



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA DOPRAVNÍ

Vojtěch Thums

POPIS AERODYNAMICKÝCH VLASTNOSTÍ
ZÁVODNÍHO MOTOCYKLU

Bakalářská práce

2022



K616.....Ústav dopravních prostředků

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Vojtěch Thums

Studijní program (obor/specializace) studenta:

bakalářský – DOS – Dopravní systémy a technika

Název tématu (česky): **Popis aerodynamických vlastností závodního motocyklu**

Název tématu (anglicky): Description of the aerodynamic properties of the racing motorcycle

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte následujícími pokyny:

- V obecné části stručně pojednejte o aerodynamice v kontextu motocyklů.
- Popište vlivy aerodynamiky na chování motocyklu a jak se aerodynamické účinky teoreticky, experimentálně a numericky určují.
- Navrhněte možnosti jak provést experimentální měření aerodynamických účinků na závodním motocyklu a toto měření proveďte.
- Získané výsledky vyhodnoťte a podrobte diskuzi.



- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: ČENDEL, Yunus A. Fundamentals of thermal-fluid sciences. 3rd ed., ISBN 978-007-126631-4
NOSKIEVIČ, Jaromír. Mechanika tekutin., ISBN 04-233-87
FOALE, Tony. Motorcycle handling and chassis design., ISBN 84-933286-3-4

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Přemysl Toman**
Ing. Josef Svoboda

Datum zadání bakalářské práce: **22. června 2021**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce: **8. srpna 2022**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

doc. Ing. Petr Bouchner, Ph.D.
vedoucí
Ústavu dopravních prostředků



doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Vojtěch Thums
jméno a podpis studenta

V Praze dne 22. června 2021

Čestné prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), v platném znění.

V Praze dne 7. srpna 2022

.....
Vojtěch Thums

Děkuji Ing. Přemyslu Tomanovi a Ing. Josefu Svobodovi, vedoucím práce, za podnětné rady, doporučení, vstřícnost a ochotu při řešení úkolů v rámci bakalářské práce.

Dále děkuji Ing. Tomáši Vítů, Ph.D., za cenná doporučení k mému výzkumu a Ing. Michalu Schmirlerovi, Ph.D., za pomoc při zajištění prostředí, v němž probíhalo měření.

Poděkování patří též panu Janu Válkovi, DiS. za doporučení při 3D tisku modelu motocyklu a Mgr. Pavle Kroupové za rady týkající se jazykové stránky mé bakalářské práce.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá aerodynamickými vlastnostmi závodního motocyklu. Vychází z potřeby zlepšení konstrukce nového motocyklu vyvíjeného studentským týmem CTU Lions. Práce přináší teoretický výklad aerodynamických jevů a jejich aplikaci na motocykly. Popisuje vliv aerodynamický jevů na tvar motocyklu a s tím spojených kapotáží. Experimentálním způsobem na modelu motocyklu zjišťuje hodnoty, kterých mohou nabývat odporové síly při jízdě motocyklu. Poznatky, které jsou v práci popsány, budou v následujícím ročníku soutěže Motostudent pomocníkem při návrhu a konstrukci nového motocyklu.

Klíčová slova

aerodynamické vlastnosti motocyklu, CTU Lions, CTU Lions EVO 2.0 Electric, motocykl, aerodynamika, větrný tunel

Abstract

This bachelor's thesis deals with the aerodynamic properties of a racing motorcycle. It stems from a need to improve the design of a new motorcycle being developed by the CTU Lions student team. Thesis provides a theoretical interpretation of aerodynamic phenomena and its application to motorcycles. It describes the influence of aerodynamic phenomena on the shape of the motorcycle and the associated fairing. It detects the values in an experimental way on a motorcycle model that the resistance forces can acquire whilst riding the motorcycle. The knowledge that is described in this Bachelor thesis will assist in the design and construction of a new motorcycle throughout the next year of the Motostudent competition.

Keywords

motorcycle aerodynamics, CTU Lions, CTU Lions EVO 2.0 Electric, motorcycle, aerodynamics, wind tunnel

Obsah

Obsah.....	5
Seznam použitých zkratk a symbolů	7
Úvod.....	8
1 Historie aerodynamiky vozidel.....	9
2 Mechanika tekutin.....	14
2.1 Proudění tekutin.....	14
2.1.1 Vířivé a nevířivé proudění	15
2.1.2 Laminární a turbulentní proudění.....	16
2.2 Viskozita.....	17
2.2.1 Dynamická viskozita	19
2.2.2 Kinematická viskozita.....	20
2.3 Rovnice kontinuity	20
2.4 Bernoulliho rovnice	21
2.5 Vztlak	22
2.6 Odporová síla	24
2.6.1 Mezní vrstva.....	25
2.6.2 Odtržení proudu a úplav.....	25
2.7 Teorie podobnosti.....	25
2.7.1 Reynoldsovo číslo	26
3 Aerodynamika motocyklu.....	28
3.1 Odporová síla motocyklů.....	28
3.2 Vnitřní proudění vzduchu	30
3.3 Vztlak/přítlak motocyklu	31
3.4 Aerodynamika motocyklů závodících v MotoGP.....	32
3.5 Boční síla.....	33
3.6 Aerodynamika jezdce	34
3.7 Měření aerodynamických účinků na motocykl	34
3.7.1 Aerodynamické tunely	34
3.7.2 Typy aerodynamických tunelů.....	35
3.7.3 Metody měření v aerodynamickém tunelu	35
3.7.4 Simulace	37
4 Výroba modelu pro experiment	39
4.1 Softwarová úprava kapotáží.....	39

4.2	3D tisk.....	41
4.3	Úprava a spojování modelu.....	42
5	Měření ve větrném tunelu.....	45
6	Vyhodnocení měření.....	46
7	Přepoččet výsledků z modelu na skutečný motocykl.....	49
	Závěr.....	50
	Citovaná literatura.....	51
	Seznam obrázků.....	55
	Seznam tabulek.....	56
	Seznam grafů.....	56
	Seznam příloh.....	56

Seznam použitých zkratk a symbolů

$v_{1,2,3}$	[m/s]	rychlost proudění
μ	[Pa·s]	dynamická viskozita
τ	[N/m ²]	tečné (smykové) napětí
γ	[s ⁻¹]	změna smykové rychlosti
ν	[m ² /s]	kinematická viskozita
Δm	[kg]	hmotnost
ΔV	[m ³]	objem proteklý za čas
ρ	[kg/m ⁻³]	hustota
p	[Pa]	tlak
g	[m/s ⁻²]	gravitační zrychlení Země
h	[m]	výška
Δh	[m]	rozdíl výšek
c_x	[-]	koeficient obtékání tělesa tekutinou
S_x	[m ²]	průmět čelní plochy tělesa do roviny kolmé ke směru proudění
F_D	[N]	odporová síla aerodynamického odporu
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
\bar{V}	[m/s]	průměrná rychlost proudu
D	[m]	charakteristická délka tělesa v ose

Úvod

Ve 20. století došlo k výraznému rozvoji technických oborů, včetně aerodynamiky. Od prvního letu bratří Wrightů k prvním úspěšným pokusům o dobytí vesmíru uběhlo méně než 60 let. Na první pohled se může zdát, že aerodynamika výrazně ovlivňovala pouze letecké a kosmické obory, ale vědomosti získané studiem aerodynamiky byly mimo jiné aplikovány v pozemní dopravě, architektuře i vojenství.

V pozemní dopravě se první pokusy o zakomponování aerodynamiky projevily zvýšením rychlosti. Vývoj motorismu způsobil, že se dopravní prostředky staly každodenní součástí běžného života, a jeho obliba vedla ke vzniku nového sportovního odvětví.

Motoristický sport využívá znalostí aerodynamiky pro překonávání dosud zavedených rekordů, které se nedostaví bez neustálého vývoje a inovací všech částí stroje. Výjimkou nejsou ani motocyklové závody, pro které se každý závodní tým snaží vyvinout vítězný stroj.

Spolu s duchem všech motocyklových týmů se nese i univerzitní tým CTU Lions, který se v roce 2019 potřetí účastnil celosvětové soutěže vysokých škol MotoStudent, v níž mají univerzitní týmy za úkol vyvinout a sestavit prototyp závodního motocyklu. Tato bakalářská práce má za cíl popsat aerodynamické účinky působící na motocykl CTU Lions EVO 2.0 Electric vyvinutý týmem CTU Lions pro ročník 2019-2021.

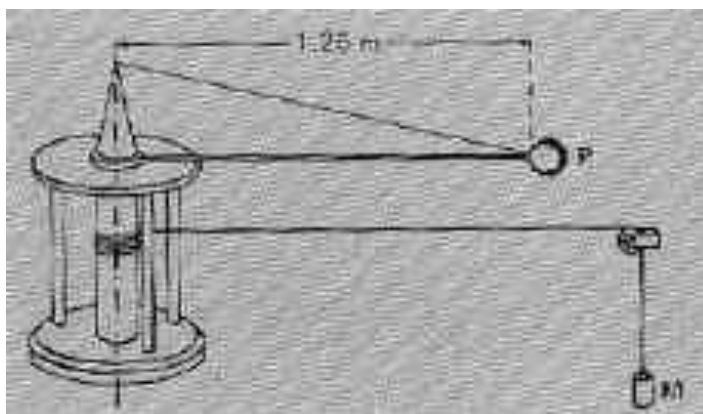
Práce seznamuje čtenáře se stručnou historií aerodynamiky, základními fyzikálními principy v oblasti aerodynamiky a jejich teoretickou aplikací na jízdu motocyklu. Praktická aplikace aerodynamiky se dá experimentálně ověřit několika metodami, jež jsou v práci také popsány. Dále je v práci detailně popsán experiment provedený na zmenšeném modelu motocyklu CTU Lions EVO 2.0 Electric ve větrném tunelu a jeho výsledky jsou interpretovány z hlediska skutečného motocyklu.

1 Historie aerodynamiky vozidel

Studium aerodynamiky v moderním pojetí začalo přibližně v 18. století, přestože pozorování základních pojmů, např. aerodynamického odporu, bylo zaznamenáno mnohem dříve. Mnoho počátečního úsilí bylo použito na dosažení letu letadla těžšího než vzduch, který byl poprvé demonstrován bratry Wrighty. Později se výzkum přesunul také na pozemní vozidla.

Od počátku výzkumu aerodynamiky se zkoumaly aerodynamické vlastnosti obtékaných těles. Nejprve se využívalo přírodních vlivů, jako větru nebo přirozeného stabilnějšího proudu vzduchu vanoucího jeskyněmi. Tomuto efektu dnes říkáme komínový efekt. Při těchto metodách měli však badatelé problém měřit aerodynamické efekty přímo na obtékaném tělese. [1]

Jako první přišel v 18. století Angličan Benjamin Robins s rotačním přístrojem pro měření aerodynamických vlivů. Tento přístroj lze vidět na *obrázku 1*. Stroj byl poháněn závažím na kousku lana, pomocí tíhové síly závaží roztočilo měřicí přístroj a Robins byl schopen popsat první teorie o vztahu odporu, tvaru, rychlosti a orientaci v prostoru zkoumaného předmětu. [1]

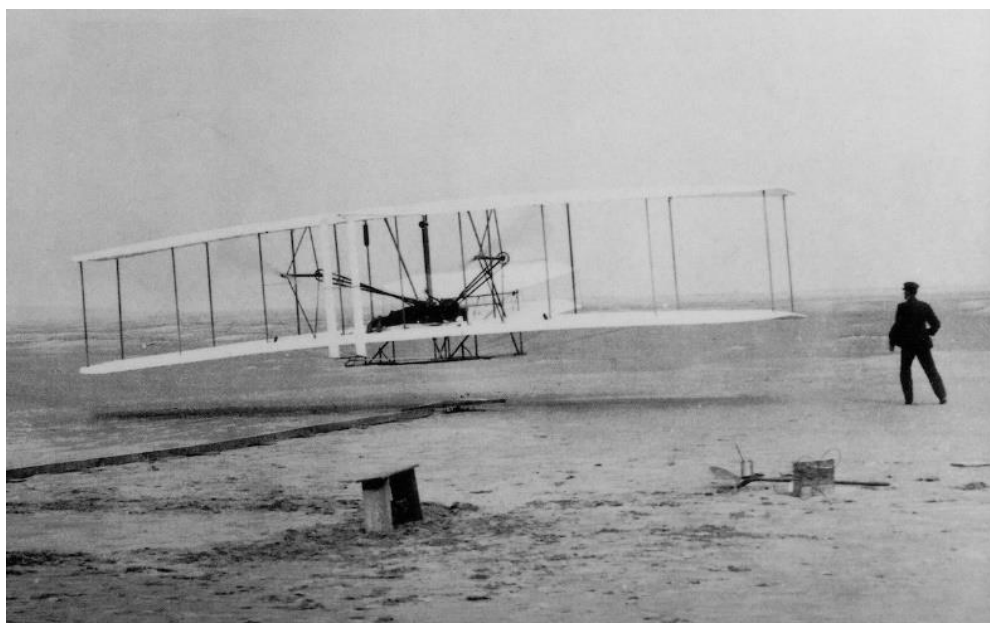


Obrázek 1: Přístroj Benjamina Robinse pro měření aerodynamických vlivů [1]

Na poznatky Robinse navazuje Sir George Cayley, který zkoumal aerodynamické principy pomocí přístroje pracujícího na obdobném principu. Díky svým poznatkům byl jako první schopen zkonstruovat letoun těžší než vzduch. Tento kluzák byl naprosto přelomový ve vnímání letu. Do této chvíle se všichni vynálezci snažili vytvořit první letadlo, které by mávalo křídly jako ptáci. [1]

1 Historie aerodynamiky vozidel

V roce 1901 sestrojili bratři Wrightové první aerodynamický tunel s průřezem 400x400 mm, na kterém testovali proudění okolo leteckých profilů. Na základě těchto poznatků dne 17. 12. 1903 provedli první let s motorovým letounem a vyhráli tak pomyslný závod všech vynálezců po celém světě. Na *obrázku 2* je fotografie prvního letounu. Konstrukteři zde kladli důraz zejména na co největší plochu vztlaku při zachování nízké hmotnosti celého stroje. [1][2]



Obrázek 2: První letadlo bratrů Wrightů z roku 1903 [2]

Aerodynamika pozemních vozidel byla dlouhou dobu vývoje přehlížena, konstruktéři vozidel se však aerodynamikou zabývali již ve 20. letech minulého století. Dokonce se prováděly zkoušky aerodynamiky, ale u těch se konstruktéři a výrobci potkávali s velkými komplikacemi, jak nasimulovat reálné prostředí. Z tohoto důvodu zůstávali u osvědčených tvarů automobilů. Základní kámen aerodynamické výroby vozidel položil Edmund Rumpler, který v roce 1921 představil na berlínském autosalonu svůj první prototyp vozu s označením OA 104, který můžeme vidět na *obrázku 3*. Tento vůz je známější pod názvem Tropfenwagen. V celé široké veřejnosti vzbudil automobil velké pozdvižení a Rumpler chtěl jako první zahájit sériovou výrobu aerodynamického vozu. Dodnes automobil patří ke světovým unikátům. [3]

V 80. letech byl jediný dochovaný exemplář Tropfenwagenu vložen do aerodynamického tunelu, aby bylo možné změřit součinitel odporu vzduchu c_x . Celý motoristický svět byl překvapen, když výsledná hodnota c_x činila 0,28. [3]



Obrázek 3: Tropfenwagen v aerodynamickém tunelu s vizualizací okolního proudění [3]

První sériovou výrobu aerodynamického vozu se povedlo provést Hansi Ledwinkovi, který z pozice generálního ředitele zastupoval společnost Tatra. Automobil Tatra 87 byl vylepšený model prototypu Tatra 77, kde si konstruktéři vyzkoušeli nové konstrukční a návrhářské metody výroby karosérie, rámu a uložení motoru. Tatra 87 díky tomu byla o třetinu levnější a jednalo se o nejrychlejší automobil vyráběný v českých zemích. Základní koncepce obou vozidel byla stejná, jednalo se o proudnicový tvar vozidla a motor V8 pohánějící zadní nápravu. U modernějšího typu vozidla se zapracovalo na konstrukci karosérie, která se stala polosamonosná a ovladatelnost se zvýšila díky zmenšení celého automobilu o 40 cm na celkovou délku 4,74 m.



Obrázek 4: Tatra 87 cestovatelů Zikmunda a Hanzelky

1 Historie aerodynamiky vozidel

Automobil Tatra 87 celosvětově proslavili po druhé světové válce dobrodruzi Jiří Hanzelka a Miroslav Zikmund, kteří s ním v letech 1947–1950 odjeli do Afriky a Jižní Ameriky na obchodní misi závodu Tatra. Jejich vůz je zachycen na *obrázku 4*.

