



TUGAS AKHIR - TF 181801

**DESAIN DAN ANALISA AERODINAMIKA *FRONT WING* DAN
REAR WING PADA MOBIL STUDENT FORMULA SAPUANGIN
SPEED**

Muh Indjra Dj
NRP. 02311640000068

Dosen Pembimbing:
Gunawan Nugroho, S.T., M.T., Ph.D.

Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020

Halaman ini sengaja dikosongkan



FINAL PROJECT - TF 181801

***DESIGN AND AERODYNAMICS ANALYSIS OF FORMULA
STUDENT CAR SAPUANGIN SPEED***

Muh Indjra Dj
NRP. 02311640000068

Supervisors:
Gunawan Nugroho, S.T., M.T., Ph.D.

*Department Of Engineering Physics
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020*

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini.

Nama : Muh Indjra Dj
NRP : 02311640000068
Departemen / Prodi : Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FTIRS)
Perguruan Tinggi: Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "*DESAIN DAN ANALISA AERODINAMIKA FRONT WING DAN REAR WING PADA MOBIL STUDENT FORMULA SAPUANGIN SPEED*" adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya-benarnya.

Surabaya, 28 Juli 2020

Yang membuat pernyataan,



Muh Indjra Dj

NRP. 02311640000068

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR

**DESAIN DAN ANALISA AERODINAMIKA FRONT WING DAN REAR
WING PADA MOBIL STUDENT FORMULA SAPUANGIN SPEED**

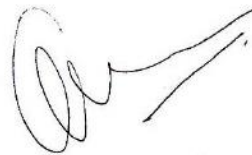
Oleh:

Muh Indjra Dj

NRP. 02311640000068

Surabaya,

Menyetujui,
Pembimbing I



Gunawan Nugroho, S.T., M.T., Ph.D.

NIP. 19771127 200212 1 002

Mengetahui,

Kepala Departemen
Teknik Fisika FTI-ITS



Di Suvanto, S.T., M.T

NIP. 1917/1113 199512 1 002

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

DESAIN DAN ANALISA AERODINAMIKA FRONT WING DAN REAR WING PADA MOBIL STUDENT FORMULA SAPUANGIN SPEED

TUGAS AKHIR




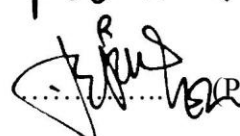
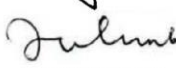
Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Progam Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FTIRS)
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

Muh Indjra Di

NRP. 02311640000068

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

- | | | |
|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| 1. Gunawan Nugroho, S.T., M.T., Ph.D |  | (Pembimbing I) |
| 2. Ir. Roekmono, M.T. |  | (Ketua Penguji) |
| 3. Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T. |  | (Penguji I) |
| 4. Erna Septyaningrum S.T., M.T. |  | (Penguji II) |
| 5. Ir. Zulkifli, S.T., M.Sc. |  | (Penguji III) |

SURABAYA

2020

Halaman ini sengaja dikosongkan

DESAIN DAN ANALISA AERODINAMIKA FRONT WING DAN REAR WING PADA MOBIL STUDENT FORMULA SAPUANGIN SPEED

Nama : Muh Indjra DJ
NRP : 02311640000068
Departemen : Teknik Fisika FTIRS - ITS
Dosen Pembimbing : Gunawan Nugroho S.T., M.T.,
Ph.D.

ABSTRAK

ITS team SapuAngin telah mengikuti kompetisi Student Formula Japan (SFJ) sejak tahun 2012 dengan nama mobil SapuAngin Speed (SAS). Lintasan balap pada kompetisi ini terdiri dari belokan tajam berulang. Oleh karena itu, penggunaan *wing* dapat menjadi salah satu solusi untuk meningkatkan performa belok kendaraan. Simulasi awal dilakukan pada mobil SAS untuk mengetahui kondisi *existing* mobil. Kemudian dipilih jenis airfoil Eppler E423 dan S1210 untuk *rear* dan *front wing* berturut-turut. Hasil simulasi menunjukkan nilai C_d dan C_l mobil tanpa *wing* adalah 0,6189 dan 0,0078 sementara dengan *wing* adalah 0,6722 dan -1,055. Hasil akhir desain menunjukkan distribusi beban yang diterima roda depan dan belakang adalah 51,83% dan 48,17%. Penambahan *wing* menunjukkan *top speed* kendaraan yang dihasilkan menurun menjadi 41 m/s dari kecepatan awal sebesar 45 m/s dan gaya traksi pada roda di trek lurus berkurang 0,058% - 5,314% dari sebelumnya. Meski begitu, kecepatan maksimum mobil meningkat 0,958% - 11,014% pada saat berbelok.

Kata Kunci: Aerodinamika, FSAE, *Rear Wing*, dan *Front Wing*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DESIGN AND AERODYNAMICS ANALYSIS OF FORMULA STUDENT CAR SAPUANGIN SPEED

Name : Muh Indjra Dj
NRP : 02311640000068
Department : Engineering Physics FTIRS - ITS
Supervisors : Gunawan Nugroho S.T., M.T.,
Ph.D.

ABSTRACT

ITS team Sapuanginn has followed the Student Formula Japan (SFJ) competition since 2012 with a car's name of SapuAngin Speed (SAS). The winner will belong to a team with the highest score. The track in this competition consists repeated sharp corners. Therefore, the use of wings can be one solution to improve cornering speed. Initial simulation is performed to determine the existing condition of the cars. Then selected airfoil type Eppler E423 and S1210 for the rear and front wing respectively. Simulation result show c_d and c_l without wing are 0,6722 and 0,0078 while with wing 0,6722 and -1,055. Final design result show that load distribution received by the front and rear wheels is 51,83% and 48,71%. The addition of wing decrease the top speed to 41 m/s from 45 m/s and traction force on the wheels decrease 0,058% - 5,314% on the straight line. However, the maximum cornering speed increase 0,958% - 11,014%.

Keywords: Aerodynamics, FSAE, Rear Wing, and Front Wing

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah atas izin Allah *subhannahu wa taala* sehingga penulis diberikan kemudahan dan kelancaran dalam penyusunan tugas akhir yang berjudul **“Desain Dan Analisa Aerodinamika Front Wing Dan Rear Wing Pada Mobil Student Formula Sapuangin Speed”**

Dalam proses penyelesaian tugas akhir ini penulis telah dibantu dan didukung oleh berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada:

1. Keluarga penulis, kepada orang tua bapak Djusman Wardin dan ibu Indah Lestari. Adik-adik penulis Feby, putri, dan andra yang telah memberikan doa serta dukungan kepada penulis.
2. Bapak Dr. Suyanto, S.T., M.T. selaku Kepala Departemen Teknik Fisika ITS.
3. Bapak Gunawan Nugroho, ST, MT, PhD selaku dosen pembimbing serta kepala laboratorium Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan yang telah membimbing dan banyak memberikan motivasi kepada penulis.
4. Bapak Totok Ruki Biyanto S.T., M.T., Ph.D selaku dosen wali yang telah memberikan ilmu dan pengalaman hidup kepada penulis.
5. Bapak Ir. Witantyo M.Eng.Sc selaku pembimbing ITS Team Sapuangin yang telah banyak membantu dalam meng-*upgrade* diri penulis.
6. Mas, Mbak, beserta teman-teman ITS Team Sapuangin 2017/2018, 2018/2019, dan 2019/2020 yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk mengembangkan diri dan ikut berkontribusi dalam riset Sapuangin.
7. Teman-teman KSE, khususnya Angkatan 2016, Holle, Nuril, Qori, Nesa, Aresyah, Shafly, Rodzan dan lainnya atas batuan, dukungan dan tempat bernaung.
8. Mas, Mbak, beserta teman-teman BEM FTI, khususnya departemen PSDM yang telah membantu mengembangkan kepercayaan diri dan manajemen diri penulis.
9. Mukhlis, Np, dan Afif sebagai teman kos yang menemani penulis menyelesaikan tugas akhir ini.

10. Faizul, ihan, bangkit dan teman-teman Thalassinus Fortis

Serta pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu-persatu. Semoga laporan tugas akhir ini dapat dipergunakan dengan sebaik-baiknya.

Surabaya, 18 Juni 2020

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
COVER PAGE.....	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	v
LEMBAR PENGESAHAN	vii
LEMBAR PENGESAHAN	ix
ABSTRAK	xi
ABSTRACT.....	xiii
KATA PENGANTAR	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL.....	xxi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan.....	2
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Sistematika Laporan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	5
2.1 Aerodinamik <i>Downforce</i> dan Performa Kendaraan	5
2.2 Gaya Aerodinamika.....	6
2.3 Airfoils dan Wing.....	8
2.4 Rear Wing.....	9
2.5 Front Wing	11
2.6 <i>Computational Fluid Dynamics</i>	11

2.7	<i>Distribusi Gaya Aerodinamik dan Kesetimbangan</i>	13
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		17
3.1	Studi Literatur	17
3.2	Desain Geometri Mobil SAS VIII	18
3.3	Bentuk <i>Wing</i> dan Dimensi	19
3.4	Computational Domain.....	20
3.5	Simulasi CFD.....	21
3.6	Meshing Parameter	23
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		25
4.1	Hasil dan Validasi Kendaraan Kondisi <i>Existing</i>	25
4.2	Desain dan Hasil Simulasi <i>Rear Wing</i>	27
4.3	Desain dan Hasil Simulasi <i>Front Wing</i>	28
4.4	Hasil simulasi Full Model <i>Aerodynamic Package</i>	30
4.5	Performa Kendaraan	32
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		37
5.1	Kesimpulan	37
5.2	Saran	37
DAFTAR PUSTAKA.....		39
LAMPIRAN		41
BIODATA PENULIS.....		51

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Trend maksimum akselerasi kendaraan pada saat berbelok 50 tahun terakhir (Katz J. , 1995).....	6
Gambar 2. 2 Penguraian komponen gaya drag dan lift (Prakoso, 2011).....	6
Gambar 2. 3 Geometri airfoil (a) Panjang span, (b) <i>angle of attack</i> , (c) <i>leading edge</i> , <i>trailing edge</i> , <i>maximum thickness</i> dan <i>chord</i> (Douglas, Gasiorek, & Swaffield, 2005).....	8
Gambar 2. 4 Prinsip penggunaan <i>end plate</i> (Pelekasis & Oxyzoglou, 2017)	10
Gambar 2. 5 Parameter <i>end plate</i> yang mempengaruhi performa <i>rectangular wing</i> (Katz J. , 1995)	10
Gambar 2. 6 <i>Free body diagram</i> distribusi pembebanan (Dahlberg, 2016).....	14
Gambar 2. 7 <i>Center of pressure</i> kendaraan	15
Gambar 3. 1 Diagram alir Penelitian	17
Gambar 3. 2 Desain mobil SAS VIII.....	18
Gambar 3. 3 Batasan desain volumetrik <i>rear wing</i>	19
Gambar 3. 4 Batasan desain volumetrik <i>front wing</i>	20
Gambar 3. 5 Dimensi domain komputasi	21
Gambar 4. 1 Kontur tekanan pada Mobil	26
Gambar 4. 2 <i>Streamline</i> di Sekitar bodi mobil	26
Gambar 4. 3 Profil airfoil eppler E423	27
Gambar 4. 4 Grafik pengaruh AOA E423 (a) terhadap Cd (b) terhadap Cl.....	27
Gambar 4. 5 Konfigurasi multielement wing	28
Gambar 4. 6 Final desain rear wing.....	28
Gambar 4. 7 Profil airfoil S1210	29
Gambar 4. 8 Grafik pengaruh AOA S1210 (a) terhadap Cd dan (b) terhadap Cl 29	
Gambar 4. 9 Final desain front wing	30
Gambar 4. 10 Kontur Cp pada wing (a) bawah <i>front wing</i> (b) atas <i>front wing</i> (c) bawah <i>rear wing</i> (d) atas <i>rear wing</i>	30

Gambar 4. 11 <i>Streamline</i> pada <i>front wing</i>	31
Gambar 4. 12 <i>Streamline</i> pada <i>rear wing</i>	31
Gambar 4. 13 Free diagram body SAS dengan wing.....	32
Gambar 4. 14 Grafik torsi terhadap RPM.....	33
Gambar 4. 15 Grafik gaya-gaya yang bekerja pada kendaraan terhadap kecepatan	34
Gambar 4. 16 Performa kendaraan pada saat berbelok.....	35

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Spesifikasi Mobil SAS VIII	19
Tabel 3. 2 Dimensi desain volumetrik <i>rear wing</i>	20
Tabel 3. 3 Dimensi desain volumetrik <i>front wing</i>	20
Tabel 3. 4 Parameter yang digunakan	22
Tabel 3. 5 Kondisi batas simulasi CFD	22
Tabel 3. 6 hasil Gid independence	23
Tabel 4. 1 Validasi Hasil	25

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Student Formula Japan (SFJ) adalah kompetisi tahunan yang merupakan bagian dari *Formula Student of Automotive Engineering* (FSAE) region Asia untuk wilayah Jepang. Kompetisi ini sudah dimulai sejak tahun 2003 dengan tema “*Mono-Zukuri*” yaitu untuk menantang pelajar membangun sebuah mobil balap prototipe formula terbaik dari segala aspek baik konstruksi, performa, finansial, dan rencana pemasaran yang ada di dalam industri otomotif. Tidak seperti perlombaan mobil konvensional, penilaiannya terdiri dari delapan event yang berbeda, dan tim yang memiliki akumulasi nilai tertinggi-lah yang akan menjadi juara. Terdapat tiga event statis (cost, presentation, design) dan lima event dinamis (acceleration, skid pad, autocross, fuel economy, endurance) (US Comp Edition Society of Automotive Engineers, 2004)

ITS Team Sapuangen telah mengikuti kompetisi ini sejak tahun 2012 dengan nama mobil Sapuangen Speed (SAS). Sapuangen Speed yang sedang dikerjakan sekarang adalah Sapuangen Speed generasi ke- VIII. Pada mobil sapuangen speed ini terdapat kehilangan energi dari *engine* yang ditransmisikan ke system transmisi dan ban yang mengakibatkan terdapat batasan daya yang diterima oleh ban. Ekstra *force* pada arah ke bawah diperlukan untuk meningkatkan batasan yang tidak diinginkan tersebut. Meningkatkan berat dapat dilakukan, tapi membuat *handling* kendaraan lebih buruk dan daya yang lebih besar. Desain bentuk bodi yang baik dan penambahan *aerodynamic device* dapat meningkatkan *downward pressure* (*Downforce*) yang dapat ditransfer ke ban sehingga membuat grip ban lebih baik dan mobil melaju lebih cepat pada saat berbelok. Selain itu, Lokasi titik *downforce center of pressure* juga penting untuk meningkatkan stabilitas pengereman. “*Downforce* yang bekerja pada *rear axle* mempengaruhi traksi dan stabilitas, sementara di depan berpengaruh pada *steering*” (Newbon & Sims-William, 2017). Selain itu, penelitian ini juga dilakukan karena sapuangen generasi I-VII memperoleh poin yang kecil untuk penilaian aerodinamika.

