistá voda jako chladicí médium

Podle pravidel soutěže Formula Student je nutné použít jako chladicí médium čistou vodu. Jakékoliv příměsi na bázi glykolu, příměsi pro mazání vodní pumpy nebo jiná aditiva, jsou striktně zakázány [14].

Použití vody jako chladicího média ve formulovém voze má své výhody i nevýhody. Mezi hlavní výhodu vody patří její větší hodnota měrné tepelné kapacity a tedy schopnost odvést ze systému větší množství tepla na jednotku hmotnosti/objemu než u směsi vody s nemrznoucí kapalinou na bázi glykolu, jakou známe z běžného motoristického života.

V Tab. 2 jsou uvedeny hodnoty měrné tepelné kapacity vody v závislosti na teplotě a koncentraci nemrznoucí kapaliny Texaco Havoline XLC. Z tabulky je patrné, jak s koncentrací nemrznoucí kapaliny pro danou teplotu klesá hodnota měrné tepelné kapacity c_p a tím se snižuje množství odváděného tepla.

Tab. 2 Hodnoty měrné tepelné kapacity [19]

Temperature (°C)	Concentration of Havoline XLC (Vol%)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
-50	Freez	Freez	Freez	Freez	Freez	Freez	2,64	2,48	2,16	Freez	Freez
-40	Freez	Freez	Freez	Freez	Freez	Freez	2,72	2,56	2,26	Freez	Freez
-30	Freez	Freez	Freez	Freez	Freez	2,95	2,81	2,64	2,35	2,31	Freez
-20	Freez	Freez	Freez	Freez	3,33	3,03	2,89	2,71	2,44	2,35	Freez
-10	Freez	Freez	Freez	3,73	3,40	3,11	2,96	2,79	2,52	2,38	2,19
0	Freez	4,05	3,91	3,77	3,46	3,18	3,03	2,85	2,60	2,42	2,24
10	4,20	4,05	3,95	3,81	3,52	3,25	3,10	2,92	2,68	2,46	2,29
20	4,19	4,06	3,98	3,85	3,57	3,31	3,16	2,98	2,75	2,50	2,34
30	4,18	4,07	4,01	3,88	3,62	3,37	3,22	3,04	2,81	2,55	2,39
40	4,18	4,08	4,03	3,91	3,66	3,42	3,27	3,09	2,87	2,60	2,44
50	4,18	4,08	4,05	3,93	3,70	3,47	3,32	3,14	2,93	2,65	2,49
60	4,18	4,09	4,06	3,95	3,73	3,52	3,37	3,19	2,99	2,70	2,54
70	4,19	4,10	4,07	3,96	3,76	3,56	3,41	3,23	3,03	2,76	2,59
80	4,20	4,11	4,08	3,97	3,78	3,59	3,44	3,27	3,08	2,82	2,64
90	4,21	4,12	4,08	3,97	3,79	3,62	3,48	3,31	3,12	2,89	2,69
100	Boil	4,13	4,07	3,97	3,80	3,65	3,50	3,34	3,15	2,95	2,74
110	Boil	Boil	Boil	Boil	Boil	Boil	3,53	3,37	3,19	3,02	2,79
120	Boil	Boil	Boil	Boil	Boil	Boil	Boil	Boil	3,21	3,09	2,84

Jako nevýhodu čisté vody v chladicím okruhu závodního vozu vidím její schopnost varu při určité teplotě a tlaku. K tomuto ději dochází i u směsi s nemrznoucí kapalinou, ale jak je uvedeno v Tab. 1, dochází k tomu při vyšší teplotě, než je u čisté vody. Navíc zde hraje roli tlak v chladicím okruhu. Tab. 3 nám ukazuje, jak se s rostoucím tlakem zvyšuje teplota syté vodní páry, tj. teplota, při které dochází k varu kapaliny.

V chladicím okruhu, ve kterém je jako chladivo použita čistá voda, je proto nutné zajistit takový tlak, aby k tomuto nežádoucímu ději nedošlo, jinak hrozí zničení např. vodního čerpadla což může vést až k havárii motoru.

Tab. 3 Vlastnosti syté vodní páry při daném tlaku [15]

Tlak páry	Teplota páry	Měrný objem	Měrná hmotnost	Měrná entalpie páry	Měrná entalpie kapaliny	Výparné teplo
p	t	v''	ρ''	h''	h'	$r = h'' - h'$
[MPa]	[°C]	[m³/kg]	[kg/m³]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]
0,05	81,34	3,2390	0,3089	2645,4	340,6	2304,8
0,07	89,96	2,3640	0,4233	2659,6	376,9	2282,7
0,09	96,71	1,8690	0,5353	2670,5	405,3	2265,2
0,10	99,63	1,6940	0,5907	2675,2	417,6	2257,6
0,11	102,31	1,5500	0,6457	2679,4	428,9	2250,5
0,12	104,80	1,4290	0,7004	2683,3	439,4	2243,9
0,13	107,12	1,3250	0,7547	2686,9	449,2	2237,7
0,14	109,31	1,2360	0,8091	2690,2	458,5	2231,7
0,15	111,36	1,1590	0,8628	2693,3	467,2	2226,1
0,16	113,31	1,0910	0,9165	2696,3	475,4	2220,9
0,17	115,16	1,0310	0,9700	2699,0	483,3	2215,7
0,18	116,92	0,9773	1,0232	2701,6	490,7	2210,9
0,19	118,60	0,9290	1,0761	2704,1	497,9	2206,2
0,20	120,21	0,8854	1,1289	2706,4	504,7	2201,7
0,21	121,76	0,8459	1,1817	2708,7	511,3	2197,4
0,22	123,25	0,8098	1,2343	2710,8	517,6	2193,2
0,23	124,68	0,7768	1,2866	2712,9	523,7	2189,2
0,24	126,07	0,7465	1,3390	2714,8	529,6	2185,2
0,25	127,41	0,7185	1,3913	2716,7	535,3	2181,4
0,26	128,70	0,6925	1,4431	2718,5	540,8	2177,7
0,27	129,96	0,6684	1,4951	2720,2	546,2	2174,0
0,28	131,18	0,6461	1,5470	2721,9	551,4	2170,5
0,29	132,36	0,6253	1,5985	2723,5	556,4	2167,1
0,30	133,51	0,6057	1,6500	2725,1	561,4	2163,7
0,35	138,84	0,5241	1,9067	2732,1	584,2	2147,9
0,40	143,59	0,4624	2,1615	2738,2	604,5	2133,7
0,45	147,88	0,4139	2,4144	2743,5	623,0	2120,5
0,50	151,81	0,3747	2,6665	2748,2	639,9	2108,3

5.2 Základní výpočet tepelného výkonu vodního chladiče

Pro výpočet tepelného výkonu vodního chladiče je nutné znát několik základních parametrů, jako jsou vstupní teploty chladicího média a vzduchu, rychlost vzduchu před chladičem, měrné tepelné kapacity a hmotnostní průtoky obou médií. Dále je nutné znát výkon motoru, jehož jedna třetina musí být uchlazena, velikost teplosměnné plochy chladiče a další.

Parametry týkající se motoru lze získat z údajů, které poskytuje výrobce, nicméně přesnější hodnoty získáme z měření na měřicím zařízení, tzv. motorové brzdě.