Aerodynamika motocyklů se začala podrobně řešit až po druhé světové válce. V 50. letech minulého století se začaly objevovat první kapkovité tvary kapotáží na závodních motocyklech. Prototyp těchto kapotáží lze vidět na *obrázku 5*.



Obrázek 5: Moto Guzzi z roku 1957 s motorem 500 ccm dosahující rychlosti 240 km/h

S aerodynamickým výzkumem zaměřeným přímo na motocykly začala společnost Motto Guzzi, která jako první postavila v 50. letech aerodynamický tunel pro testování motocyklů. První testování spočívalo zejména na subjektivním hodnocení jezdce – jeho pocitech při proudění vzduchu. Nejvyšší naměřená rychlost vzduchu v tunelu byla 225 km/h a bylo jí dosaženo za pomoci leteckého motoru značky FIAT. Společnost Motto Guzzi s výzkumem ve svém aerodynamickém tunelu pokračovala do 80. let 20. století. [4]

Sériová výroba motocyklů do 80. let probíhala bez velkého vlivu zájmu konstruktérů o kapotáže, nejvíce se stavěly motocykly bez kapotáží – tzv. „naked bikes“. Motocykly měly pouze čelní štít, který rozrážel vzduch proudící na jezdce. Od 80. let se začaly objevovat kapotáže na sériových motocyklech a v 90. letech přišla většina výrobců motocyklů s kompletní čelní maskou, díky které stroje dosahovaly lepších aerodynamických vlastností. [5]

1 Historie aerodynamiky vozidel



Obrázek 6: Jawa TS 350 638, 1986 (vlevo) a BMW R100RT, 1996 (vpravo)

Na obrázku 6 je možné vidět rozdíl mezi kapotážemi na motocyklech Jawa TS 350 638 z roku 1986 a BMW R100RT z roku 1996. Rozdíl je viditelný na první pohled. Trend většího užití kapotáží trvá dodnes. Kapotáže dnešních motocyklů budou analyzovány a popsány v kapitole (3).

2 Mechanika tekutin

Aby mohly být popsány aerodynamické vlastnosti závodního motocyklu, budou v následující kapitole stručně popsány základy mechaniky tekutin. Tyto teoretické znalosti jsou nezbytné pro řešení celé řady inženýrských úloh a budou tvořit základ pro následný experiment v aerodynamickém tunelu.

Tekutiny jsou děleny na kapaliny a plyny. Na rozdíl od pevných látek mají tekutiny volné molekulární vazby, díky kterým mohou téct mezi pevně ohraničenými stěnami. Pevné látky rozdělujeme mimo jiné na tuhé a poddajné. Poddajné (deformovatelné) látky vykazují pružné, tvárné nebo křehké chování při zatěžování, což souvisí zejména s jejich tvrdostí a modulem pružnosti, případně dalšími mechanickými vlastnostmi. [6]

Kapaliny a plyny rozdělujeme podle schopnosti utvořit hladinu. Plyny jsou rozpínavé a snaží se vždy vyplnit celý objem nádoby, ve které jsou. Kapaliny po nalití do nádoby a ustálení utvoří volnou hladinu kvůli snaze o působení minimální vnitřní energie v kapalině.

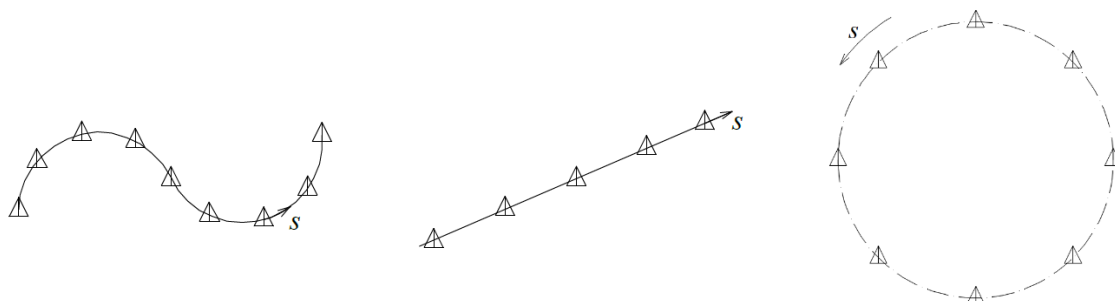
Tekutiny mohou být rozděleny dle svých fyzikálních vlastností na stlačitelné a nestlačitelné. Zpravidla bývají označovány plyny jako stlačitelné a kapaliny jako nestlačitelné. Další možností rozdělení tekutin je podle vnitřního tření. To nazýváme viskozita. Pokud zohlednění výpočtu dovoluje zanedbat vnitřní tření, je počítáno s modelem ideální tekutiny. Není-li tomu tak a zjednodušení použít nelze, musí být počítáno s modelem reálné tekutiny. Tekutiny se samovolně vždy pohybují z pole s větším tlakem do pole s tlakem menším. Pohyb dále může být vyvolán vnější silou. [6]

2.1 Proudění tekutin

Pohyb tekutin označujeme prouděním a můžeme ho znázornit pomyslnými čarami. Tyto pomyslné čáry nazýváme proudnicemi nebo proudovými čarami a představují převládající směry vektorů tekutiny. Nemusí jít o trajektorie elementů, ty se mohou mísit

2 Mechanika tekutin

a měnit své pozice v rámci proudění. [7] Rozdělení proudění tekutin se provádí podle vlastností tekutin, nebo podle druhu média jeho vlivu na hydrodynamiku a aerodynamiku. Proudění dokonalé/ideální tekutiny se rozděluje na vířivé a nevířivé, u skutečných tekutin je rozdělení na laminární a turbulentní. [8][7]



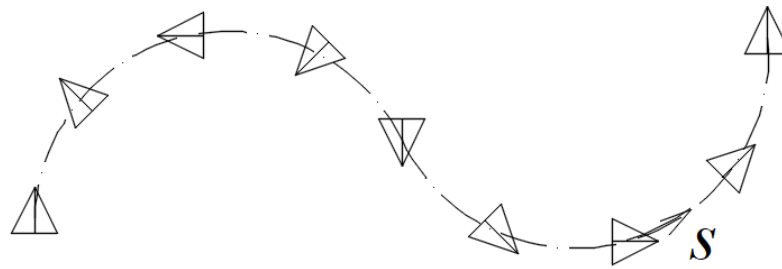
Obrázek 7: Pohyb částic tekutiny při potenciálním proudění a potenciálním víru [5]

2.1.1 Vířivé a nevířivé proudění

Na *obrázku 7* lze pozorovat, že potenciální proudění mění pouze souřadnice objemových, nebo hmotnostních elementů pozorovaného média, nikoliv natočení v ose každého elementu. Tyto elementy si můžeme představit jako malý objem, který charakterizuje vlastnosti celého objemu a hmotnosti tekutiny. U kapalin je jedním z možných příkladů tohoto elementu kapka.

Pro pozorování elementů tekutin používáme dvě metody, Lagrangeovu a Eulerovu. Lagrangeův popis kontinua je založen na vybrání konkrétního elementu v médiu, přičemž pozorovatel je součástí pohybující se tekutiny. Z tohoto elementu můžeme pozorovat jeho polohu v čase.

Při Eulerově popisu kontinua nepozorujeme trajektorii částice, ale rozložení elementu podle veličin rychlosti, tlaku nebo hustoty. Danou veličinu sledujeme jako objemový, nebo hmotnostní element, nikoli jako konkrétní částici. Eulerova metoda také sleduje změny v čase, ale jsou pouze lokální, tedy je pozorujeme z pevného místa mimo proudící tekutinu. S tímto popisem kontinua jsou úzce spjaty proudnice, díky kterým můžeme médium vyšetřené Eulerovou metodou znázornit graficky. [9] Příklady zobrazení Eulerovým popisem kontinua jsou *obrázky 7 a 8*.

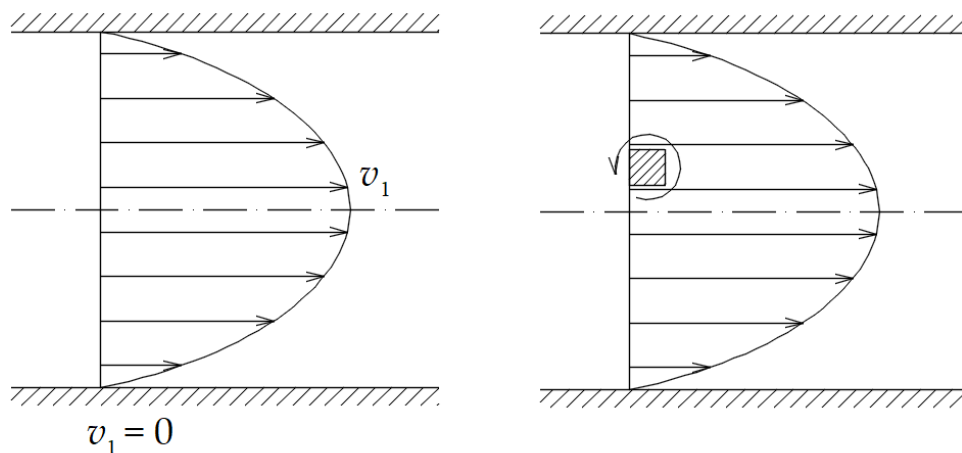


Obrázek 8: Pohyb částic tekutiny při vířivém proudění [6]

Na obrázku 8 můžeme pozorovat natočení částic, ke kterým jsou rychlosti tečné. Spojením jednotkových tečných vektorů k rychlostem získáme proudnici.

2.1.2 Laminární a turbulentní proudění

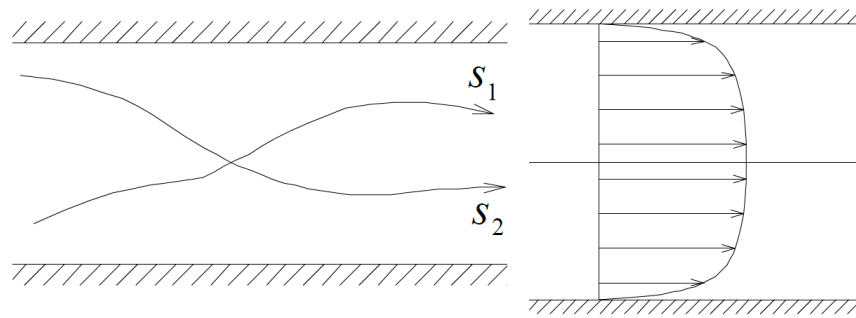
Laminární proudění se vyznačuje paralelním prouděním všech proudnic látky. Na obrázku 9 můžeme pozorovat, že laminární proudění se při použití skutečné tekutiny stává turbulentním. Tento jev si můžeme představit jako malý objem tekutiny, jehož vrstva se bude pohybovat nižší rychlostí než vrstva sousední. Pomalejší vrstva díky tomu zpomaluje vrstvu rychlejší a otáčí jí kolem kolmé osy k nakresleným proudnicím. [6] Laminární proudění nemusí být jen v přímkách, ale může být zaoblené nebo kopírovat tvar předmětu. [10]



Obrázek 9: Zobrazení laminárního proudění v pevném tělese, například trubici [6]

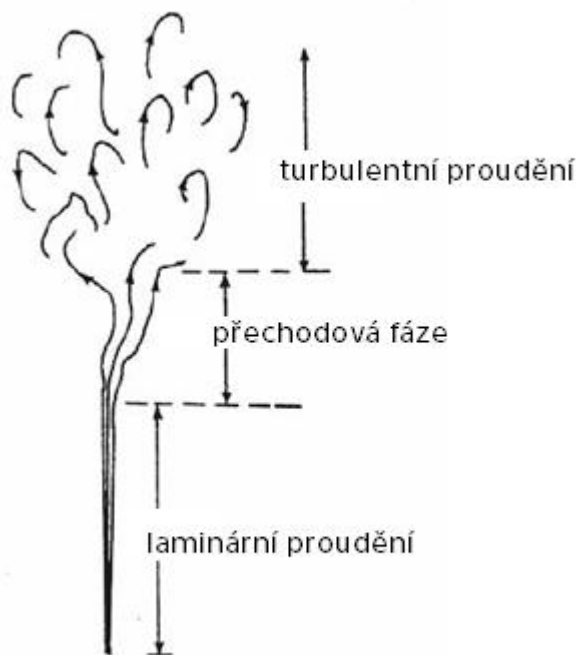
Turbulentní proudění se vyznačuje kromě postupné rychlosti také turbulentní rychlostí, kterou se částice přemísťují po průřezu trubice, viz obrázek 10. Zde vidíme, jak se částice S1 a S2 mísí po celém průměru.

2 Mechanika tekutin



Obrázek 10: Zobrazení a rychlostní profil turbulentního proudění [6]

Turbulentního proudění může být dosaženo při zvýšení rychlosti nebo změně náběžné hrany. To vede k výrazným změnám ve směru a vířivosti proudnic. Jednoduchý příklad je pádlování na klidné vodě. Pokud vodák ponoří pádlo do vody a bude pádlovat velmi pomalu, na hladině vody nebude poznat rozdíl. Naopak když vykoná pohyb pádlem větší silou, na opačné straně náběžné hrany pádla se vytvoří vodní víry. Na obrázku 11 můžeme pozorovat přechodovou fázi mezi laminárním a turbulentním prouděním.



Obrázek 11: Zobrazení laminárního proudění, přechodové fáze a turbulentního proudění [10]

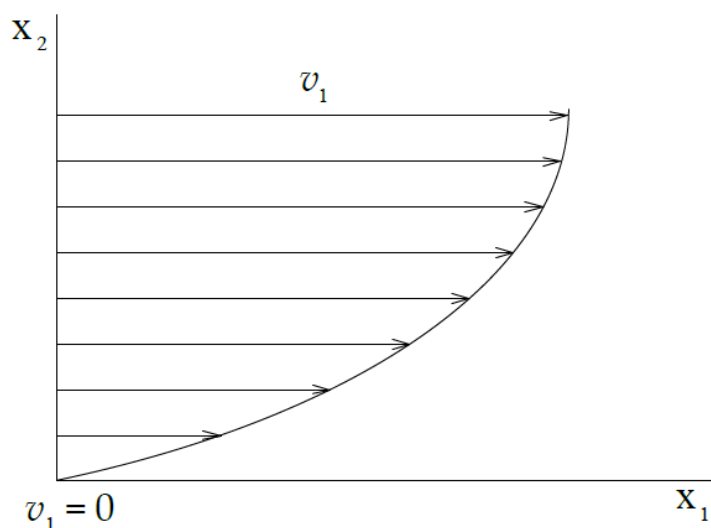
2.2 Viskozita

Při použití reálné tekutiny musíme vzít v potaz její viskozitu. Vzduch a voda jsou newtonovskými tekutinami. Tyto tekutiny totiž splňují Newtonův zákon viskozity, který

2 Mechanika tekutin

říká, že odpor způsobený vnitřním třením v tekutině je přímo úměrný rychlosti toku. Další z vlastností je smykové napětí přímo úměrné změně rychlosti ve směru kolmém na vektor rychlosti a konstanta úměrnosti je dynamická viskozita.

Představme si proudící reálnou kapalinu, například vodu rozdělenou na rovnoběžné vrstvy ve směru proudění. Každá z těchto vrstev se může pohybovat jinou rychlostí. Nejpomaleji se bude pohybovat vrstva, jež je v kontaktu se stěnou. Ta bude zpomalovat sousedící vrstvu, která se bude pohybovat o něco rychleji než první vrstva. V *obrázku 12* můžeme pozorovat, že v symetrické trubici se nejrychleji bude pohybovat vrstva v ose trubice.



