

2. DASAR TEORI

2.1 Aerodinamika pada Mobil

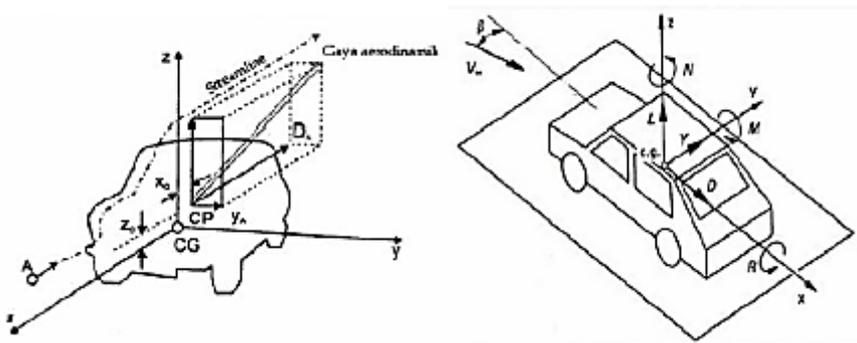
Aerodinamika merupakan salah satu faktor utama dalam perancangan sebuah kendaraan. Ketika objek berupa kendaraan sedang melaju, ada gaya yang dihasilkan oleh gerakan relatif antara udara dengan permukaan bodi dan gaya-gaya yang dihasilkan oleh udara inilah yang disebut dengan aerodinamika. Dalam rekayasa otomotif modern, aerodinamika mempunyai dampak yang sangat besar (Hidayati et al., 2017). Berdasarkan arusnya, aerodinamis dapat diklasifikasikan menjadi 2 macam yaitu aerodinamis eksternal dan aerodinamis internal. Aerodinamis eksternal adalah aliran yang terjadi di sekitar benda-benda padat, contohnya seperti gaya angkat dan gaya hambat yang terjadi pada sayap sebuah pesawat terbang. Aerodinamis internal merupakan aliran yang melalui bagian dalam dari benda padat, contohnya seperti aliran udara yang ada di mesin jet. Dalam sebuah perancangan *body* kendaraan juga diperlukan adanya ilmu aerodinamika untuk menganalisis gaya yang terjadi pada kendaraan tersebut. Pemodelan dengan bentuk yang aerodinamis sangat penting dalam melakukan desain dan analisis pada kendaraan (Zheng & Qiu, 2018).



Gambar 2. 1 Karakteristik Aliran Eksternal pada Mobil.

Sumber: Project B Team. (n.d). *Aerodinamika pada bodi mobil*. <https://proyek-lebah.blogspot.com/2014/10/aerodinamika-pada-bodi-mobil.html>

Perancangan desain untuk memaksimalkan aerodinamis pada kendaraan terutama mobil, maka perlu pengetahuan bagaimana aliran udara melewati mobil.



Gambar 2. 2 Distribusi Gaya Aerodinamis Pada Kendaraan Mobil.

Gaya-gaya aerodinamis seperti yang terdistribusi pada gambar 2.2 adalah:

1. Gaya samping aerodinamis (*side force*)
2. Gaya angkat aerodinamis (*lift force*)
3. Gaya akibat pusaran udara (*turbulence force*)
4. Gaya hambat aerodinamis (*drag force*)

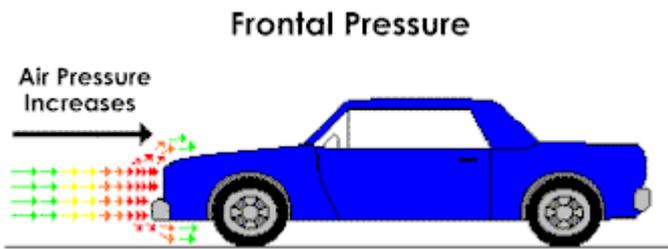
2.1.1 Gaya Hambat

Gaya hambat atau *drag force* merupakan gaya yang berlawanan dengan arah gerak benda (Edfi & Utama, 2018). Penjelasan lainnya adalah *drag* merupakan aerodinamis aliran udara yang ada di sekitar kendaraan, melalui kendaraan, dan paralel dengan arah angin apabila kendaraan pada posisi bergerak. Dengan kata lain, *drag* merupakan jumlah semua gaya eksternal dalam aliran fluida yang melawan arah gerak objek. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Patidar et al. (2015) dapat mereduksi konsumsi bahan bakar karena penurunan gaya hambat yang terjadi pada bodi kendaraan membuat mobil dapat melaju lebih cepat dan mesin mampu bekerja dengan lebih ringan serta efisien karena secara eksperimental terbukti 40 % kinerja mesin digunakan hanya untuk melawan hambatan *drag*.

Skin friction drag merupakan akibat dari arus yang bergerak di sekitar permukaan suatu objek sehingga menghasilkan hambatan. Pengaruh kualitas halus atau kasarnya permukaan seluruh bodi kendaraan yang dialiri aliran udara memengaruhi kontribusi gaya *drag*. Permukaan yang kasar memengaruhi ketidakstabilan dari aliran di permukaan, dan hilangnya momentum (Dosil, 2016). Maka dari itu sangat penting untuk mempertimbangkan bahan dan kualitas permukaan kendaraan serta desain yang maksimal agar tidak ada tonjolan dalam permukaan bodi kendaraan.

Frontal pressure adalah oleh tekanan udara untuk aliran di sekitar bagian depan mobil. Tekanan frontal disebabkan oleh tekanan udara di depan mobil yang dihasilkan oleh interaksi antara jutaan molekul udara dengan bagian grill mobil. Peningkatan tekanan udara ini

menyebabkan molekul udara tersebut juga mencari jalur keluar di sekitar sisi, atas, dan bawah mobil.



Gambar 2. 3 *Frontal Pressure* yang Terjadi pada Mobil.

Sumber: *General Aerodynamics Principals*. (n.d).

Pada analisis menggunakan metode CFD, besar kecilnya nilai suatu tekanan biasanya diasumsikan dengan sebuah warna pada *surface body* yang terkait. Tekanan merupakan gaya yang bekerja pada permukaan benda tiap satuan luas. Secara sistematis, tekanan dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$P = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

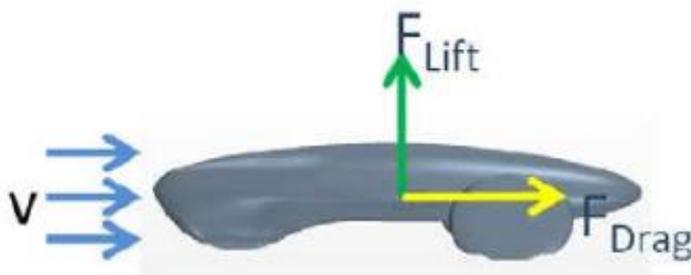
Keterangan:

P = Tekanan (N/m²)

F = Gaya yang bekerja (N)

A = Luas penampang (m²)

Gaya hambat atau gaya *drag* dipengaruhi oleh besar *Cd* (*drag coefficient*). Secara umum *drag force* ini dapat terjadi akibat adanya perbedaan tekanan antara bagian depan dan belakang benda.



Gambar 2. 4 Arah Gaya *Drag*.

Sumber: Abo-serie, E. (2017). Aerodynamics assessment using cfd for a low drag shell eco-marathon car. *Journal of Thermal Engineering, Special Issue 6: Istanbul International Conference on Progress Applied Science (ICPAS2017)*, 1527-1536. doi.org/10.18186/journal-of-thermal-engineering.353657.