5.2.1 Vstupní hodnoty

Vzduch

$$T_{1vz} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$v_1 = 10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

$$R = 287\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$$

$$c_{pvz} = 1,0\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$$

$$p_{atm} = 101325\text{ Pa}$$

Voda

$$T_{1vo} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{2vo} = 94\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t = 6\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$c_{pvo} = 4,21\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$$

Motor

$$P_m = 60\text{ kW}$$

$$Q_{chl} = 20\text{ kW}$$

Chladič

$$S_{ch} = 0,0847\text{ m}^2$$

5.2.2 Hmotnostní průtok vody

$$Q_{chl} = \dot{m}_{vo} \cdot c_{pvo} \cdot \Delta t$$

$$\dot{m}_{vo} = \frac{Q_{chl}}{c_{pvo} \cdot \Delta t}$$

$$\dot{m}_{vo} = \frac{20\text{ kW}}{4,21\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1} \cdot 6\text{ }^{\circ}\text{C}} \quad (1)$$

$$\dot{m}_{vo} = 0,79\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$$

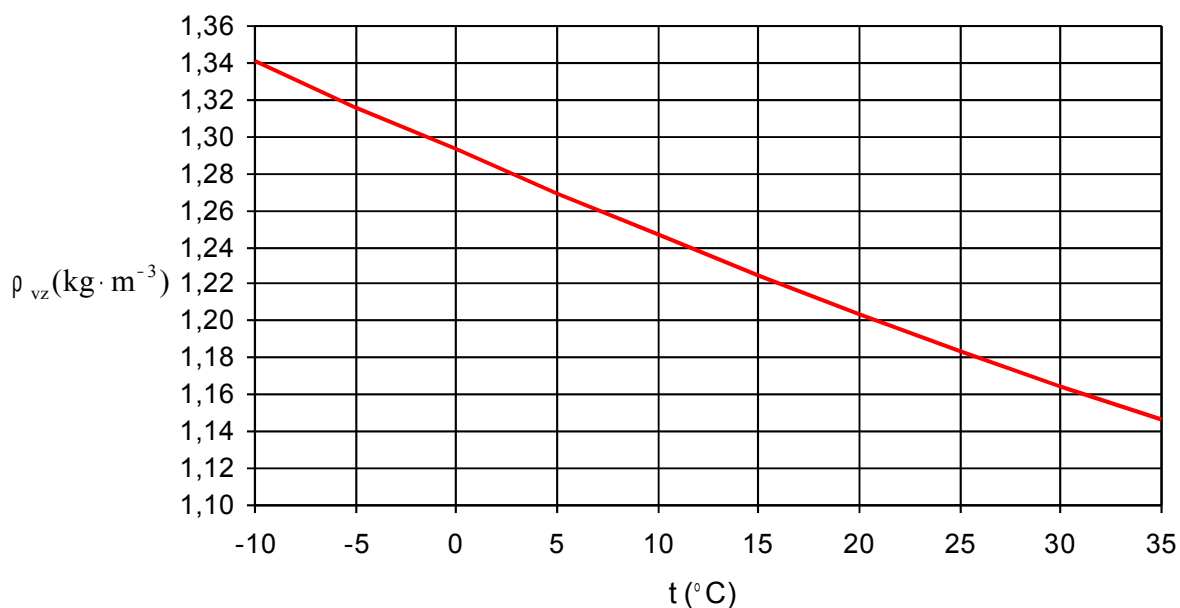
5.2.3 Hustota vzduchu při dané teplotě

$$\rho_{vz(30^{\circ}\text{C})} = \frac{p}{R \cdot T_{1vz}}$$

$$\rho_{vz(30^{\circ}\text{C})} = \frac{101325\text{ Pa}}{287\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1} \cdot 303,15\text{ K}} \quad (2)$$

$$\rho_{vz(30^{\circ}\text{C})} = 1,165\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$$

Vzduch má při teplotě 30 °C hustotu 1,165 kg·m⁻³. Na Obr. 16 je zobrazeno, jak se mění hustota vzduchu v závislosti na teplotě.



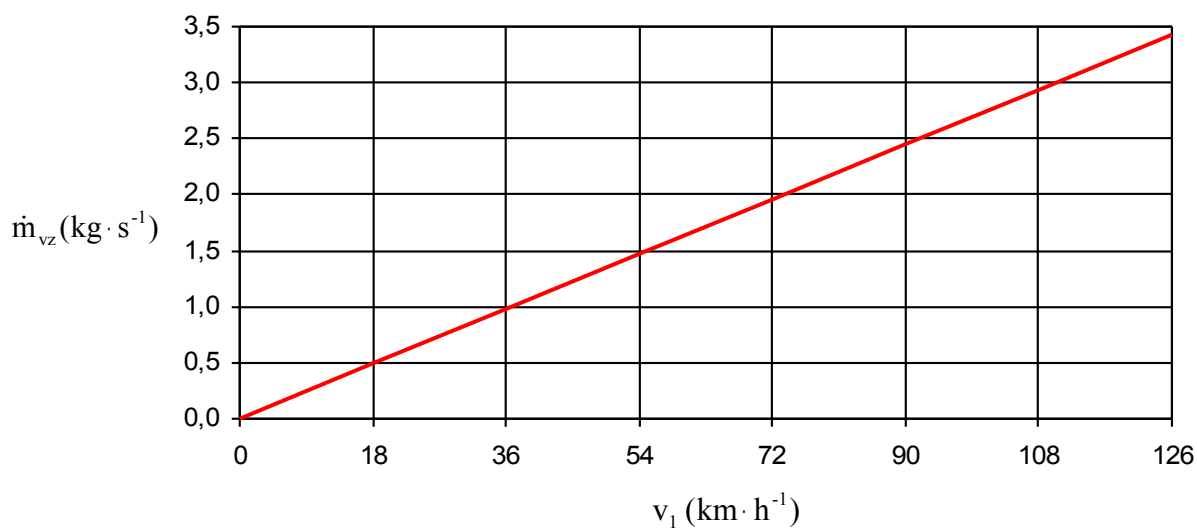
Obr. 16 Graf hustoty vzduchu v závislosti na teplotě

5.2.4 Hmotnostní průtok vzduchu

$$\dot{m}_{\text{vz}} = \rho_{\text{vz}(30^{\circ}\text{C})} \cdot S_{\text{chl}} \cdot v_1$$

$$\dot{m}_{\text{vz}} = 1,165 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 0,0847 \text{ m}^2 \cdot 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \quad (3)$$

$$\underline{\underline{\dot{m}_{\text{vz}} = 0,98 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}}}$$



Obr. 17 Graf hmotnostního průtoku vzduchu v závislosti na rychlosti

5.2.5 Ověření fyzikální realizovatelnosti

$$\begin{aligned}\Delta t_{\max} &= T_{lvo} - T_{lvz} \\ \Delta t_{\max} &= 100^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C} \\ \Delta t_{\max} &= 70^{\circ}\text{C}\end{aligned}\tag{4}$$