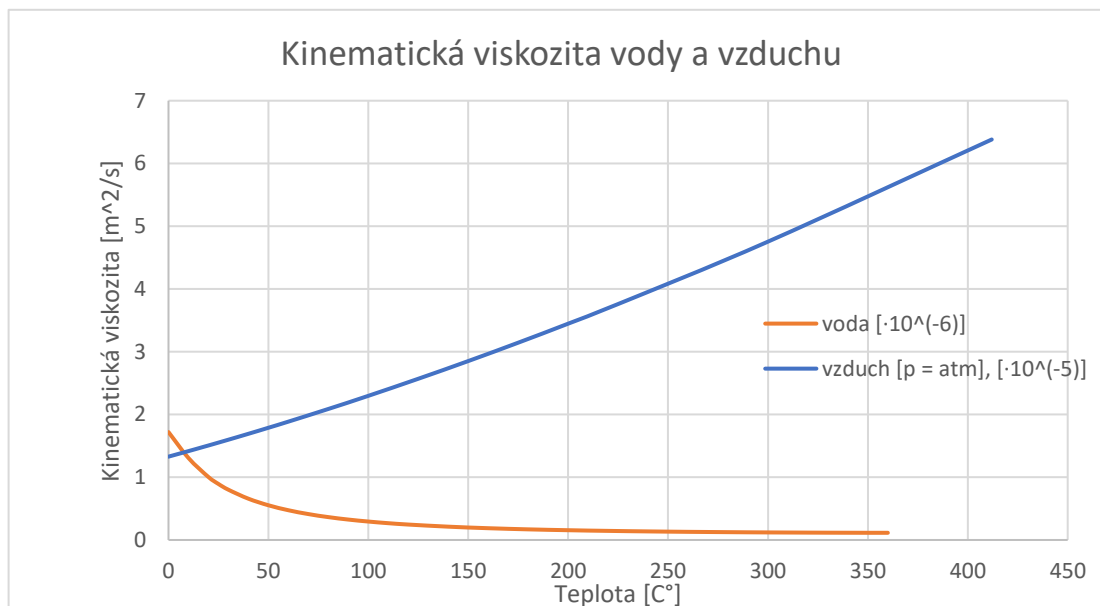
Obrázek 12: Znázornění účinků viskozity na proudění u pevné stěny pomocí proudnic [6]

Voda je při běžných teplotách asi padesátkrát viskóznější než vzduch a viskozita vytváří tření na obtékaných tělesech. Na základě této skutečnosti dochází při výpočtech, kde je médiem vzduch, ke zjednodušení. V případě, že je vzduch považován za ideální plyn, má nulovou viskozitu. Avšak tento předpoklad je naprosto chybný v experimentech prováděných za běžných teplot, protože díky vazkosti jsou letadla schopna létat, větrné mlýny se točí a plachetnice mohou vyplout z přístavu. Nemusíme ale zůstat jen u jevů aerodynamických, kvůli vazkosti jsme například schopni využívat tepelných výměníků pro chlazení. [10]

Viskozita obecně závisí na teplotě a tlaku tekutiny, typickou závislost kapaliny a plynu na teplotě ukazuje *graf 1*. Pro kapaliny je závislost na tlaku malá, kromě případů při velmi

2 Mechanika tekutin

vysokém tlaku. Plyny, díky jejich stlačitelnosti, jsou závislé na obou veličinách, tedy teplotě a tlaku. [8] V grafu 1 můžeme vidět, že viskozita vzduchu a vody má obrácený trend a že vzduch už při teplotě 400 °C za stálého tlaku nabývá velmi vysokých hodnot. Graf 1 nám tedy mimo jiné říká, že čím vyšší teplotu vzduch má, tím menší vazkostí disponuje. Právě vysoká teplota vzduchu zásadně mění aerodynamické poměry na kapotáži motocyklu, který je předmětem studia v této práci.



Graf 1: Průběh kinematičké viskozity v závislosti na teplotě [38] [39]

2.2.1 Dynamická viskozita

Dynamická viskozita popisuje odpor tekutiny v proudu při působení vnější síly. To se projevuje právě při jevu s dvěma vrstvami popsány výše, viz obrázek 12. Odpor v tekutině je důsledkem existence mezimolekulárních vazebních sil v reálné tekutině. Vlivem těchto sil vzniká mezi jednotlivými vrstvami proudící tekutiny (viz výše) tečné napětí. Součinitel dynamické viskozity je pak u newtonovských tekutin definován jako podíl tečného napětí a změny rychlosti proudění v sousedních vrstvách, tedy dv/dy . Rovnice dynamické viskozity μ (2.1) se rovná podílu tečného napětí τ ku změně smykové rychlosti γ .

$$\mu = \frac{\tau}{\gamma} \text{ [Pa} \cdot \text{s]} \quad (2.1)$$

K měření dynamické viskozity se používají viskozimetry. Jedním z příkladů je rotační viskozimetr, do kterého se vloží měřená látka v kapalném skupenství. Viskozimetr se roztočí a měřením kroutícího momentu je určena dynamická viskozita látky. [11]

2.2.2 Kinematická viskozita

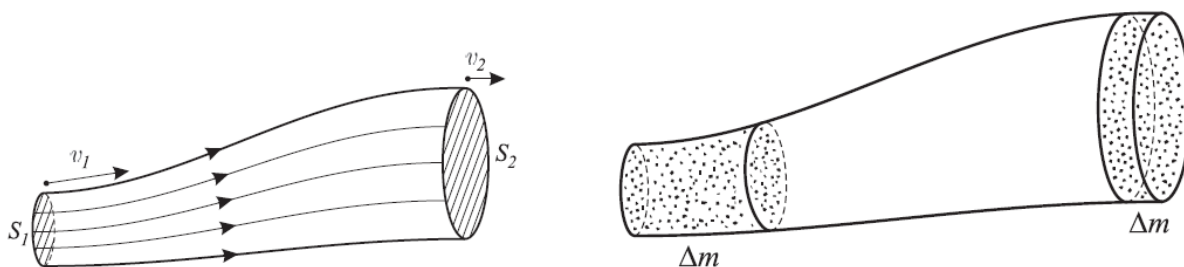
Ve výpočtech se využívá vlastností kinematické viskozity ν , jež je popsána rovnicí (2.2). Ta se rovná podílu dynamické viskozity μ ku hustotě látky ρ .

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \text{ [m}^2/\text{s]} \quad (2.2)$$

Jednotky kinematické viskozity [m²/s] dávají této veličině kinematický rozměr, proto se toto slovo vyskytuje i v jejím názvu. V menších objemech se využívá jednotek [cm²/s]. [12]

2.3 Rovnice kontinuity

Základní rovnicí pro řešení problémů proudění je rovnice kontinuity. Představme si proudovou trubici, kterou tvoří svazek proudnic a jejíž stěny jsou též utvořeny proudnicemi čili jimi neprochází žádná tekutina. [13]



Obrázek 13: Pohyb tekutiny v proudové trubici [13]

Na obrázku 13 vlevo můžeme vidět proudovou trubici, do které plochou S_1 proudí ustáleným proudem tekutina a plochou S_2 opět opouští danou trubici. Vpravo můžeme vidět hmotnost Δm proteklou průřezem S_1 .

Hmotnost Δm , která proteče plochou S_1 , se rovná násobku hustoty média ρ a objemu ΔV , který za určitý čas protekl, viz rovnice (2.3). [6]

$$\Delta m = \rho \cdot \Delta V \text{ [kg]} \quad (2.3)$$

V obrázku 13 vidíme, že hmotnost Δm proteklá plochou S_1 se musí rovnat hmotnosti Δm proteklé plochou S_2 . Tato úvaha bude fungovat, i když místo pomyslné stěny proudové trubice použijeme skutečnou trubici z nepropustného materiálu. Použijeme stejné

2 Mechanika tekutin

označení pro konec trubice, tedy S_1 , definujeme rychlost v této ploše jako v_1 a hustotu tekutiny jako ρ_1 . Obdobné veličiny definujeme i v druhém průřezu S_2 , tedy v_2 a ρ_2 . Za určitý čas Δt se tekutina v průřezu S_1 posune o vzdálenost $v_1 \cdot \Delta t$. Díky tomu, že kapalina je nestlačitelná a nemá kam z trubice vytéct, musí být médium posunuto o stejný objemový tok v S_1 jako v S_2 . Tento jev nazýváme rovnicí kontinuity, která je popsána v rovnici (3.4). [13]

$$S_1 \cdot \rho_1 \cdot v_1 \cdot \Delta t = S_2 \cdot \rho_2 \cdot v_2 \cdot \Delta t; S_1 \cdot \rho_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot \rho_2 \cdot v_2 \quad (2.4)$$

Při zachování stejné hustoty média $\rho_2 = \rho_1$ je možné rovnici (3.4) zjednodušit do tvaru rovnice (3.5).

$$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 \quad (2.5)$$

Z rovnice (3.5) vyplývá, že rychlost je nepřímo úměrná průřezu trubice. [13]

2.4 Bernoulliho rovnice

Bernoulliho rovnice spoléhá na vlastnost nestlačitelnosti tekutiny a provedení v konzervativním silovém poli (například gravitačním poli Země). Tato rovnice znázorňuje zákon o zachování energie v ideální tekutině. Kvůli podmínce nestlačitelnosti se pomocí Bernoulliho rovnice počítají úlohy týkající se hlavně kapalin. Níže si ukážeme, že tato rovnice nám též vysvětluje určité aerodynamické jevy.

Představme si trubici rozdílných průměrů, jako na *obrázku 13*, která má rozdíl výšek konců $\Delta h = h_2 - h_1$. Objemový průtok trubicí musí být stejný jako při rovnici kontinuity, protože spoléháme na nestlačitelnost tekutiny. Předpokládejme, že na vstupu trubice se tekutina pohybuje rychlostí v_1 , je pod tlakem p_1 a tento konec je ve výšce h_1 . Analogické veličiny můžeme definovat na druhém konci trubice, tedy: v_2 , p_2 a h_2 . Na základě zachování energie můžeme psát rovnici (3.6), kde ρ je hustota vyšetřované látky a g je gravitační zrychlení Země.

$$\frac{1}{2} \rho \cdot v_1^2 + h_1 \cdot \rho \cdot g + p_1 = \frac{1}{2} \rho \cdot v_2^2 + h_2 \cdot \rho \cdot g + p_2 \quad (2.6)$$

2 Mechanika tekutin

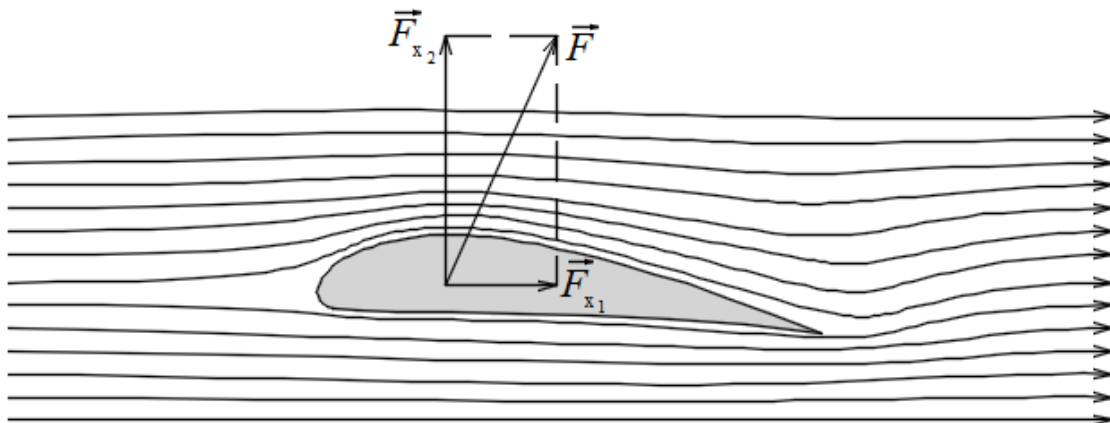
Z Bernoulliho rovnice kontinuity vyplývá, že zvýší-li se tlak p ve vyšetřovaném objemu tekutiny, pak musí klesnout rychlost v a obráceně. Těchto poznatků využijeme v následující kapitole 2.5.

Výpočtů Bernoulliho rovnice využíváme však jen při zjednodušení ideální tekutiny. Pro výpočty skutečné tekutiny používáme Navier Stokesovu rovnici. Kdybychom Navier Stokesovu rovnici určitým způsobem zjednodušili, dostali bychom Bernoulliho diferenciální rovnici. Výsledek zjednodušení nám říká, že Navier a Stokes zobecnili rovnici na proudění s případným vlivem vnitřního tření.

2.5 Vztlak

Vztlak je síla, která umožňuje předmětu se vznést. Je to síla, která snižuje účinek tíhové síly předmětu, což může vést k situaci, že se předmět stane „lehčí než vzduch“ a vzlétne. Všechny létající předměty (letadla) musí mít větší vztlak než tíhovou sílu. Vztlak je generován pouze v prostředí tekutin, ve vakuu vztlak nevznikne.

Horkovzdušné balóny generují vztlak díky horkému vzduchu uvnitř textilního obalu balónu, který je lehčí než vzduch okolní. Vrtulníky získávají vztlak díky rotující vrtuli, její pohyb vzduchem zvedá vrtulník vzhůru. Letouny používají vztlak hlavně z křidel, která svým tvarem umožňují létat. Pro popis vztlaku využijeme zejména příkladu letounů. [14]



Obrázek 14: Profil křídla obíhaný proudnicemi vzduchu [6]

Na obrázku 14 můžeme pozorovat, že profil křídla je na spodní straně více napřímený oproti vrchní straně, která je vypouklá. Před a za křídlem je proud vzduchu ustálený. To znamená, že vztlaková síla na křídle vzniká rozdílnou rychlostí proudění vzduchu nad a pod křídlem. Elementy vzduchu na horní části profilu křídla musí za stejný čas urazit

2 Mechanika tekutin

delší dráhu než elementy na opačné straně. Proudnice nad křídlem jsou blíže u sebe, což značí, že rychlost proudění nad křídlem je vyšší než pod křídlem. Větší rychlost proudění znamená, že je zde nižší tlak oproti tlaku na spodní straně křídla, kde se vzduch pohybuje pomaleji. Výsledná vztlaková síla \vec{F} je zapříčiněna rozdílnými tlaky a rychlostmi při oběhu vzduchu křídla. [15] [16]



Obrázek 15: Zobrazení přítlačné síly vyvinuté spoilerem [17]

U pozemních vozidel využíváme zejména přítlak, který je zápornou hodnotou vztlaku. Přítlak zvyšujeme dvěma hlavními způsoby. Jeden z možných je přidání takzvaného spoileru, který generuje reakční sílu působící vertikálně k zemi a „tlačí“ spoiler a tím i vozidlo k zemi. Další účinek reakční síly je brzdný, který působí horizontálně za vozidlo. Na obrázku 15 je vertikální síla znázorněna červenou barvou a horizontální síla žlutou. Reakční síla je vytvořena principem vzniku vztlaku na profilu a částečně odrazem proudění od plochy přítlačného křídla. Tím generuje přítlak, který konstruktéři vozidel chtějí. Problém vyvstává ve chvíli, kdy spoiler zvyšuje aerodynamický odpor, viz kapitola 2.6. Druhý způsob zvýšení přítlaku je správné usměrnění toku pod vozidlem. Tím se opět zvýší rychlost vzduchu pod vozidlem a vozidlo celou svou podlahou generuje přítlak. [17] [18] [19]

2.6 Odporová síla

Odporová síla je mechanická síla, která opět působí pouze při obtékání předmětu tekutinou. Tato síla, jak název napovídá, klade odpor proti pohybování v tekutině. Koná tak na stejném principu jako vztlak, avšak v jiné ose. Odpor je zapříčiněn rozdílem tlaků před a za obtékaným tělesem.

Teoretický předpoklad odporové síly F_D u pozemních vozidel je popsán rovnicí (2.7). Jde o jednu z modelových teorií, která říká, že míra odporové síly je přibližně kvadraticky závislá na rychlosti pohybu. V rovnici (3.7) jsou veličiny ρ značící hustotu tekutiny, která dané těleso obtéká, c_x značící koeficient obtékání vzduchu tělesa, S_x je průmět čelní plochy tělesa do roviny kolmé ke směru proudění a v je rychlost proudění tekutiny.

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_x \cdot S_x \cdot v^2 [N] \quad (2.7)$$

Při návrhu vozidel se hledí na koeficient c_x kvůli jeho schopnosti obtékat těleso tekutinou. Ideální tvar vozidla z hlediska obtékání vzduchu je jednoduchá kapka, která má hodnotu c_x 0,1. Tento tvar však musí být upraven už jen kvůli schopnosti vyjet na vozovku. Na všech dopravních prostředcích pohybujících se po veřejně dostupných komunikacích musí být komponenty zvyšující aerodynamický odpor, například zpětná zrcátka. Dále nesmíme opomenout bezpečnost a komfort všech účastníků provozu, nebo maximální délku vozidla, aby bylo schopné se pohybovat po městě. Pro představu, hodnota c_x pro krychli je 1. V *tabulce 1* jsou popsány hodnoty c_x a S_x běžných dopravních prostředků. [20]

Tabulka 1: Shrnutí běžných hodnot c_x a S_x u běžných vozidel

typ vozidla	c_x [-]	S_x [m ²]
běžné osobní automobily	0,3–0,4	1,6–2
nákladní automobily	0,8–1,1	4–7
autobusy	0,5–0,7	5–7
motocykly	0,3–0,5	0,3–0,6
závodní vozy Formule 1	0,7–1,1	0,7–1,3

2 Mechanika tekutin

V *tabulce 1* vidíme, že nákladní automobily se v koeficientu c_x blíží geometrickému tvaru krychle. Konstrukteři volí tento tvar také kvůli velkému přísunu vzduchu na kapotu nákladního automobilu, čímž se dostává dostatek vzduchu do tepelných výměníků motoru a motor se díky tomu lépe chladí.