Bentuk dari kendaraan akan menentukan nilai *coefficient drag* (C_d) dimana semakin aerodinamis bentuk kendaraan maka nilai *coefficient drag* akan semakin kecil pula, sehingga akan berpengaruh pada besar gaya hambat yang terjadi pada kendaraan. Semakin rendah gaya hambat yang terjadi maka semakin efisien konsumsi bahan bakar saat kendaraan dioperasikan. Energi yang digunakan mesin untuk membuat kendaraan melaju akan semakin kecil dengan berkurangnya gaya hambat yang bekerja, sehingga efisiensi bahan bakar lebih tinggi (Patidar et al., 2015). Secara sistematis, persamaan koefisien hambat dirumuskan sebagai berikut (Arpino, 2018):

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (2.2)$$

Keterangan:

C_d = Koefesien *Drag*

D = Gaya Hambat (N)

V = Kecepatan Mobil (m/s)

ρ = Densitas Udara (Kg/m³)

A = Luas Permukaan Objek (m²)

Pengurangan koefisien *drag* pada suatu kendaraan merupakan salah satu cara yang cukup efektif untuk meningkatkan performa maupun kehematan dalam penggunaan bahan bakar. Terdapat dua aspek penting yang perlu diperhatikan dalam proses mendesain bodi suatu kendaraan agar memiliki nilai hambatan yang rendah, adapun aspek tersebut yaitu:

1. Apabila objek yang didesain panjang dan tipis, maka hambatannya berkaitan dengan friksi. Hambatan ini dapat dikurangi dengan menjaga aliran laminar sebanyak mungkin. Hal ini mengisyaratkan untuk penggunaan permukaan-permukaan yang halus.
2. Apabila objek yang didesain tumpul, maka gaya hambatan yang bellawanan dengan arah pergerakan benda adalah hambatan bentuk. Gaya tahanan ini akan menjadi lebih signifikan saat objek bergerak pada kecepatan tinggi dengan luas permukaan yang besar.

Koefisien *drag* memiliki hubungan dengan bilangan Reynolds. Hanif & Utomo (2015) menyatakan bahwa hubungan antara bilangan Reynolds dengan koefisien *drag* adalah semakin besar bilangan Reynolds maka nilai koefisien *drag* yang terjadi akan cenderung semakin kecil. Untuk menentukan suatu aliran laminar atau turbulen, Osborne Reynolds memperkenalkan bilangan tidak berdimensi yang merupakan fungsi dari kecepatan aliran. Nilai bilangan Reynolds dapat dihitung menggunakan suatu persamaan yang dimana apabila nilai bilangan $Re < 2300$

merupakan aliran laminar, dan aliran turbulen ketika $Re > 4000$ (Hanif & Utomo, 2015). Persamaan dari bilangan Reynolds dapat dituliskan secara sistematis sebagai berikut:

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (2.3)$$

Keterangan:

Re = Bilangan Reynolds (*Reynolds number*)

ρ = Massa jenis fluida (kg/m^3)

V = Kecepatan aliran fluida (m/s)

L = Panjang karakteristik medan aliran (m)

μ = Viskositas fluida (kg/ms)

2.2 CAD

Computer Aided Design atau CAD merupakan *software* komputer yang memungkinkan seorang perancang untuk mendesain gambar teknik dengan mentransformasikan gambar geometris secara cepat. Kegunaan CAD ini sangat luas, berbagai manfaat implementasi penggunaan CAD dapat digunakan pada industri penerbangan untuk mendesain pesawat terbang, dapat juga digunakan untuk pembuatan *mold*, konstruksi bangunan sipil, elektronika, hingga industri otomotif. Produk yang ingin digambarkan melalui CAD bisa diwakili garis-garis maupun simbol-simbol yang memiliki makna tertentu, serta produk yang didesain dapat berupa gambar 2 dimensi dan 3 dimensi.

Solidworks merupakan salah satu program CAD (Computer Aided Design) yang memiliki kemampuan pemodelan 3 dimensi *solid* dalam proses pembuatan objek prototipe 3D baik secara visual, drafting beserta dokumentasi data-datanya ataupun proses yang lebih kompleks yaitu melakukan sebuah simulasi (Setyono dan Gunawan, 2015). Solidworks yang digunakan untuk merancang, memvisualkan, dan membuat objek dipilih sebagai *software* CAD sebagai media untuk membuat desain bodi mobil kendaraan tipe *urban concept car* karena mudah dalam melakukan desain 3D yang efisien. Grafik *real view* yang memungkinkan para *designer*

untuk memvisualisasikan hasil desain secara *real-time* dan *add-ins* bernama Solidworks Visualize yang dapat membuat hasil *rendering* dari desain yang dibuat menjadi lebih realistis.

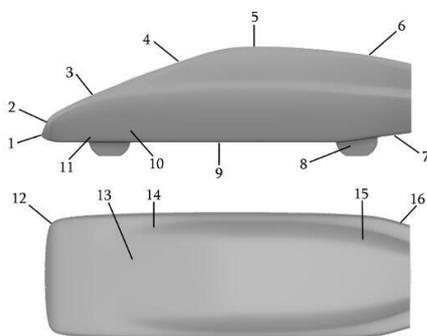


Gambar 2. 5 Contoh Hasil Render *Urban Concept Car*.

Sumber: Ambarita, H., Siregar M. R., Kawai, H. (2017). Study on aerodynamics characteristics an urban concept car for energy-efficient race. *Sustainable Energy and Biomaterial Centre of Excellent. Faculty of Engineering Universitas of Sumatera Utara*. doi: 10.1088/1757-899X/343/1/012025

2.3 Desain Bodi Aerodinamika

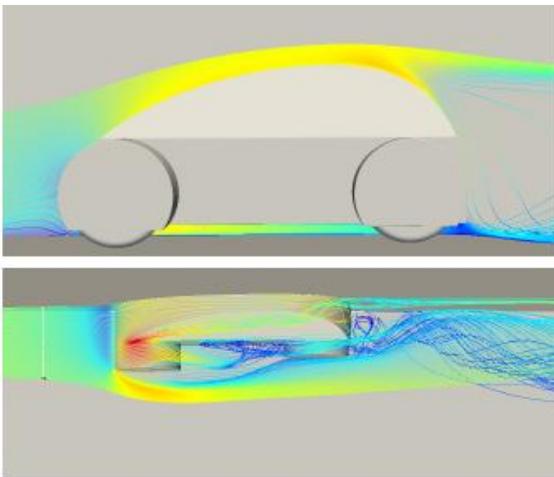
Koefisien *drag* rendah merupakan salah satu kunci utama dalam meraih efisiensi dalam konteks kendaraan yang melaju menggunakan bahan bakar atau energi *alternative* semacamnya. Tujuan khusus dari desain bodi aerodinamika dapat bervariasi, seperti contohnya *truck* muatan tidak membutuhkan *downforce* sedangkan mobil balap yang berkecepatan tinggi sangat membutuhkan *downforce*. Setiap detil dari kendaraan dapat dioptimalkan, namun interaksi dan kaitan antar setiap detil atau zona bagian tersebut merupakan tantangan yang harus ditemukan solusinya. Zona-zona atau panel pada kendaraan *urban concept* dapat dideskripsikan sebagai berikut (Cogan, 2016); 1. *round front end*, 2. *cooling duct optimised*, 3. *bonnet slope*, 4. *windscreen slope*, 5. *roof camber*, 6. *rear slope*, 7. *rear diffuser*, 8. *covered wheels*, 9. *smooth underside*, 10. *round wheel-well*, 11. *wheel fairing*, 12. *top view taper*, 13. *windscreen curve*, 14. *A-pillar round*, 15. *C-pillar inswept*, 16. *rear end boat tail*



Gambar 2. 6 Kontur Kendaraan Tipe *Urban Concept Car*

Sumber: Cogan, D., J. (2016). *The aerodynamic design and development of an urban concept vehicle through cfd analysis*. [Thesis, Cape Peninsula University of Technology]. <https://core.ac.uk/download/pdf/148366176.pdf>

Menurut Dosil (2017), tidak perlu adanya restrukturisasi kendaraan secara menyeluruh untuk meningkatkan aerodinamika, sejumlah *improvement* dan modifikasi juga dapat menambah aerodinamika. Dengan dilakukannya sejumlah *improvement*, diharapkan tujuan dari *improvement* ini adalah menciptakan cara yang cepat dan ekonomis untuk mengurangi hambatan tanpa perlu membangun kendaraan yang sepenuhnya baru. Pada gambar 2.7 merupakan contoh gambar aliran fluida yang merugikan dan modifikasi serta *improvement* dapat dilakukan dalam melakukan desain bodi mobil *urban concept*.