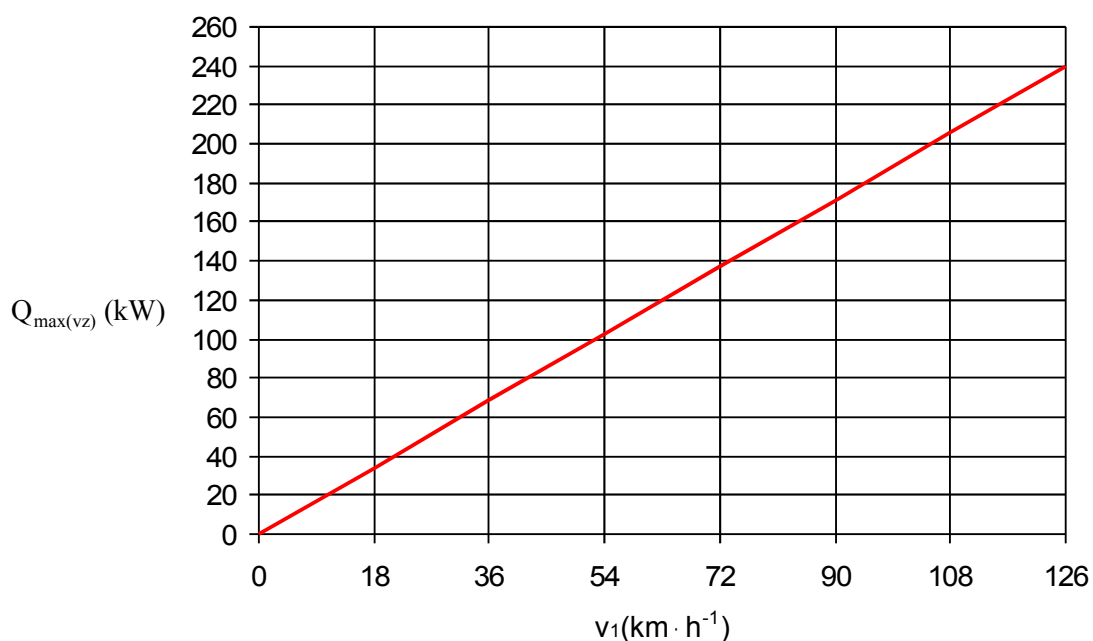
$\Delta t_{\max}$ nám udává o kolik stupňů lze ochladit vodu nebo ohřát vzduch při 100% účinnosti. V tomto případě to znamená, že vodu lze maximálně ochladit ze 100 °C na 30 °C a naopak vzduch lze ohřát maximálně z 30 °C na 100 °C.

a) Na straně vody

$$\begin{aligned}Q_{\max(vo)} &= \dot{m}_{vo} \cdot c_{pvo} \cdot \Delta t_{\max} \\ Q_{\max(vo)} &= 0,79 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 4,21 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 70^{\circ}\text{C} \\ Q_{\max(vo)} &= 232,8 \text{ kW}\end{aligned}\tag{5}$$

b) Na straně vzduchu

$$\begin{aligned}Q_{\max(vz)} &= \dot{m}_{vz} \cdot c_{pvz} \cdot \Delta t_{\max} \\ Q_{\max(vz)} &= 0,98 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 1,0 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 70^{\circ}\text{C} \\ Q_{\max(vz)} &= 68,6 \text{ kW}\end{aligned}\tag{6}$$



Obr. 18 Maximální tepelný výkon v závislosti na rychlosti

Ověření fyzikální realizovatelnosti znamená, jakého maximálního chladicího výkonu lze dosáhnout pro daný maximální teplotní spád, budeme-li chladit pouze vodou nebo vzduchem. Výsledky uvažujeme pro 100% účinnost. Účinnost bude velmi závislá zejména na rychlosti vozu, tj. na hmotnostním průtoku vzduchu vložkou chladiče.

6. Ventilátor

Ventilátor je důležitou součástí chladicího okruhu. Jak bylo popsáno výše, jeho absence může výrazně ovlivnit výsledek týmu, ať už z hlediska bodového hodnocení komisařů při statických disciplínách nebo z hlediska výkonnosti motoru během závodů na trati.

Je nepostradatelný v horkých letních soutěžních dnech, při popojíždění po dráze atd. Pomáhá zvyšovat chladicí výkon, ale na druhé straně zvyšuje hmotnost vozu. Proto je nutné při výběru ventilátoru věnovat pozornost nejen jeho výkonnostním parametrům, ale také jeho hmotnosti.

6.1 Výběr ventilátoru

Pro výběr ventilátoru jsem zvolil italskou firmu SPAL Automotive, která má ve světě vedoucí postavení ve výrobě vysoce kvalitních elektrických ventilátorů pro všechny typy vozidel [16]. Vzhledem k rozměru teplosměnné plochy chladiče 290mm x 292mm a umístění ventilátoru za chladičem jsem se při výběru zaměřil na sací ventilátory z řady 190, napájené 12V, viz Obr. 19.



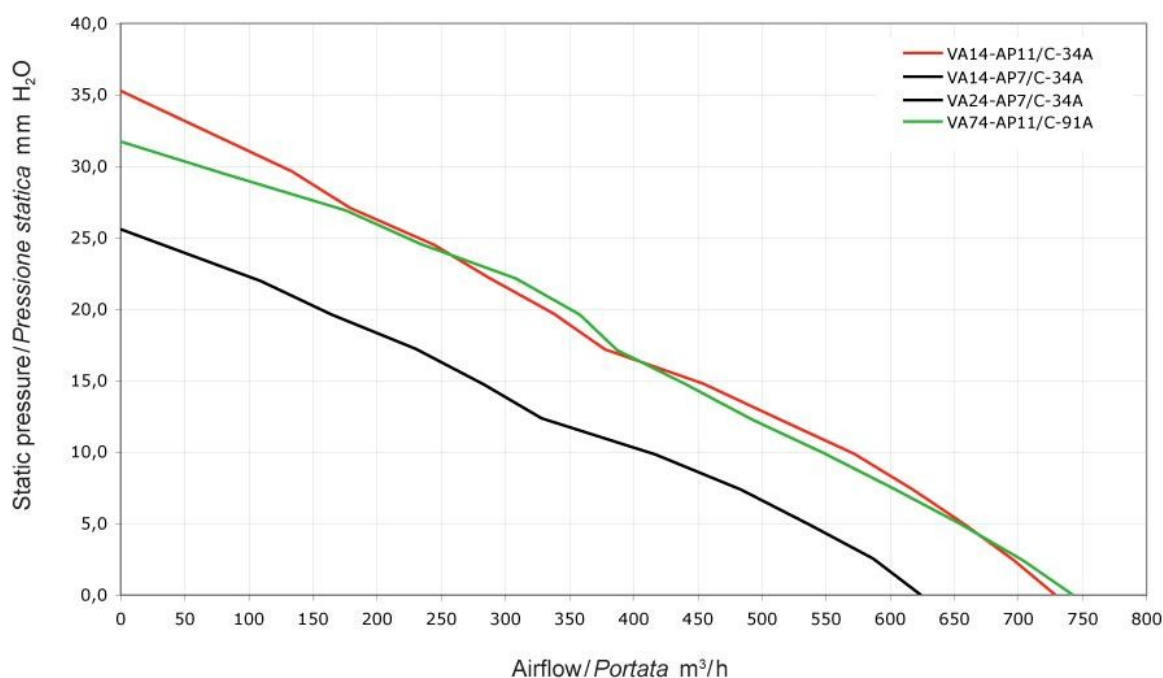
Obr. 19 Zvolený ventilátor SPAL Automotive [16]

Důležitým faktorem při výběru vhodného ventilátoru je jeho maximální příkon, viz Obr. 20. Ventilátor by neměl příliš zatěžovat elektrickou soustavu, aby nedocházelo k rychlému vybíjení akumulátorů.

Static pressure	Airflow	Current input
mm H ₂ O	m ³ /h	A
0.0	620.0	4.4
2.5	580.0	4.6
5.0	530.0	4.7
7.5	480.0	4.7
10.0	410.0	4.7
12.5	320.0	4.6
15.0	280.0	4.8
17.5	230.0	5.0
20.0	160.0	5.0
25.0	0.0	5.3

Obr. 20 Výkonové parametry zvoleného ventilátoru [16]

Z široké nabídky ventilátorů firmy SPAL Automotive jsem zvolil typ VA14-AP7/C-34A, který vyhovuje zadaným podmínkám. Má dostatečný objemový průtok, nízký příkon, viz Obr. 20, a jeho hmotnost je pouze 0,9 kg.