Obecně platí, že silniční nebo okruhové závodní stroje mají vyšší hodnoty c_x . Jedná se například o vozy v seriálu mistrovství světa Formule1 nebo motocykly v seriálu mistrovství světa MotoGP. Vyšší hodnoty c_x se zde navrhují z důvodu většího přitlaku na zadní kolo, čímž se zvýší hodnota přeneseného výkonu ze zadní nápravy na vozovku. [5] [21] [17]

2.6.1 Mezní vrstva

Mezní vrstva vzniká při obtékání reálnou tekutinou na povrchu každého obtékaného tělesa, kde dochází k ulpívání tekutiny na povrchu obtékaného tělesa. Šířka mezní vrstvy roste v návaznosti na vzdálenost od počátku obtékaného tělesa. Rychlost se také mění dle vzdálenosti od povrchu obtékaného tělesa, kde na povrchu je rychlost nulová a s rostoucí vzdáleností roste. Rychlostní profil se tedy parabolicky zvětšuje úměrně s rostoucí vzdáleností od povrchu tělesa. Změna rychlostního průběhu určuje, zdali jde o obtékání laminární nebo turbulentní. [22]

2.6.2 Odtržení proudu a úplav

Při obtékání rovinné desky se statický tlak podél desky nemění. Jiná situace nastává při obtékání zaoblených těles, kde dochází ke změně rychlosti na povrchu tělesa vlivem účinků Bernoulliho rovnice (2.4).

Bod, ve kterém se proud vzduchu odtrhne od obtékaného tělesa, se nazývá bod odtržení. V odtrženém proudu vzniká úplav, což je oblast zvířeného proudění za obtékaným tělesem, vytvořená z částic mezních vrstev unášených proudem z povrchu tělesa, popřípadě částic odtrženého proudu. [22]

2.7 Teorie podobnosti

Při studiu aerodynamických vlastností těles a dopravních prostředků je často třeba používat zmenšené modely z důvodu omezené velikosti měřicích tunelů a nutnosti snižovat náklady na praktická měření.

2 Mechanika tekutin

Máme-li dva nebo více předmětů, které jsou si nějakým způsobem podobné, stačí umět popsat jeden z nich. K popsání ostatních využijeme jednoduchých matematických operací. Určením podobnosti systémů zjistíme, zdali jsou si předměty podobné, částečně podobné nebo nepodobné. [23]

Teorii podobnosti lze použít pouze v případě podobných systémů, s velkou opatrností u částečně podobných systémů. Kritéria podobnosti jsou bezrozměrná čísla, která používáme na základě vhodných definic. Ze znalosti teorie podobnosti musíme vědět, která kritéria podobnosti máme použít. Teorie podobnosti nám také říká, jak způsobem zapisovat fyzické experimentální pokusy nebo modelové numerické rovnice a jak s nimi počítat. [23]

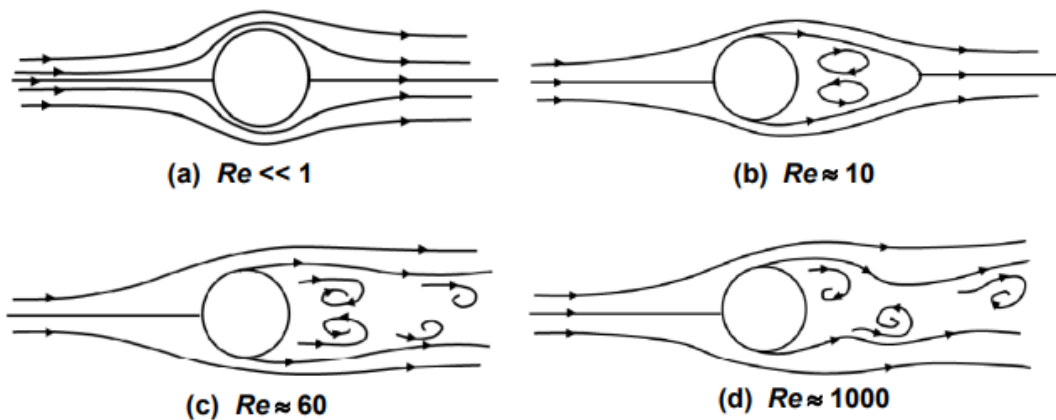
2.7.1 Reynoldsovo číslo

Reynoldsovo číslo znázorňuje, kdy je proud tekutiny laminární, v přechodové fázi nebo turbulentní. Vyjadřuje se rovnicí (3.8), kde Reynoldsovo číslo Re se rovná podílu hustoty tekutiny ρ , průměrné rychlosti proudící tekutiny \bar{v} a charakteristické délky předmětu D ku dynamické viskozitě proudící látky μ .

$$Re = \frac{\bar{v} \cdot D}{\nu} = \frac{\rho \cdot \bar{v} \cdot D}{\mu} \quad [-] \quad (2.8)$$

V trubici může Re nabývat hodnot pro laminární proudění od 0 do 2 300 včetně. Pro turbulentní proudění musí být větší než 10 000. Hodnoty mezi jsou v přechodové fázi, kde se způsob proudění neuspořádaně mění. U výpočtu Re musíme mít na paměti, že laminární proudění může být zachováno i při vyšších číslech, pokud je materiál trubice dostatečně hladký a vyvarujeme se narušení kontinuity proudu a vibrací. V takovém případě může být laminární proudění až do hodnoty Re 100 000. V praxi na tělesech různých tvarů nabývají hodnoty Re při turbulentní proudění nad 500 000. [20] [10]

2 Mechanika tekutin



Obrázek 16: Znázornění proudění okolo kuličky při různých hodnotách Re [24]

Na *obrázku 16* můžeme pozorovat, že laminární obtékání okolo kuličky je pouze pro hodnotu Re menší než 1. Naopak turbulentní proudění začíná okolo hodnoty Re 1 000.

3 Aerodynamika motocyklu

Tvar a délka motocyklu včetně jezdce ovlivňují výraznou měrou celkové aerodynamické vlastnosti stroje, které jsou důležité pro zachování ovladatelnosti a stability při jízdě. Zachování této podmínky je velmi složité s ohledem na jednostopé řešení motocyklu, protože samovyvažovací schopnosti při klonění a klopení a účinky gyroskopických momentů v interakci s řízením jsou v každé fázi jízdy jiné. K jejich zvládnutí samozřejmě dopomáhá jezdec, ale nesmíme opomenout, že uřízení motocyklu musí být v jeho fyzických silách. [5] [25]

Aerodynamické účinky můžeme změnit například kapotáží, čelním štítkem, nožními štítky a v neposlední řadě křídélky. Všechny tyto komponenty zlepšují obtékání vzduchu okolo motocyklu a usměrňují proudy vzduchu k dokonalejšímu obtékání okolo jezdce. U závodních motocyklů se konstruktéři kapotáže soustředí zejména na přední část kapotáže a náběhové hrany. Zadní části nepřikládají takovou důležitost. Na běžných sériově vyráběných silničních motocyklech se kapotáže upravují kvůli stylu a designu, nebo vlivům počasí a pohodlí jezdce. [5]

Nesmíme opomenout, že každý dopravní prostředek se potřebuje určitým způsobem zbavovat přebytečného tepla z pohonného ústrojí, k čemuž také slouží vzduch. Výhodou pro designéry kapotáží je, že všechna silniční dopravní vozidla se pohybují zejména ve středních až vysokých rychlostech. Díky tomu se například u spalovacích motorů nemusí usměrňovat proud vzduchu přímo do spalovací komory a sání do motoru může být například pod sedlem.

Nejčastěji měřené síly, který mají velký podíl na chování motocyklu, jsou odporová síla, vztlak a boční síla. Tyto veličiny bývají nejčastěji měřeny při určování aerodynamických vlastností motocyklů. [5] [21]

3.1 Odporová síla motocyklů

V kapitole 2.6 bylo popsáno, jak funguje odporová síla u vozidel. U motocyklů je komplikované sladit tvar motocyklu a kapotáží tak, aby plynule navazoval na jezdce a součinitel odporu c_x s průmětem čelní plochy tělesa do roviny kolmé ke směru proudění S_x byl co nejmenší.

3 Aerodynamika motocyklu

Odporová síla F_D je proporční ku průmětu čelní plochy tělesa do roviny kolmé ke směru proudění S_x . Pokud zdvojnásobíme velikost S_x , síla F_D se zčtyřnásobí. Dále platí, že viskozita a rychlost proudícího vzduchu okolo obtékaného tělesa se rovná třetí mocnině výkonu motoru. Pokud se S_x zvýší dvakrát, požadovaný výkon motoru pro jízdu ve stejné rychlosti bude osminásobný. [5]

Optimalizovat čelní plochu S_x je vcelku snadné. Nesmíme ale zapomenout, že do S_x se počítá i jezdec, potažmo spolujezdec, kteří nejedou staticky, takže S_x se mění v průběhu jízdy. Z těchto důvodů nemůžeme optimalizovat S_x motocyklu do minimalistických rozměrů za účelem snížení F_D , protože po posazení jezdce na stroj by se S_x diametrálně změnil. S S_x motocyklu s jezdce tedy nepřímo souvisí i konstrukce motocyklu jako takového.



Obrázek 17: Zobrazení čelní plochy enduro motocyklu i s jezdce [26]

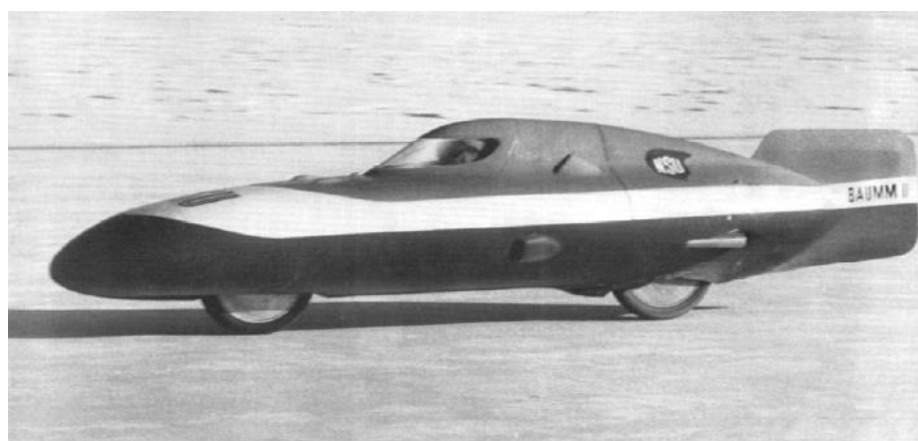
Na obrázku 17 můžeme pozorovat, že S_x enduro motocyklu bez předního větrného štítu skoro bez kapotáže, kvůli zmenšení váhy závodního stroje, je v poměru 2 : 1 ku S_x jezdce. Tyto případy bývají běžné pro stroje, kde je kladen důraz na ovladatelnost v nezpevněném terénu.

3 Aerodynamika motocyklu

Naopak na *obrázku 18* můžeme pozorovat jeden z nejaerodynamičtějších motocyklů na světě, který sestrojil H. P. Mueller s úmyslem překonání dosavadních rychlostních rekordů stanovených na motocyklu. Kdyby jezdec nemusel vidět na cestu, vůbec by se konstruktér tohoto motocyklu neobtěžoval s okénky a motocykl by měl hondotu S_x o tuto část nižší. Zadní ploutev se na motocykl připevňovala pouze pro pokusy o jízdu v rychlosti nad 240 km/h. [5]

V těchto podmínkách musíme brát v potaz i plochy tak malé, jako má brzdová páčka. I u té totiž bylo dokázáno, že má plochu dostatečně velkou na to, aby motocykl ve vysokých rychlostech sama brzdila. [27]

Nesmí být opomenuto, že tvar motocyklu H. P. Muellera je vhodný pouze pro přímou jízdu a jezdec stanovil rekord v rychlosti na solné pláni v Utahu, USA. Motocykl je pro použití do silničního prostoru naprosto nepoužitelný. Povrch solné pláně by se dal klasifikovat jako dokonale rovný. [5]



Obrázek 18: H. P. Mueller ve 125cc NSU „létajícím hamaku“ v roce 1956 překonávající 240 km/h [5]

Z *obrázků 17 a 18* můžeme také odvodit, že součinitel odporu c_x bude na obou motocyklech zcela odlišný. Ideální kombinací ke snížení odporové síly F_D a zachování nejvyšší možné rychlosti jsou závodní motocykly soutěže MotoGP.

3.2 Vnitřní proudění vzduchu

Každý motocykl potřebuje ke správnému fungování chladný čerstvý vzduch. V této podkapitole se budeme zabývat pouze chlazením a sáním spalovacích motorů, nikoli ostatními částmi motocyklů, například tlumiči. [5]

3 Aerodynamika motocyklu

V minulosti bylo provedeno mnoho pokusů o použití vysokého tlaku vzduchu, který se tvoří před motocyklem, k sání vzduchu do karburátorů motocyklu. Problém nastával ve vyšších rychlostech, kdy proud vzduchu byl tak velký, že karburátor nedokázal fungovat správně. S moderními vstříkovými tryskami však toto řešení fungovalo velmi dobře a ustálilo se řešení uzavření vzduchového sání v takzvaném „air boxu“ uvnitř motocyklu, viz *obrázek 19*. Tento „air box“ je chlazen rámem. [5]



Obrázek 19: Zobrazení airboxu na motocyklu Buell XB12R Firebolt

Využití vysokého tlaku před motocyklem však nemá takový efekt, jak se na první pohled zdá. Pouze u vysokých rychlostech je tento efekt měřitelný. U rychlosti 320 km/h je výkon vyšší o zhruba 5 %, což znamená zrychlení motocyklu na 325 km/h. U 160 km/h se pohybuje zlepšení výkonu okolo 0,5 %. [5]

3.3 Vztlak/přítlak motocyklu

Vztlak působící na motocykl zmenšuje hmotnost působící na kola motocyklu. Tato vlastnost může být velice nebezpečná, protože může převýšit gravitační a odporovou sílu působící na motocykl. Ten se pak stává neovladatelným.

Představme si, že odporová a vztlaková síla jsou v rovnováze a motocykl se pohybuje ve vysokých rychlostech. Po přidání plynu se motocyklu začne automaticky zvedat přední kolo, což nezkušeného jezdce nemile překvapí. Tento jev způsobuje moment působící na zadním kole a snaží se motocykl i s jezdce převrátit vzhůru nohama. V kombinaci s boční silou větru, působící silou ztlumičů nebo gyroskopických momentů

3 Aerodynamika motocyklu

generovaných koly, může být tento efekt velmi náročný na zvládnutí a pokračování v jízdě. [5]

Stejný výsledek bude mít zatížení zadního kola a odlehčení předního, což nám dokazuje, že tíhová síla se přenáší z předního na zadní kolo v závislosti na poloze těžiště a sil na něj působících.

Při zvýšení vztlaku působícího na motocykl můžeme zvýšit rychlost ve směrových obloucích na úkor brzdění ve vysokých rychlostech a na úkor trakčních a stabilních vlastností motocyklu. Pokud tento poznatek povedeme do extrému, z motocyklu by se vlastně stal letoun, který by mohl zatáčet s příčným zrychlením omezeným pouze vlastností konstrukce. Kdybychom mohli vytvořit aerodynamický přítlak ve vertikále pouze v ose motocyklu, například křídélky připevněnými z boku kapotáže, následovalo by zvýšení brzdného efektu, akcelerace a průjezdné rychlosti v zatáčkách. Zajímavým vedlejším efektem by byl menší úhel náklonu v zatáčkách. [5]

3.4 Aerodynamika motocyklů závodících v MotoGP

Motocykly závodící v seriálu mistrovství světa MotoGP nejsou sériově vyráběny. Jejich návrh je vytvořen za účelem dosažení co nejvyšší rychlosti a ovladatelnosti. I s těmito kritérii však aerodynamický odpor při rychlosti 250 km/h překonává 90 % výkonu. [27]



Obrázek 20: Marq Marquez při závodě Gran Prix America 2022 [28]

Na obrázku 20 vidíme motocyklového jezdce Marqa Marqueze, který je přitisknutý k nádrži motocyklu, rukama a nohama svírá tělo motocyklu pro co nejmenší S_x . Hlavu se snaží „schovat“ co nejvíce za čelní větrný štít, tzv. „plexi“. Všechny tyto úkony činí také kvůli zmenšení úplavu, který se tvoří za koncovou hranou kapotáží a plexi. Čím kratší je

3 Aerodynamika motocyklu

vzdálenost mezi těmito dvěma prvky, tím nabývá Reynoldsovo číslo v úpravu nižších hodnot, takže přechod do laminárního obtékání vzduchu okolo helmy je plynulejší. To platí také pro ostatní části jezdce, jako nohy, tělo, ruce.