Salah satu solusi untuk menambah gaya tekan ke bawah adalah penggunaan *wing* depan dan belakang. Penelitian mengenai *wing* pada mobil formula SAE telah dilakukan oleh beberapa tim FSAE, salah satunya adalah tim *Monash Motorsport* dari *Monash University*, dalam penelitiannya tersebut dijelaskan mobil dengan *wing* akan lebih cepat 2 km/jam di tikungan tetapi lebih lambat 0.19 detik di trek lurus sepanjang 75 meter. Bentuk *airfoil* dan sudut serang (*angle of attack*) yang bekerja pada *wing* sangat berpengaruh terhadap gaya angkat negatif dan gaya *drag* yang dihasilkan. (Wordley & Saunders, 2006)

Simulasi *Computational Fluid dynamics* (CFD) dilakukan untuk menganalisa aerodinamika pada mobil dengan beberapa komponen tidak di desain pada penelitian ini. Rincian yang berlebih meskipun merepresentasikan kondisi kendaraan secara real. Namun, dapat secara signifikan meningkatkan *Reynold's Number* di seluruh kendaraan yang dapat menghambat konvergensi perhitungan (Soliman, Schommer, & Martins, 2015).

Tujuan dari tugas akhir ini adalah mengembangkan divais aerodinamika pada mobil balap formula Sapuangin lengkap dengan penggunaan *wing* depan dan belakang menggunakan metode CFD.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dibahas sebelumnya, dapat dirumuskan permasalahan diantaranya:

- a. Bagaimana pengaruh penggunaan *front* dan *rear wing* terhadap nilai koefisien *drag* dan *lift* mobil Formula Student Sapuangin Speed?
- b. Bagaimana pengaruh *front* dan *rear wing* terhadap performa kendaraan?

1.3 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian tugas akhir ini sebagai berikut:

- a. Mengetahui pengaruh penggunaan *front wing* dan *rear wing* terhadap koefisien *drag* dan *lift* pada mobil Formula Student Sapuangin Speed.
- b. Mengetahui pengaruh *front wing* dan *rear wing* terhadap performa kendaraan.

1.4 Batasan Masalah

Untuk memfokuskan penyelesaian masalah pada penelitian tugas akhir maka batasan masalah yang diangkat adalah sebagai berikut:

- a. Mobil kendaraan yang dianalisa adalah mobil sapuangin speed generasi ke VIII.
- b. *Aerodynamic device* yang dianalisa hanya penggunaan *front* dan *rear wing*.
- c. Metode yang digunakan adalah simulasi numerik
- d. Aliran pada inlet dianggap uniform, incompressible flow, dan steady flow.
- e. Persamaan model turbulensi yang digunakan adalah K-epsilon.

1.5 Sistematika Laporan

Laporan tugas akhir secara garis besar ini tersusun dari 5 BAB dengan rincian sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Pada bagian ini dijelaskan mengenai latar belakang dilakukannya penelitian ini, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan serta sistematika penulisan laporan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Pada bagian ini dijelaskan beberapa teori-teori beserta penelitian terdahulu yang berkaitan dengan penelitian.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

pada bagian ini dijelaskan secara detail tahapan-tahapan yang dilakukan pada penelitian ini

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini dilakukan Analisa data dari simulasi yang telah dilakukan. Data yang dianalisa diantaranya gaya drag, gaya angkat negative dan keseimbangan

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Aerodinamik *Downforce* dan Performa Kendaraan

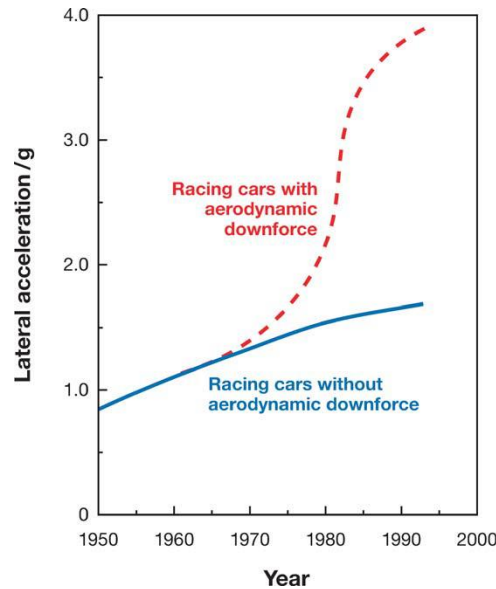
Gaya pada saat mobil melaju, mengerem, dan menikung adalah akibat kontak antara ban dan jalan. Gaya gesekan ban ini sangat dipengaruhi oleh gaya vertikal yang bekerja pada ban dan dibatasi oleh beberapa koefisien gesekan maksimum. Sebagai contoh pada saat mobil berbelok terdapat kecepatan maksimum yang diperbolehkan agar mobil tetap stabil, tetapi jika melebihi kecepatan maksimum tersebut mobil akan tergelincir. Hal tersebut merupakan akibat gaya kontak adhesi pada ban dan jalan.

Gaya normal pada ban dapat ditingkatkan (gesekan maksimum) dengan mendorong ban lebih napak pada jalan sehingga kecepatan berbelok dapat ditingkatkan juga, tanpa tergelincir. Salah satu caranya adalah menambah beban kendaraan. Namun, tidak akan berhasil dengan baik. Karena penambahan akan mempengaruhi akselerasi pada mobil dan gaya yang diperlukan untuk memutar mobil, pada tingkat yang sama.

Aerodynamic downforce, bagaimanapun meningkatkan beban pada ban tanpa peningkatan pembebanan pada kendaraan sehingga meningkatkan kemampuan berbelok tanpa adanya penambahan penalty akibat penambahan massa, yang akan memberikan pengurangan pada *lap time*.

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, salah satu keuntungan aerodinamik *downforce* adalah meningkatkan kecepatan berbelok. Pada gambar 1 ditunjukkan kurva yang membandingkan maksimum kapasitas berbelok mobil balap *sport* modern (Chevrolet Corvette produksi tahun 1993 dengan *relative cornering speed* 1). Peningkatan bertahap yang ditunjukkan garis tebal adalah hasil perbaikan berkelanjutan dalam teknologi ban. Garis ini merepresentasikan kemampuan berbelok kendaraan tanpa aerodinamik *downforce*. Sementara garis putus-putus menunjukkan trend performa kendaraan bermobil yang canggih termasuk F-1, *indy*, dan prototipe mobil balap. Peningkatan besar pada kemampuan berbelok terjadi tahun 1970 yang merupakan hasil penggunaan *inverted wing*

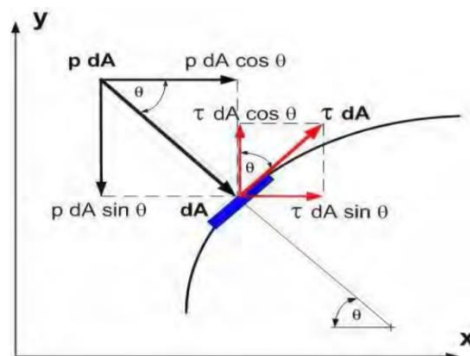
(sayap terbalik). Trend ini meningkat secara cepat hingga akhir 1970, dengan pengenalan prinsip efek *ground clearance* menggunakan body dari kendaraan itu sendiri untuk menciptakan *downforce* (Katz J. , 1995).



Gambar 2. 1 Trend maksimum akselerasi kendaraan pada saat berbelok 50 tahun terakhir (Katz J. , 1995)

2.2 Gaya Aerodinamika

Secara sederhana penyebab utama dari timbulnya gaya-gaya aerodinamis pada kendaraan adalah karena adanya distribusi tekanan pada permukaan bodi kendaraan yang bekerja pada arah normal dan adanya distribusi tegangan geser pada permukaan bodi kendaraan yang akan bekerja pada arah tangensial terhadap permukaan kendaraan. Gaya tegak lurus aliran ini disebut gaya *lift* sedangkan gaya yang sejajar horizontal disebut dengan gaya drag.



Gambar 2. 2 Penguraian komponen gaya drag dan lift (Prakoso, 2011)

Penguraian gaya drag dapat dilihat pada gambar 2.2 gaya drag yang terjadi dapat berupa *skin friction drag* (F_{Df}) yaitu gaya hambat yang menyinggung permukaan secara tangensial yang timbul sebagai akibat adanya *viskositas* (tegangan geser antara fluida dan permukaan benda) dan *pressure drag* (F_{Dp}) yaitu gaya hambat yang tegak lurus terhadap permukaan benda yang timbul karena adanya tekanan fluida. Resultan antara *friction drag* dan *pressure drag* ini disebut sebagai total drag yang didefinisikan sebagai berikut:

$$F_D = F_{Dp} + F_{Df} \quad (2.1)$$

$$F_D = \int \cos \theta (P dA) + \int \sin \theta (\tau dA) \quad (2.2)$$

Untuk merancang suatu kendaraan salah satu faktor aerodinamis yang paling penting adalah *drag force*. Gaya total yang menahan laju bergeraknya suatu kendaraan. Besarnya *drag* ini untuk setiap bentuk kendaraan berbeda satu dengan yang lainnya, dan ini bergantung pada faktor koefisien *drag* atau C_D yang didefinisikan sebagai berikut:

$$C_D = \frac{F_d}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (2.3)$$

Aerodinamik drag selain bergantung pada koefisien drag dan hubungannya seperti rumusan diatas, juga dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti sifat turbulensi aliran dan bilangan Reynolds. Ketergantungan pada bilangan Reynolds ini mempunyai arti bahwa koefisien drag bervariasi sesuai kecepatan.

Sama halnya dengan gaya drag, gaya angkat juga terjadi akibat resultan gaya tekan dan gaya geser ke arah sumbu y pada gambar 2.2 Sehingga gaya angkat dapat didefinisikan sebagai berikut :

$$F_L = F_{Lp} + F_{Lf} \quad (2.4)$$

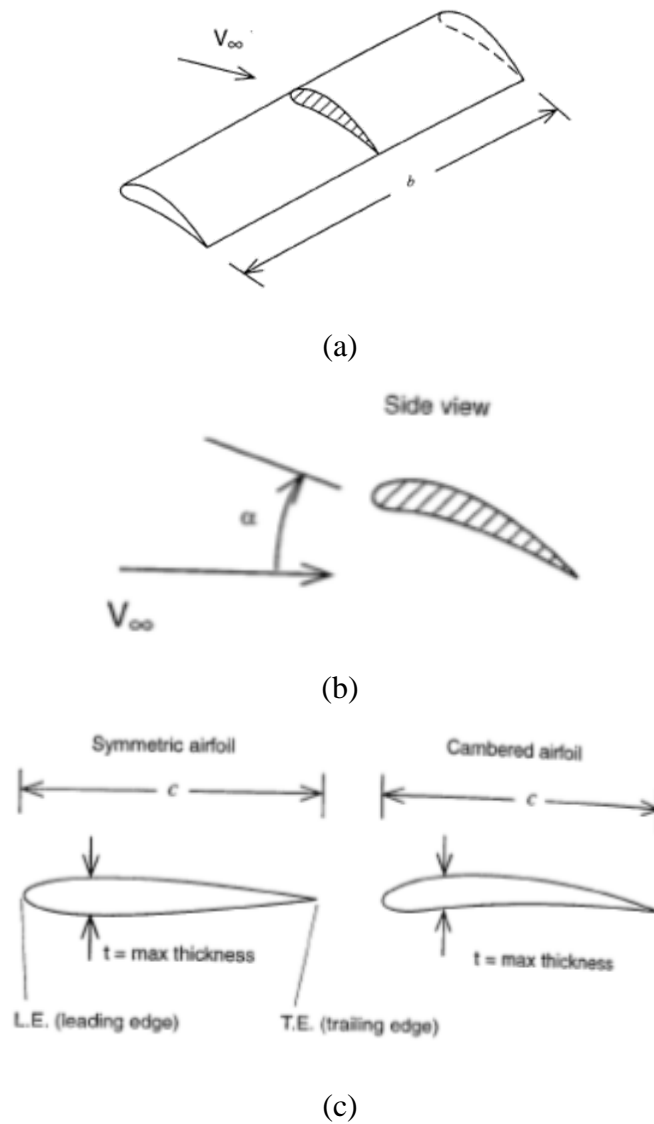
$$F_L = - \int \sin \theta (P dA) + \int \cos \theta (\tau dA) \quad (2.5)$$

Tiap body memiliki karakteristik gaya lift yang berbeda. Karakteristik gaya lift ditunjukkan dengan *Coefficient Lift* (C_L) yang didefinisikan sebagai berikut:

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (2.6)$$

2.3 Airfoils dan Wing

Airfoil adalah suatu bentuk geometri aerodinamik yang dirancang untuk menghasilkan gaya lift saat terdapat aliran fluida yang bergerak terhadap permukaannya. Berdasarkan geometrinya, airfoil diklasifikasikan menjadi symmetry airfoil dan asymmetry airfoil.



Gambar 2.3 Geometri airfoil (a) Panjang span, (b) *angle of attack*, (c) *leading edge*, *trailing edge*, *maximum thickness* dan *chord* (Douglas, Gasiorek, & Swaffield, 2005)

Beberapa istilah yang sering digunakan berkaitan dengan airfoil adalah leading edge yaitu ujung depan dari airfoil, trailing edge yaitu ujung belakang airfoil, chord yaitu panjang airfoil dari leading edge sampai trailing edge, span yaitu panjang airfoil dengan arah perpendicular dengan chord, dan *angle of attack (AOA)* yaitu sudut yang dibentuk airfoil relative terhadap arah aliran. Selain itu hal yang sering diperhatikan dari bentuk airfoil adalah ketebalan maksimum dari airfoil.

Desain *Wing* (sayap) pesawat terbang telah siap digunakan pada pertengahan abad dua puluh, kemudian desainer mobil balap meminjan profil sayap pesawat terbang yang sukses untuk digunakan pada kendaraan mereka. Namun, pendekatan ini tidak sepenuhnya berhasil karena perbedaan yang melekat antara kedua aplikasi ini. Kesulitan memadukan teknologi ini disorot oleh Katz tahun 1994 yang dapat diringkas sebagai berikut.

- a. Sayap depan mobil balap sangat dipengaruhi oleh *ground effect* yang tinggi.
- b. Mobil balap berjenis *open-wheel* memiliki *aspect ratio* yang kecil.
- c. Terdapat interaksi yang sangat berkaitan antara sayap dan komponen mobil yang lainnya (seperti bodi, ban, dan sayap yang lainnya (Katz J. , 2006).