Obr. 21 Charakteristika ventilátoru VA14-AP7/C-34A [16]

7. 3D počítačové konstruování

V současné době jsou v oblasti konstruování nepostradatelnými pomocníky CAD systémy. Tyto systémy zahrnují všechny aplikace sloužící k snadné tvorbě a editaci geometrie výrobků, prostorových 3D modelů a výrobní dokumentace. Mnohé z CAD programů jsou dále rozšiřovány o různé funkce pro konkrétní účely např. simulace a pevnostní analýzy. Jejich součástí jsou také knihovny normalizovaných a uživatelsky definovatelných dílů.

Hlavní výhodou CAD aplikací je velká úspora času věnovaná samotnému grafickému zpracování při návrhu, nebo úpravě součástí [17].

7.1 Catia V5

Ke konstrukci chladiče jsem využil systém pro 3D konstruování Catia V5, logo viz Obr. 22, od společnosti Dassault Systemes.

Catia představuje systém nejvyšší třídy v oblasti CAD/CAM/CAE technologií, který umožňuje pokrýt celý proces vývoje výrobku, tzn. od koncepčního návrhu designu, přes vlastní konstrukci, různé analýzy, simulace a optimalizace s možností okamžité aplikace změny na výrobek podle dosažených výsledků, až po tvorbu veškeré výrobní dokumentace [18].

Je to tzv. hybridní modelář, což znamená, že kombinuje v jednom modelu jak plošné (surface) tak i objemové (solid) elementy a dává tak možnost výběru modelářských technik. Výhodou je také možnost nepovinné parametrizace. Všechny moduly a modelářské techniky jsou integrovány, takže změny jednotlivých modelů či elementů se okamžitě projeví i na souvisejících dílech. Součástí systému je také rozsáhlá knihovna standardních součástí.

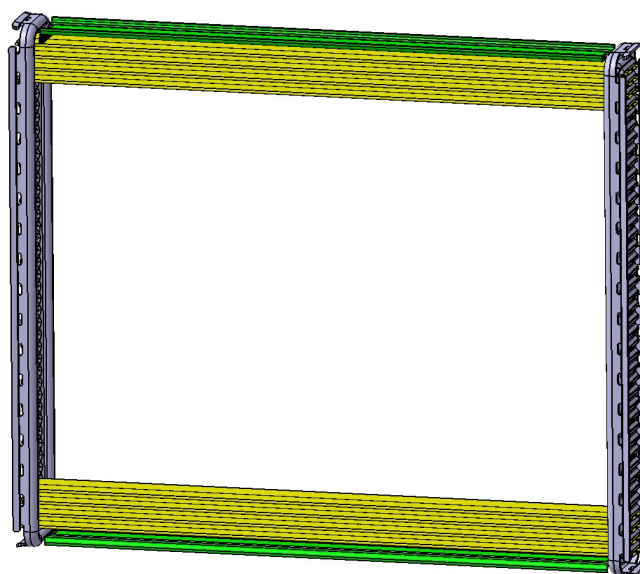
Program Catia je používán jako komplexní řešení pro návrh, optimalizaci a podporu výroby ve všech oblastech průmyslu (letecký, automobilový, lodní, průmysl spotřebního zboží atd.) [17].



Obr. 22 Logo programu Catia [20]

7.2 Tvorba modelu chladiče

Podle požadavků týmu na maximální rozměr chladiče jsem z výrobního programu společnosti Visteon –Autopal s.r.o. vybral vyhovující vložku chladiče. Pro ni jsem již provedl základní výpočet tepelného výkonu, viz kapitola 5.2. Dále je nutné navrhnout komory, držáky pro uchycení chladiče k vozu a vstupní a výstupní hrdla pro připojení hadic.



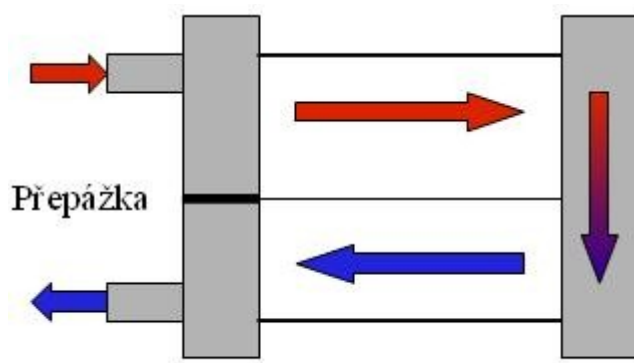
Obr. 23 Sestava vložky chladiče v prostředí programu Catia

Na Obr. 23 je ukázka vybrané vložky chladiče. Jelikož se jedná o vložku, která se již vyrábí, nebylo nutné opět navrhovat jednotlivé komponenty.

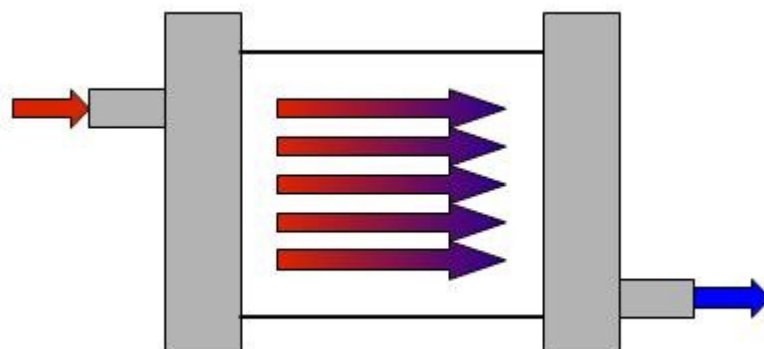
Chladič je typu „U-flow“, což znamená, že vstupní i výstupní hrdlo je umístěno na jedné straně chladiče a komora na této straně je uvnitř rozdělena přepážkou. Přepážka se zpravidla umísťuje doprostřed komory mezi dvě sousední trubky, ale není to pravidlem, vždy záleží na specifikaci zákazníka.

Na Obr. 24 je znázorněn princip proudění chladiva „U-flow“ chladičem. Chladivo vstupuje do chladiče v jeho horní polovině, proudí trubkami v této horní části a vrací se zpět přes zpětnou komoru do spodní poloviny a poté výstupním hrdlem do čerpadla.

Výhodou tohoto typu chladiče je přibližně o 10-15% vyšší chladicí výkon než u chladiče typu „I-flow“, protože chladivo je na své dráze dvakrát ochlazováno. Nevýhodou je vyšší tlaková ztráta. Ukázka proudění chladiva chladičem typu „I-flow“ je na Obr. 25.