Pod písmenem S v reklamním sloganu firmy REPSOL jsou dva otvory, tzv. ejektory. Ty fungují jako výfuk ohřátých proudů z tepelného výměníku motoru. Zajímavé je, že rychlostí proudění okolo těchto výfuků se vytváří podtlak, který urychluje proudění vzduchu ve výměníku, a motor se pak může lépe chladit. To má za důsledek zvýšení výkonu motoru. Podobný princip použila již v roce 1967 závodní verze Tatra 603, která měla na zádním nárazníku dva velké ejektory vypadající jako obrovské výfuky. Výsledek těchto ejektorů byl, že výkon motoru se zvýšil o 20 koní oproti verzi chlazené ventilátorem. [29]

Z hlediska aerodynamiky je v MotoGP velmi zajímavý ročník 2016, kdy se začala objevovat křídélka na boční straně motocyklu. Ta generovala větší přítlak na přední kolo, takže motocykl byl stabilnější. Křídélka se však neobjevovala na úplně všech strojích MotoGP a výsledky také jasně nenaznačovaly, jestli je lepší jezdit s křídélky nebo bez nich. Zcela jasná souvislost se však ukázala mezi použitím křídélek a fyzickou vytrvalostí jezdce, protože ovládání motocyklu bylo díky přítlaku způsobenému křídélky výrazně náročnější. Na všech strojích se křídélka objevovala na méně složitých okruzích, kdežto na složitých okruzích jen na strojích fyzicky zdatnějších jezdců. Jedním z jezdců, který pro většinu závodů nepoužil křídélka, je Dani Pedrosa, který má výšku 158 cm a váží okolo 55 kg. To jsou míry ideálního jezdce, ale pokud má tento ideální jezdec překlápět motocykl ze strany na stranu, na celý závod mu síly nestačí. [25] [30]

Křídélka byla nakonec pro ročník 2017 zakázána kvůli obavám jezdců o jejich nebezpečnost mimo jiné při pádu. Mnoho jezdců se také svěřilo, že velmi nebezpečná byla i jízda ve vysokých rychlostech za motocyklem s křídélky. Usměrnění proudu vzduchu křídélky nadzvedávalo následujícímu motocyklu přední kolo (viz podkapitola 4.3) a při 340 km/h, kdy každá nelinearita může být fatální, rozvlnilo celý motocykl. [25]

3.5 Boční síla

U aerodynamiky motocyklu se nesmí zapomínat na vlivy větru a okolního vzduchu, který na stabilitu jízdy vozidla působí. S úhlem natočení proudění bočního větru se mění S_x a s ním související c_x . Výslednici sil působících aerodynamických odporů z jízdy vpřed

3 Aerodynamika motocyklu

a bočního větru musí jezdec kompenzovat například nakloněním motocyklu do směru opačného oproti proudění bočního větru.

3.6 Aerodynamika jezdce

Základním požadavkem kombinézy a přilby je samozřejmě ochrana, ale výrobci těchto bezpečnostních prvků dbají na všechny požadavky své klientely. Zlepšování těchto prvků se prakticky provádí pouze exaktně. V aerodynamických tunelech se na těchto prvcích měří odolnost proti proudění, tepelné mapy a chlazení jezdce, podle kterých se pak prvky odvětrávají. V neposlední řadě se zkoumá aerodynamický odpor, aby byly odstraněny zbytečné ztráty proudícím vzduchem. [31]

3.7 Měření aerodynamických účinků na motocykl

Tradičně a s největší přesností se měří aerodynamické vlastnosti v aerodynamickém (nebo také větrném) tunelu. Tato metoda je vysoce nákladná, a proto se v dnešní době používají ve velké míře počítačové simulace proudění okolo motocyklů.

Jednostopé dopravní prostředky jsou velmi složité geometrické objekty, u kterých se nedá jednoduše teoreticky vypočítat aerodynamických sil výše popsaných. Tyto výpočty jsou založeny na empiricky podložených zkušenostech výpočtáře.

3.7.1 Aerodynamické tunely

Aerodynamické tunely jsou nejpřesnějším nástrojem ke zjištění aerodynamických vlastností pozemních vozidel. Motocykly by kvůli rozložení váhy a tvaru neměly být měřeny bez účinků jezdce.

Zjednodušeně řečeno, aerodynamické tunely jsou velké trubice, ve kterých proudí médium, nejčastěji vzduch, z jedné strany trubice na druhou. Objekt je upevněn tak, aby se v tunelu nepohnul, ovšem je záhodno nasimulovat stejné podmínky, jako při reálném použití. U letounů je tento požadavek splněn již proudícím vzduchem, u pozemních vozidel jsou důležitými prvky také pohyblivá vozovka a pohyblivá kola měřeného objektu. [32] [33]

V aerodynamickém tunelu nemusí být měřeny pouze objekty ve skutečné velikosti, ale i poměrově menší. Škálování modelů je velmi zajímavá část pokusu na zmenšeném

3 Aerodynamika motocyklu

modelu, protože čím menší měřítko k měřenému objektu je, tím menší je přesnost a interpolace dat naměřených na modelu ku reálnému předmětu. [5]

Tunely, do kterých se vejde motocykl ve skutečné velikosti, bývají velmi drahé a na světě jich není mnoho. Z tohoto důvodu se častěji dělají pokusy na zmenšených modelech. Problém mimo jiné nastává v přesnosti vytvoření modelu motocyklu. Představme si, že vytváříme model v měřítku 1 : 5 a přesnost provedení u reálného motocyklu byla 1 mm. Na pětikrát menším modelu by tolerance provedení musela být 0,2 mm, aby byly výsledky z měření přesné. [5]

3.7.2 Typy aerodynamických tunelů

Aerodynamické tunely rozdělujeme podle rychlosti média, nejčastěji vzduchu, v nich proudících na nízkorychlostní, vysokorychlostní, podzvukové a nadzvukové. [32]

V nízkorychlostních tunelech proudění vzduchu v měřicím prostoru podléhá stlačitelnosti v tak malé míře, že ji nemůžeme měřit a zanedbáváme ji. Vysokorychlostní tunely již dokáží vyvinout rychlost proudění dostatečně vysokou na pozorování jevů stlačitelnosti vzduchu. [33] [34]

Podzvukové tunely dokáží vyvinout rychlost vzduchu v měřicím prostoru dostatečně vysokou na pozorování jevů stlačitelnosti plynu, nepřesahují však rychlosti zvuku. Tyto tunely také nazýváme subsonickými. Nadzvukové (supersonické) tunely dokáží produkovat rychlost nerušeného proudu vzduchu v měřicím prostoru přesahující rychlost vzduchu. [33] [34]

Dále existují například kryogenické větrné tunely, které proudící vzduch vysoce podchladí, čímž sníží jeho viskozitu. Díky tomu se nemusí v tunelu násobit rychlost dle Reynoldsova čísla Re , ale dosáhneme přesných výsledků za nižších rychlostí proudění. V neposlední řadě existují tunely, kde proudícím médiem mohou být kapaliny pro zkoumání hydrodynamických jevů.

3.7.3 Metody měření v aerodynamickém tunelu

Při měření v aerodynamickém tunelu se musí stanovit, zdali chceme provést vizualizační, nebo numerické měření. U vizualizačních měření, jak již název napovídá, se používají různé metody měření pro vizualizaci proudu tekutiny okolo obtékaného tělesa pro lepší

3 Aerodynamika motocyklu

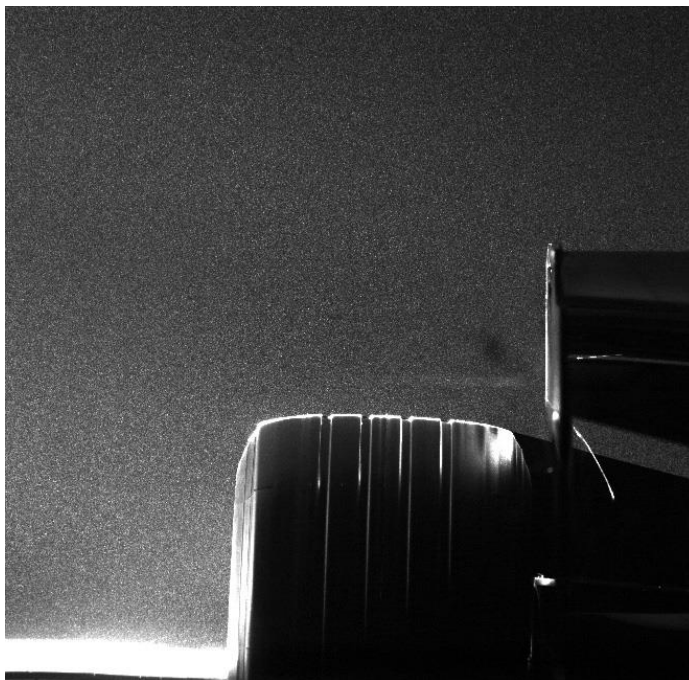
pochopení aerodynamických jevů. Mezi nejčastější vizualizační metody patří metoda kouřem, „bavlnková“ metoda nebo metoda PIV. Při numerickém měření se používají například aerodynamické váhy.



Obrázek 21: Zobrazení kouřové a „bavlnkové“ metody [33]

Na *obrázku 21* můžeme pozorovat vizualizaci kouřovou a „bavlnkovou“ metodou. Kouřová metoda vizualizuje proudění vzduchu kouřem vypuštěným z jedné nebo více trysek na měřený objekt. „Bavlnková“ metoda má název odvozený od bavlnek, které se nejčastěji používají jako materiál látky nastříhané na tenké proužky nalepené na obtékaný objekt. Z dalších možných materiálů pro tuto metodu je papír nebo jiná látka. Výsledky těchto metod nelze jednoduše kvantifikovat. [32]

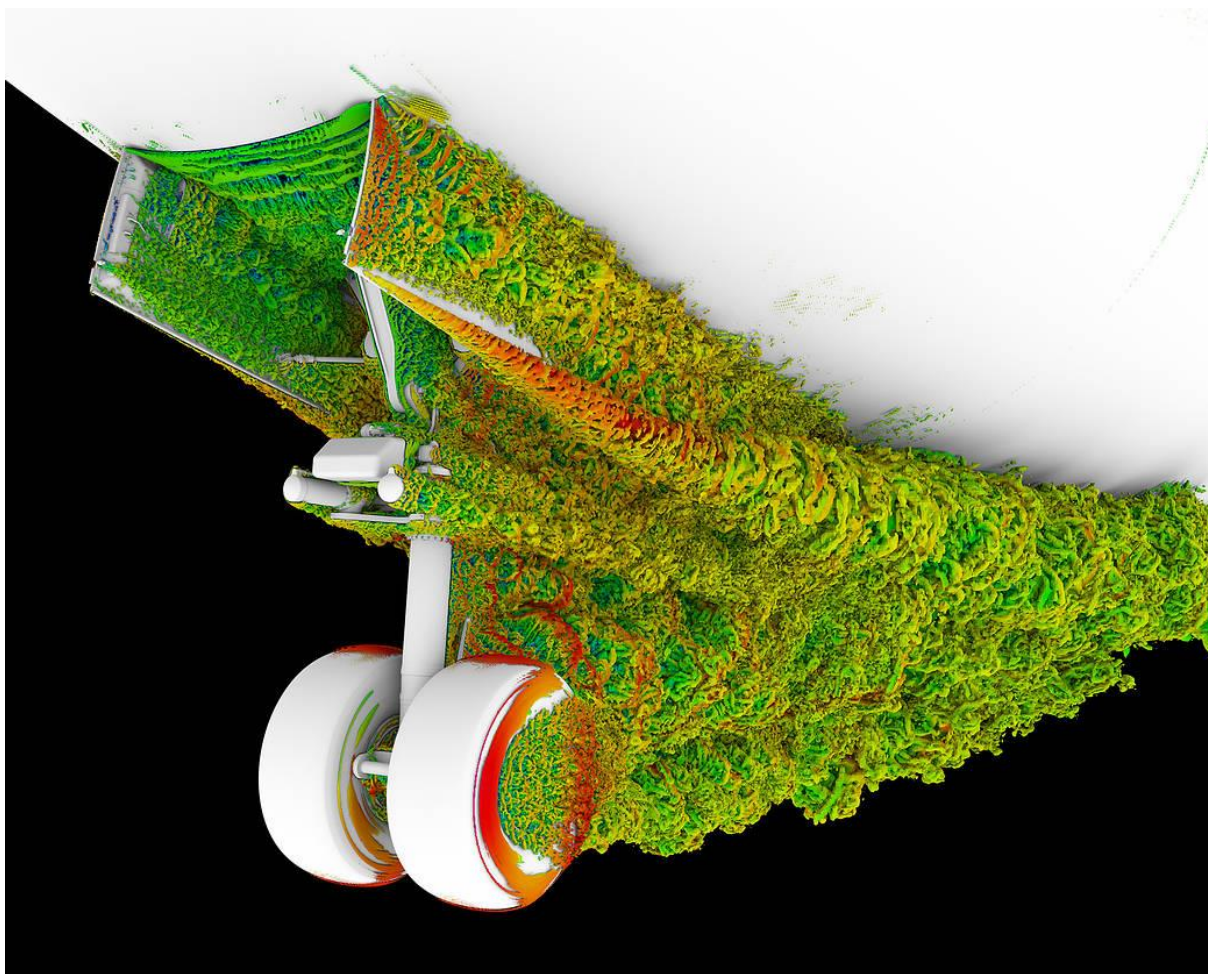
Pro zpřesnění vizualizačních metod se používají laserové metody, například metoda PIV (Particle Image Velocimetry). PIV umožňuje vizualizovat proudění téměř přesně, jak se objevuje v aerodynamickém tunelu, aniž by nějak ovlivňovalo samotné proudění vzduchu. Při této metodě se musí do proudícího média přidat částice podobné hustoty, jako má proudící tekutina. Tyto částice jsou zcela zásadní součástí této metody, protože právě ty jsou měřeny na základě laserových vysokorychlostních kamer a mohou být kvantifikovány. Na *obrázku 22* můžeme pozorovat částice proudící spolu se vzduchem, který proudí okolo zadní pneumatiky vozu formule 1. Světlé části na fotografii znázorňují měřená místa osvětlená měřicím laserem. [35]



Obrázek 22: Zobrazení metody PIV [35]

3.7.4 Simulace

Kvůli vysoké cenové náročnosti experimentálních aerodynamických pokusů se s vzrůstajícím výkonem počítačů začaly rozmáhat numerické simulace proudění. Tyto simulace mají velkou výhodu, protože výpočty nejsou ovlivněny tolerancí provedení měřeného modelu a model může být libovolně měněn v rámci měření. To snižuje velkou měrou náklady na měření. Na *obrázku 23* můžeme pozorovat proudění vzduchu okolo vysunutého podvozku letounu. Podobné simulace se samozřejmě dají vytvořit okolo jakéhokoli předmětu, u kterého potřebujeme určit aerodynamické vlastnosti, tedy i motocyklu. [36]



Obrázek 23: Simulace proudění vzduchu okolo podvozku letounu [36]

4 Výroba modelu pro experiment

Tým CTU Lions se účastní soutěže MotoStudent, která každé dva roky pořádá závodní ročník, jehož součástí je vyrobení celého závodního motocyklu. Pro ročník 2019–2021 (prodloužený o koronavirovou pauzu) tým vyvinul a postavil motocykl CTU Lions EVO 2.0 Electric. Celková hmotnost motocyklu je 165 kg, výkon motoru je 13 kW a špičkových 42 kW, točivý moment je 95 Nm a maximální rychlost motocyklu je 190 km/h. Kvůli finanční náročnosti měření na skutečném motocyklu a dostupnosti větrného tunelu, kam se celý motocykl nevešel, bylo jedinou možností vyrobit model v měřítku 1 : 5. V praktické části této práce byl proveden experiment zaměřený na aerodynamické vlastnosti motocyklu CTU Lions EVO 2.0 Electric.

Při výrobě modelu bylo postupováno od úpravy kapotáží v softwaru GeomegicDesignX přes 3D tisk aerodynamicky nejdůležitějších komponent motocyklu, úpravu povrchu vytisknutých částí a lakování až po složení modelu motocyklu do finální podoby. V této kapitole budou podrobně popsány kroky výroby modelu motocyklu CTU Lions EVO 2.0 Electric v měřítku 1 : 5.