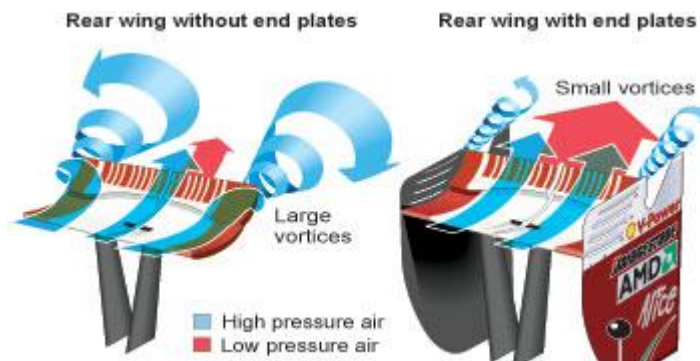
2.4 Rear Wing

Katz (Katz J. , 2006) dan Seljak (Seljak, 2008) dalam studinya mendeskripsikan bahwa sekitar 30% sampai 35% dari total *downforce* dihasilkan dengan bantuan *rear wing* pada mobil balap modern. Fungsi utama dari *rear wing* adalah membantu terutama dalam pengereman dan menikung pada ban belakang untuk menghilangkan *oversteering*. Dalam beberapa kasus, desain *rear wing* menggunakan *multiple wings* dan *flaps* untuk mendapatkan *downforce* yang lebih besar. Dua sayap akan menghasilkan *downforce* yang lebih besar dibandingkan satu sayap, tapi tidak dua kali lebih banyak. *Multielement airfoils* meningkatkan *downforce* dengan memungkinkan lebih besar total *wing camber* dengan sudut serang tinggi dan menunda pemisahan aliran dekat *trailing edge*.

Bagaimanapun, aliran udara pada bagian belakang mobil dipengaruhi oleh banyak komponen (*intake, bodywork, pengemudi* dan lain-lain) akibat bagian depan kendaraan bagian depan sehingga disebut "*dirty air*" karena aliran telah terpisah

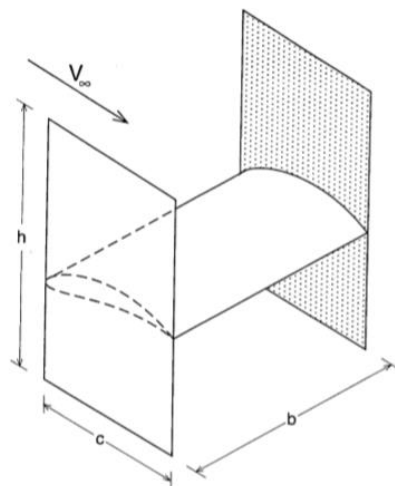
dengan banyak turbulensi. Hal ini mengakibatkan *rear wing* kurang efisien daripada *front wing*.

End plate pada *rear wing* digunakan sebagai cara yang efektif untuk mereduksi *drag* akibat *edge vortices* pada mobil balap. Pentingnya *end plate* ini adalah untuk mencegah tumpahan udara di sekitar ujung sayap, dan menunda pergerakan konsentrasi dari *trailing vortices*. Fungsi *end plate* mirip seperti *winglet* pada sayap pesawat, untuk memisahkan tekanan positif bagian atas sayap dan tekanan negatif bagian bawah sayap sehingga mereduksi *induced drag*, seperti ditunjukkan pada gambar 2.4



Gambar 2. 4 Prinsip penggunaan *end plate* (Pelekasis & Oxyzoglou, 2017)

Efek dari penggunaan *end plate* dapat dirumuskan dengan formula sederhana seperti yang disarankan oleh Hoerner (Hoerner, 1965) berdasarkan model tersebut, *side fin* meningkatkan *effective wing aspect ratio*:



Gambar 2. 5 Parameter *end plate* yang mempengaruhi performa *rectangular wing* (Katz J. , 1995)

$$AR = AR_{Actual} \left(1 + \frac{1.9h}{b} \right) \quad (2.7)$$

Aktual *aspect ratio* untuk rectangular *wing* dirumuskan:

$$AR_{Actual} = \frac{b}{c} \quad (2.8)$$

2.5 Front Wing

Front wing merupakan bagian yang pertama yang berinteraksi langsung dengan udara. Oleh karenanya memiliki peran penting untuk menentukan aliran udara melalui seluruh mobil. *Front wing* menghasilkan 20% - 30% *downforce* dari total *downforce* kendaraan (Pelekasis & Oxyzoglou, 2017).

Roda mobil FSAE yang terbuka merupakan hambatan paling besar daripada bagian mobil lainnya. Karena aturan FSAE yang melarang penutup roda, hal ini yang menyebabkan *separation flow* yang tak terhindarkan dan menyebabkan meningkatnya *drag* pada kendaraan. Interaksi udara antara *front wing* dan roda depan sangat sulit untuk menghasilkan solusi terbaik, Sebagian besar tim menggunakan *front wing* untuk mendefleksikan udara yang melaju di sekitar ban depan.

Modifikasi desain utama untuk solusi ini terletak pada *end plat* dan *flap* pada *wing*, bertujuan untuk mengurangi *tip vortex* dan *wake* dengan cara menghindari tumbukan pada roda depan. Hal ini dapat dilakukan dengan membuat tepi bagian dalam *plat* melengkung untuk mengarahkan udara ke arah sasis atau dengan pinggiran luar untuk mengarahkan udara dari bagian luar roda depan.

2.6 Computational Fluid Dynamics

Computational Fluid Dynamics atau CFD adalah analisis sistem yang melibatkan aliran fluida, perpindahan panas, dan fenomena terkait seperti reaksi kimia berdasarkan simulasi berbasis komputer. Penggunaan CFD memungkinkan pengurangan biaya dan waktu untuk setiap desain baru secara substansial (Versteeg & Malalasekera, 1995).

Secara sederhana, CFD adalah teknik numerik untuk menyelesaikan dan menganalisa aliran fluida dengan bantuan computer. Berikut adalah tiga persamaan yang digunakan:

a. Persamaan Konversi Massa

Pada intinya persamaan ini menyatakan bahwa, ‘pada sebuah volume fluida, laju dari pertambahan masa kedalam volume tersebut pasti sama dengan kecepatan aliran masa disepanjang kontrol volume tersebut.’ Secara matematis persamaan tersebut dapat dinyatakan sebagai :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.9)$$

b. Persamaan Navier-stokes

Persamaan ini adalah pernyataan matematis dari gerakan fluida berdasarkan hukum newton kedua, yang menyatakan bahwa ‘laju perubahan momentum pada partikel fluida sama dengan jumlah dari gaya-gaya pada sebuah partikel.’ Adapun persamaan matematisnya adalah sebagai berikut (Versteeg & Malalasekera, 1995).

Persamaan pada komponen sumbu -x:

$$\begin{aligned} \rho \left[\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right] & \quad (2.10) \\ & = \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] - \frac{\partial p}{\partial x} + X \end{aligned}$$

Persamaan pada komponen Sumbu -y:

$$\begin{aligned} \rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right] & \quad (2.11) \\ & = \mu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] - \frac{\partial p}{\partial y} + Y \end{aligned}$$

Persamaan pada komponen sumbu -z:

$$\begin{aligned} \rho \left[\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right] & \quad (2.12) \\ & = \mu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] - \frac{\partial p}{\partial z} + Z \end{aligned}$$

c. Model turbulensi $k-\varepsilon$ *realizable*

Salah satu model turbulensi yang biasa digunakan adalah model $k-\varepsilon$ *realizable* yang dapat digunakan pada kasus khusus. Istilah *realizable* merujuk pada

kondisi batas matematis tertentu terkait dengan tegangan normalnya. Hal ini dijelaskan pada kombinasi antara hubungan *Boussinesq* dan definisi viskositas *eddy* yang menghasilkan persamaan tegangan normal Reynold pada aliran inkompresibel seperti yang dinyatakan persamaan (2.13) dan (2.14) (Shih, Liou, Shabbir, & Zhu, 1995).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial k}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) & \quad (2.14) \\ & = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{E^2}{k + \sqrt{v \varepsilon}} \end{aligned}$$

2.7 Distribusi Gaya Aerodinamik dan Kesetimbangan

Salah satu efek samping dari penggunaan *wing* adalah meningkatkan hambatan udara pada kendaraan sehingga perlunya menganalisa efek hambatan udara pada kecepatan tertinggi kendaraan untuk mengetahui seberapa besar kendaraan kehilangan daya mesin akibat hambatan udara.

Akselerasi kendaraan dapat dihitung dengan persamaan:

$$m x_{vehicle} \ddot{x} = F - \frac{1}{2} \rho C_d A \dot{x}^2 \quad (2.45)$$

Pada saat terjadi kondisi equilibrium antara gaya dorong dan gaya hambat udara, akselerasi $x_{vehicle} \ddot{x}$ sama dengan nol sehingga persamaan (...) dapat disederhanakan menjadi:

$$F = \frac{1}{2} \rho C_d A \dot{x}^2 \quad (2.16)$$

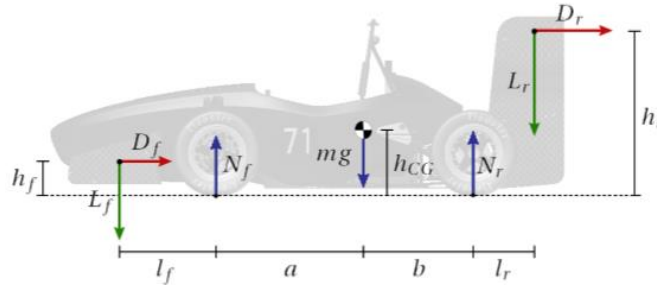
Gaya dorong kendaraan dapat diekspresikan dalam *engine power* P dan kelajuan kendaraan $v = \dot{x}$ dengan pendekatan oleh McBeath (McBeath, Competition Car Downforce, 1998) , diperoleh

$$P = \frac{C_d A v^3}{1.633} \quad (2.17)$$

Salah satu keuntungan menggunakan aerodinamik divais adalah meningkatkan grip pada ban. Peningkatan performa dikarenakan ekstra grip dari penambahan beban normal dapat dikalkulasi dengan mengetahui kelajuan maksimum yang diizinkan secara teoritis pada saat kendaraan menikung sebelum kehilangan grip. Kelajuan ini adalah ketika nilai gaya gesek sama dengan gaya sentripetal. Dengan asumsi koefisien gesek konstan.

$$\mu F_z = \mu \left(mg + \frac{1}{2} \rho C_L A v^2 \right) = \frac{mv^2}{R} \leftrightarrow v = \sqrt{\frac{mg}{\frac{m}{\mu R} - \frac{1}{2} \rho C_L A}} \quad (2.18)$$

Posisi dan dimensi *wing* harus dipertimbangkan untuk mencapai distribusi beban yang diinginkan dari gaya aerodinamik. Pusat beban aerodinamik haruslah dekat dengan *Center of Gravity* (CG) mobil sapu angin speed untuk memperthanakan karakteristik *handling* pada kecepatan yang berbeda. Gaya yang bekerja pada kendaraan ditunjukkan pada *Free body diagram* di bawah. beban yang diterima pada ban belakang dapat dikalkulasi pada kondisi equilibrium sebagai berikut.



Gambar 2. 6 *Free body diagram* distribusi pembebanan (Dahlberg, 2016)

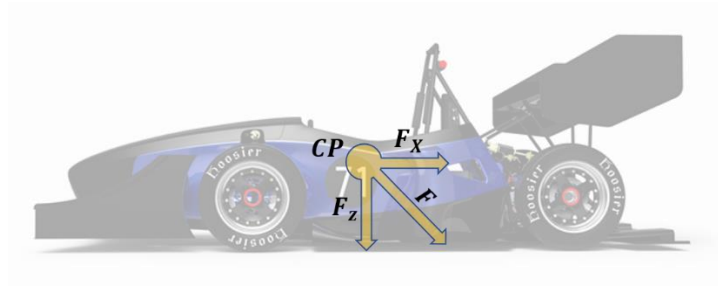
$$\uparrow: \sum_i e_z \cdot F^{(i)} = 0 \quad \Rightarrow \quad N_f + N_r - mg - L_f - L_r = 0 \quad (2.19)$$

$$\begin{aligned} \curvearrowright: \sum_i (r^{(i)} - r_{CG}) \times F^{(i)} &\Rightarrow bN_r - aN_f - (l_r + b)L_r + (l_f + a)L_f \\ &+ (h_{CG} - h_r)D_r \\ &= 0 \quad + (h_{CG} - h_f)D_f = 0 \end{aligned} \quad (2.20)$$

Berdasarkan persamaan di atas, gaya yang bekerja pada ban belakang adalah:

$$N_r = \frac{amg + (l_r + a + b)L_r - l_f L_f + (h_r - h_{CG})D_r + (h_f - h_{CG})D_f}{a + b} \quad (2.21)$$

Bagian penting lain dari aerodinamika mobil adalah distribusi gaya aerodinamik. Distribusi gaya aerodinamik erat kaitannya dengan *centre pressure* yang merupakan titik dimana resultan gaya aerodinamika diterapkan. Pada gambar di bawah *centre pressure* ditunjukkan dengan *CP*.



Gambar 2. 7 *Center of pressure* kendaraan

Letak *center pressure* memperhatikan *center of mass* (CG), mobil akan mengalami momen di sekitar sumbu horizontal (lateral) yang besarnya akan bertambah ketika kecepatan meningkat. Missal titik CG dan CP tidak sama pada arah $-x$. *Downforce* akan mengakibatkan momen yang cenderung membuat mobil berotasi ke arah $-y$.

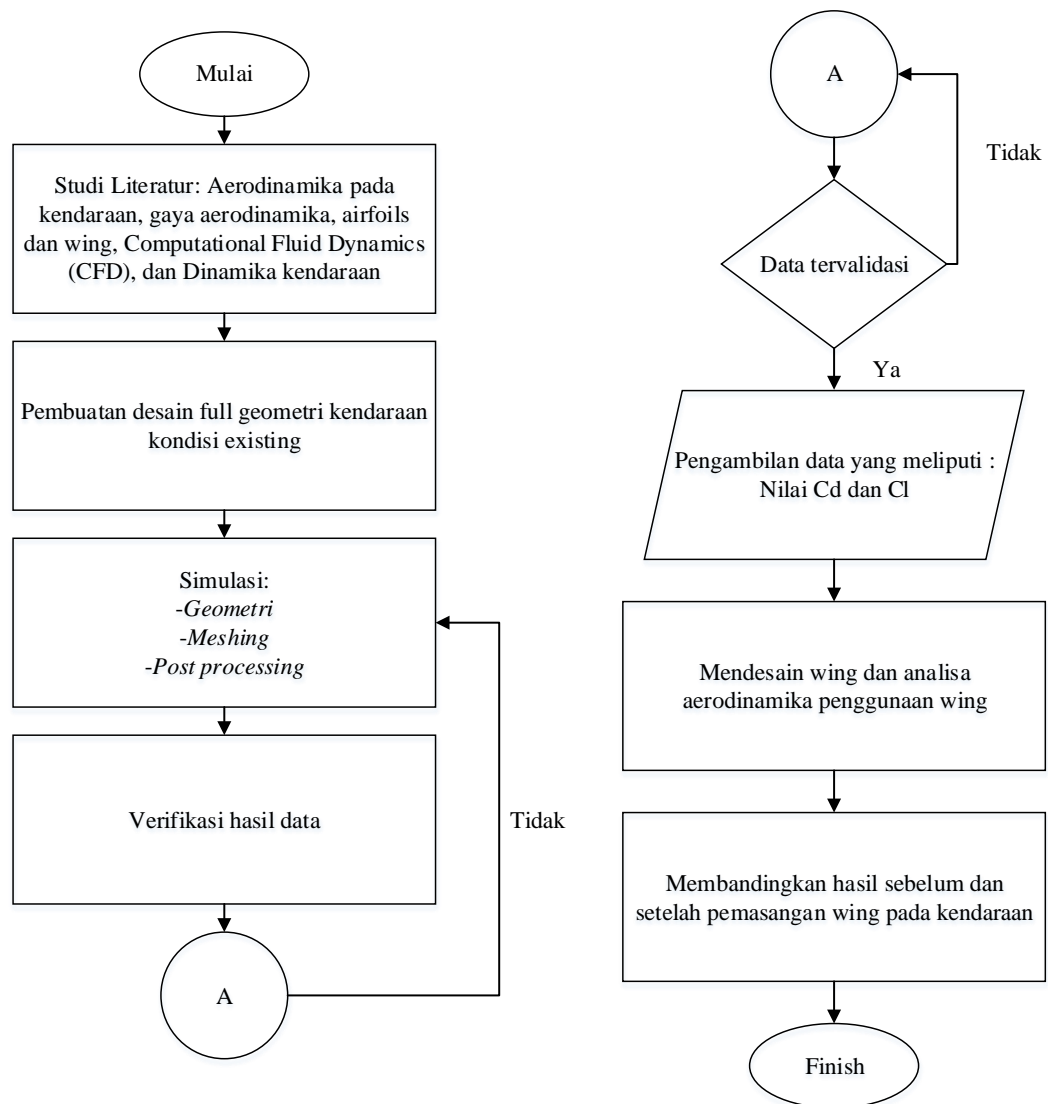
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Studi Literatur