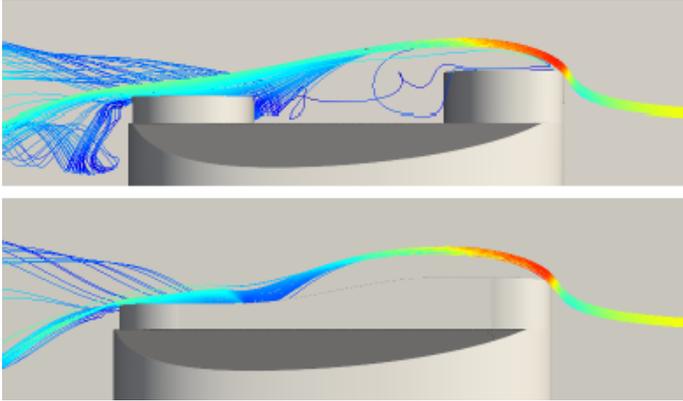


Gambar 2. 7 Garis Aliran Fluida pada Mobil *Urban Concept* Tanpa *Improvement*

Sumber: Dosil, F., D. (2017). *Aerodynamic analysis and design of a car for the shell eco marathon*. [Thesis, Aalborg University]. [https://projekter.aau.dk/projekter/files/239462168/Aerodynamic Analysis and Design of a Car for the Shell Eco Marathon.pdf](https://projekter.aau.dk/projekter/files/239462168/Aerodynamic%20Analysis%20and%20Design%20of%20a%20Car%20for%20the%20Shell%20Eco%20Marathon.pdf)

2.3.1 Wheel Skirt

Wheel skirt bertujuan agar permukaan bodi dapat menutup semua area antara ban depan hingga ban belakang. Dengan dilakukannya penambahan *wheel skirt*, kendaraan *urban concept car* dapat mereduksi hambatan yang terjadi di ban pada kendaraan. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Dosil (2017), penambahan modifikasi *wheel skirt* dapat mereduksi koefisien *drag* hingga 11.2%. Dengan adanya *wheel skirt* seperti pada gambar 2.8 membuat aliran udara tidak bertabrakan dengan roda belakang ketika kendaraan sedang melaju seperti yang terlihat pada ilustrasi pada gambar 2.7.

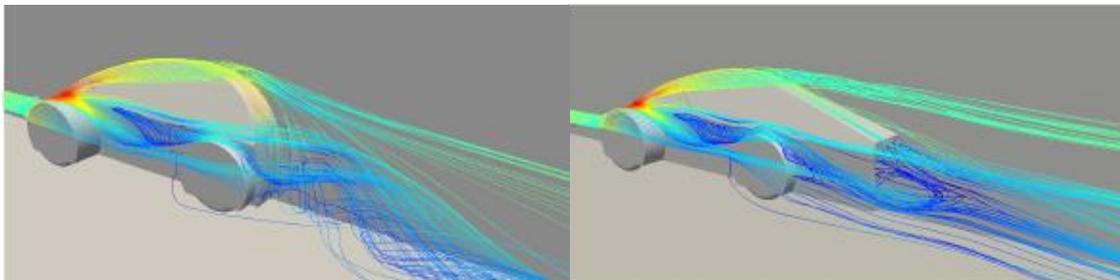


Gambar 2. 8 Perbedaan Aliran dengan Adanya *Wheel Skirt*

Sumber: Dosil, F., D. (2017). *Aerodynamic analysis and design of a car for the shell eco marathon*. [Thesis, Aalborg University]. https://projekter.aau.dk/projekter/files/239462168/Aerodynamic_Analysis_and_Design_of_a_Car_for_the_Shell_Eco_Marathon.pdf

2.3.2 Bentuk *Rear End Body*

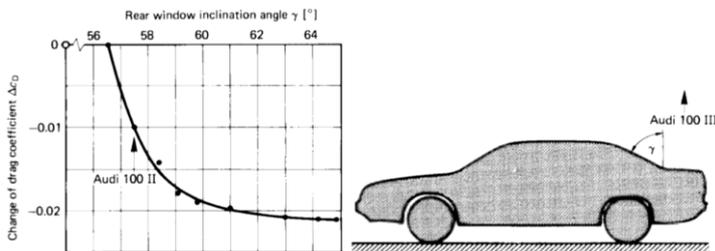
Menurut penelitian yang dilakukan oleh Dosil (2017), dengan memanjangkan *rear end* atau ekor bodi dapat meningkatkan koefisien *drag* hingga 30.4% dari pada desain ekor bodi yang lebih pendek. Aliran yang terjadi pada bagian ekor mobil pada gambar 2.9 dengan desain *rear end body* yang lebih pendek akan mempengaruhi dari aliran *wake*.



Gambar 2. 9 Perbedaan Aliran pada Ekor Bodi Mobil yang Lebih Pendek (Kiri) dan Lebih Panjang (Kanan).

Sumber: Dosil, F., D. (2017). *Aerodynamic analysis and design of a car for the shell eco marathon*. [Thesis, Aalborg University]. https://projekter.aau.dk/projekter/files/239462168/Aerodynamic_Analysis_and_Design_of_a_Car_for_the_Shell_Eco_Marathon.pdf

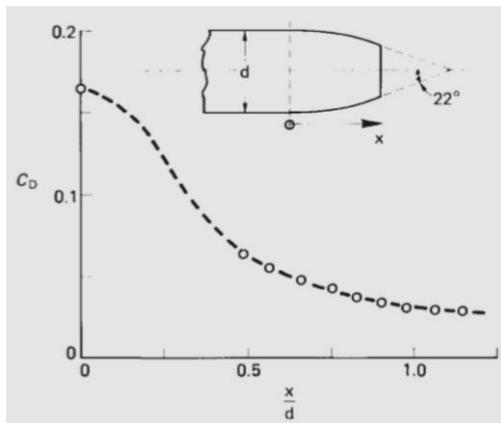
Sudut kemiringan yang lebih kecil dapat berpengaruh kerugian gradien karena adanya deakselerasi pada bagian belakang.



Gambar 2. 10 Pengaruh Sudut Kemiringan *Rear End Body* terhadap Koefisien *Drag*

Sumber: Mesquita, C., A. (2021). *Aerodynamic and structural design of an energy-efficient car powered by hydrogen fuel cell. Instituto superior tecnico.*
[https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1126295043838912/81430-\(Projecto%20de%20um%20veiculo%20elctrico%20movido%20a%20hidrogenio\)%20AbstractExtended.pdf](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1126295043838912/81430-(Projecto%20de%20um%20veiculo%20elctrico%20movido%20a%20hidrogenio)%20AbstractExtended.pdf)

Melakukan *tapering* pada *rear end body* juga dapat mereduksi dari *downstream wake*. Efek *tapering* dapat dilakukan dengan mengecilkan ukuran ujung belakang bagian *rear end body*. Efektivitas dari *tapering* di ujung *rear end body* ditunjukkan seperti pada gambar 2.11.

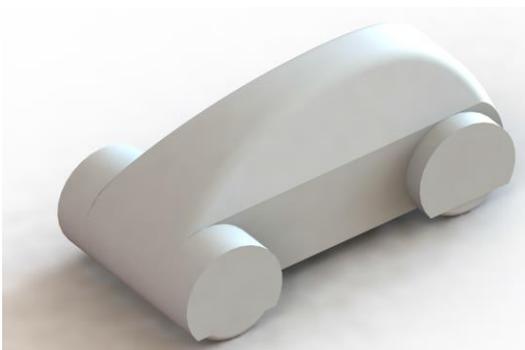


Gambar 2. 11 Perbandingan Sudut *Tapering* pada Ujung *Rear End Body*

Sumber: Mesquita, C., A. (2021). *Aerodynamic and structural design of an energy-efficient car powered by hydrogen fuel cell. Instituto superior tecnico.*
[https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1126295043838912/81430-\(Projecto%20de%20um%20veiculo%20elctrico%20movido%20a%20hidrogenio\)%20AbstractExtended.pdf](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1126295043838912/81430-(Projecto%20de%20um%20veiculo%20elctrico%20movido%20a%20hidrogenio)%20AbstractExtended.pdf)

2.3.3 Menghaluskan Sudut

Sudut yang tajam pada permukaan bodi yang bereaksi dengan aliran akan mengakibatkan *flow separation*. *Flow separation* pada permukaan yang sudutnya tidak halus akan berdampak negatif pada aerodinamika mobil nantinya. Oleh karena itu dengan menghaluskan sudut (*edge fillet*) aliran fluida dapat bergerak dengan mengikuti bentuk bodi yang sudutnya di *fillet* tanpa adanya turbulensi dan *flow separation*.



Gambar 2. 12 *Rounded Side Edge*.

Sumber: Dosil, F., D. (2017). *Aerodynamic analysis and design of a car for the shell eco marathon*. [Thesis, Aalborg University].