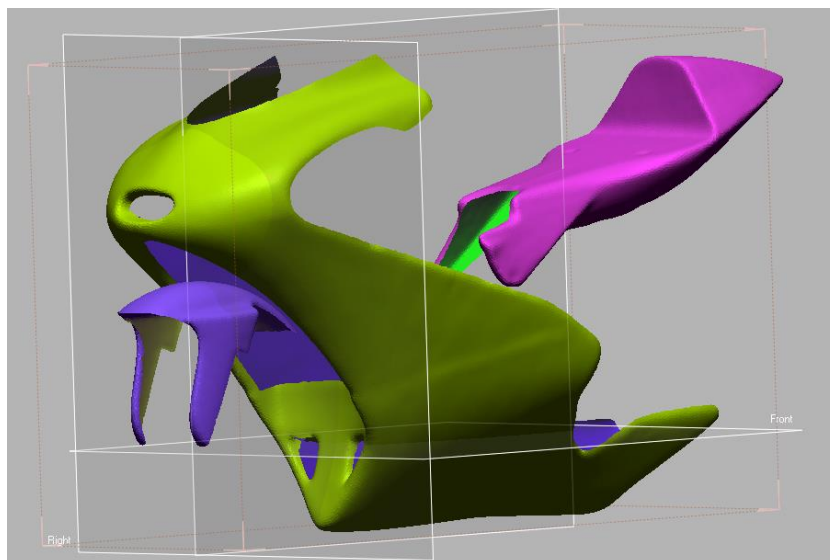
4.1 Softwarová úprava kapotáží

Pro úspěšné vytisknutí kapotáží na 3D tiskárně musela být připravena data do určeného formátu. Z tohoto důvodu muselo být učiněno několik kroků k jejich filtraci a úpravě.

Týmem CTU Lions byly poskytnuty kapotáže těla, předního blatníku a takzvané podsedlovky k poslednímu jimi vyvinutému motocyklu ve formátu .stl. Po zobrazení kapotáží v softwaru GeomegicDesignX bylo zjištěno, že kapotáže nemají tloušťku a od naskenování nebyly nijak upravované. Data byla pouze mesh (sít) bodů. Na vývoj motocyklu tyto vlastnosti souborů neměly žádný velký vliv, ale pro 3D tisk modelu v měřítku 1 : 5 bylo velmi důležité vyhladit meshe bodů a přidat plochám tloušťku. Na *obrázku 24* jsou vyobrazena data poskytnutá týmem.

Nejprve byly vyhlazeny hrany kapotáží ve funkčním balíčku „Polygons“, kde díky funkci „Edit Boundaries“ byly vyhlazeny všechny hrany kapotáží metodou „Smooth“ a zjemňujícím hlediskem 2 mm. Tento postup byl opakován třikrát pro lepší zachování původního tvaru kapotáží a zároveň pro dostatečné vyhlazení hran.

4 Výroba modelu pro experiment



Obrázek 24: Zobrazení kapotáží motocyklu po nahrání do softwaru GeometricDesign X (tzv. raw data)

Po vyhlazení hran byla provedena funkce „Global Remesh“ pro vytvoření nového meshe a funkce „Healing Wizard“ pro automatické opravení chyb způsobených novým síťováním. Přepracovaný mesh vypadal na první pohled velmi podobně jako ten původní, ale po bližším přezkoumání byly hrany vyhlazené, plochy měly nové zasíťování a byly připraveny k vytažení do třetího rozměru. Vytažením získají tloušťku potřebnou pro 3D tisk.

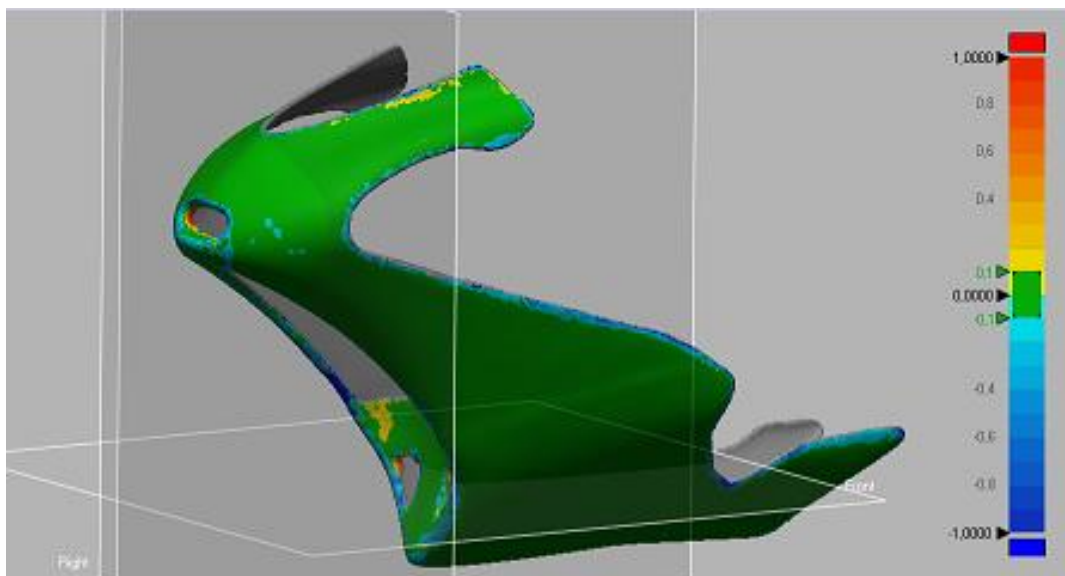
Ve stejném balíčku funkcí, jako byly provedeny ty předešlé, se nachází funkce „Thicken“. Za použití metody „Surface“ byla vytažena tloušťka dovnitř kapotáže směrem „Direction2“. Šířka tohoto vytažení byla 10 mm, aby byla v měřítku 1 : 5 šířka stěny 2 mm.

Na *obrázku 25* můžeme pozorovat přesnost vytažené kapotáže těla motocyklu vůči skenované kapotáži. Hlavní plochy kapotáže jsou v absolutní přesnosti k naskenovaným kapotážím. Největší odchylky jsou znázorněny na hranách kapotáže, ty jsou ovšem očekávané kvůli jejich předešlému vyhlazení. Největší odchylka má hodnotu 1 mm, což je v toleranci s ohledem na měřítko modelu. Odchylka na vytisknutém měřeném modelu bude 0,2 mm. Velmi podobnou přesnost můžeme pozorovat i na ostatních částech kapotáže. Výsledek vytažených kapotáží byl vyexportován ve formátu .stl.

Pro vytvoření modelu bylo potřeba vyexportovat data přední vidlice spolu s takzvanými brýlemi a řídítky. Na druhou stranu modelu motocyklu byly vyexportovány všechny části kyvné vidlice. V neposlední řadě bylo pro přesnější model motocyklu potřeba

4 Výroba modelu pro experiment

vyexportovat obě kola a kapotáž krytu baterií motocyklu. Data byla exportována z formátu .scdoc do formátu .stl za pomoci softwaru Ansys SpaceClaim.



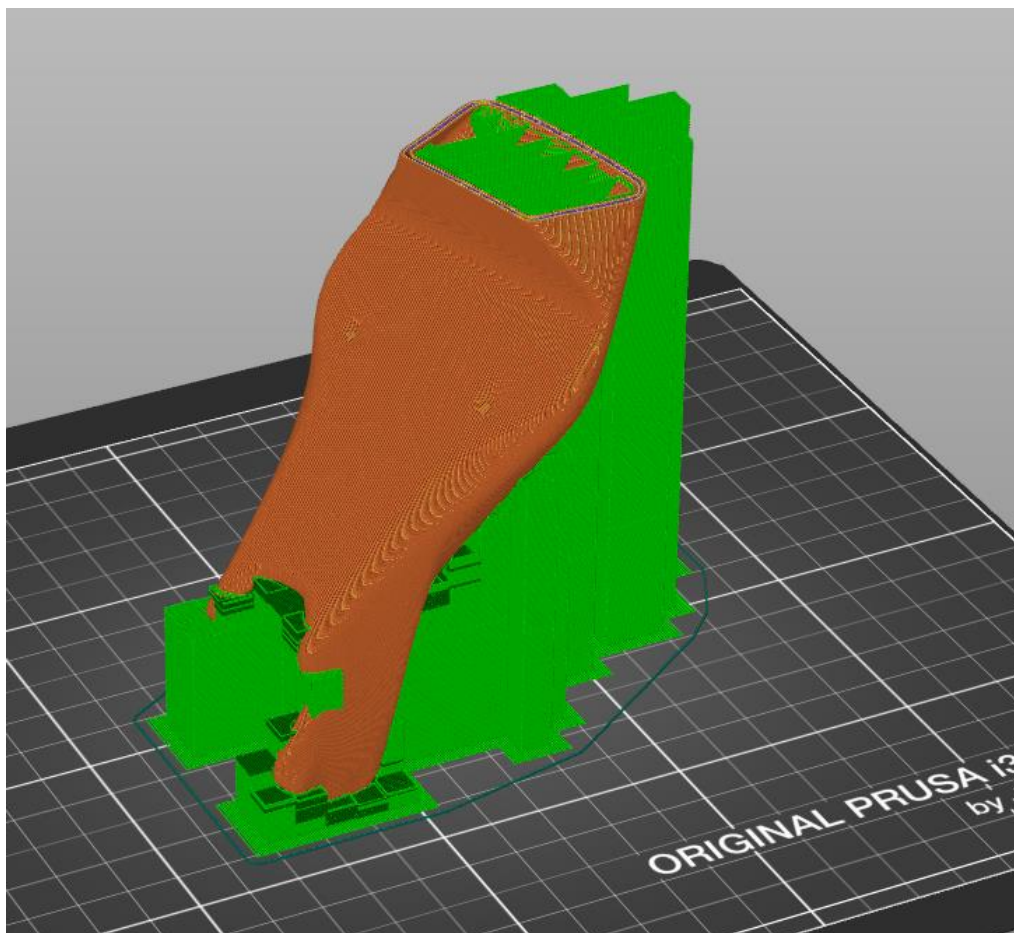
Obrázek 25: Přesnost povrchu skenovaných kapotáží a kapotáží s přidanou tloušťkou

4.2 3D tisk

Po úpravě dat do vhodné podoby pro 3D tisk byly jednotlivé části vytisknuty z materiálu PLA na tiskárnách Original Prusa MINI+ a Original Prusa i3 MK3S. Data pro tiskárny byla vytvořena v softwaru PrusaSlicer. Nejprve bylo vytisknuto pět pokusů kapotáže ochrany baterií vždy v různých tloušťkách filamentu od 0,1 mm do 0,3 mm a rozdílnou tryskou šířky 0,4 a 0,6 mm. Pro potřeby měření v aerodynamickém tunelu byla vybrána konfigurace 0,2 mm šířky tisku filamentu a 0,4 mm tlusté trysky.

Nastavení tisku v softwaru PrusaSlicer bylo vcelku defaultní, měnila se pozice švu tisku na náhodnou, vzor výplně na gyroid a vzdálenost podpěr se zvětšila na 6 mm. Na obrázku 26 můžeme vidět říznutá data sliceru v zadní části podsedlovky. Oranžovou barvou je znázorněna stěna tisknutého objektu, fialovou je znázorněna výplň objektu a zelenou jsou vykresleny podpěry. Ty nám umožňují tisknout složité útvary s převisem. Podpory byly po vytisknutí odňaty z modelu pomocí ostrého nože a precizních štípacích kleští využívaných hlavně na ploché spoje.

Nejdelší dobu trval tisk kapotáže celého těla a kola. Každá z těchto položek se tiskla skoro 18 hodin.



Obrázek 26: Zobrazení podsedlovky v PrusaSliceru

4.3 Úprava a spojování modelu

Po vytisknutí všech potřebných částí motocyklu musely být vnější plochy upraveny, aby neměly na omak citelné vrstvy tisknutého filamentu. Za tímto účelem byl použit smirkový papír nejprve zrnitosti 80, později 220. Po upravení všech částí kapotáže, kol a předních vidlic byl použit plnič ve spreji, který byl nanesen na povrch těchto částí ve třech vrstvách. Stav po aplikování plniče na povrch je viditelný na *obrázku 27*. Po úplném zaschnutí plniče byl použit smirkový papír zrnitosti 400 pro úplné vyhlazení všech nerovností na povrchu modelu.

Po porovnání všech částí vytisknuté kapotáže se skutečnou kapotáží motocyklu bylo zjištěno, že konstruktéři týmu CTU Lions upravovali kapotáže z hlediska jejich tvaru a ty neodpovídaly naskenovaným datům. Kapotáže musely být upraveny tak, aby odpovídaly reálnému motocyklu. Úprava spočívala v odříznutí přední části podsedlovky a zadní části kapotáže celého motocyklu. Přední blatník byl upilován ze strany dotýkající se předních vidlic kvůli lepšímu dosednutí ploch těchto součástí.

4 Výroba modelu pro experiment



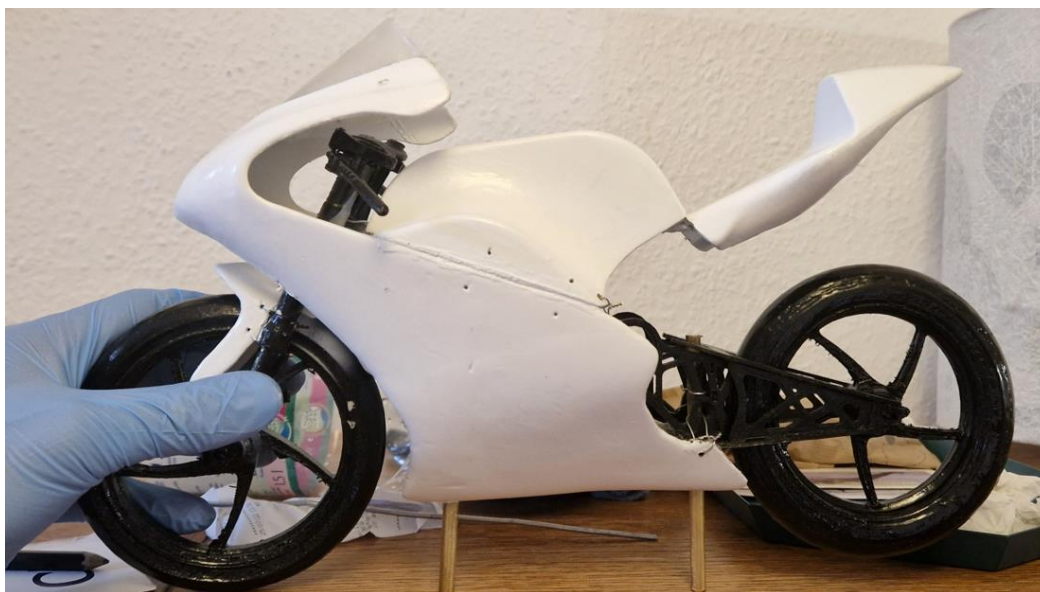
Obrázek 27: Schnutí všech částí motocyklu po aplikování plniče

Do spodní části kapotáže celého těla musely být zavedeny dvě mosazné tyče o průměru 6 mm pro uchycení v aerodynamických vahách ve větrném tunelu. Tyče byly uchyceny jen za pomoci tření v dřevěné lati, která byla připevněna motorovým silikonem do dna kapotáže celého těla. Čelní štít byl vyroben z papírenské folie o tloušťce 0,5 mm nahřátím a následným tvarováním do potřebného tvaru.

Části kyvné vidlice nebyly nijak povrchově upravovány z důvodu přesného 3D tisku. Všechny části byly spojeny pomocí nerezového drátku, sekundového lepidla a pružinového drátu o průměru 3 mm, který byl použit jako osička pro kola a podpěra pro podsedlovku.

Výsledný model byl nalakován lesklou bílou a černou barvou. Finální úpravy byly provedeny barvou a štětečkem. Jediné mosazné tyče zůstaly bez barvy kvůli přesnosti jejich profilu a lepšímu upevnění v aerodynamických vahách. Na *obrázku 28* můžeme vidět finální verzi motocyklu bez polepů.

4 Výroba modelu pro experiment



Obrázek 28: Finální verze motocyklu EVO 2.0 Electric bez polepů

Při porovnání vytvořeného modelu v měřítku 1 : 5 ku skutečnému motocyklu, viditelném na obrázku 29, můžeme vidět nepatrné nepřesnosti na čelním štítu, který není tak dokonale vypouklý jako na skutečném motocyklu. Dále je přední blatník na skutečném motocyklu v mnohem menší vzdálenosti od předního kola než na modelu. V neposlední řadě je patrné, že na modelu kapotáž celého těla motocyklu lícuje přesně s kapotáží krytu baterií, což se na skutečném motocyklu neděje. Tyto nedostatky modelu byly vyhodnoceny jako nepatrné a nebyla jim přisouzena velká míra závažnosti pro validaci výsledků měření.