Urutan langkah-langkah yang dilakukan dalam pelaksanaan penelitian ini terdapat pada diagram alir pelaksanaan penelitian pada gambar 3.1



Gambar 3. 1 Diagram alir Penelitian

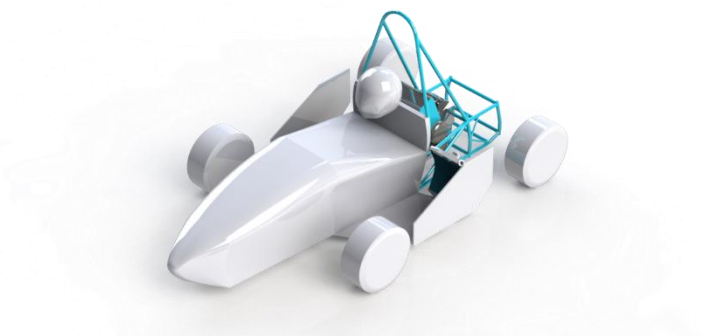
Penelitian ini diawali dengan studi literatur mengenai aerodinamika pada kendaraan, gaya aerodinamika, *airfoils* dan *wing*, *Computational Fluid Dynamics* (CFD), dan dinamika kendaraan. Literatur tersebut selanjutnya di-*review* untuk

memberikan pemahaman lebih utuh yang dibutuhkan dalam proses simulasi analisis hasil simulasi.

Langkah selanjutnya mendesain dan melakukan simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) pada kondisi mobil *existing*. Apabila simulasi memenuhi konvergensi simulasi, *grid independence*, dan memiliki selisih kurang dari 10% dari data acuan, selanjutnya melakukan pengambilan data berupa nilai Cd dan Cl. Kemudian mendesain *wing* dan melakukan analisa aerodinamika pada kendaraan. Data – data untuk setiap geometri kemudain dibandingkan dan dilakukan analisis pengaruh penggunaan *wing*.

3.2 Desain Geometri Mobil SAS VIII

Secara umum geometri dari mobil Sapuangin Speed ini didesain menyerupai bentuk bodi mobil formula. Bagian depan tumpul dan membesar sampai bagian belakang yang hampir berbentuk segiempat. Hal tersebut dikarenakan geometri juga mengikuti bentuk chassis kendaraan. Gambar 3.2 adalah rancangan desain mobil Sapuangin Speed VIII.



Gambar 3. 2 Desain mobil SAS VIII

Proses desain model 3D mobil SAS VIII dilakukan menggunakan *software CAD Solidworks 2017*. Beberapa komponen tidak di desain pada penelitian ini seperti Arm, Knalpot, Baterai, dan komponen elektrik lainnya. Rincian yang berlebih meskipun merepresentasikan kondisi kendaraan seccara real. Namun, dapat secara signifikan meningkatkan *Reynold Number* di seluruh kendaraan yang dapat menghambat konvergensi perhitungan (Soliman, Schommer, & Martins, 2015). Selain itu, detail-detail tersebut dapat diabaikan karena tidak memberi

pengaruh yang signifikan pada efek aerodinamika. Tabel 3.1 menyajikan data spesifikasi mobil SAS VIII .

Tabel 3. 1 Spesifikasi Mobil SAS VIII

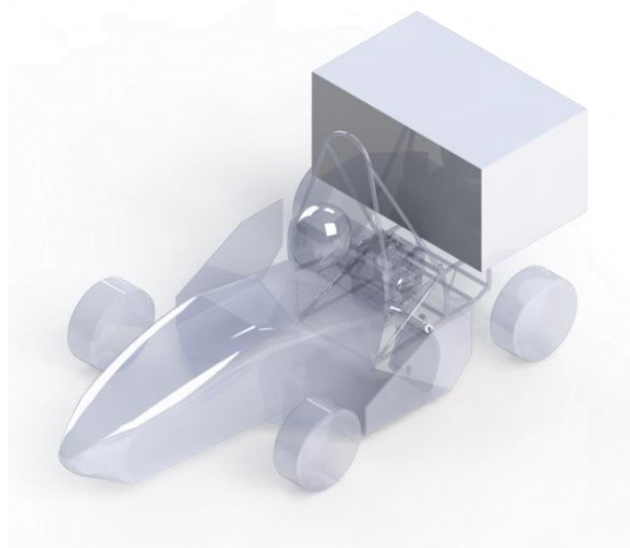
Parameter	Nilai
Panjang (L)	2,860 m
Lebar (W)	1,649 m
Tinggi (H)	1,280 m
Wheelbase	1,560 m
Tinggi Cg (h_{CG})	0,300 m

3.3 Bentuk *Wing* dan Dimensi

Formula FSAE memberlakukan sejumlah pembatasan pada penempatan dan ukuran perangkat aerodinamik yang dipasang ke mobil. Aturan-aturan yang berlaku ini sebagaimana tertera dalam lampiran.

3.3.1 Dimensi *Rear Wing*

Berdasarkan batasan ukuran fisik *rear wing* sesuai dengan aturan FSAE, mempertimbangkan masalah *packaging*, dan kemudahan reparasi komponen-komponen yang berada di belakang kendaraan. Gambar 3.3 memperlihatkan batas desain volumetrik *rear wing*.



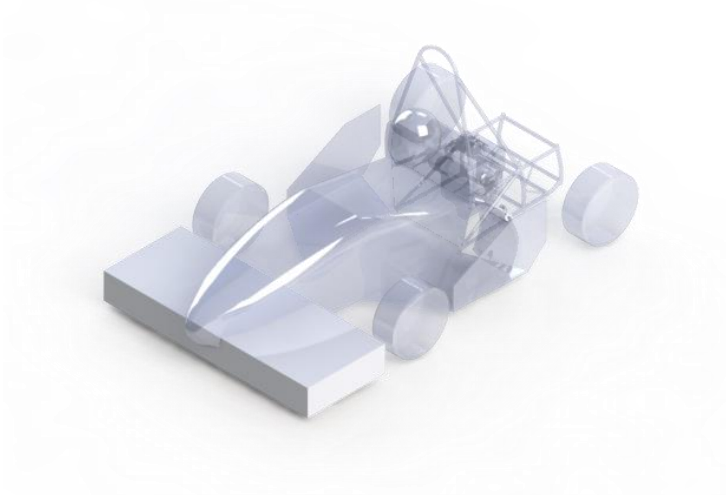
Gambar 3. 3 Batasan desain volumetrik *rear wing*

Tabel 3. 2 Dimensi desain volumetrik *rear wing*

Panjang (m)	Lebar (m)	Tinggi (m)
0,745	1,2	0,632

3.3.2 Dimensi *Front Wing*

Berdasarkan batasan ukuran fisik *front wing* sesuai dengan aturan FSAE serta mempertimbangkan performa suspensi agar seluruh bagian kendaraan tidak menyentuh tanah selama *track event*, maka *ground clearance* dari *front wing* adalah 40 mm. Lebih lanjut, untuk mengetahui batasan ruang yang tersedia untuk pemasangan *front wing* digambarkan batas desain volumetrik pada mobil seperti tampak pada gambar 3.4.

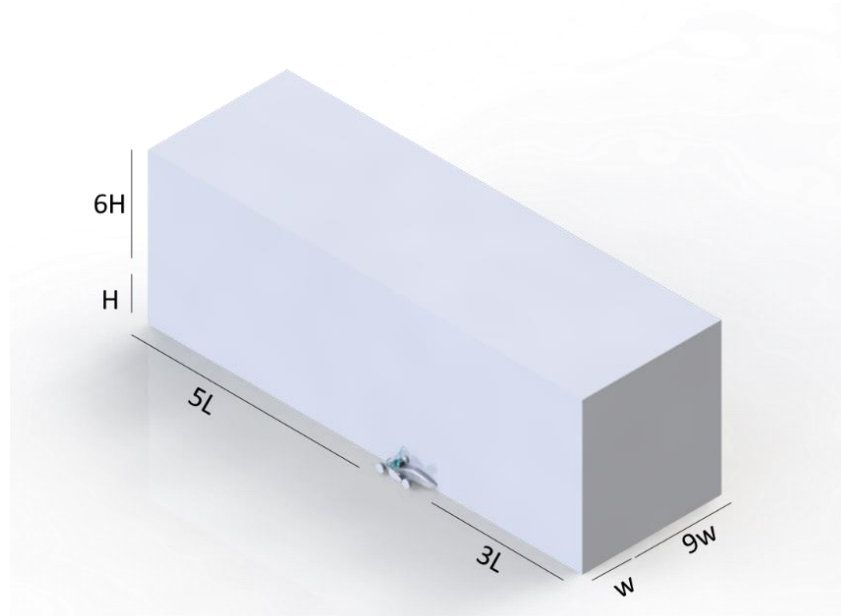
**Gambar 3. 4** Batasan desain volumetrik *front wing***Tabel 3. 3** Dimensi desain volumetrik *front wing*

Panjang (m)	Lebar (m)	Tinggi (m)
0,625	1,649	0,21

3.4 Computational Domain

Pada kenyataannya, untuk simulasi kondisi *open road*, luas area penampang terowongan angin harus menghasilkan *blockage ratio* kurang dari atau sama dengan 0,2%. *Blockage ratio* dapat dihitung dengan menggunakan rasio luas area depan

objek yang diproyeksikan ke area penampang terowongan angin. Domain komputasi yang tidak terlalu besar dapat menghemat proses komputasi. Karena keterbatasan komputasi dan bentuk yang simetris hanya dibuat simulasi setengah kendaraan (Soliman, Schommer, & Martins, 2015).



Gambar 3. 5 Dimensi domain komputasi

3.5 Simulasi CFD

Tahap awal dari simulasi CFD adalah pembuatan geometri yang diimpor dari *Computer Aided Design (CAD)*. Setiap variasi model perangkat aerodinamika *wing* disimulasikan satu per satu sampai ditemukan desain yang sesuai, kemudian mensimulasikan karakteristik aerodinamis akhir dari seluruh kendaraan.

Geometri-geometri yang telah di desain pada *software CAD* di-eksport dalam bentuk *neutral file format (IGES, STEP, SAT dll)* agar dapat menghindari kesalahan penyajian geometri.

Tahapan kedua adalah *meshing* yang merupakan proses diskritisasi bagian integral dari proses numerik dimana geometri dibagi menjadi elemen-elemen kecil. Pada masing-masing element tersebut nantinya akan dilakukan persamaan dasar simulasi CFD. *Meshing* akan sangat mempengaruhi akurasi, konvergensi, dan

waktu simulasi sehingga perlunya menegatur *meshing* sedemikian rupa untuk hasil yang akurat dengan waktu komputasi yang tidak terlalu lama.

Tahapan ketiga adalah menentukan inisial kondisi dan kondisi batas serta parameter-parameter yang akan digunakan dalam simulasi. Karena aliran udara di sekitar mobil FSAE turbulen, model harus dipilih untuk simulasi turbulen. Terdapat empat model turbulen utama yang sering digunakan pada industryomotif: $k - \varepsilon$, $k - \omega$, *Lattice Boltzmaan* dan *Large Eddy Simulation* (LES). Pada kasus ini, akan dipilih model $k - \varepsilon$. Pada aplikasi industry model ini menunjukkan bahwa memungkinkan mencapai hasil yang baik dalam bentuk nilai integral (seperti koefisien drag), dengan error 2-5% (Pelekasis & Oxyzoglou, 2017).

Tabel 3. 4 Parameter yang digunakan

Parameter	Nilai
Model Geometri	3D Solver
Keadaan	<i>Steady State</i>
Viscous Model	K - ε epsilon
Material Properties	Fluid : air

Tabel 3. 5 Kondisi batas simulasi CFD

No	Kondisi Batas	Kondisi
1	Velocity - inlet	Inlet air <ul style="list-style-type: none"> • Kecepatan aliran: 13,89 m/s • <i>Turbulence intensity</i>: 5% • <i>Turubulence viscosity Ratio</i>: 10
2	Pressure – Outlet	Backflow Reference Frame : Absolute <ul style="list-style-type: none"> • <i>Gauge Pressure</i>: 0 Pa • <i>Backflow Turbulent Intensity</i>: 5% • <i>Backflow Turbulent Ratio</i>: 10
3	Wall	<i>No slip Wall</i>

3.6 Meshing Parameter

Meshing yang diberikan pada simulasi ini memiliki ukuran kontrol volume dan metode yang berbeda-beda tiap desain. Untuk membuktikan bahwa pola *mesh* yang digunakan sudah tepat digunakan, dilakukan pengujian *grid independence*, yaitu memperkecil skala *mesh* hingga perubahan hasil simulasi yang didapatkan mencapai nilai konstan. Tabel 3.4 menunjukkan beberapa *mesh* dengan jumlah *element* berbeda dan nilai *cd* masing-masing untuk setiap geometri.

Tabel 3. 6 hasil *Gid independence*

Rear Wing			
Nodes	Elements	cd	Selisih (%)
32681	180812	0,20163	
262132	802706	0,18877	6,813825424
339440	1236296	0,18702	0,934625013
752018	3659139	0,18968	1,402646619
Front Wing			
Nodes	Elements	Cd	Selisih (%)
32546	173501	0,1125	
310444	1066856	0,09874	13,93310826
573692	2548004	0,09855	0,188249907
637705	2915420	0,09837	0,188877916
No wing cars			
Nodes	Elements	Cd	Selisih (%)
1275359	6827905	0,70481	
1583316	8639555	0,6189	12,18809013
2623470	14794603	0,61614	0,446409767
1861369	10281442	0,61791	0,286732781

Dari tiap pola *mesh*, dapat disimpulkan untuk mencapai selisih berada di bawah 10% masing-masing geometri memiliki jumlah *nodes* dan *element* yang berbeda-beda. Pada *rear wing* selisih hasil mulai mencapai di bawah 10% ketika jumlah *element* mencapai 802706 *element meshing*, *Front wing* pada 1066856 *element meshing*, dan mobil tanpa *wing* pada 8639555 *element meshing*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil dan Validasi Kendaraan Kondisi *Existing*

Validasi hasil simulasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi yang diperoleh dengan hasil penelitian sebelumnya dan memperhatikan nilai konvergensi hasil simulasi. Dalam metode simulasi Computational Fluid Dynamic, selisih yang dapat ditoleransi antar kedua nilai tersebut adalah di bawah 10% (William, 2014).