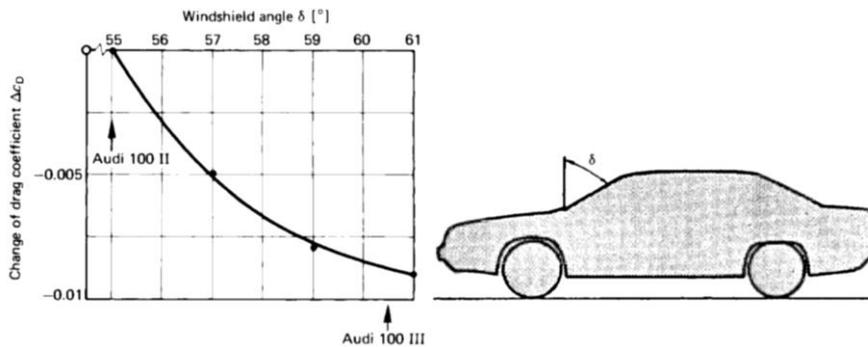
[https://projekter.aau.dk/projekter/files/239462168/Aerodynamic Analysis and Design of a Car for the Shell Eco Marathon.pdf](https://projekter.aau.dk/projekter/files/239462168/Aerodynamic_Analysis_and_Design_of_a_Car_for_the_Shell_Eco_Marathon.pdf)

Analisa CFD yang dilakukan oleh Dosil (2017) menguji besarnya radius *fillet* terhadap perubahan pengurangan koefisien *drag* pada permukaan bodi *urban concept* yang masih tajam. Pengaruh radius 50 mm *fillet* dan 100 mm berturut turut dapat mengurangi koefisien *drag* sebesar 24,7% dan 23,9%. Hal ini menunjukkan adanya potensial untuk mereduksi koefisien *drag* pada desain mobil *urban concept*.

2.3.4 Kemiringan *Windshield*

Semakin kecil sudut kemiringan kaca depan akan memberikan tekanan yang merugikan. Semakin kecil sudut kemiringan juga akan memberikan gaya geser yang lebih pada permukaan. Aliran yang mengalir pada mobil yang sedang melaju umumnya akan terpisah tepat pada sebelum melewati *windshield*. Namun, karena adanya aliran turbulen, *recirculation bubble* akan terjadi sehingga aliran udara akan menyambung kembali kearah *windshield*. Rekomendasi sudut

kemiringan dijelaskan oleh Mesquita (2021) sebesar 60° saja demi keamanan dan kenyamanan berkendara.

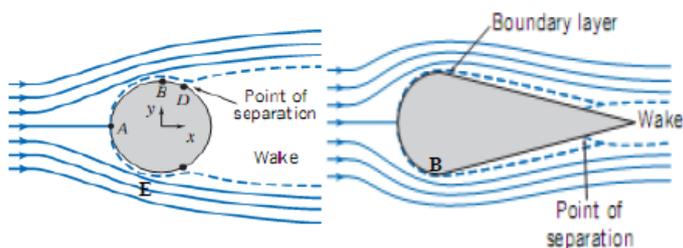


Gambar 2. 13 Pengaruh Kemiringan *Windshield* terhadap Perubahan Koefisien *Drag* pada Audi 100 III.

Sumber: Mesquita, C., A. (2021). *Aerodynamic and structural design of an energy-efficient car powered by hydrogen fuel cell. Instituto superior tecnico.*
<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1126295043838912/81430-Projecto%20de%20um%20veiculo%20elctrico%20movido%20a%20hidrogenio%20AbstractExtended.pdf>

2.3.5 Vortex Generator

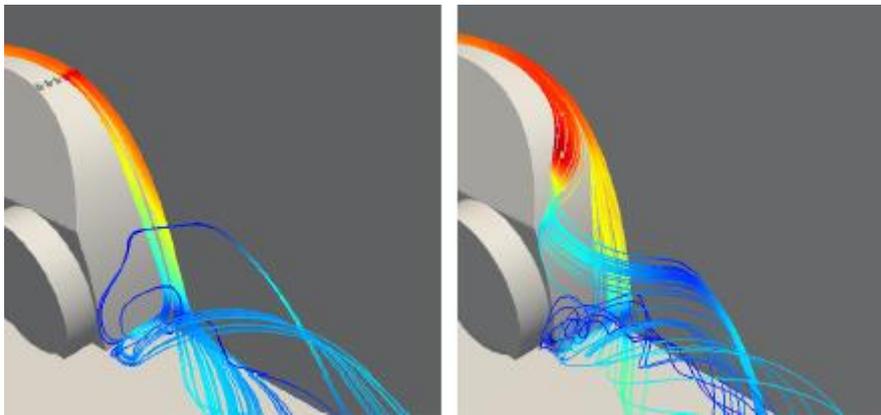
Bilangan Reynold yang tidak terlalu besar memungkinkan untuk aliran agar tetap pada permukaan bodi yang dialiri udara. Namun, apabila laju aliran tersebut berada dalam kecepatan yang tinggi, maka aliran akan terpisah dari permukaan. Area peningkatan pemisahan yang besar menciptakan efek separasi *boundary layer*, area tersebut dikenal dengan *wake region* (Greenbank, 2019). *Passive flow separation* atau *passive boundary layer separation control* merupakan salah satu metode untuk menahan aliran dengan cara menambah momentum pada aliran.



Gambar 2. 14 Visualisasi dari *boundary layer separation*.

Sumber: Greenbank, L. (2019). *Determining the effectiveness of vortex generators with regards to automotive applications.* [Dissertation, University of Southern Queensland].
https://sear.unisq.edu.au/43136/12/Greenbank_L_Sharifian-Barforoush_Redacted.pdf

Bagian belakang atau ekor bodi merupakan salah satu faktor utama dalam pembentukan *drag* karena turbulensi ataupun *flow separation*. Dalam sub bab 2.6.2 yang membahas mengenai perpanjangan ekor bodi cukup berpengaruh meminimalisir *flow separation* yang menyebabkan hambatan. Cara lain dalam mengurangi hambatan adalah dengan menambahkan sebuah perangkat yang berfungsi sebagai *passive flow control device* dalam penundaan *flow separation*. *Vortex generator* (pembangkit pusaran) mampu merubah titik separasi fluida dapat bergeser lebih ke belakang dan daerah *wake* dapat berkurang (Greenbank, 2019). *Vortex Generator* merupakan komponen yang berbentuk *fin* (sirip) yang ditempatkan di atap kendaraan. *Vortex generator* yang mampu menahan *flow separation* dikarena bentuk *vortex generator* menciptakan tekanan aliran udara tinggi di bagian depan dan ketika tekanan yang rendah dibelakangnya. Hal tersebut menciptakan *vortices* atau pusaran sehingga membantu untuk penundaan *flow separation* seperti pada gambar 2.15.



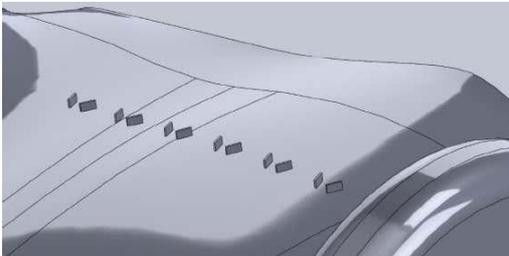
Gambar 2. 15 Perbandingan Aliran dengan atau Tanpa Adanya *Vortex Generator*.

Sumber: Dosil, F., D. (2017). *Aerodynamic Analysis and Design of a Car for the Shell Eco Marathon*.

[Thesis,AalborgUniversity].https://projekter.aau.dk/projekter/files/239462168/Aerodynamic_Analysis_and_Design_of_a_Car_for_the_Shell_Eco_Marathon.pdf, p.56

Menurut Analisa CFD yang dilakukan oleh Dosil (2017), penambahan *vortex generator* merupakan cara untuk pengoptimasian sebuah desain *urban concept car*. Penambahan *vortex generator* di bagian atap terbukti mampu menunda *flow separation* pada bagian ekor mobil. Penambahan *vortex generator* merupakan solusi yang mudah dan murah karena tidak perlu merubah desain mobil yang menimbulkan perluasan *surface* yang bisa mengakibatkan penambahan bobot kendaraan. Penambahan *vortex generator* pada penelitian Dosil (2017) dapat mengurangi koefisien *drag* hingga 13% seperti pada gambar 2.15. Pemasangan *vortex generator* yang merupakan *passive flow separation control* merupakan modifikasi atau

improvement dengan kemudahan dan biaya yang ekonomis. Konfigurasi *vortex generator* dengan tipe *counter rotating rectangular vanes* seperti pada mobil milik ITS Team Sapuangin mampu mengurangi 5.05% koefisien *drag* dan mampu meningkatkan efisiensi konsumsi bahan bakar dari yang awalnya 392 km/l menjadi 418 km/l.