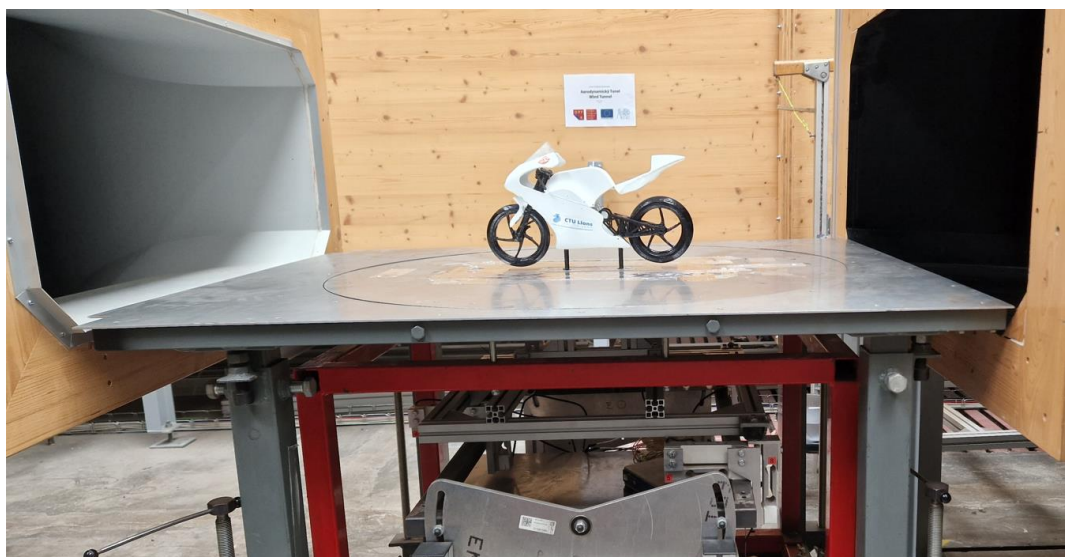


Obrázek 29: Motocykl CTU Lions EVO 2.0 Electric, Aragón 2021

5 Měření ve větrném tunelu

Měření bylo provedeno v laboratořích Ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky Fakulty strojní Českého vysokého učení technického pod vedením Ing. Michala Schmirlera, Ph.D. Měření probíhalo ve větrném tunelu s měřicím prostorem o velikosti 450 mm x 900 mm. Maximální rychlost proudění vzduchu je 60 m/s a je vyvinuta axiálním ventilátorem s příkonem 60 kW. Při 40 m/s je intenzita turbulencí okolo 1,5 %. Větrný tunel má uzavřený cirkulační tunel s otevřeným měřicím prostorem.

Měření probíhalo za pomoci aerodynamických vah, které měřily odporové síly ve třech osách. Veličiny, které tyto váhy zaznamenávají, jsou aerodynamický odpor, vztlak a boční síla. Sběr dat probíhá pomocí systému National Instruments a vyhodnocení dat v systému LabView.



Obrázek 30: Model motocyklu upevněný v aerodynamických vahách

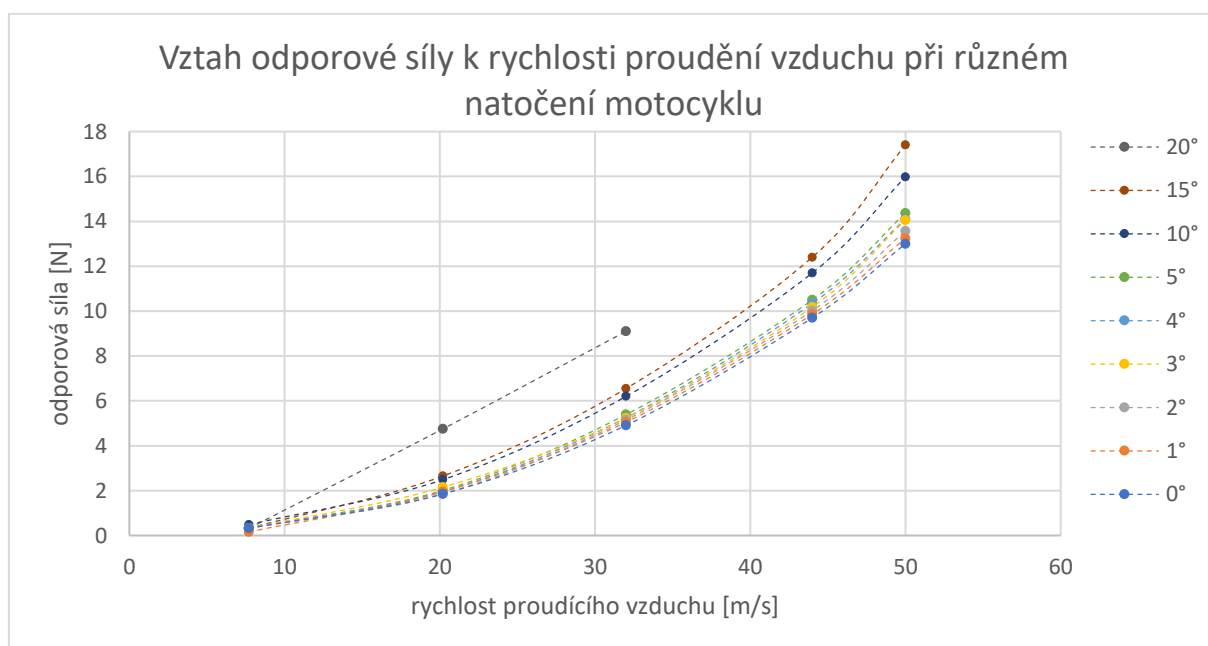
Měření probíhalo nejprve na samostatných trubičkách vystupujících z aerodynamických vah, do kterých se poté zasunuly mosazné tyče s modelem. Měření na samostatných trubičkách udalo hodnoty, které musely být odečteny od měření na modelu celého motocyklu. Měřilo se při rychlostech proudícího vzduchu 7,7 m/s, 20,2 m/s, 32 m/s, 44 m/s a 50 m/s a každá z těchto variant při úhlu natočení od 0° do 20°. Natáčení probíhalo v ose jízdy motocyklu na obě strany. Data z měření obou stran byla shodná, a z tohoto důvodu byla vyhodnocena pouze pro jednu stranu. Model byl nainstalován na měřicí váhy tak, aby kola byla 3 mm nad měřicí deskou a mohla se samovolně točit.

6 Vyhodnocení měření

Po získání dat a odečtení odporových, vztlakových a bočních sil trubiček od výsledků měření bylo možné výsledky měření vyhodnotit. Měření u natočení motocyklu 20° od počátečního směru natočení motocyklu, které bylo přímo v ose proudění, muselo být přerušeno z důvodu bezpečnosti větrného tunelu a modelu už při rychlosti 32 m/s. Model se při vyšších rychlostech nekontrolovaně rozechvěl a měření by i z tohoto důvodu bylo nepřesné a výsledky by byly zkreslené. Data z měření jsou dostupná v příloze 1.

V grafu 2 je znázorněn vývoj odporové síly v ose motocyklu k rychlosti proudění při různém natočení modelu motocyklu. Odporová síla F_D je s úhlem natočení vyšší a spojnice bodů v různých rychlostech připomíná hyperbolický průběh křivek. Výjimkou se může zdát F_D pro úhel natočení motocyklu 20° , který má průběh pouze lineární. Z důvodu absence měřených dat v rychlostech 44 m/s a 50 m/s nemůžeme tento závěr vyvrátit. Předpokládá se, že by spojnice bodů i pro úhel natočení 20° byla podobného průběhu jako u ostatních natočení.

Dále v grafu 2 můžeme pozorovat kvadratický nárůst odporové síly u všech měřených spojnic bodů od nulového natočení do natočení 15° . To nám potvrzuje teoretický předpoklad odporové síly v podkapitole (2.6).

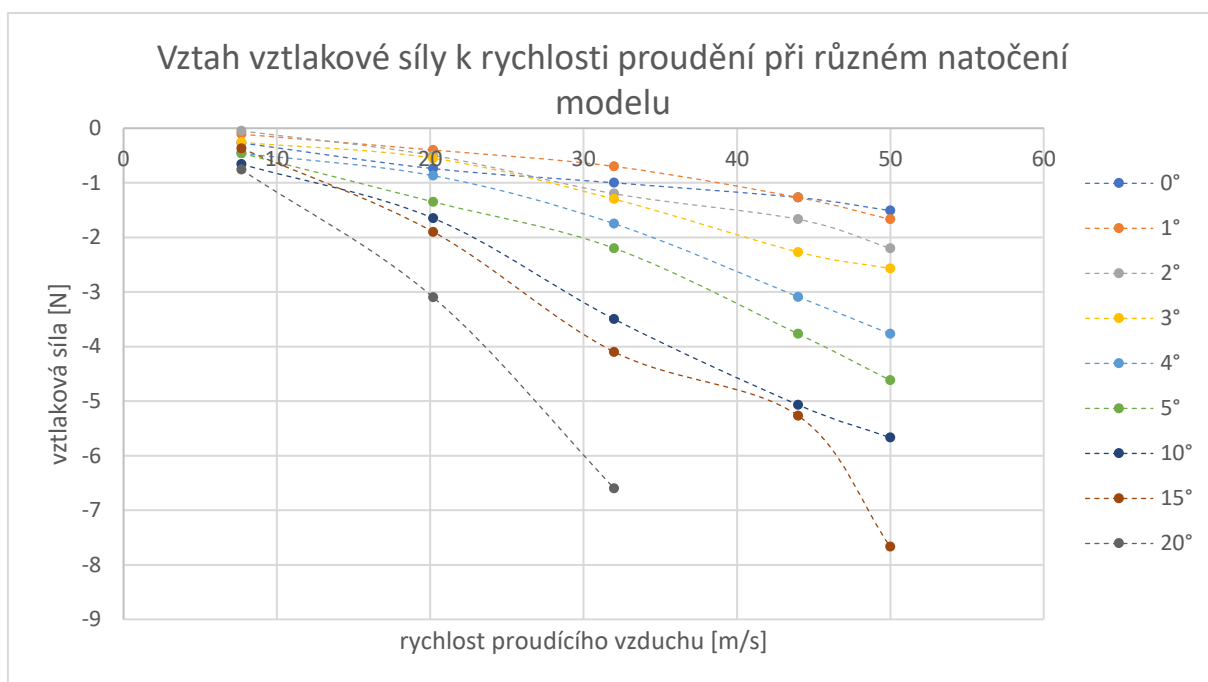


Graf 2: Vztah odporové síly k rychlosti proudění vzduchu v různém natočení modelu

6 Vyhodnocení měření

Nejvyšší hodnota v *grafu 2* je vyvolána odporovou silou v natočení 15° od počáteční osy a rychlosti proudu vzduchu 50 m/s . Hodnota síly u tohoto měření je $17,4 \text{ N}$. Nejnižší hodnota při stejné rychlosti proudu vzduchu byla při nulovém natočení motocyklu se silou 13 N . Z pohledu jízdy motocyklu je toto zjištění očekávané, protože se všeobecně počítá, že motocykl pojedě nejčastěji ve svojí ose. Konstrukteři na základě tohoto předpokladu navrhují motocykly a jejich kapotáže. Při nejmenší odporové síle má motocykl také nejnižší spotřebu paliva.

Trend nejvyšších hodnot při natočení 15° , potažmo 20° pokračuje i v *grafu 3*, který znázorňuje vztah vztlakové síly k rychlosti proudícího vzduchu. Zde můžeme vidět, že síla přitlaku je v úhlu natočení modelu 0° větší při rychlostech od 0 m/s do 28 m/s než u všech natočení motocyklu od 1° do 4° . Tento jev může být vysvětlen změnou úhlu náběhu vzduchu, který obtékal motocykl ve spojení s designem kapotáže a celého motocyklu.

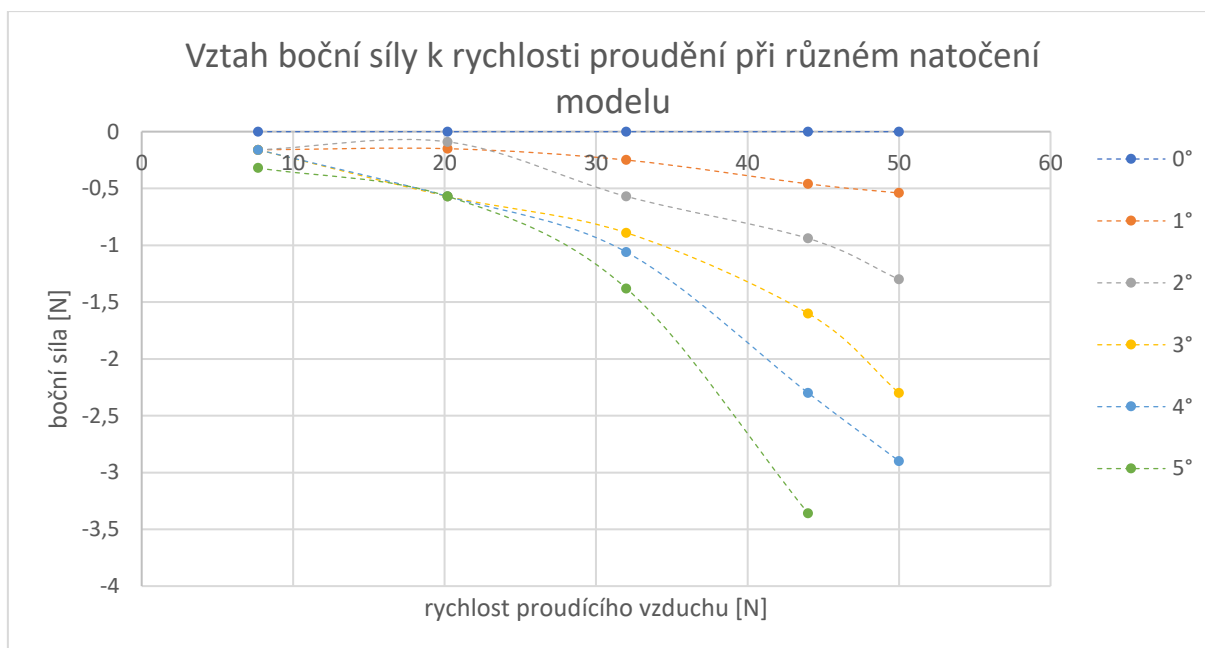


Graf 3: Vztah vztlakové síly k rychlosti proudění při různém natočení modelu

Z hlediska rostoucí přitlačné síly se změnou úhlu náběhu se můžeme domnívat, že přitlak motocyklu bude větší s působením síly bočního větru minimálně do úhlu 20° . Nesmíme však zapomenout, že s úhlem natočení se mění i odporová a boční síla, nemůžeme tedy tuto domněnku jednoduše potvrdit.

6 Vyhodnocení měření

Při vyhodnocování se ukázalo, že byla provedena chyba v měření boční síly pravděpodobným opřením měřicí trubičky o stěnu měřicí desky při natočení motocyklu nad 5°. Z tohoto důvodu *graf 4* znázorňuje vztah boční síly k rychlosti proudění pouze do tohoto úhlu. Jak je z grafu patrné, v nulovém natočení osy motocyklu k ose proudění byla boční síla nulová ve všech rychlostech. Díky tomu můžeme tvrdit, že motocykl je osově souměrný. Proudění vzduchu v přímém směru na jízdu nemá žádný vliv na boční stabilitu motocyklu.



Graf 4: Vztah boční síly k rychlosti proudění vzduchu v různém natočení motocyklu

V *grafu 4* můžeme pozorovat, že hodnota boční síly působící na motocykl v úhlu natočení 2° při rychlosti 20 m/s je nižší než hodnota u motocyklu natočeného pouze o 1°. Rozdíl těchto dvou hodnot je 0,06 N a nemůže mu být přikládána velká váha. Z pokusu vyplývá, že boční síla roste úměrně k úhlu natočení. Tento výsledek jen potvrzuje zkušenost každého motocyklového jezdce, který při poryvech větru musí více naklonit motocykl pro stálou jízdu v ose motocyklu.

Součinitel odporu c_x se mění s každou rychlostí a silou působící na motocykl. Z důvodu změny průmětu čelní plochy tělesa do roviny kolmé ke směru proudění S_x s každým úhlem natočení a nepřesnosti jeho výpočtu byly hodnoty c_x vypočteny jen pro směr přímý.

7 Přepočet výsledků z modelu na skutečný motocykl

Měření na modelu 1 : 5 bylo provedeno za účelem aplikace výsledků na skutečný motocykl EVO 2.0 Electric. Díky podobnostním číslům můžeme výsledky z modelu v měřítku 1 : 5 validovat. K validaci bylo využito Reynoldsova čísla Re , viz podkapitola 2.7.1.

V přímém směru je hodnota Re na modelu motocyklu nad 500 000 pouze u proudění rychlostí nad 30 m/s. Z tohoto důvodu bylo c_x vypočteno pouze pro rychlosti proudění 32 m/s, 44 m/s a 50 m/s, aby bylo validní k přepočtu na model celého motocyklu.

Tabulka 2: Hodnoty c_x změřené na modelu v měřítku 1 : 5

v [m/s] / c_x [-]	32 m/s	44 m/s	50 m/s
c_x	0,094967	0,099233	0,102989

Tyto hodnoty c_x jsou vypočítány bez jezdce. Při validaci s hodnotami c_x z jiných silničních motocyklů s jezdce jsou odpovídající. Výzkumníci z technické univerzity v Bruneji prováděli podobný výzkum a jejich hodnoty c_x se pro odpor motocyklu s jezdce pohybovaly okolo 0,15–0,3 při nulovém úhlu natočení. [37]

Díky podobnostnímu koeficientu Re můžeme použít pro výpočet odporové síly F_D hodnotu c_x vypočtenou na modelu. Při výpočtu nesmíme zapomenout, že již nepočítáme na modelu v měřítku 1 : 5, ale na skutečném motocyklu. Z tohoto důvodu bude hodnota S_x pětikrát větší. V tabulce můžeme vidět výsledek přepočtu pro různé rychlosti.