Parameter utama yang akan dijadikan acuan pada simulasi Aerodinamika ini adalah nilai koefisien *drag*. Validasi akan dilakukan dengan membandingkan nilai koefisien drag hasil simulasi dan hasil standar *open wheel vehicle* maupun penelitian sebelumnya terkait mobil *formula student* tanpa perangkat aerodinamika.

Sebagaimana dijelaskan (Seward, 2014) dalam bukunya dan penelitian terkait aerodinamika mobil *formula student* oleh (Pelekasis & Oxyzoglou, 2017) memiliki nilai Cd 0,60 dan 0,63 berturut-turut.

Tabel 4. 1 Validasi Hasil

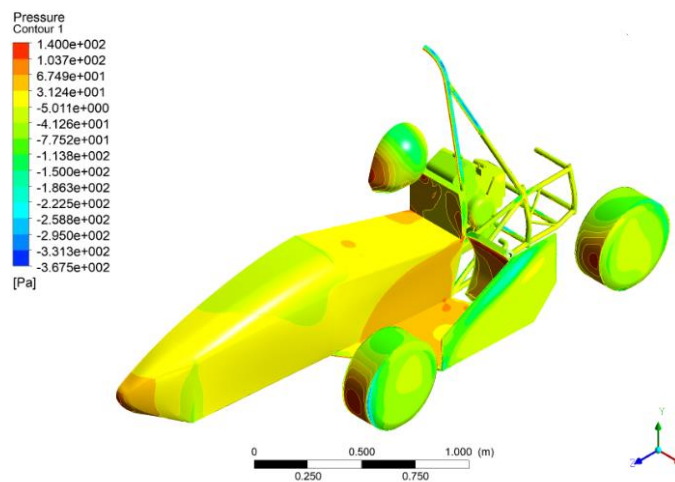
Berdasarkan	Nilai Cd Simulasi	Nilai Cd Standar	Error
Seward	0,6189	0,60 – 0,7	3,15% - 16,67%
Pelekasis		0,63	1,70%

Berdasarkan tabel di atas persentase selisih nilai Cd simulasi dan hasil penelitian-penelitian sebelumnya adalah 1,70% - 3,15%. Walaupun desain mobil tersebut berbeda. Namun, secara umum termasuk jenis mobil yang sama, yaitu *open wheel race vehicle*. Hal tersebut menunjukkan bahwa hasil penelitian tugas akhir ini telah tervalidasi.

Setelah dilakukan simulasi CFD diperoleh mobil Sapuaringin Speed memiliki Cd 0,6189 dan nilai Cl positif 0,0078 dengan luasan *frontal area* 1,159 m². Hasil tersebut menunjukkan bahwa mobil menghasilkan gaya angkat yang berakibat penurunan stabilitas kendaraan pada kecepatan tinggi. Penambahan

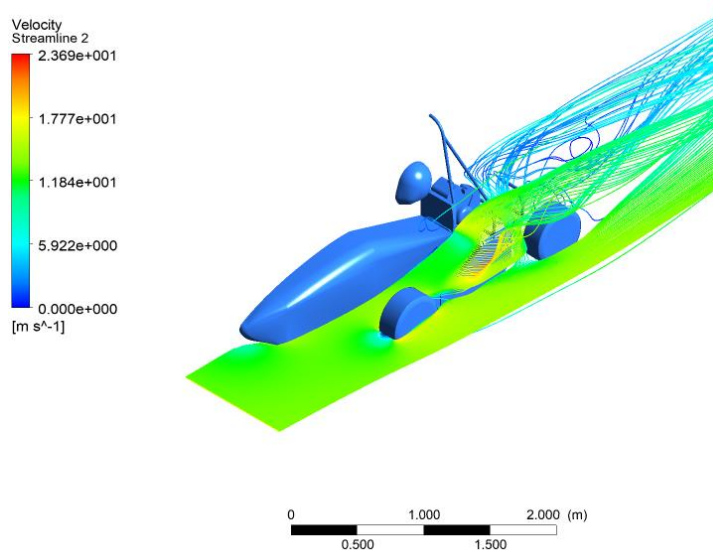
perangkat aerodinamik perlu ditambahkan untuk menghasilkan *downforce* sehingga meningkatkan performa kendaraan dan membuat mobil lebih kompetitif pada saat *on-track*.

Ansys Workbench post-processing juga mampu memberikan tampilan visual distribusi tekanan yang bekerja pada permukaan kendaraan. Gambar 4.1 menunjukkan terjadinya *multi stagnasi* ditandai dengan spektrum warna merah pada area depan daerah ban depan dan belakang *nose cone*, dan helm pembalap.



Gambar 4. 1 Kontur tekanan pada Mobil

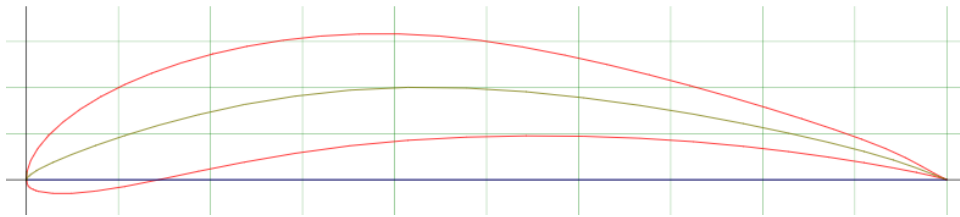
Daerah *stagnasi* ini akan memberikan pengaruh terhadap gaya hambat kendaraan. keuntungan lain dari penggunaan *wing* adalah menghindari gangguan aliran pada bagian belakang kendaraan seperti yang diperlihatkan pada gambar 4.2.



Gambar 4. 2 Streamline di Sekitar bodi mobil

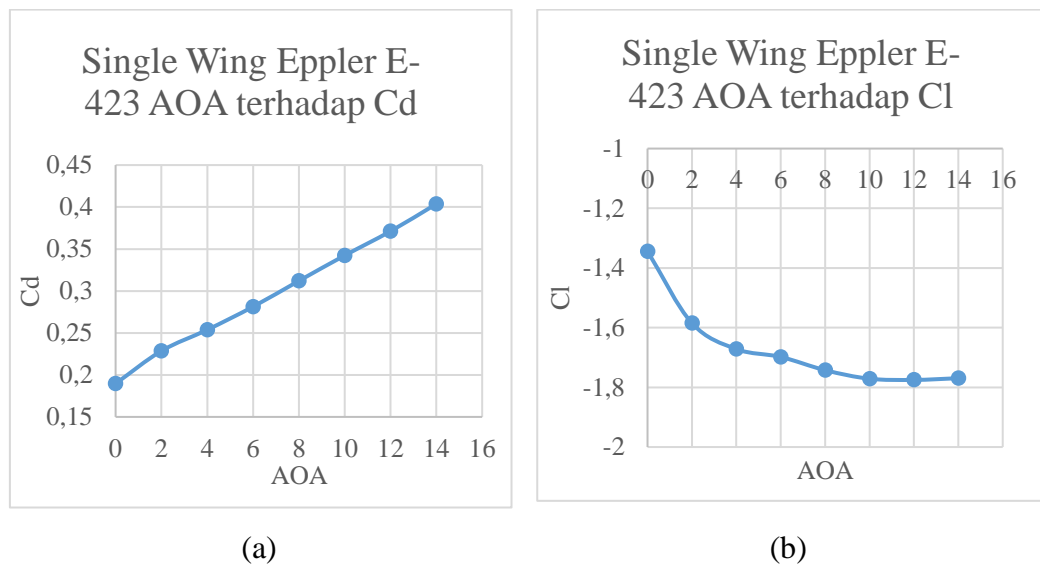
4.2 Desain dan Hasil Simulasi *Rear Wing*

Tahapan awal yang dilakukan adalah pemilihan konfigurasi airfoil yang tepat. Berdasarkan penelitian (Dahlberg, 2016) yang membandingkan lima jenis airfoil *high lift* diperoleh airfoil jenis EPPLER-E423 cocok diterapkan pada mobil SAS VIII karena memiliki nilai koefisien lift yang relatif tinggi dan memiliki profil yang mudah dibuat.



Gambar 4. 3 Profil airfoil eppler E423

Setelah memilih jenis airfoil, perlu untuk mengestimasi dimensi sudut serang efektif untuk airfoil jenis ini. Grafik di bawah menunjukkan pengaruh sudut serang airfoil terhadap nilai C_d dan C_l .

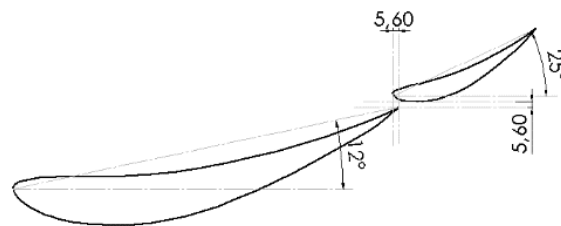


Gambar 4. 4 Grafik pengaruh AOA E423 (a) terhadap C_d (b) terhadap C_l

Berdasarkan grafik di atas dapat dilihat bahwa sudut serang efektif airfoil adalah pada sudut 12 derajat dengan nilai koefisien *lift* -1,775. Hal ini dapat diperjelas dengan nilai koefisien lift negatif turun pada sudut serang 14 derajat. Pada sudut serang ini airfoil telah mengalami kondisi *stall*. Karena telah mengalami kondisi *stall*, cara lain yang dapat ditempuh meningkatkan nilai koefisien *lift* negatif

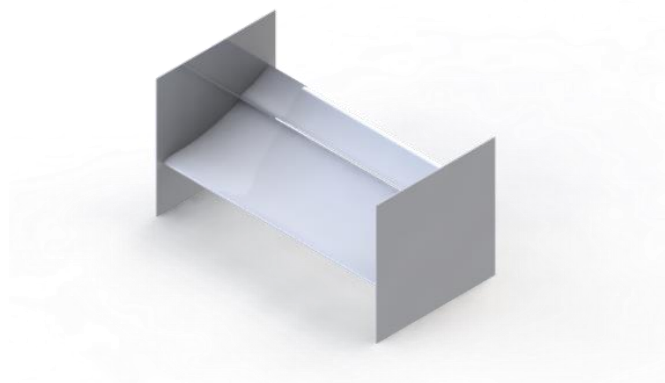
adalah menunda separasi aliran dengan menambahkan *second element*. Keuntungan penggunaan *second element* adalah terjadi *energizing* pada lapisan batas.

Penelitian sebelumnya (McBeath, 2006) menjelaskan AOA yang disarankan untuk penggunaan *second element* adalah 25 – 30 derajat. Dengan *gap* dan *overlap* 1 – 4%*C*. Pada penelitian ini dipilih AOA *main element* dan *second element* berturut-turut 12 dan 25 derajat dengan jarak *gap* dan *overlap* yang dipilih adalah 1%*C*. Hasil simulasi menunjukkan nilai *C_d* dan *C_l* adalah 0,482 dan -2,137 berturut-turut.



Gambar 4. 5 Konfigurasi multielement wing

Selain untuk memudahkan *packaging* perangkat *wing* penggunaan *end plate* juga untuk mereduksi *induced drag* pada airfoil. Dimensi *end plate* maksimum, yaitu 600 mm x 600 mm akan digunakan untuk memaksimalkan nilai aspek rasio serta mempertimbangkan komponen-komponen pada bagain belakang kendaraan. Desain akhir, *rear wing* yang akan digunakan seperti ditunjukkan pada gambar 4.6

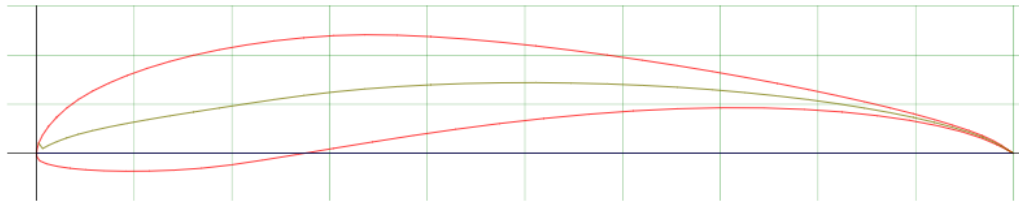


Gambar 4. 6 Final desain rear wing

4.3 Desain dan Hasil Simulasi *Front Wing*

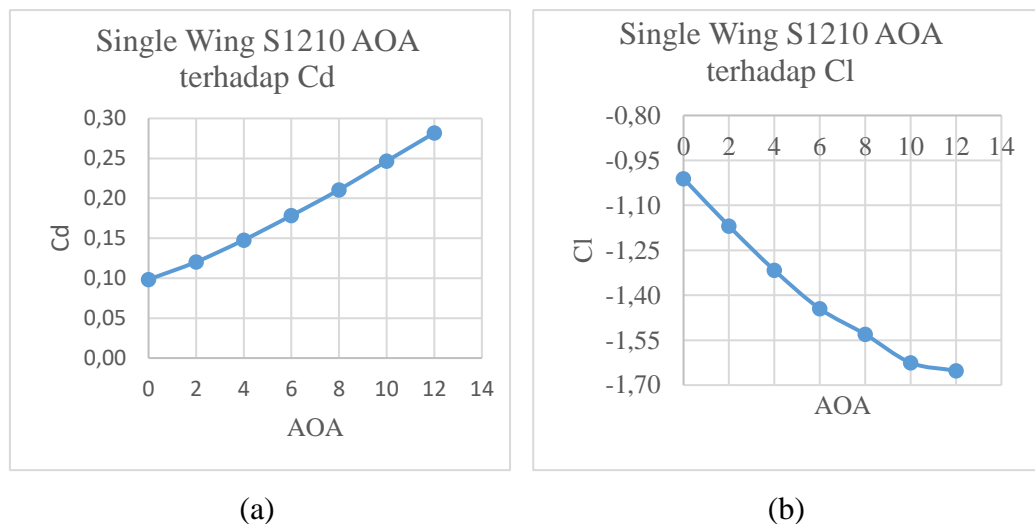
Konfigurasi airfoil yang digunakan pada *front wing* adalah S1210. Pemilihan airfoil ini berdasarkan penelitian (Grabis & Agarwal, 2018) jenis airfoil ini

memiliki koefisien lift negative yang tinggi pada *ground clearance* yang rendah dibandingkan empat jenis airfoil lainnya.



Gambar 4. 7 Profil airfoil S1210

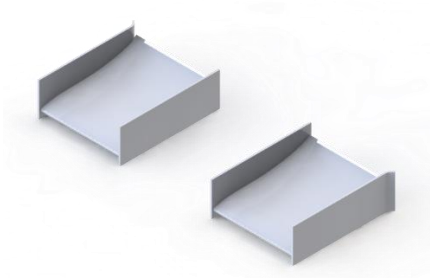
Setelah memilih jenis airfoil, perlu untuk mengestimasi dimensi sudut serang efektif untuk airfoil jenis ini. Grafik di bawah menunjukkan pengaruh sudut serang airfoil terhadap nilai C_d dan C_l .