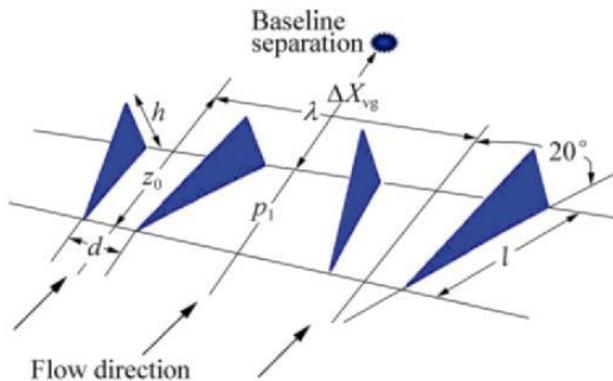
Gambar 2. 16 *Vortex Generator* Tipe *Rectangular* dengan *Counter Rotating* pada Bodi Mobil

Sumber: ITS Team Sapuangin. (2021). *Aerodynamic Drag Reduction Using Passive Vortex Generator on Sapuangin XI EVO 2*. https://www.scribd.com/embeds/498657863/content?start_page=1&view_mode=scroll&access_key=key-fFexxf7r1bzEfWu3HKwf.

Bentuk *vortex generator counter rotating* lebih baik dalam hal menunda separasi aliran dibandingkan *vortex generator* tipe *co-rotating* (Karim, 2019). Tipe *co-rotating* menciptakan aliran yang cenderung memperbesar *wake region* karena pusaran yang terjadi lebih menjauhi *boundary layer* dibandingkan dengan *counter rotating* yang lebih mampu menahan separasi aliran. Godard & Stanislas (2006) melakukan studi optimasi untuk *co* dan *counter rotating vortex generator*, mereka menyebutkan *counter rotating* dua kali lebih efektif dalam meningkatkan tegangan geser, serta bentuk *fin triangular* bekerja lebih baik segi mengurangi *drag* dan meningkatkan kekuatan pusaran. Studi Analisa lain yang dilakukan oleh Kumar et al. (2016) menguji beberapa bentuk umum yang biasanya dipakai sebagai acuan tipe *vortex generator* seperti *rectangular*, *gothic*, dan *triangular vortex generator*. Analisa *vortex generator* dilakukan pada NACA 0012 Airfoil melalui simulasi CFD. Terbukti bahwa bentuk *vortex generator* bentuk *triangular* memiliki koefisien drag sebesar 0.0020 dan hasil tersebut adalah yang terkecil dibandingkan *rectangular* sebesar 0.0087 dan *gothic* sebesar 0.0069 (Kumar et al., 2016).

Perubahan transisi dari *laminar boundary layer* menjadi *turbulent boundary layer* merupakan tujuan utama dari pemasangan *vortex generator* pada *external surface* suatu *moving body*. Parameter yang mempengaruhi performa *vortex generator* antara lain *leading edge* (x/c), tipe atau bentuk geometri (*triangular vanes*), konfigurasi (*counter rotating*), sudut orientasi

terhadap *free stream velocity* (β), jarak antar *vortex generator* (D), ketinggian (h), ketebalan dari *fin* (t), dan panjang *fin* (l) (Azmi & Sasongko, 2015).



Gambar 2. 17 *Triangular Vanes* dengan Konfigurasi *Counter Rotating Vortex Generator*

Sumber: Widodo, W., A. & Hariyadi, (n.d). *Karakteristik wake area akibat efek penggunaan vortex generator di belakang wing airfoil naca 43018.*

2.4 CFD

Computational Fluid Dynamics atau disebut juga dengan CFD adalah metode komputasi dari cabang ilmu mekanika fluida yang menggunakan analisa numerik dan data yang terstruktur untuk menganalisa dan memecahkan permasalahan fluida. CFD dapat membantu *engineer* dalam menganalisa suatu sistem yang melibatkan aliran fluida, perpindahan panas, reaksi kimia, dan fenomena fisik lainnya yang berdasarkan pada simulasi berbasis komputer. Yogatama & Trisno (2018) pada masa kini penyelesaian permasalahan yang menggunakan pendekatan analitis menjadi pilihan utama. Penyelesaian permasalahan menggunakan pendekatan eksperimental secara konvensional sudah mulai ditinggalkan karena membutuhkan waktu yang agak lama dan mengeluarkan biaya lebih untuk pengujiannya.

Analisis menggunakan CFD merupakan alat yang sangat berguna dalam evaluasi aerodinamika kendaraan karena dapat memberikan banyak informasi yang sulit diperoleh dengan pengukuran eksperimental (Arpino et al., 2019). Proses yang dilakukan oleh aplikasi CFD adalah mengontrol perhitungan yang akan dilibatkan dengan memanfaatkan berbagai persamaan. Persamaan-persamaan ini adalah persamaan yang ditimbulkan dengan memasukkan parameter bebas yang terlibat dalam *domain*. Lapisan batas (*Boundary condition*) merupakan kondisi dimana kontrol-kontrol perhitungan sebagai pengertian awal yang akan dilibatkan ke dalam kontrol perhitungan yang berdekatan lainnya melalui persamaan yang terlibat. Suatu kode CFD tersusun atas algoritma-algoritma numerik yang dapat menyelesaikan

permasalahan aliran fluida. Suatu kode CFD terdiri dari tiga elemen utama yaitu *pre-processing*, *solver*, dan *post processing*.

2.4.1 Tahap Pre-Processing

Tahapan *pre-processing* adalah tahap pendefinisian masalah aliran fluida berupa pemodelan geometri yang dirancang menggunakan format CAD (*Computer Aided Design*) sebagai objek untuk penentuan domain pergerakan fluida yang dianalisis dalam simulasi, pembagian domain fluida yang disimulasi menjadi beberapa daerah yang lebih kecil dengan elemen tertentu atau disebut dengan *meshing*.

2.4.2 Tahap Solver atau processing

Tahap *solver* merupakan tahap perhitungan numerik masalah atau pengujian aliran fluida pada komputer yang kondisinya perlu dikondisikan seperti bentuk aliran, jenis material yang digunakan, dan kondisi awal pada inlet dan outlet dari fluida. Kondisi tersebut dipastikan dengan kondisi yang *real* sehingga simulasi dapat dijalankan dengan hasil sesuai yang diinginkan.

2.4.3 Tahap Post Processing

Tahap *post processing* merupakan tahap terakhir dari tiga tahapan dalam CFD yang menampilkan data hasil simulasi dapat berupa laju aliran massa fluida, tekanan, kecepatan fluida, temperatur, dll. Informasi visual yang disediakan dalam komputer dapat dilihat dalam bentuk kontur, warna, grafik, dan garis aliran.

2.5 Shell Eco-marathon (SEM)

Shell *Eco-marathon World Championship* akan dilakukan dengan 2 *challenges* dan eksklusif hanya untuk kategori *urban concept cars*. *World Championship Mileage Challenge* adalah mencari efisiensi tertinggi dari kendaraan masing-masing tim. Para peserta bersaing untuk menempuh jarak terjauh dengan jumlah bahan bakar atau *supply energy* yang sangat terbatas. Dalam hal ini, dibutuhkan strategi mengemudi yang bijak, teknologi yang baik, dan bodi aerodinamika yang baik. *World Championship Time Trial* adalah *challenge* terakhir sebelum *final race*. Pada saat *time trial*, mobil-mobil hemat energi melakukan tes kecepatan dalam 1 lap. Berbeda dengan *World Championship Mileage Challenge* yang mengusung aspek keefisienan, *World Championship Time Trial* menguji kemampuan mobil hemat energi untuk melaju dan manuver. Sehingga para peserta tidak hanya merancang dari segi kendaraan yang hemat energi saja, namun juga mampu menggapai kecepatan tinggi atau waktu tempuh yang singkat sehingga keseimbangan antara efisiensi dan kinerja menjadi kunci untuk mencapai hasil yang baik dalam kompetisi ini. 8 tim yang terpilih banyaknya poin *challenges* sebelumnya akan memasuki babak *final race*. Peserta yang tersisa akan melakukan balapan dengan *grid position start* berdasarkan

waktu dari *time trial* sebelumnya. Mobil yang melewati garis *finish* akan dijadikan juara dari perlombaan tingkat dunia ini. Tim Sapuangin dari Institut Teknologi Sepuluh Nopember mengharumkan nama Indonesia dengan meraih juara ke-3 pada *Shell Eco-marathon World Championship 2023* yang diadakan 10-12 Oktober 2023 di Shell technology Centre, Bangalore, India (*Shell Eco-marathon World Championship, 2023*).