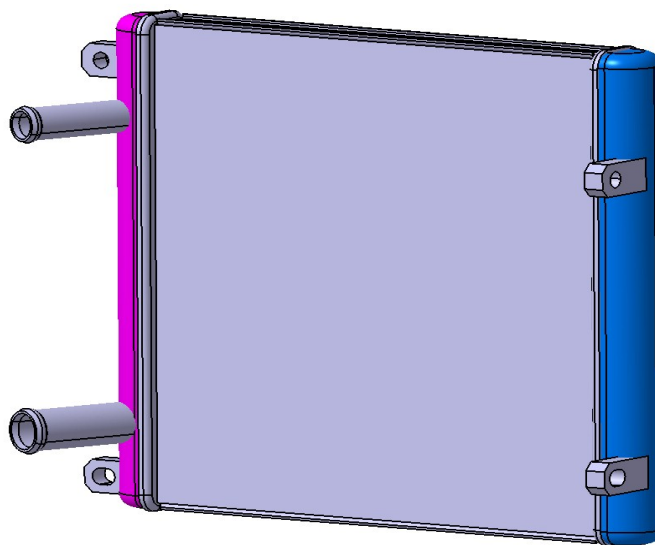
Obr. 24 Proudění v chladiči typu „U-flow“



Obr. 25 Proudění v chladiči typu „I-flow“

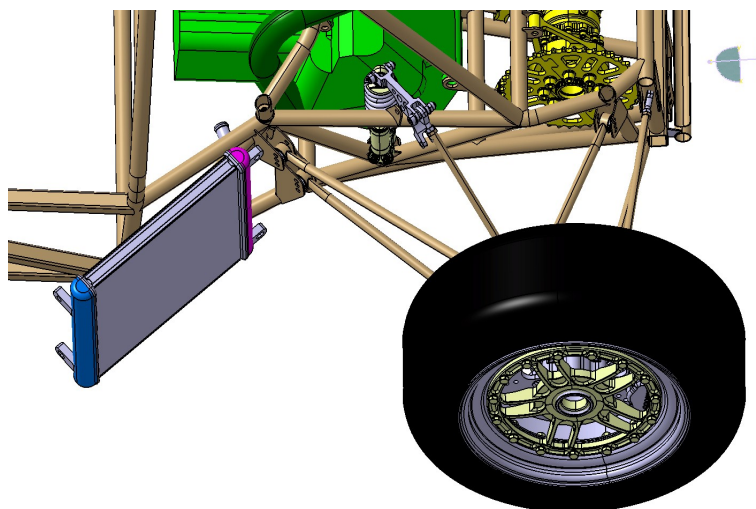
Pro výrobu prototypového chladiče je plně dostačující vytvoření tzv. zjednodušeného modelu, viz Obr. 26. Aby se vyhovělo požadavkům zákazníka v co nejkratším čase, je návrh takového modelu ve 3D programu většinou jednoduchý a rychlý. 3D model neobsahuje do detailů vypracované jednotlivé komponenty. Ty se modelují až pro sériovou výrobu, detailní komponenty viz Obr. 23.

Pro pracovníky prototypové dílny, kteří chladič vyrábí jsou nejdůležitější tvar komory, její výška, pozice držáků a hrdel, popř. pozice přepážky.



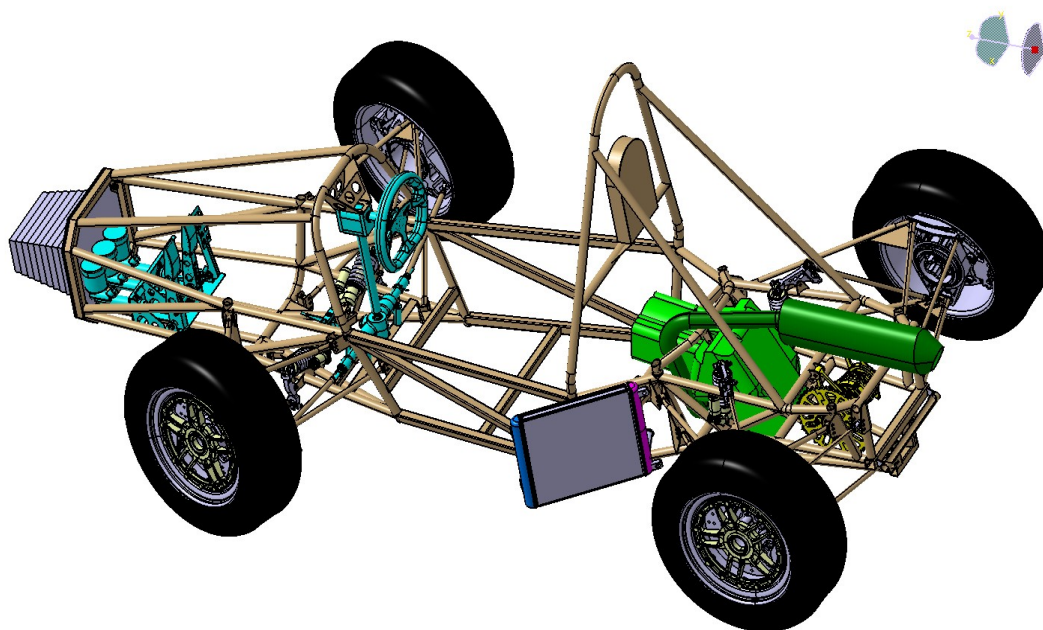
Obr. 26 Zjednodušený prototypový model U-flow chladiče
pro vůz Formula Student týmu VUT v Brně

Při výběru pozice chladiče na voze se vycházelo z několika návrhů. Důležitým bodem byl vzhled vozu a zachování jeho dobré aerodynamiky. Zvolené řešení, které je vidět na Obr. 27 a 28, bylo vyhodnoceno jako nejvýhodnější.



Obr. 27 Detail umístění chladiče v programu Catia V5

Chladič není umístěn kolmo ke směru jízdy, ale je natočen k vozu. Nevyčnívá do strany jako u jiných vozů, jako např. Obr. 5, nenarušuje tak jeho siluetu a je zachována dobrá aerodynamika. Vzduch ke chladiči bude přiváděn tunelem na boku vozu a pro zvýšení chladicího výkonu bude zadní část chladiče osazena přidavným ventilátorem.



Obr. 28 Pohled na model vozu s chladičem v programu Catia V5

8. Výroba chladiče

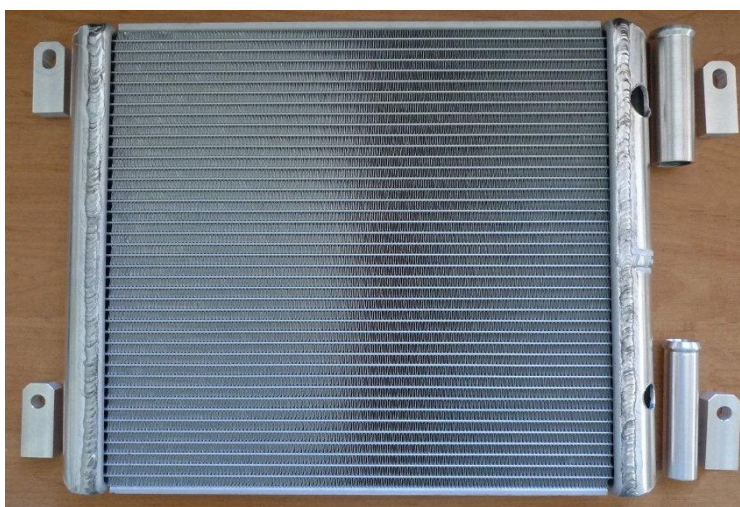
Jelikož se jedná pouze o jeden kus vodního chladiče, byla jeho výroba zadána prototypové dílně ve firmě Visteon-Autopal s.r.o., která má s výrobou celohliníkových chladičů bohaté zkušenosti.



Obr. 29 Vložka chladiče v rámu připravena k pájení

Na Obr. 29 je složená vložka chladiče. Je vložena do rámu a připravená k pájení v peci. Při pájení se používá technologie pájení v ochranné atmosféře (Control Atmosphere Brazing-CAB). Zatímco probíhá pájení vložky, ohnutím hliníkového plechu do požadovaného tvaru se vyrobí komory. V případě složitějších tvarů se používají kopyta, na nichž se plech tvaruje.