Gambar 4. 8 Grafik pengaruh AOA S1210 (a) terhadap C_d dan (b) terhadap C_l

Sesuai dengan filosofi desain *front wing* yaitu mengimbangi moment akibat penambahan *rear wing*, dengan melakukan manipulasi aljabar pada persamaan (2.21) diperoleh nilai sudut serang yang dipilih untuk *front wing* adalah 10 derajat dengan distribusi beban 51,46% pembebanan pada roda belakang dan 48,54% pada roda depan. Pemilihan sudut serang 10 derajat juga karena nilai efisiensi aerodinamika relatif lebih tinggi daripada sudut serang 12 derajat. Namun, memiliki selisih nilai c_l yang relative kecil.

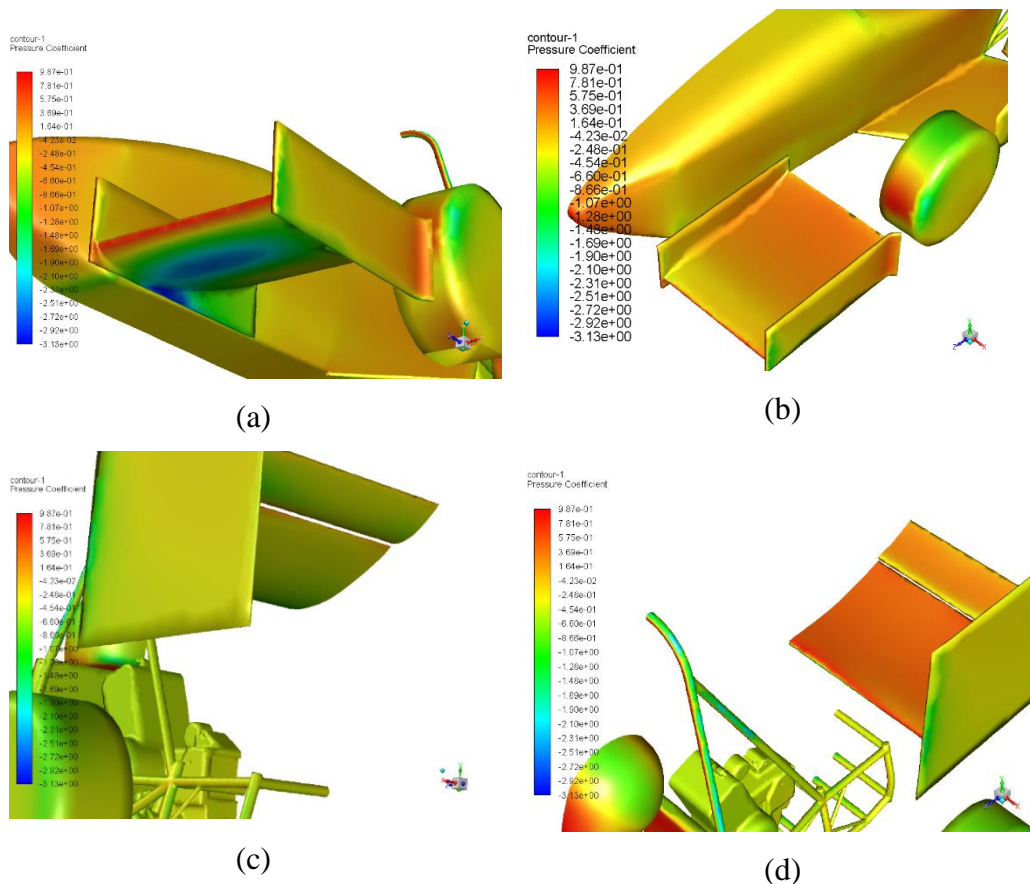
Penambahan *end plate* dilakukan untuk mengarahkan aliran fluida agar tidak bertumbukan dengan roda sehingga merduksi *drag* dan menambah *downforce*. Final desain *front wing* seperti dipelihatkan pada gambar 4.9.



Gambar 4. 9 Final desain front wing

4.4 Hasil simulasi Full Model *Aerodynamic Package*

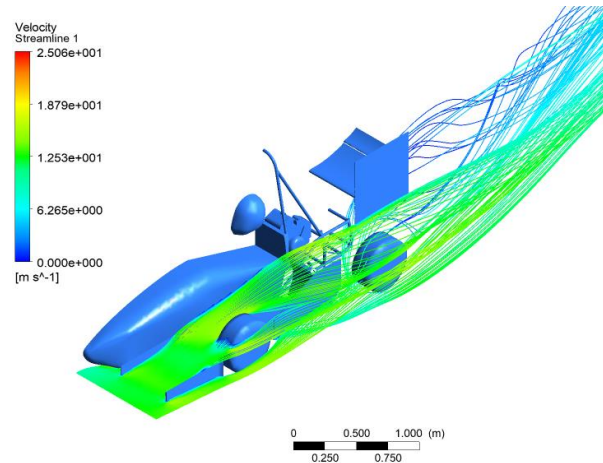
Final model merupakan model kendaraan yang sama dengan kondisi sebelumnya dengan penambahan perangkat *front* dan *rear wing* yang telah dipilih sebelumnya. Penambahan perangkat *wing* menambah luasan *frontal area* menjadi $1,363 \text{ m}^2$. kendaraan juga menghasilkan nilai koefisien *drag* dan *lift* sebesar 0,6722 dan -1,055 berturut-turut.



Gambar 4. 10 Kontur Cp pada wing (a) bawah *front wing* (b) atas *front wing* (c) bawah *rear wing* (d) atas *rear wing*

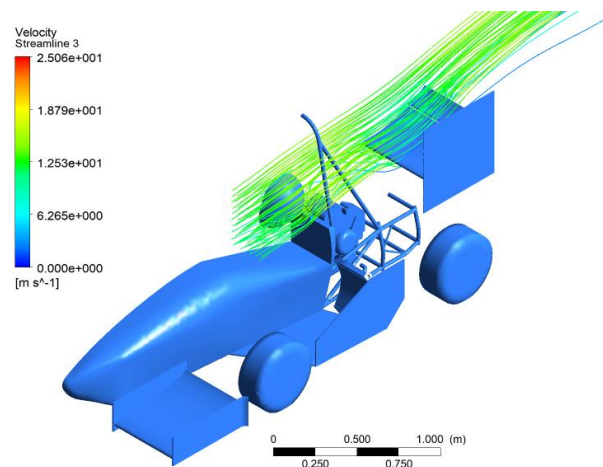
Gambar 4.10 menunjukkan nilai C_p positif di bagian atas *front* dan *rear wing* dan nilai C_p negative di bagian bawah *front* dan *rear wing*. Perbedaan nilai C_p ini yang menghasilkan *downforce* pada kendaraan akibat penggunaan *wing*.

Streamline di bawah ini digunakan untuk memvisualisasikan aliran udara di sekitar mobil. Selain itu, *streamline* di bawah juga menunjukkan *wing* dapat menghindari gangguan aliran di belakang kendaraan.



Gambar 4. 11 *Streamline* pada *front wing*

Lebih lanjut, gambar 4.12 menunjukkan *streamline* pada *rear wing*. Gambar ini menunjukkan bahwa aliran udara untuk *rear wing* dipengaruhi oleh banyak bagian dari kendaraan yang terletak di bagian depan yang mengakibatkan dampak pada efisiensi *rear wing*. Pengurangan efisiensi ini banyak dipengaruhi pada bagian *cockpit*, helm dan *firewall* yang menciptakan *vortice* yang berinteraksi dengan *freestream* yang mengakibatkan pengurangan kecepatan.



Gambar 4. 12 *Streamline* pada *rear wing*

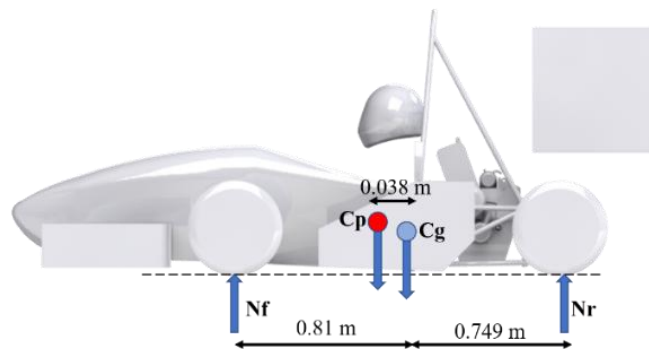
4.5 Performa Kendaraan

Bagian terakhir dalam diskusi ini adalah membandingkan performa model kendaraan sebelumnya dengan penambahan perangkat aerodinamik *wing*. Performa ini berkaitan dengan karakteristik kendaraan pada saat *on track*. Berdasarkan penelitian (Costa & Bortolussi, 2016) Beberapa asumsi digunakan untuk mempermudah perhitungan, diantaranya sebagai berikut.

- a. Tidak mempertimbangkan perpindahan berat
 - 1) Efek suspensi diabaikan
 - 2) Inersia diabaikan
 - 3) Grip ban dianggap fungsi linear
- b. Tidak menggunakan pemodelan ban yang kompleks
 - 1) Perubahan *camber*, *slip ratio*, dan *slip angle* diabaikan
 - 2) Efek temperature dan tekanan ban diabaikan.
- c. Pergerakan *yawing* kendaraan diabaikan
- d. Perubahan traksi kendaraan akibat gaya sentrifugal dan pemindahan beban diabaikan.

4.5.1 Distribusi gaya-gaya pada kendaraan

Bagian penting yang lain dari pembahasan aerodinamika adalah menggambarkan gaya-gaya terdistribusikan pada kendaraan. Gambar di bawah menunjukkan gaya-gaya yang bekerja pada kendaraan akibat penambahan *wing* pada sumbu *pitching* kendaraan.



Gambar 4. 13 Free diagram body SAS dengan wing

Hasil simulasi pada *fluent* menunjukkan letak *center pressure* yang merupakan letak resultan gaya aerodinamika terletak pada jarak horizontal 0,038 m dari titik CG kendaraan.

Berdasarkan gambar 4.13 dengan menguraikan gaya-gaya tersebut dan asumsi kendaraan dalam kondisi ekuilibrium, diperoleh distribusi beban akhir yang diterima roda depan dan belakang berturut adalah 51,83% dan 48,17%.

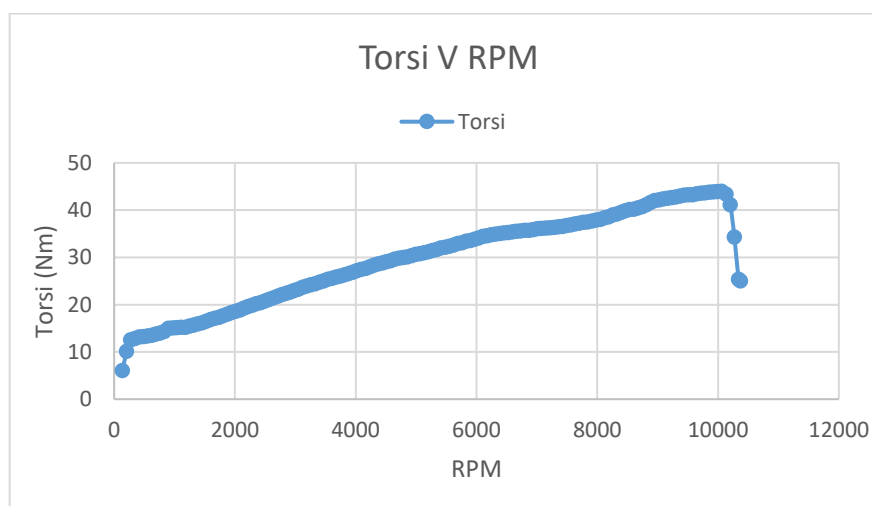
4.5.2 Kecepatan maksimum kendaraan

Kecepatan maksimum dapat diperoleh dengan memanipulasi persamaan (2.17) dengan P daya maksimum *engine*, yaitu 40,45 kW (40450 W). Nilai kecepatan maksimum kendaraan yang dapat dicapai tanpa perangkat aerodinamika adalah 45 m/s, sedangkan kecepatan maksimum kendaraan setelah penambahan *wing* adalah 41 m/s. Namun, kececepatan maksimum sulit dicapai dalam *event* ini karena *trek* pada kompetisi terdiri dari belokan tajam yang berulang dan sedikit jalan lurus yang panjang sehingga bukan fokus utama dari desain aerodinamis.

4.5.3 Performa kendaraan pada trek lurus

Performa kendaraan pada trek lurus dapat dimodelkan dengan persamaan (2.15) dengan F adalah gaya yang terdiri dari gaya akibat *engine* dan gaya *rolling resistance*. Sementara $m\ddot{x}_{vehicle}$ adalah gaya traksi kendaraan.

Grafik torsi – RPM diperlihatkan pada gambar 4.14 Grafik ini deiperoleh berdasarkan hasil tes dynamometer. Grafik ini sebagai acuan menghitung gaya yang dihasilkan *engine*.



Gambar 4. 14 Grafik torsi terhadap RPM

Berdasarkan data di atas gaya yang bekerja pada kendaraan relatif terhadap kecepatan ditunjukkan pada grafik di bawah. Solusi penyelesaian tersebut didekati dengan metode yang digunakan penelitian (McTighe, Grinshpan, & Dekker, 2018).



Gambar 4. 15 Grafik gaya-gaya yang bekerja pada kendaraan terhadap kecepatan

Menurut prinsip d'Alembert kendaraan akan melawan akselerasi pada roda dengan gaya rekasi imajiner yang nilainya sama dengan arah yang berlawanan padatitik CG kendaraan. Hal tersebut yang membuat ketidakseimbangan *couple* yang menyebabkan perubahan pembebanan *static axle* yang disebut *longitudinal load transfer* dengan penambahan beban pada roda belakang dan pengurangan pada roda depan.

Besarnya gaya traksi maksimum yang diizinkan adalah 3626, 79 N dengan *longitudinal load transfer* sebesar $\pm 680,02$ N. Berdasarkan grafik 4.12 gaya traksi maksimum tanpa dan dengan *wing* sebesar 3303,49 N dan 3282,07 N nilai ini masih lebih kecil dari nilai gaya traksi maksimum yang diizinkan agar mobil tetap seimbang sehingga perpindahan berat dapat diabaikan.

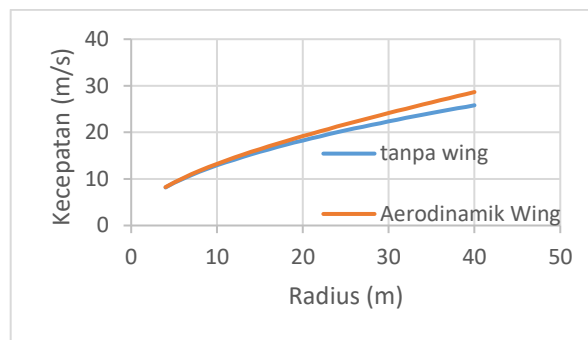
Grafik 4.12 menunjukkan penambahan perangkat aerodinamika meningkatkan gaya hambatan angin yang bekerja pada kendaraan karena nilai C_d dan luas penampang kendaraan lebih besar dari sebelumnya.