Gambar 2. 18 Mobil Sapuangin XI Evo 3 dari ITS.

Sumber: itsfa. (2023, Oktober 13). *Mobil sapuangin xi evo 3 ketika melaju pada final race world championship 2023*. <https://www.its.ac.id/news/2023/10/13/juara-3-dunia-tim-sapuangin-its-taklukkan-shell-eco-marathon-2023/whatsapp-image-2023-10-13-at-17-40-18/>

SEM diadakan dengan tujuan untuk mendorong inovasi dalam pengembangan kendaraan hemat energi. Ajang-ajang ini memiliki peran yang sangat penting dalam membentuk masa depan transportasi yang lebih ramah lingkungan dan efisien dalam penggunaan energi. Para anggota tim yang terlibat dapat berpartisipasi dalam membuka mata masyarakat di dunia akan pentingnya mengurangi ketergantungan sumber daya terbatas, dan juga produsen mobil yang dapat mempertimbangkan mengenai *prototype car* dan juga *urban concept car*.

2.5.1 Prototype Car

Prototype car adalah salah satu kategori dalam perlombaan SEM. *Prototype car* merupakan kendaraan yang sangat efisien karena bentuknya yang aerodinamis seperti kendaraan dari masa depan karena desainnya yang ekstrem karena kendaraan tipe *prototype* ini dirancang dengan hanya 3 roda saja. Namun karena desainnya yang khusus dan ekstrem demi memaksimalkan efisiensi, hal tersebut membuat *prototype car* bukan menjadi pilihan utama untuk mengimplementasikannya ke mobil untuk diperjual-belikan. Pada kategori *prototype car* ketinggian maksimal dari kendaraan adalah 100cm, *track width* minimal 50 m, *wheebase* minimal 100 cm, lebar keseluruhan maksimal 130 cm, panjang keseluruhan maksimal 350 cm, berat total tanpa pengemudi maksimal 140 kg (Firmansyah et al., 2023).

2.5.2 Urban Concept Car

Urban concept car merupakan kendaraan hemat energi yang memiliki *outline design city car*. Berbeda dengan *prototype car*, *urban concept car* ini pada dasarnya dirancang sebagai mobil-mobil di perkotaan karena memiliki ruang kabin yang lebih lega dan memiliki kapasitas penumpang yang lebih daripada *prototype car*. Efisiensi energi yang dihasilkan oleh *urban concept car* didapatkan dari desain bodinya yang aerodinamis, namun efisiensinya tidak akan sebesar efisiensi dari *prototype car* karena desain dari *urban concept* lebih mengarah ke penggunaan perkotaan.

Pada kendaraan tipe *urban concept car*, kendaraan diharuskan mengikuti desain kendaraan roda empat seperti yang ada di pasaran sekarang. Regulasi mengenai dimensi kendaraan juga sudah ditentukan seperti tinggi kendaraan di 1000-1300 mm, lebar 1200-1300 mm, dan panjang 2200-3500 mm. Kendaraan *urban concept* juga harus memiliki *wheeltrack* minimal 1200 mm, *track width* depan minimal 1000 mm, *track width* belakang minimal 80 mm dan massa kendaraan tanpa *driver* maksimal 225 kg (Firmansyah et al., 2023).

2.6 Regulasi SEM

Desain *urban concept car* yang dibuat harus sesuai dengan regulasi yang ditentukan seperti pengereman, lampu/penerangan, ban, velg, kemudi, dan desain bodi. Bodi kendaraan yang lulus persyaratan SEM harus menutupi seluruh komponen mekanik tidak termasuk roda dan suspensi, kondisi tersebut harus terpenuhi untuk kendaraan ketika dipandang dari sisi depan, belakang, samping, dan atas. Roda dan suspensi harus tertutup oleh bodi kendaraan ketika dipandang dari atas. Bodi kendaraan bagian luar harus tidak memiliki bentuk yang tajam, radius lekukan sekurang-kurangnya 5 cm.

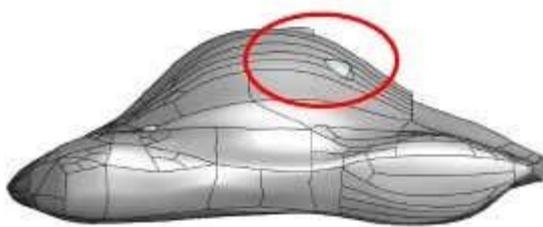
Driver dari *urban concept car* yang minimal memiliki berat 70 kg harus dapat mudah untuk akses keluar dan masuk kendaraan seperti selayaknya mobil pada umumnya dan diberi 2 akses pintu sebagai penumpang. Akses pintu masuk dan keluar pengemudi harus memiliki dimensi minimal 500 x 800 mm. Kelengkapan lain seperti atap penutup ruang kemudi, kaca depan, seerta ruang bagasi dengan 500 x 400 x 200 mm (p x l x t) serta kendaraan harus dilengkapi dengan *towing hook* yang mampu menopang beban tarik hingga 2000 N. Diameter *velg* roda yang ditetapkan oleh tim regulasi adalah berkisar 15 hingga 17 inchi. Ban yang digunakan dapat menyesuaikan medan dan segala jenis ban diperbolehkan selama disesuaikan dengan jenis dan ukuran *velg* (Shell Eco-Marathon Team, 2023).

Kendaraan kategori *urban concept* Pada SEM, kategori yang dapat diikuti oleh peserta adalah kategori *battery electric*, *hydrogen fuel cell*, dan *internal combustion engine*

menggunakan Shell FuelSave Unleaded 95, Shell FuelSave Diesel, dan etanol E1000 (Shell Eco-Marathon Team, 2023).

2.7 Kajian Terdahulu

Pada tahun 2020, Tim Sapuangin dari ITS menyempurnakan mobil *urban concept* dari pendahulu mereka dan dinamai Sapuangin XI EVO 3. Sapuangin XI EVO 3 merupakan mobil kategori *urban concept* dan mengikuti kelas *gasoline internal combustion engine*. Tim Sapuangin dari ITS memiliki terobosan dengan mengaplikasikan *vortex generator* (VG) pada sisi bodi bagian atas dari Sapuangin XI EVO 3 seperti pada gambar 2.19. Simulasi mobil Sapuangin XI EVO 3 dilakukan dengan tanpa menggunakan *vortex generator* untuk mendapatkan hasil titik separasi pada bodi sehingga titik tersebut digunakan sebagai acuan untuk pemasangan *vortex generator*.



Gambar 2. 19 Letak *vortex generator* pada mobil Sapuangin XI EVO 3.

Sumber: ITS Team Sapuangin. (2021). *Aerodynamic drag reduction using passive vortex generator on sapuangin xi evo 2*. https://www.scribd.com/embeds/498657863/content?start_page=1&view_mode=scroll&access_key=key-fFexxf7r1bzEfWu3HKwf.

Hasil perbandingan simulasi mobil Sapuangin XI EVO 3 sebelum setelah pemasangan *vortex generator* ditunjukkan pada tabel dibawah ini yang dimana hasil simulasi CFD memiliki rata rata penurunan koefisien *drag* sebesar 6% setelah pemasangan *vortex generator*

Tabel 2. 1

Hasil Koefisien *Drag* Mobil Sapuangin XI EVO 3 Sebelum dan Sesudah pemasangan *Vortex Generator*

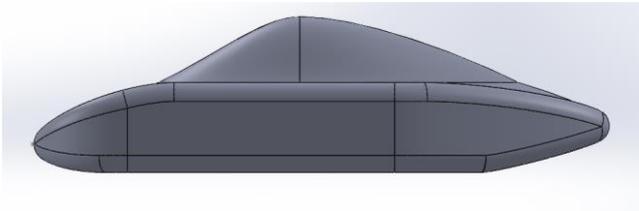
Kecepatan (km/j)	Koefisien <i>drag</i> sebelum pemasangan VG	Koefisien <i>drag</i> setelah pemasangan VG
20	0.124	0.115
25	0.118	0.101
30	0.113	0.091
35	0.109	0.083

40	0.105	0.077
----	-------	-------

Sumber: Marselino, R. *Laporan desain kendaraan kontes mobil hemat energi tahun 2020*.