Hrdla se vyrábí soustružením z hliníkových tyčí kruhového profilu a držáky se frézují z hliníkových tyčí čtvercového nebo obdélníkového profilu. Na Obr. 30 jsou již připraveny jednotlivé díly chladiče k poslednímu kroku, což je svaření hrdel a držáků s komorami.



Obr. 30 Jednotlivé díly chladiče připravené ke svařování

9. Měření na kalorimetru

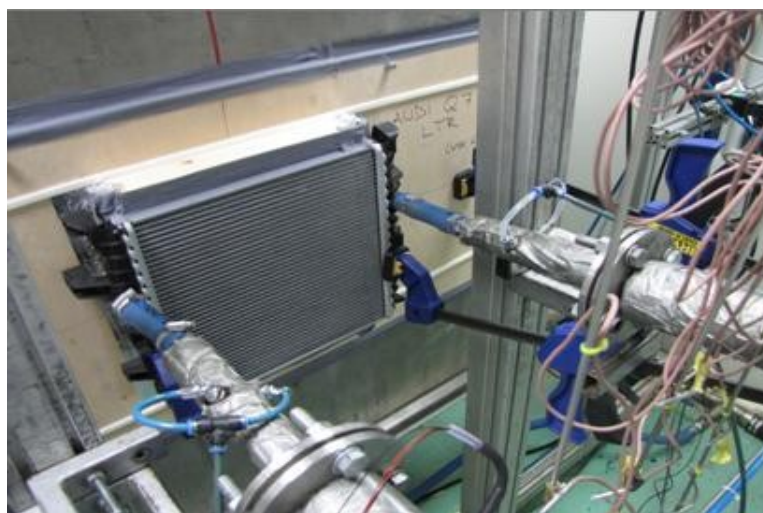
Kalorimetry jsou zařízení, které slouží k měření tepelných veličin. Jsou to vlastně izolované nádoby, ve kterých dodáme zkoumané látce známé množství tepla a ze změny teploty určíme její tepelnou kapacitu [22].

Kalorimetry rozdělujeme na:

- směšovací: zkoumané látce je dodáváno nebo odebíráno teplo jinou látkou známé tepelné kapacity.
- elektrické: teplo je dodáváno z odporové spirály a můžeme ho určit z protékajícího proudu, napětí a doby.

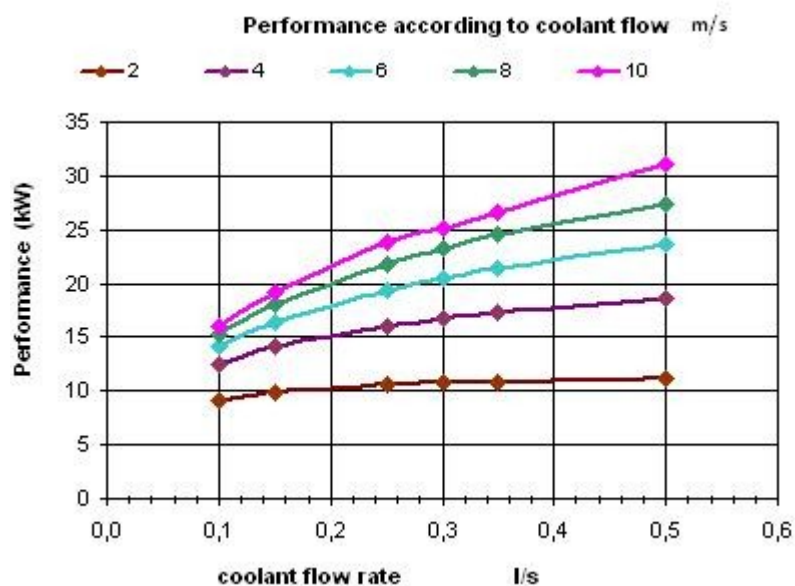
9.1 Princip měření

Zařízení, na kterém byl proveden test chladiče, pracuje na principu směšovacího kalorimetru a lze na něm měřit kromě tepelného výkonu chladiče i tlakovou ztrátu na chladivu a na vzduchu. Na Obr. 31 je zobrazen chladič během testu. Ohřáté chladivo odevzdává teplo proudícímu vzduchu, princip přestupu tepla je uveden u Obr. 15, a na základě změn teplot a tlaků na straně chladiva a vzduchu se určí tepelný výkon chladiče a tlakové ztráty pro obě média.



Obr. 31 Chladič ve vzduchovém tunelu kalorimetru [21]

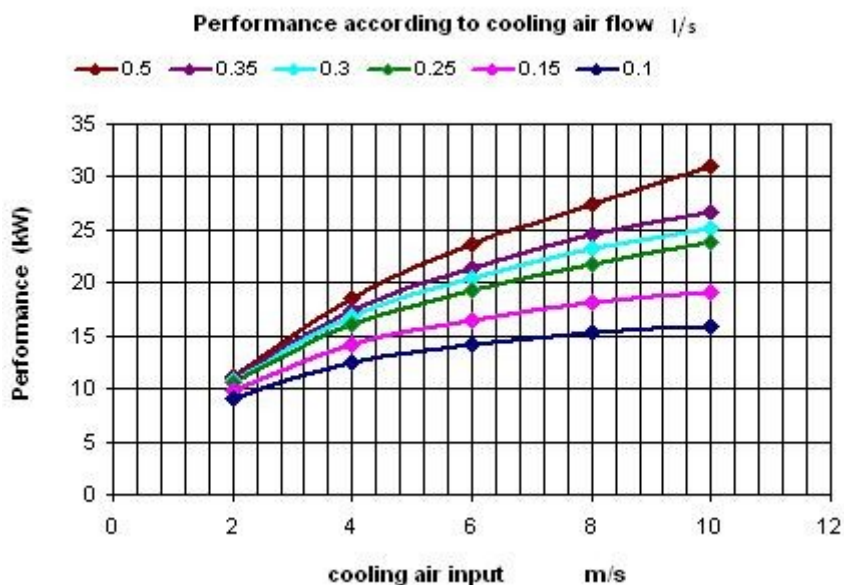
9.2 Výsledky měření



Obr. 32 Tepelný výkon v závislosti na průtoku chladiva [21]

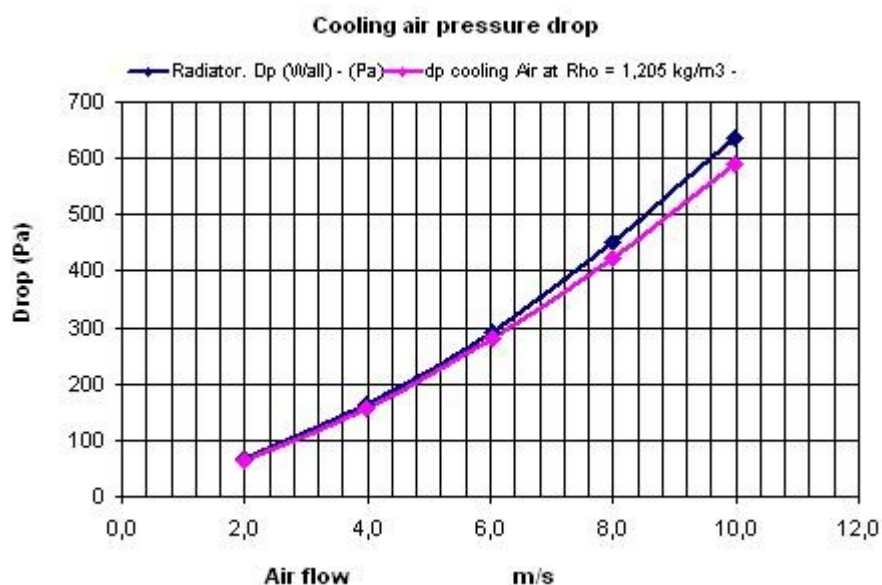
Výsledná data jsou zobrazena v grafech odkud můžeme odečítat potřebné údaje. Na Obr. 32 vidíme tepelný výkon chladiče v závislosti na průtoku chladiva pro pět různých rychlostí tohoto média.