Gaya yang dihasilkan oleh *engine* akan berkurang karena gaya hambat udara dan gaya hambat *rolling resistance*. Gaya traksi yang dihasilkan akibat penambahan *wing* dibandingkan kondisi *existing* akan berkurang secara eksponensial seiring bertambahnya kecepatan kendaraan karena gaya aerodinamika berbanding lurus kuadrat terhadap kecepatan relatif kendaraan. Selisih Gaya traksi

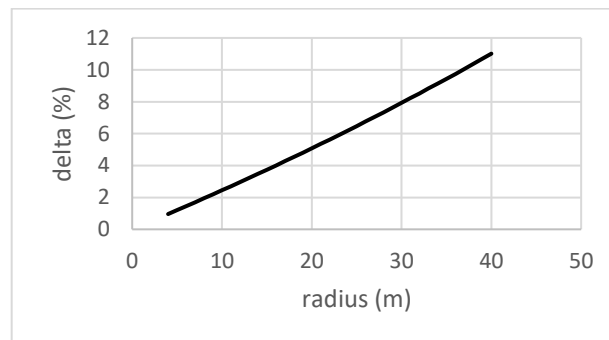
yang dihasilkan mobil dengan *wing* berkurang 0,058% - 5,314% dibandingkan tanpa *wing*.

4.5.4 Performa kendaraan pada saat berbelok

Aturan pada kompetisi menyatakan bahwa trek dalam *event* memiliki radius belok bervariasi dari 4 m hingga 30 m (SAE, 2019). Kecepatan teoritis maksimum kendaraan diperoleh dengan persamaan (2.18). Nilai yang dihasilkan dengan persamaan ini mengasumsikan bahwa daya *engine* mencukupi untuk menghasilkan kecepatan menikung maksimum.



(a)



(b)

Gambar 4. 16 Performa kendaraan pada saat berbelok

Berdasarkan grafik di atas dapat disimpulkan bahwa semakin besar radius belok semakin besar kecepatan menikung maksimum yang mampu dicapai mobil. Hal ini dikarenakan gaya sentrifugal yang dialami oleh mobil semakin kecil dan membuat semakin sulit untuk terjadinya guling pada mobil. Selain itu, grafik di atas menunjukkan penambahan perangkat *wing* dapat meningkatkan kecepatan maksimum mobil sapuangan speed pada saat berbelok sebesar 0,958% sampai 11,014%.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan simulasi dan analisa data yang telah dilakukan, maka kesimpulan yang dapat diambil dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

- Nilai c_d dan c_l pada mobil tanpa wing adalah 0,6189 dan 0,0078 sementara pada mobil dengan penambahan wing mengalami kenaikan c_d dan c_l yaitu 0,6722 dan -1,055.
- Hasil akhir desain menunjukkan distribusi beban yang diterima roda depan dan belakang adalah 51,83% dan 48,17%. Penambahan *wing* juga menunjukkan *top speed* kendaraan yang dihasilkan menurun menjadi 41 m/s dari kecepatan awal sebesar 45 m/s dan gaya traksi pada roda di trek lurus berkurang 0,058% - 5,314% dari sebelumnya. Meski begitu, kecepatan maksimum mobil meningkat 0,958% - 11,014% pada saat berbelok.

5.2 Saran

Berikut adalah saran yang diberikan terkait penelitian ini untuk pengembangan penelitian selanjutnya:

- Simulasi dilakukan pada kondisi transient agar dapat melihat efek aerodinamika pada saat ban berotasi.
- Simulasi dengan domain komputasi $\frac{1}{2}$ lingkaran perlu dilakukan, untuk melihat kecepatan relatif kendaraan pada saat berbelok.
- Perlu dilakukan penelitian eksperimental untuk memperkuat hasil simulasi yang dilakukan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Costa, R. P., & Bortolussi, R. (2016). Lap Time Simulation of Formula SAE Vehicle With Quasi-steady State Model. *SAE International*.
- Dahlberg, H. (2016). *Aerodynamic Development of Formula Student Race Car*. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology.
- Douglas, J., Gasiorek, J., & Swaffield, J. (2005). *Fluid Mechanics Fifth edition*. united kingdom: Pearson.
- Grabis, M., & Agarwal, R. K. (2018). *Computational Fluid Dynamics Analysis of High Lift, Inverted Computational Fluid Dynamics Analysis of High Lift, Inverted Airfoils in Ground Effect*. Washington: Washington University Open Scholarship.
- Hoerner, S. F. (1965). *Fluid Dyanmic Lift*. albuquerque: Hoerner Fluid Dynamics.
- Katz, J. (1995). *Race Car Aerodynamics Designing for Speed*. Massachusetts: Bentley Publisher.
- Katz, J. (2006). *Aerodynamics of Racecars*. Annual Review of Fluid Mechanics.
- Katz, J. (2006). *Aerodynamics of Race Cars (Vol. 2)*. San Diego: Annual Review.
- McBeath, S. (1998). *Competition Car Downforce*. Somerset: Haynes Publishers.
- McBeath, S. (2006). *Competition Car Aerodynamics*. Sparkford: Haynes.
- McTighe, J., Grinshpan, A., & Dekker, D. (2018). Elapsed Time of Vehicle Acceleration . *Undergraduate Journal Of Mathematical Modelling*.
- Newbon, J., & Sims-William, D. (2017). Aerodynamic Analysis of Grand Prix Cars Operating in Wake Flows. *SAE International*, 27.
- Pelekasis, N., & Oxyzoglou, I. (2017). *DESIGN & DEVELOPEMENT OF AN AERODYNAMIC PACKAGE FOR A FSAE RACE CAR* . Thessaly: University of Thessaly.
- Prakoso, A. B. (2011). *Studi Numerik Karakteristik Aliran 3 Dimensi Disekitar Model Sapuangin Dengan Rasio Ground Clearance Terhadap Panjang Model (C/L = 0.027)*. Surabaya: ITS Surabaya.
- SAE. (2019). *Formula SAE Rules*. inggris: Society of Automotive Engineers.
- Seljak, G. (2008). *Racecar Aerodynamics (Vol. 38)*. Ljubljana.

- Seward, D. (2014). *Race Car Design*. London: PALGRAVE.
- Shih, T., Liou, W., Shabbir, A., & Zhu, J. (1995). A New k- ϵ EddyViscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows - Model Development and Validation. *Computers Fluids*, 227-238.
- Soliman, P., Schommer, A., & Martins, M. E. (2015). Formula SAE Aerodynamics: Design process with focus on drivability. *Federal University of Santa Maria*.
- US Comp Edition Society of Automotive Engineers. (2004). *Formula SAE Rules*. USA.
- Versteeg, H., & Malalasekera, W. (1995). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*. Harlow: Longman.
- William, L. (2014). *verification and validation in computational fluid dynamics*. USA: Elsevier.
- Wordley, S., & Saunders, J. (2006). Aerodynamics for Formula SAE: A Numerical, Wind Tunnel and On Track Study. *SAE International*.

LAMPIRAN

A. Regulasi FSAE Terkait

Berikut adalah daftar regulasi FSAE 2020 yang berkaitan dengan topik Aerodinamika kendaraan.

V – Vehicle Requirements

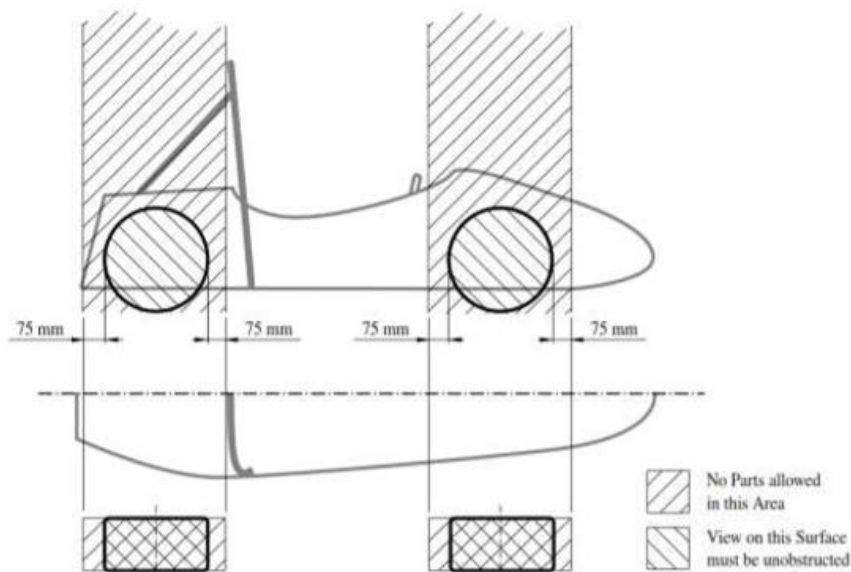
V.1 Configuration

The vehicle must be open wheeled and open cockpit (a formula style body) with four wheels that are not in a straight line.

V.1.1 Open Wheel

V.1.1.1 Open Wheel vehicles must satisfy all of the following criteria:

- The top 180° of the wheels/tires must be unobstructed when viewed from vertically above the wheel.
- The wheels/tires must be unobstructed when viewed from the side.
- No part of the vehicle may enter a keep out zone defined by two lines extending vertically from positions 75 mm in front of and 75 mm behind, the outer diameter of the front and rear tires in the side view elevation of the vehicle, with tires steered straight ahead. This keep out zone will extend laterally from the outside plane of the wheel/tire to the inboard plane of the wheel/tire.



V.1.4 Ground Clearance

V.1.4.1 Ground clearance must be sufficient to prevent any portion of the vehicle except the tires from touching the ground during dynamic events.

V.1.4.2 Intentional or excessive ground contact of any portion of the vehicle other than the tires will forfeit a run or an entire dynamic event.

The intent is that sliding skirts or other devices that by design, fabrication or as a consequence of moving, contact the track surface are prohibited and any unintended contact with the ground which causes damage, or in the opinion of the Dynamic Event Officials could result in damage to the track, will result in forfeit of a run or an entire dynamic event.

T.7 BODYWORK AND AERODYNAMIC DEVICES

T.7.1 Bodywork and Components

T.7.1 There must be no openings through the bodywork into the driver compartment from the front of the vehicle back to the roll bar main hoop or firewall other than that required for the cockpit opening. Minimal openings around the front suspension components are allowed.

T.7.2 All forward facing edges on the bodywork that could impact people, including the nose, must have forward facing radii of at least 38 mm. This minimum radius must extend to at least 45° relative to the forward direction, along the top, sides and bottom of all affected edges.

T.7.3 All forward facing wing edges including wings, end plates, Gurney flaps, wicker bills and undertrays that could contact a pedestrian must have a minimum radius of 5 mm for all horizontal edges and 3 mm for vertical edges (end plates). If the edges themselves do not meet this requirement, additional permanently attached pieces designed to meet this requirement must be used.

T.7.2 General Aerodynamics

T.7.2.1 Aerodynamic device

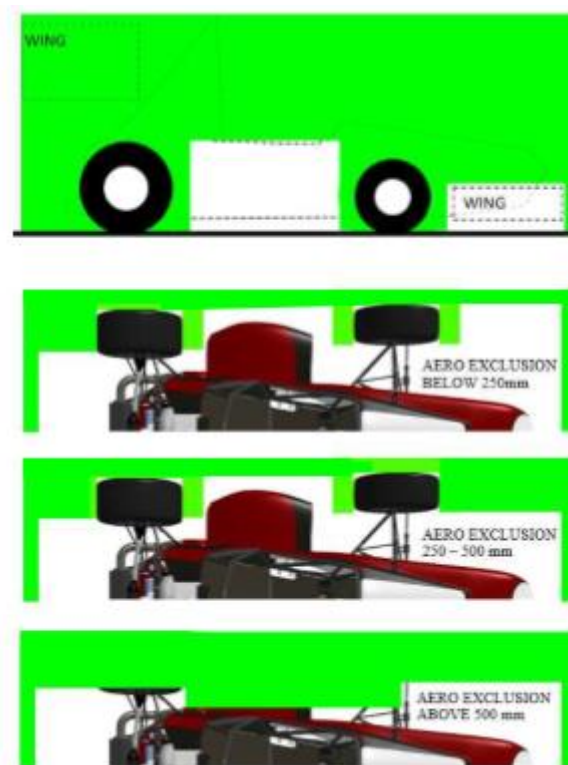
A part on the vehicle which guides airflow for generation of downforce and/or reduction of drag.

Examples include but are not limited to: wings, undertray, splitter, endplates, vanes.

T.7.2.2 No power device may be used to move or remove air from under the vehicle except fans designed exclusively for cooling. Power ground effects are prohibited.

T.7.2.3 All Aerodynamic Devices must be designed such that the mounting system provides adequate rigidity in the static condition and such that the Aerodynamic Devices do not oscillate or move excessively when the vehicle is moving.

T.7.2.3 All Aerodynamic Device limitations apply with the wheels pointing in the straight ahead position



T.7.3 Front Mounted

T.7.3.1 In plan view, any part of any Aerodynamic Device must be:

- a. No more than 700 mm forward of the fronts of the front tires.
- b. Within a vertical plane parallel to the centerline of the chassis touching the outside of the front tires at the height of the hubs.

T.7.3.2 When viewed from the front of the vehicle, the part of the front wheels/tires that are more than 250 mm above ground level must be unobstructed when measured without a driver in the vehicle.

T.7.4 Rear Mounted

T.7.4.1 In plan view, any part of any Aerodynamic Device must be:

- a. No more than 250 mm rearward of the rear of the rear tires
- b. No further forward than a vertical plane through the rearmost portion of the front face of the driver head restraint support, excluding any padding, set (if adjustable) in its fully rearward position (excluding undertrays).
- c. Inboard of two vertical planes parallel to the centerline of the chassis touching the inside of the rear tires at the height of the hub centerline.

T.7.4.2 In side elevation, any part of an Aerodynamic Device must be no higher than 1.2 meters above the ground when measured without a driver in the vehicle.

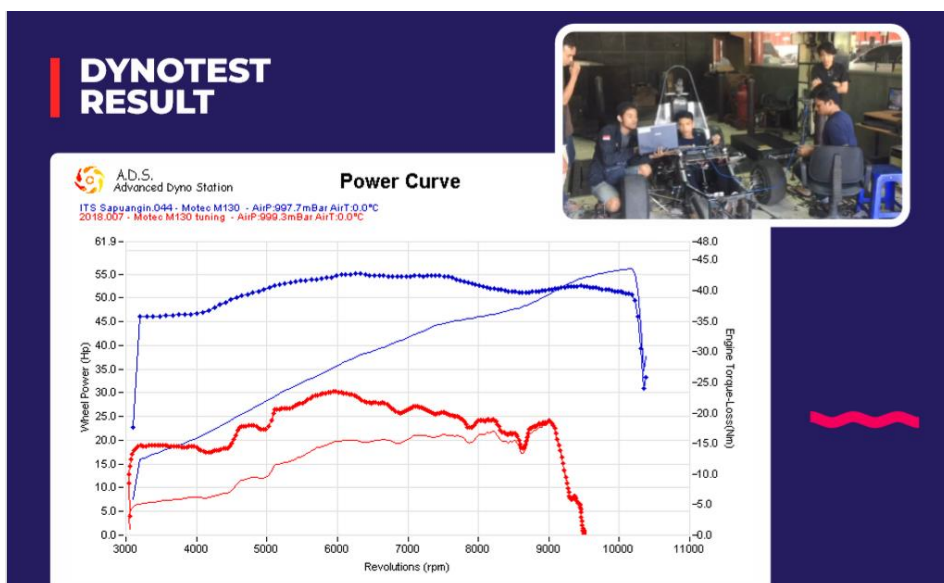
T.7.5 Between Wheels

T.7.5.1 Between the centerlines of the front and rear wheel axles, an Aerodynamic Device may extend outboard in plan view to a line drawn connecting the outer surfaces of the front and rear tires at the height of the wheel centers.