<https://www.scribd.com/document/507210793/Laporan-Desain-Dan-Progres-Kendaraan-Kontes-Mobil-Hemat-Energi>

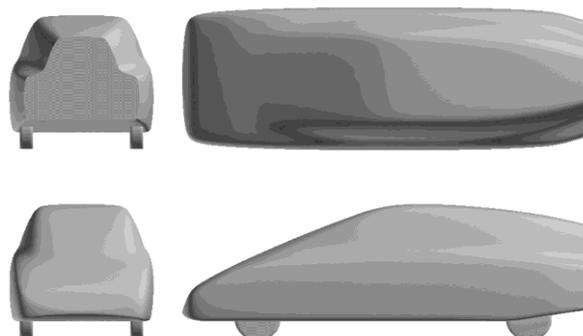
Penelitian yang dilakukan oleh Mesquita (2021) yang mendapatkan hasil koefisien *drag* sebesar 0.1390 dengan *velocity* inlet sebesar 50 m/s. Hasil desain terbaik yang dibuat oleh sang peneliti berdasarkan 4 gambar konsep pengujian berdasarkan pengelompokan karakteristik yang dibuatnya. Penulis mempertimbangkan adanya potensi *improvement* dengan menambahkan *flow control device* untuk mencegah terjadinya *flow separation*.



Gambar 2. 20 *Final Design* dari *Urban Concept Car*.

Sumber: Mesquita, C., A. (2021). *Aerodynamic and structural design of an energy-efficient car powered by hydrogen fuel cell*. *Instituto superior tecnico*. [https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1126295043838912/81430-\(Projecto%20de%20um%20veiculo%20electrico%20movido%20a%20hidrogenio\)%20AbstractExtended.pdf](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1126295043838912/81430-(Projecto%20de%20um%20veiculo%20electrico%20movido%20a%20hidrogenio)%20AbstractExtended.pdf)

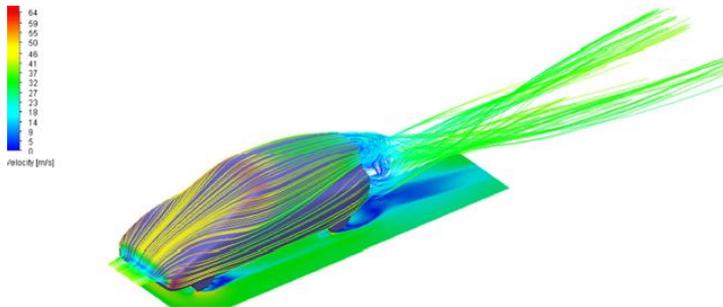
Gruetzmacher (2015) memiliki model *urban concept* yang disebut ASMO. Hasil pengujian CFD yang dilakukannya didapatkan hasil koefisien *drag* sebesar 0.155 dengan pengujian *inlet velocity* sebesar 50 km/h. Desain dengan hasil koefisien drag 0.155 dapat dilihat di gambar 2.21.



Gambar 2. 21 Hasil Konsep Desain *Urban Concept* ASMO.

Sumber: Gruetzmacher, M. (2015). *Comparison of the asmo car model with experimental data and simulations*. Nafems. <https://www.smart-fem.de/media/floefd/ASMO-Car.pdf>

Desain yang dibuat Gruetzmacher (2015) dapat ditingkatkan di bagian *rear end body*. Desain bagian *rear end body* yang langsung menutup secara tegak lurus akan berdampak pada *wake*. Desain *rear end body* dapat dipertimbangkan dengan membuat *slope* atau kemiringan pada bagian *rear end*.



Gambar 2. 22 Pathlines Car Model ASMO.

Sumber: Gruetzmacher, M. (2015). *Comparison of the asmo car model with experimental data and simulations*. Nafems. <https://www.smart-fem.de/media/floefd/ASMO-Car.pdf>

Perancangan mobil yang dibuat oleh Anto et al. (2019) membuat desain mobil *urban concept* yang dinamai Sapuangin XI Evo 1 untuk mewakili tim ITS. Anto et al. (2019) menyebutkan bahwa besar kecilnya *drag force* tidak hanya dengan mengubah bentuk bodi, tetapi juga dengan cara langsung mengubah bentuk bidang alirannya. Mobil Sapuangin XI Evo 1 mengikuti acuan desain pada gambar 2.23 dengan acuan pada bentuk nomor 4 dan 5 yang didesain *se-streamline* mungkin.

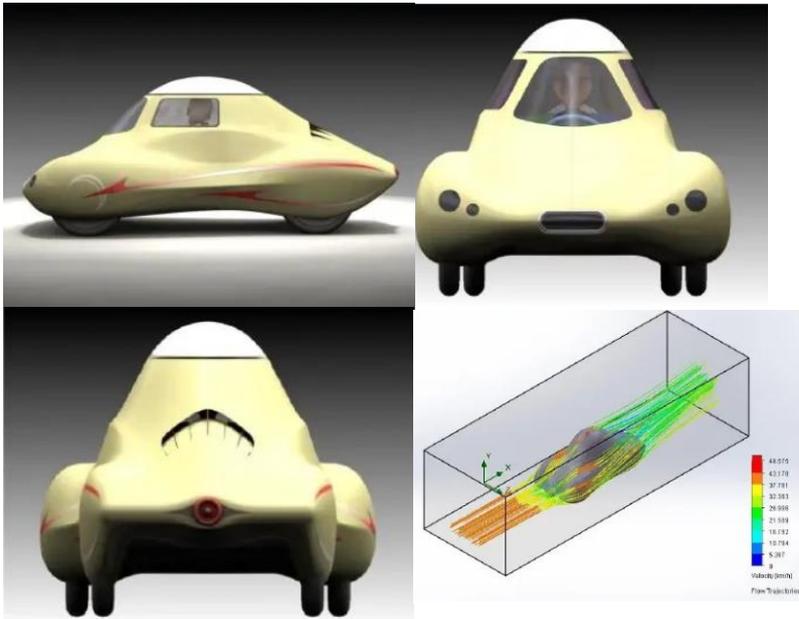
			C_L	C_D
1	Circular plate		0	1.17
2	Circular cylinder $L/D < 1$		0	1.15
3	Circular cylinder $L/D > 2$		0	0.82
4	Low drag body of revolution		0	0.04
5	Low drag vehicle near the ground		0.18	0.15
6	Generic automobile		0.32	0.43
7	Prototype race car		-3.00	0.75

Gambar 2. 23 Tipe Koefisien *Lift* dan *Drag* Berdasarkan Beberapa Bentuk Bodi.

Sumber: Muchammad et al. (2019). *Laporan desain kendaraan kontes mobil hemat energi tahun 2019*. Sapuangin ITS Team 1

https://www.scribd.com/embeds/449469983/content?start_page=1&view_mode=scroll&access_key=key-ffexxf7r1bzEfwu3HKwf

Spesifikasi kendaraan yang memiliki panjang 2800 mm, lebar 1300 mm, tinggi 1100 mm, *track width* depan dan belakang 1000 mm dan 800 mm, wheelbase 1600 mm dan *ground clearance* 20 mm. pengujian analisa bodi kendaraan Sapuangin XI Evo 1 yang disimulasikan diperoleh hasil koefisien drag sebesar 0.244. Mobil yang didesain oleh peneliti memiliki suatu hal yang dapat dikembangkan. Desain bodi samping yang memiliki tonjolan dapat diteliti lebih lanjut untuk mendapatkan nilai koefisien *drag* yang lebih baik. Penambahan *flow control device* juga dapat dipertimbangkan untuk didesain di bagian atap mobil untuk menjaga aliran agar tidak terpecah.