V grafu na Obr. 33 vidíme výkon chladiče v závislosti na rychlosti vzduchu, tentokrát pro pět různých druhů hmotnostního průtoku vzduchu.

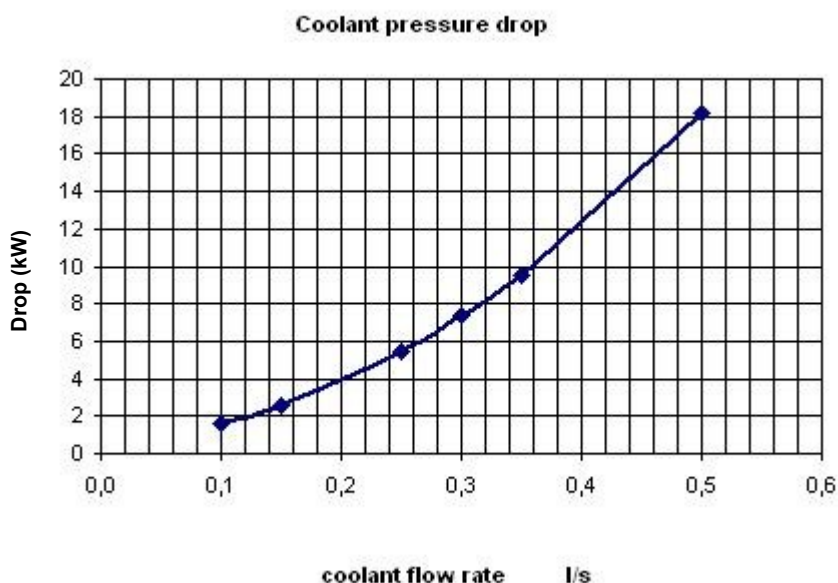


Obr. 33 Tepelný výkon v závislosti na rychlosti vzduchu [21]

Tlakové ztráty na straně vzduchu a na straně chladiva jsou zobrazeny na Obr. 34 a na Obr. 35.



Obr. 34 Tlaková ztráta na vzduchu [21]



Obr. 35 Tlaková ztráta na chladiivu [21]

Měření bylo provedeno na chladiči typu „I-flow“ se stejnou vložkou, kterou použijeme v chladiči pro vůz Formula Student. Výsledná data se budou lišit od těch, které bychom získaly v případě měření na chladiči typu „U-flow“. Jak bylo uvedeno v kapitole 7.2, zlepšil by se výkon a naopak, zhoršila by se tlaková ztráta.

Data zobrazená v této kapitole jsou majetkem společnosti Visteon-Autopal s.r.o.. Byla zapůjčena za účelem vypracování bakalářské práce a nesmí být poskytnuta třetím osobám.

10. Závěr

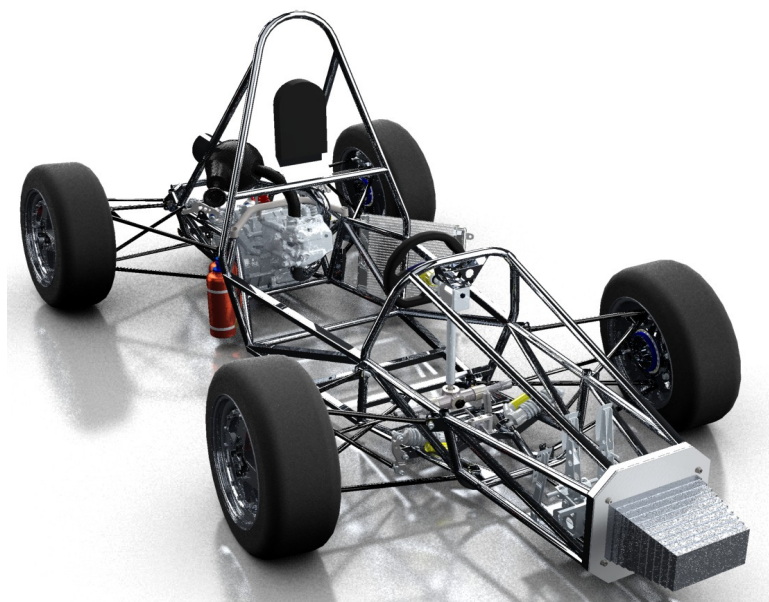
Po přidělení bakalářské práce se členové studentského týmu TU Brno Racing obrátili na společnost Visteon-Autopal s.r.o, pro kterou pracuji jako konstruktér, s prosbou, zda by jim vyrobila a dodala 1 kus vodního chladiče pro jejich závodní vůz. Visteon-Autopal se k tomuto projektu ochotně připojil a po dohodě se svým vedoucím práce jsem bakalářskou práci rozšířil o další body, výroba a měření chladiče. Tato témata se dají rozpracovat velmi podrobně, nicméně v rámci bakalářské práce jsem chtěl v krátkosti ukázat, jak probíhá výroba prototypového chladiče.

Na základě zadání jsem nejdříve provedl rozbor chladičů a jejich rozmístění na vozech Formula Student. U týmů účastnících se této soutěže můžeme najít čtyři typy uspořádání chladicí soustavy. Nejčastějším řešením je použití jednoho nebo dvou chladičů po stranách vozu.

Dalším, ale již méně častým řešením je umístění chladiče u zadní nápravy. Čtvrtým typem je varianta s chladičem a mezichladičem, která je čím dál častější vzhledem k rostoucímu počtu vozů s přeplňovaným jednoválcovým motorem.

Každé z těchto řešení má své výhody i nevýhody a záleží na týmech, ke které variantě se přikloní, aby dosáhly co nejlepších výsledků. Po zvážení několika variant se tým TU Brno Racing rozhodl pro řešení s jedním chladičem a přidavným ventilátorem.

Při výpočtu tepelného výkonu jsem se setkal se dvěma problémy a tuto část vidím jako jednu z oblastí, kde by mohlo v budoucnu dojít ke zlepšení. Kvůli technickým problémům motorové brzdy nebyly k dispozici nejpresnější hodnoty z měření a proto jsem použil data od výrobce motoru. Tým TU Brno Racing se chystá na své první závody a proto mu chyběly vstupní data týkající se teploty vzduchu a trati během závodních dnů.



Obr. 36 Ukázka vozu týmu TU Brno Racing bez šasi

Také nebyly k dispozici hodnoty rychlostí, zejména nejnižších rychlostí, kdy je nejmenší hmotnostní průtok vzduchu chladičem a chladič má tedy nejnižší chladicí potenciál. Tyto chybějící informace byly nahrazeny dohodnutými a to takovými, abychom se co nejvíce přiblížily reálným podmínkám na trati. Chybějící hodnoty by měly být během následujících testů a závodů zaznamenávány, aby mohly být použity při dalším vývoji vozu.