T.7.5.2 Except as permitted under **T.7.4.1** above, any Aerodynamic Devices, or other bodywork, located between the transverse vertical planes positioned at the front and rear axle centerlines must not exceed a height of 500 mm above the ground when measured without a driver in the vehicle.

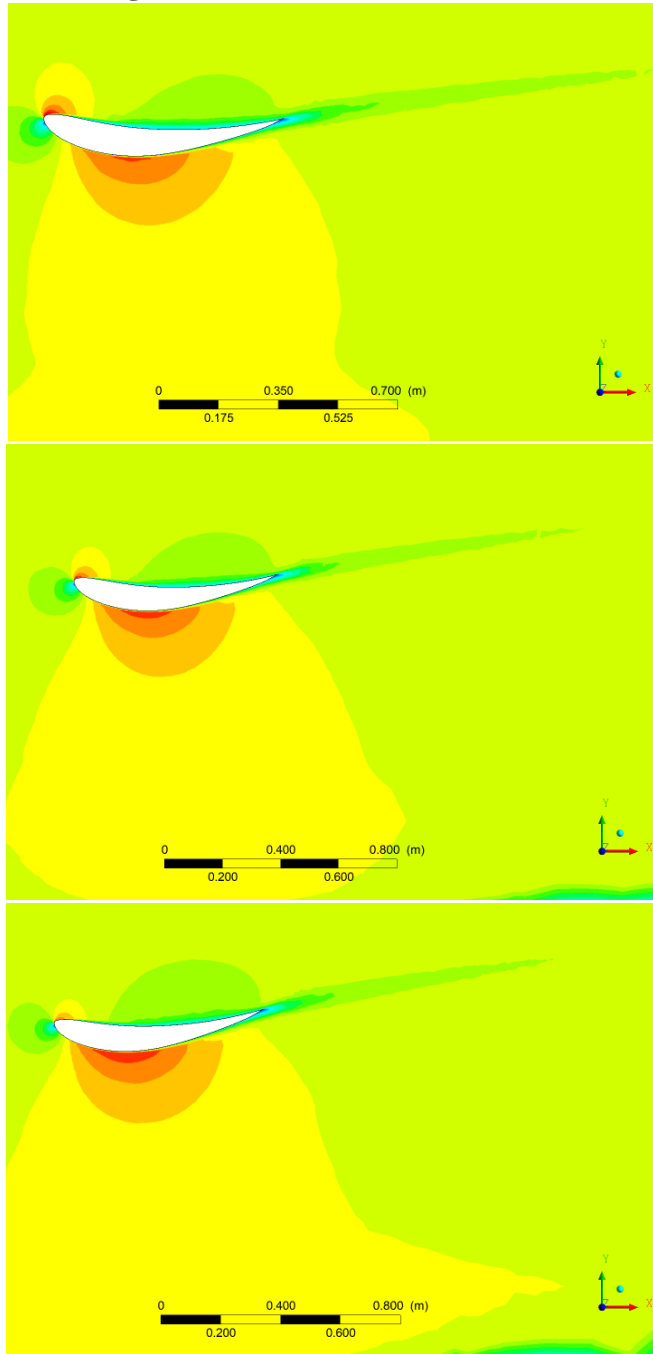
Bodywork within vertical fore and aft planes set at 400 mm outboard from the centerline on each side of the vehicle is excluded from this requirement.

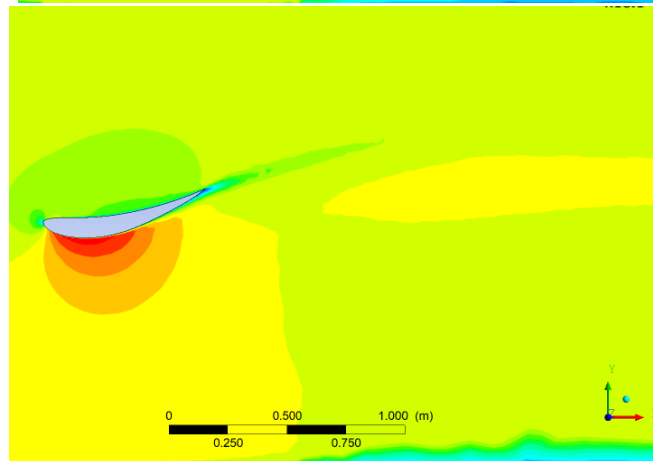
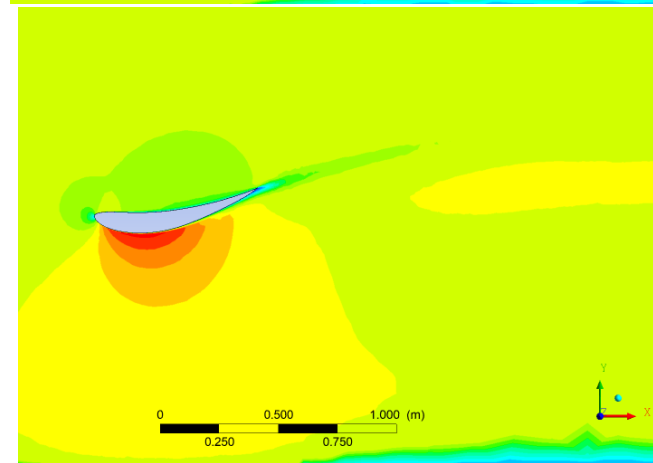
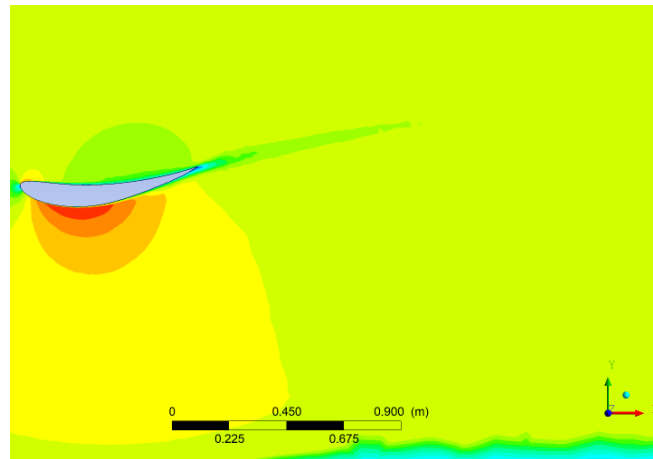
B. Pengujian DynoTest

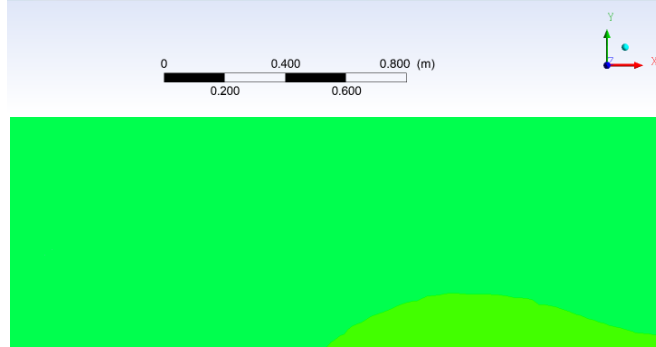
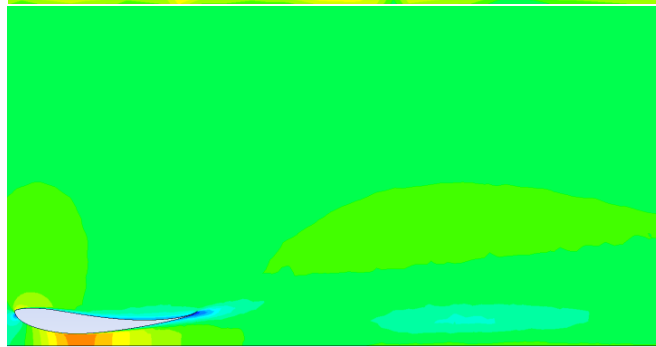
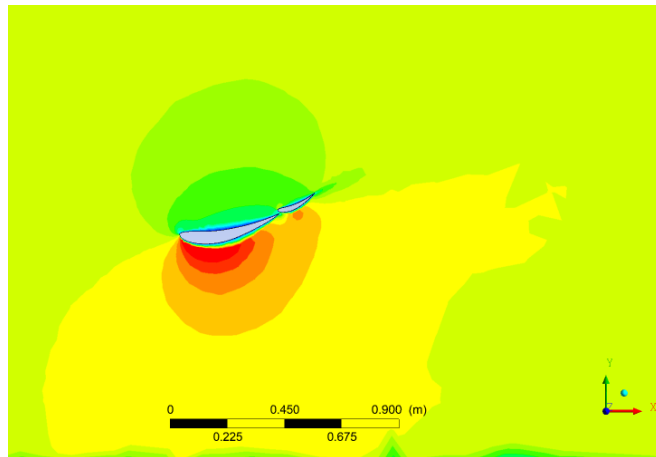


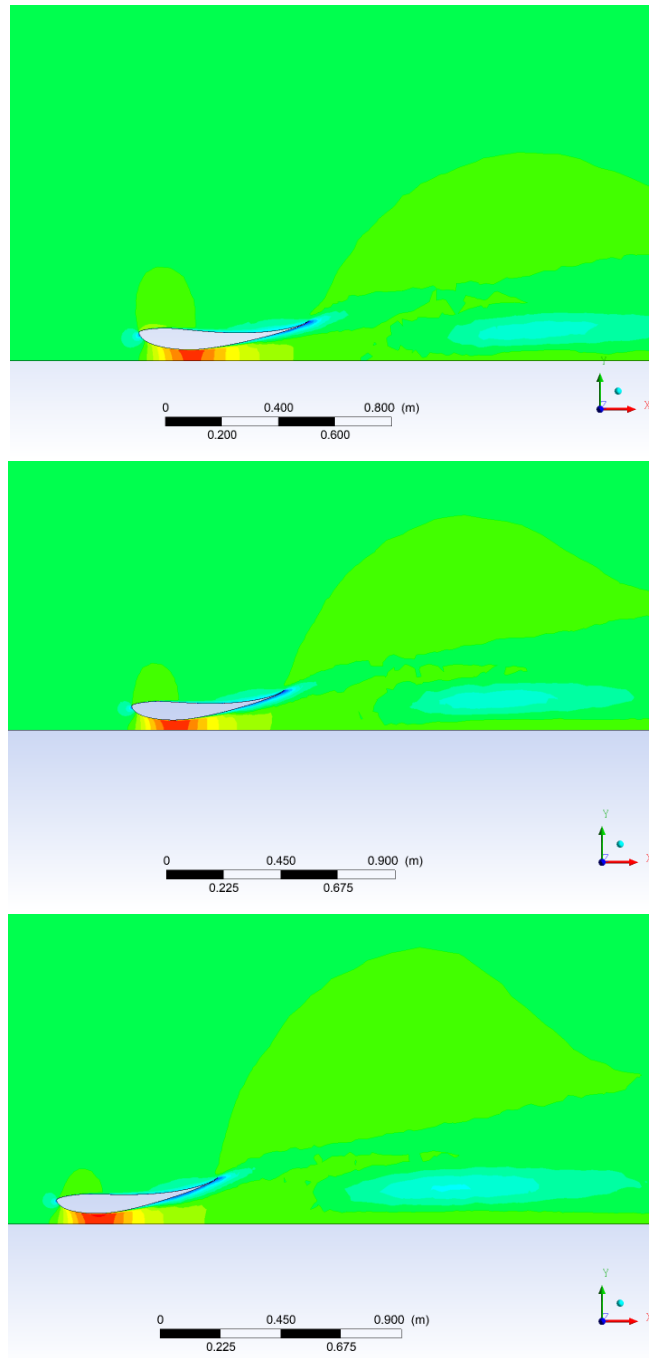
Gambar B.1 Hasil pengujian Dynotest

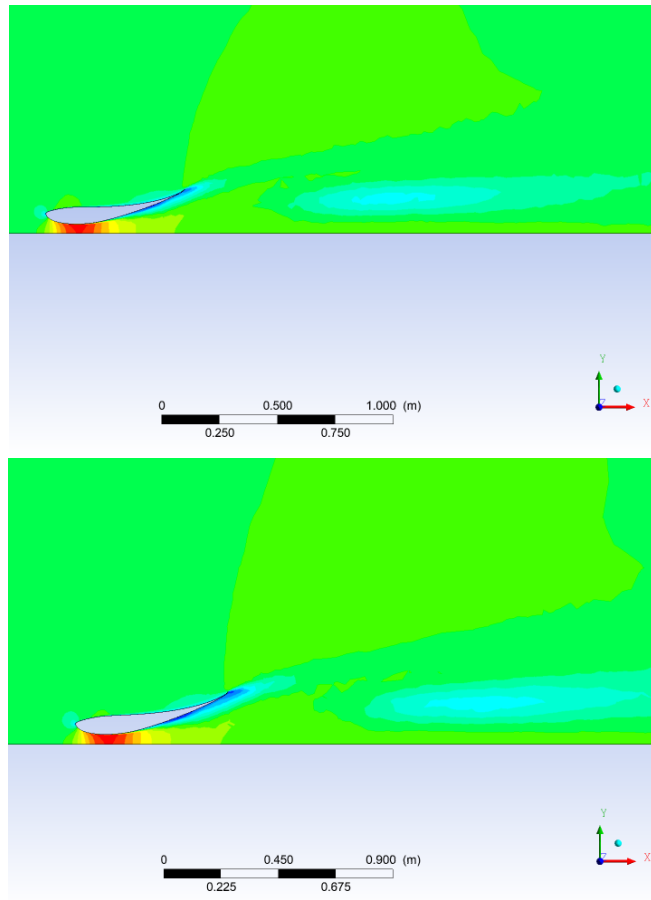
C. Profil Kecepatan Wing











Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Penulis lahir di kota Makassar pada 29 Nopember 1997. Penulis menempuh pendidikan di SD. Inp Mamajang I, SMP Negeri 29 Makassar, SMA Negeri 2 Makassar dan Pendidikan S-1 Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (FTIRS – ITS). Selama menempuh perkuliahan, penulis mengambil bidang minat rekayasa energi dan pengkondisian lingkungan dan menjadi asisten di lab tersebut. Penulis aktif sebagai staff PSDM BEM FTI 17/18. Penulis juga aktif pada tim riset ITS Team Sapuangin, sebagai staff *Frame and Body* 18/19 dan sebagai kepala divisi untuk periode 19/20. Penulis dapat dihubungi melalui e-mail : muhindjradije@gmail.com