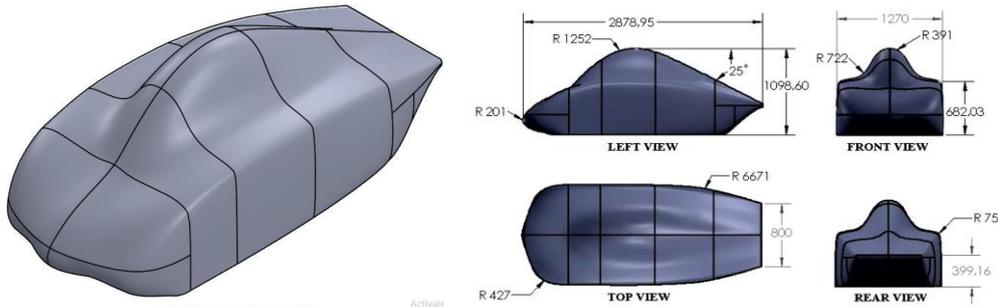
Gambar 2. 24 Desain Mobil Tampak Samping, Depan, Belakang, dan Simulasi Aerodinamika.

Sumber: Muchammad et al. (2019). *Laporan desain kendaraan kontes mobil hemat energi tahun 2019*. Sapuangin ITS Team 1

https://www.scribd.com/embeds/449469983/content?start_page=1&view_mode=scroll&access_key=key-ffexxf7r1bzEfwu3HKwf

Gunadi & Fergianto (2020) melakukan perbandingan analisa dari Urban Gasoline 18 (UG18) dari Garuda UNY Team yang berpartisipasi di SEM 2018 yang diadakan di Changi Exhibition Center. Peneliti melihat adanya kekurangan dalam desain bodi dari UG18 dari tim Garuda UNY karena dengan kategori *urban concept* bahan bakar bensin, mobil ini mendapatkan

hasil di 215 km/liter dan hasil tersebut terpaut 100 km/liter dari tim pesaingnya dengan 315 km/liter. Peneliti mendapatkan data bahwa mobil UG18 memiliki koefisien *drag* sebesar 0.4087 dan peneliti melakukan desain ulang pada mobil UG18 yang dinamai UG19 konsep V1 dan UG19 konsep V2. Perbandingan hasil koefisien *drag* dari konsep UG 19 yang terbaik didapatkan di angka 0.1965 pada UG19 V2 dengan pengujian di *velocity* sebesar 40 km/h, 30 km/h, dan 20 km/h. Hasil tersebut sangat berkurang drastis dari UG18 memiliki koefisien *drag* sebesar 0.4087 menjadi 0.1965 atau bisa ditunjukkan dengan penurunan sebesar 52%.



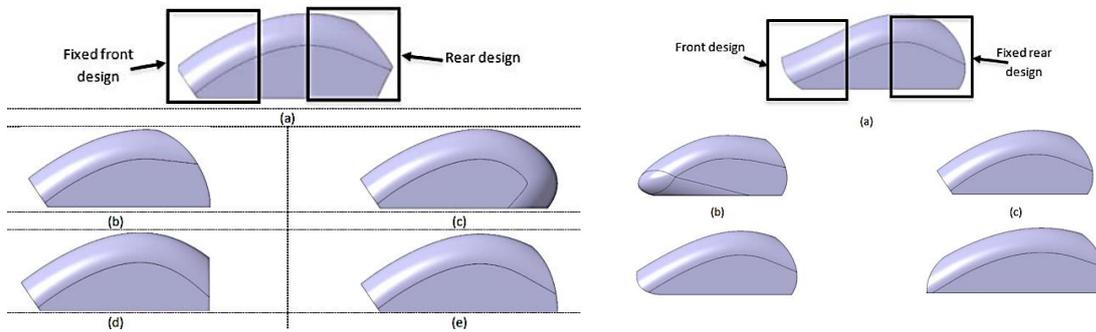
Gambar 2. 25 Isometric View dan Spesifikasi Bodi UG V2.

Sumber: Fergianto, F., Gunadi. (2020). Designing shell eco marathon car bodies with solid work.

IOP Publishing Ltd. doi: [10.1088/1742-6596/1700/1/012072](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1700/1/012072)

Pada penelitian yang dilakukan oleh Abidin et al. (2023) menentukan perbedaan *urban concept car* dengan *streamlined shape* dan *hatchback shape*. Bentuk *streamline* yang diimplementasikan pada desain *urban concept* akan berbentuk seperti *teardrop*. Bentuk dari *teardrop* memiliki bentuk lonjong di bagian depan yang akan membentuk *pointy* di bagian belakangnya. Bentuk dari *hatchback* memiliki kesamaan dengan bentuk *streamline* apabila dilihat dari samping. Perbedaannya hanya di bagian belakang mobil karena bentuk *hatchback* tidak memiliki bentuk yang *pointy* di belakang mobil. Pengujian dilakukan dengan membuat masing-masing bodi bagian depan dan belakang desain yang berbeda-beda untuk diuji kombinasinya. Pengujian dilakukan dan didapatkan kombinasi terbaik apabila gambar konsep *front design* (c) dikombinasikan dengan konsep *rear design* (b). Hasil kombinasi menghasilkan koefisien *drag* sebesar 0.221. Dengan mengusung *outline desain hatchback*, hasil penelitian

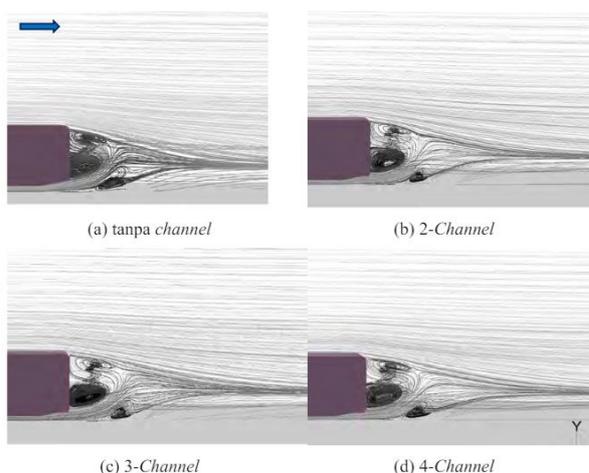
dapat dijadikan pertimbangan dengan memperpanjang bagian *rear end body* yang dapat dilakukan *extending* dan mempertimbangkan sistem *flow control device*.



Gambar 2. 26 Konsep *Front Design* dan Konsep *Rear Design*

Sumber: Abidin, H.F.Z., Rahman, Md.T.A., Adom, A.H., Jamir. M. R. M., Halim. S.S., Nawi, M. A. H. M. (2023). An analysis of urban vehicle body aerodynamics using computational fluid dynamics for the shell eco-marathon challenge. *Journal of advanced research in applied sciences and engineering technology* 30, Issue 2 (2023) 75-91. <https://doi.org/10.37934/araset.30.2.7591>

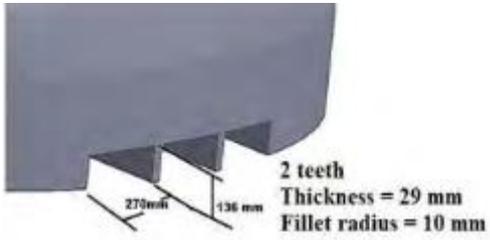
Pada penelitian yang dilakukan oleh Sucipto & Widodo (2016) yang meneliti pemasangan *vortex generator* pada bagian *underbody rear diffuser* bus, dalam penelitian tersebut dilakukan dengan tujuan untuk mengevaluasi dan analisa menggunakan *numerical simulation* pada *multiple fin* pada *rear diffuser*. *Numerical simulation* dilakukan pada geometri bus dengan *diffuser* tanpa *vortex generator*, dan *diffuser* dengan 2,3, dan 4 *fin*. Didapatkan penurunan Cd terbesar dengan *vortex generator* 4 fin sebesar 0.51% dibandingkan tanpa adanya *vortex generator*.



Gambar 2. 27 *velocity pathline* pada variasi *vortex generator*

Hasan et al. (2014) melakukan penelitian untuk mengurangi koefisien *drag* pada mobil balap yang di modifikasi pada bagian belakang bawah kendaraan. Penelitian tersebut dilakukan

pada kecepatan 50 m/s dimana nilai Cd sebesar 0.3233 pada kondisi kendaraan sebelum dilakukan modifikasi penambahan *vortex generator*. Penambahan *vortex generator* pada bagian *diffuser* mampu mereduksi Cd sebesar 4.639%



Gambar 2. 28 rear underbody vortex generator diffuser