Tabulka 3: Výsledky odporové síly F_D

v [m/s] / F_D [N]	32 m/s	44 m/s	50 m/s
Odporová síla F_D [N]	24,55	48,5	65

Po přepočtení vidíme, že F_D jedoucího motocyklu bez jezdce při rychlosti 50 m/s je 65 N při započítání hodnoty c_x 0,102989. Z těchto poznatků je zřejmé, že aerodynamický tvar motocyklu se blíží ideálu a nemusí se nijak upravovat.

Závěr

Cílem této práce bylo porozumění aerodynamickým vlastnostem závodního motocyklu. Poznatky byly využity pro pochopení aerodynamických dějů a při provedení experimentu s modelem motocyklu ve větrném tunelu za účelem interpretace z hlediska skutečného motocyklu.

V první části práce je uvedena krátká historie aerodynamiky vozidel, ve které byl čtenář seznámen s prvními aerodynamickými pokusy a zkušenostmi a jejich využitím v dopravě. Na následujících stránkách byly popsány fyzikální základy proudění tekutin, včetně základů aerodynamiky. Byly zde uvedeny aerodynamické jevy, které můžeme pozorovat okolo každého obtékaného tělesa, a byla zde zmíněna problematika teorie podobnosti.

V následující části byly teoretické poznatky převedeny na aerodynamiku motocyklu a její vliv na jízdu. Byly zde popsány hlavní aerodynamické síly, které na motocykl působí, a jakými způsoby můžeme aerodynamiku motocyklu ovlivnit. Po splnění teoretických cílů byly popsány teoretické, experimentální a numerické způsoby měření aerodynamiky motocyklu.

V experimentální části byla popsána výroba modelu v měřítku 1 : 5 motocyklu CTU Lions EVO 2.0 Electric, na němž byl proveden pokus v aerodynamickém tunelu. Byly zmíněny problémy 3D tisku z naskenovaných dat a jak se tyto problémy dají řešit. Následující kapitoly byly věnovány experimentálnímu měření a jejich vyhodnocení.

Poznatky získané při výzkumu aerodynamických vlastností motocyklu budou využity v následujícím ročníku soutěže MotoStudent za účelem zrychlení jízdy motocyklu a zlepšení energetické efektivity.

Práce může být zdrojem pro další výzkum aerodynamiky motocyklu prostřednictvím jiných metod měření, především simulací, kterým bych se rád věnoval v rámci svého navazujícího studia.

Citovaná literatura

- [1] *Aerodynamika: Historie* [online]. 2011 [cit. 2022-08-04]. Dostupné z: <http://historieletectvi.xf.cz/aerodynamika.htm#Historie>
- [2] VÁCHA, Martin. *Přednáška bratři Wrightové a Čechy* [online]. Praha: pilotinfo.cz, 2013 [cit. 2022-08-04]. Dostupné z: www.pilotinfo.cz/z-historie/prednaska-bratri-wrightove-a-cechy
- [3] VIEHMANN, Sebastian. *Diese skurrile Auto ist die Mutter der Aerodynamik* [online]. Berlin: BurdaForward GmbH, 2014 [cit. 2022-08-04]. Dostupné z: https://www.focus.de/auto/gebrauchtwagen/oldtimer/der-legendaere-rumpler-tropfen-wagen-dieses-skurrile-auto-ist-die-mutter-der-aerodynamik_id_2717268.html
- [4] *Moto Guzzi – Nato nella Galleria Del Vento – “Born out of the wind tunnel”* [online]. Racecar Engineering [cit. 2022-08-04]. Dostupné z: <https://www.racecar-engineering.com/articles/moto-guzzi-nato-nella-galleria-del-vento-born-out-of-the-wind-tunnel/>
- [5] FOALE, Tony. *Motorcycle Handling and Chassis Design*. 1. Spain: Tony Foale, 2002. ISBN 84-933286-3-4.
- [6] MALÁ, Zuzana, Danuše NOVÁKOVÁ a Tomáš VÍTŮ. *FYZIKA I*. 1. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 1995. ISBN 9788001042205.
- [7] REICHEL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. *Encyklopeide fyziky* [online]. Praha: fyzika.jreichl.com, 2014 [cit. 2022-07-30]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/123-zakladni-pojmy-dynamiky-tekutin>
- [8] NOSKIEVIČ, Jaromír. *Mechanika tekutin*. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1987. ISBN 04-233-87.
- [9] BRDIČKA, Miroslav, Ladislav SAMEK a Bruno SOPKO. *Mechanika kontinua*. Vyd. 4., rev. a upr. Praha: Academia, 2011. Gerstner. ISBN 978-80-200-2039-0.
- [10] TALAY, Theodore A. *INTRODUCTION TO THE AERODYNAMICS OF FLIGHT: [NASA SP-367]*. 1. Washington, D.C.: National Technical Information Service, 1975. ISBN B0006CMZD2.

Citovaná literatura

- [11] Dynamic Viscosity Formula. In: *Toppr* [online]. Mumbai, India: toppr.com, 2020 [cit. 2022-07-25]. Dostupné z: <https://www.toppr.com/guides/physics-formulas/dynamic-viscosity-formula/>
- [12] TRACHENKO, K. a V. V. BRAZHKIN. Minimal quantum viscosity from fundamental physical constants. *Science Advances* [online]. 2020, 6(17) [cit. 25. 07. 2022]. ISSN 2375-2548. Dostupné z: doi:10.1126/sciadv.aba3747
- [13] KOČÍ, Petr. *Chemické inženýrství I*. 4. rozšířené vydání. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2019. ISBN 978-80-7592-049-2.
- [14] WILD, Flint, ed. What is Aerodynamics?. In: *National Aeronautics and Space Administration* [online]. Washington DC: NASA, 2018 [cit. 2022-07-31]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/audience/forstudents/5-8/features/nasa-knows/what-is-aerodynamics-58.html>
- [15] HALL, Nancy, ed. *What is Lift?* [online]. Washington, D.C.: National Technical Information Service, 2021 [cit. 2022-07-31]. Dostupné z: <https://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/lift1.html>
- [16] HALL, Nancy, ed. *Wing Geometry Definitions* [online]. Washington, D.C.: National Technical Information Service, 2021 [cit. 2022-07-31]. Dostupné z: <https://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/geom.html>
- [17] *Titul mistra světa bude pravděpodobně obhajovat přepracované Porsche 911 RSR* [online]. Porsche, 2019 [cit. 2022-08-05]. Dostupné z: <https://porsche-interauto.cz/pro-media/2019/titul-mistra-sveta-bude-pravdepodobne-obhajovat-prepracovane-porsche-911-rsr>
- [18] MÍK, Petr. *Jak funguje aerodynamický přítlak?* [online]. Praha: AutoTrip, 2016 [cit. 2022-07-31]. Dostupné z: <https://autotrip.cz/jak-funguje-aerodynamicky-pritlak/>
- [19] GOODWOOD ROAD & RACING. *Bernoulli's Principle: How Lotus bent Physics in F1* [online, video]. Norwich: YouTube, 2016 [cit. 2022-07-31]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=fmA7i3K6L2Q&t=56s>
- [20] ÇENGEL, Yunus, Robert TURNER a John CIMBALA. *Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences*. 3. New York: McGraw-Hill, 2008. ISBN 978-007-126631-4. MHI 007-126631-3.
- [21] FIRST, Jiří. *Energetická analýza pozemní dopravy*. Vydání 1. elektronické. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05664-6.

Citovaná literatura

- [22] JANALÍK, Jaroslav. *Obtékání a odpor těles*. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008. ISBN 978-80-248-1911-2.
- [23] ŠNITA, Dalimil. *Chemické inženýrství I*. 1. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2005. ISBN 80-708-0589-7.
- [24] SATO, Masami a Takaya KOBAYASHI. *A fundamental study of the flow past a circular cylinder using Abaqus/CFD* [online]. Johnston: SIMULIA Community Conference, 2012 [cit. 2022-07-31]. Dostupné z: https://imechanica.org/files/Sato_MDAC_final_2232012.pdf
- [25] *TECHNIKA MOTOCYKLU - křídélka - rychlejší nebo ne?* [online]. Brno: okruhari.cz, 2016 [cit. 2022-08-03]. Dostupné z: <https://www.okruhari.cz/technika/technika-motocyklu-kridelka-rychlejsi-nebo-ne/>
- [26] Přemysl Toman jedoucí pro vítězství. In: *Eu.zonerama.com/* [online]. Dolní Bousov: Hoofina FOTO, 2022 [cit. 2022-08-03]. Dostupné z: eu.zonerama.com/photos/329957462_6960x4640.jpg
- [27] ROLLINGER, Mirek. Jízdní odpory. *Motorkari.cz* [online]. 2012, 2012 [cit. 2022-08-03]. ISSN 1214-7125. Dostupné z: <https://www.motorkari.cz/clanky/jak-na-to/jizdni-odpory-23279.html>
- [28] *MotoGP - Grand Prix des Amériques 2022: revivez la première séance d'essais libres, Rins en tête, Quartararo 4ème!* [online]. Francie: L'Automobile Magazine, 2022 [cit. 2022-08-03]. Dostupné z: <https://www.automobile-magazine.fr/motogp/article/33401-motogp-grand-prix-des-ameriques-2022-la-premiere-seance-dessais-libres-en-direct>
- [29] TOLAR, Martin. *Tatra 603-2 B5 Marathon – Závodní velryba s výfuky z rakety* [online]. Praha: Seznam zprávy, 2017 [cit. 2022-08-03]. Dostupné z: <https://www.garaz.cz/clanek/tatra-603-2-b5-marathon-zavodni-velryba-s-vyfuky-z-rakety-1487>
- [30] *Dani Pedrosa* [online]. eurosport.com, 2022 [cit. 2022-08-06]. Dostupné z: https://www.eurosport.com/moto/dani-pedrosa_prs13805/person.shtml
- [31] HUBÍK, Libor. PSÍ HUBÍK. *KONSTRUKCE KOMBINÉZY: OCHRANA, POHODLÍ, HMOTNOST, AERODYNAMIKA* [online]. Tlumačov: psihubik.cz, 2021 [cit. 2022-08-03]. Dostupné z: <https://www.psihubik.cz/konstrukce-kombinezy-ochrana-pohodli-hmotnost-aerodynamika/>

Citovaná literatura

- [32] BAALS, Donald D. a William R. CORLISS. *Wind Tunnels of NASA*. 1. Washington, D.C.: National Aeronautics and Space Administration, 1981. ISBN 81-607811.
- [33] *Wind Tunnel Laboratory* [online]. Perugia, Italy: Wind Tunnel Raffaele Balli, 2021 [cit. 2022-08-04]. Dostupné z: <http://www.windtunnel.unipg.it/index.php/en/8-category-en-gb/23-motorcycles>
- [34] *Wind Tunnel Testing* [online]. Washington, D.C.: National Aeronautics and Space Administration, 2021 [cit. 2022-08-04]. Dostupné z: www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tuntest.html
- [35] HLAWICZKA, Petr. *Jak zpřesnit simulace aneb praktické využití PIV v aerodynamickém tunelu* [online]. Praha: F1NEWS.cz, 2012 [cit. 2022-08-04]. Dostupné z: <https://f1news.autoroad.cz/technika/39851-jak-zpresnit-simulace-aneb-prakticke-vyuziti-piv-v-aerodynamickem-tunelu>
- [36] *Researches Explore Aircraft Landing Gear Aerodynamics Through Supercomputer Simulations* [online]. Washington, D.C.: National Aeronautics and Space Administration, 2017 [cit. 2022-08-04]. Dostupné z: www.nasa.gov/ames/image-feature/nasa-highlights-simulations-at-supercomputing-conference-like-aircraft-landing-gear
- [37] *Aerodynamic Effect and Power from an Auxiliary Wind Turbine with Selected Motorcycles* [online]. Brunei: Faculty of Engineering Institute Technology Brunei, 2014 [cit. 2022-08-05]. Dostupné z: www.researchgate.net/figure/Drag-coefficients-for-racing-bike-with-wind-turbine_fig1_270566521
- [38] ENGINEERING TOOLBOX. *Air - Dynamic and Kinematic Viscosity* [online]. 2003 [cit. 2022-07-30]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/air-absolute-kinematic-viscosity-d_601.html
- [39] ENGINEERING TOOLBOX. *Water - Dynamic (Absolute) and Kinematic Viscosity vs. Temperature and Pressure*. In: *Engineering ToolBox* [online]. 2004 [cit. 2022-07-30]. Dostupné z: www.engineeringtoolbox.com/water-dynamic-kinematic-viscosity-d_596.html

Seznam obrázků

Obrázek 1: Příklad Benjamina Robinse pro měření aerodynamických vlivů [1].....	9
Obrázek 2: První letadlo bratrů Wrightů z roku 1903 [2]	10
Obrázek 3: Tropfenwagen v aerodynamickém tunelu s vizualizací okolního proudění [3]	11
Obrázek 4: Tatra 87 cestovatelů Zikmunda a Hanzelky.....	11
Obrázek 5: Moto Guzzi z roku 1957 s motorem 500 ccm dosahující rychlosti 240 km/h	12
Obrázek 6: Jawa TS 350 638, 1986 (vlevo) a BMW R100RT, 1996 (vpravo).....	13
Obrázek 7: Pohyb částic tekutiny při potenciálním proudění a potenciálním víru [5].....	15
Obrázek 8: Pohyb částic tekutiny při vířivém proudění [6].....	16
Obrázek 9: Zobrazení laminárního proudění v pevném tělese, například trubici [6].....	16
Obrázek 10: Zobrazení a rychlostní profil turbulentního proudění [6]	17
Obrázek 11: Zobrazení laminárního proudění, přechodové fáze a turbulentního proudění [10].....	17
Obrázek 12: Znárodnění účinků viskozity na proudění u pevné stěny pomocí proudnic [6]	18
Obrázek 13: Pohyb tekutiny v proudové trubici [13]	20
Obrázek 14: Profil křídla obíhaný proudnicemi vzduchu [6]	22
Obrázek 15: Zobrazení přítláčné síly vyvinuté spoilerem [17].....	23
Obrázek 16: Znárodnění proudění okolo kuličky při různých hodnotách Re [24].....	27
Obrázek 17: Zobrazení čelní plochy enduro motocyklu i s jezdcem [26].....	29
Obrázek 18: H. P. Mueller ve 125cc NSU „létajícím hamaku“ v roce 1956 překonávající 240 km/h [5].....	30
Obrázek 19: Zobrazení airboxu na motocyklu Buell XB12R Firebolt.....	31
Obrázek 20: Marq Marquez při závodě Gran Prix America 2022 [28].....	32
Obrázek 21: Zobrazení kouřové a „bavlnkové“ metody [33].....	36
Obrázek 22: Zobrazení metody PIV [35].....	37

Seznam obrázků a tabulek

Obrázek 23: Simulace proudění vzduchu okolo podvozku letounu [36].....	38
Obrázek 24: Zobrazení kapotáží motocyklu po nahrání do softwaru GeomegicDesign X (tzv. raw data)	40
Obrázek 25: Přesnost povrchu skenovaných kapotáží a kapotáží s přidanou tloušťkou	41
Obrázek 26: Zobrazení podsedlovky v PrusaSliceru.....	42
Obrázek 27: Schnutí všech částí motocyklu po aplikování plniče	43
Obrázek 28: Finální verze motocyklu EVO 2.0 Electric bez polepů.....	44
Obrázek 29: Motocykl CTU Lions EVO 2.0 Electric, Aragón 2021.....	44
Obrázek 30: Model motocyklu upevněný v aerodynamických vahách	45

Seznam tabulek

Tabulka 1: Shrnutí běžných hodnot c_x a S_x u běžných vozidel.....	24
Tabulka 2: Hodnoty c_x změřené na modelu v měřítku 1 : 5.....	49
Tabulka 3: Výsledky odporové síly F_D	49

Seznam grafů

Graf 1: Průběh kinematické viskozity v závislosti na teplotě [38] [39].....	19
Graf 2: Vztah odporové síly k rychlosti proudění vzduchu v různém natočení modelu..	46
Graf 3: Vztah vztahové síly k rychlosti proudění při různém natočení modelu	47
Graf 4: Vztah boční síly k rychlosti proudění vzduchu v různém natočení motocyklu....	48

Seznam příloh

Příloha 1: Data naměřená na modelu motocyklu v aerodynamickém tunelu	
--	--