Druhou oblastí, kde vidím v budoucnu možné zlepšení je samotný vodní chladič. Jak již bylo uvedeno, při použití chladiče typu „U-flow“ získáme větší výkon, nicméně dochází k nárůstu tlakové ztráty proti typu „I-flow“. S vývojem nové generace závodního vozu se bude vyvíjet i samotný chladič, aby se dosáhlo co nejlepších parametrů.

Všechny zadané body bakalářské práce byly splněny, navíc práce byla v jejím průběhu ještě rozšířena o několik dalších bodů a i ty byly splněny.

Hlavním výstupem mojí bakalářské práce je celohliníkový vodní chladič, který jsem navrhl na základě vstupních požadavků týmu TU Brno Racing z VUT v Brně. Také jsem vybral přidavný ventilátor. Ten bude spolu s chladičem osazen do závodního vozu, který se bude účastnit mezinárodní soutěže Formula Student.



Obr. 37 Celkový pohled na vůz týmu TU Brno Racing

Seznam použitých zdrojů

- [1] *CTU CarTech* [online]. 2008-2010 [cit. 2011-02-11]. Dostupné z WWW: <<http://www.carttech.cvut.cz>>
- [2] RAUSCHER, J. *Spalovací motory : studijní opory*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2005. 235 s.
- [3] *Warwick Racing* [online]. 2011 [cit. 2011-01-31]. Dostupné z WWW: <<http://www2.warwick.ac.uk/fac/sci/eng/meng/warwickracing>>
- [4] *Joanneum racing graz* [online]. 2011 [cit. 2011-02-02]. Dostupné z WWW: <<http://www.joanneum-racing.at/cms>>
- [5] *University of Strathclyde Motorsport | Formula Student* [online]. 2011 [cit. 2011-02-02]. Dostupné z WWW: <<http://www.formulastudent.strath.ac.uk>>
- [6] *University of Toronto Formula SAE Racing* [online]. 2011 [cit. 2011-02-03]. Dostupné z WWW: <<http://www.fsae.utoronto.ca/>>
- [7] *Brunel Racing* [online]. 2011 [cit. 2011-02-03]. Dostupné z WWW: <<http://www.brunelracing.co.uk>>
- [8] ADÁMEK, L. *Konstrukční řešení a směry technického vývoje vozidel Formule Student*. Brno, 2009. 50 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Pavel Ramík.
- [9] *Poliba Corse* [online]. 2011 [cit. 2011-02-05]. Dostupné z WWW: <<http://www.dimeg.poliba.it/polibacorse>>
- [10] *Formula Student Germany* [online]. 2008-06-12 [cit. 2011-02-11]. Formula Student Germany: Design Judging Stuff. Dostupné z WWW: <<http://www.formulastudent.de/academy/pats-corner/advice-details/article/design-judging-stuff/>>
- [11] *TAU Racing* [online]. 2010 [cit. 2011-02-05]. Dostupné z WWW: <<http://www.tauracing.com/car.php>>

- [12] CHALUPA, P. *Analýza torzní tuhosti upravené varianty rámu vozidla Formula Student*. Brno, 2010. 72 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Pavel Ramík.
- [13] HORÁK, A. *Vazba inverzní úlohy na návrh experimentu*. Brno, 2006. 29 s. Pojednání ke státní doktorské zkoušce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Doc. Ing. Miroslav Raudenský, Csc.
- [14] *Formula Student* [online]. 2010 [cit. 2011-04-14]. 2011 Formula SAE Rules. Dostupné z WWW: <<http://students.sae.org/competitions/formulaseries/rules/>>
- [15] *Tzb-info* [online]. 2001-2011 [cit. 2011-04-15]. Tabulky a výpočty. Dostupné z WWW: <<http://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/9-vlastnosti-syte-vodni-pary-pri-danem-tlaku>>
- [16] *SPAL Automotive* [online]. 1999-2011 [cit. 2011-04-17]. Dostupné z WWW: <<http://www.spalautomotive.com>>
- [17] VÉVODA, A. *Porovnání moderních 3D CAD programů*. Brno, 2009. 49 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Michal Dosedla.
- [18] *Technodat* [online]. 2011 [cit. 2011-04-18]. Dostupné z WWW: <<http://www.technodat.cz/catia-v5>>
- [19] *Texaco Havoline XLC coolant properties*: Data sheet. 11 s.
- [20] *ENGINEERING.com CATIA Education Centre* [online]. 2011 [cit. 2011-04-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.catiastudent.com>>
- [21] *Visteon-Autopal Servicies, s.r.o.* : Test report no. 0087/3030/10
- [22] *wiki.matfyz.cz* [online]. 2011 [cit. 2011-04-24]. Základy termodynamiky a statistické fyziky-termodynamika. Dostupné z WWW: <http://wiki.matfyz.cz/wiki/5a._Základy_termodynamiky_a_statistické_fyziky_-_termodynamika>

Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratky

3D	Three dimensional
CAB	Control Atmosphere Brazing
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAM	Computer Aided Manufacturing
Catia	Computer Aided Three-dimensional Interactive Application

Symbols

Značka	Jednotka	Fyzikální veličina
c_{pvo}	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	Měrná tepelná kapacita vody
c_{pvz}	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	Měrná tepelná kapacita vzduchu
$\dot{m}_{vo}$	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$	Hmotnostní průtok vody
$\dot{m}_{vz}$	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$	Hmotnostní průtok vzduchu
p_{atm}	$[\text{Pa}]$	Atmosférický tlak
P_m	$[\text{kW}]$	Výkon motoru
q	$[\text{W}/\text{m}^2]$	Hustota tepelného toku
q_1	$[\text{W}/\text{m}^2]$	Hustota tepelného toku prvního tělesa
q_2	$[\text{W}/\text{m}^2]$	Hustota tepelného toku druhého tělesa
Q	$[\text{W}]$	Tepelný tok chladiva, vzduchu
Q_{chl}	$[\text{kW}]$	Požadovaný tepelný výkon chladiče
$Q_{\text{max}(vo)}$	$[\text{kW}]$	Maximální tepelný výkon chladiče na straně vody
$Q_{\text{max}(vz)}$	$[\text{kW}]$	Maximální tepelný výkon chladiče na straně vzduchu
R	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	Univerzální plynová konstanta
S_{chl}	$[\text{m}^2]$	Teplosměnná plocha chladiče
t	$[\text{°C}]$	Teplota vzduchu
T_1	$[\text{°C}]$	Teplota ohřátého chladiva
T_2	$[\text{°C}]$	Teplota ochlazeného chladiva
T_1	$[\text{°C}]$	Teplota teplejšího povrchu
T_2	$[\text{°C}]$	Teplota chladnějšího povrchu

T_{1vo}	[°C]	Vstupní teplota vody
T_{1vz}	[°C]	Vstupní teplota vzduchu
T_{2vo}	[°C]	Výstupní teplota vody
T_s	[°C]	Teplota pevného povrchu
T_∞	[°C]	Teplota proudící kapalliny
v_1	[m·s ⁻¹]	Rychlost vzduchu
Δt	[°C]	Teplotní spád na chladiči
Δt_{max}	[°C]	Maximální teplotní spád při 100% účinnosti
ρ_{vz}	[kg·m ⁻³]	Hustota vzduchu
$\rho_{vz(30\text{ }^\circ\text{C})}$	[kg·m ⁻³]	Hustota vzduchu při teplotě 30 °C

Přílohy

CD s následujícím obsahem:

- Bakalářská práce ve formátu pdf
- 3D model chladiče vytvořený v programu Catia V5 ve formátech Catpart a stp