

Analisa External Flow Pada Mobil Tesla Model S Saat Melaju di Tikungan

Alief Fadil Djanuarno, I Gusti Bagus Wijaya Kusuma, N. Suarnadwipa
Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

Abstrak

Gaya aerodinamika ikut berperan dalam faktor terbesar penyebab kecelakaan pada kendaraan. Hal ini terjadi ketika mobil melaju dengan kecepatan tinggi dan menerima gaya aerodinamika oleh angin baik secara melintang (*crosswind*) maupun dari arah belakang (*tailwind*). *Crosswind* akan mengakibatkan mobil mengalami *slip* yang berlanjut dengan *skid*, dan berakhir dengan terguling. Sedangkan *tailwind* akan mengakibatkan mobil meluncur bebas meskipun tidak secara langsung mengalami *slip*. Penelitian ini dilakukan dengan melakukan analisa pada aplikasi CFD (*Computational Fluid Dynamic*) untuk menganalisa aliran eksternal serta mencari tahu nilai gradien tekanan yang terjadi pada 3D model mobil Tesla Model S dan disimulasikan sebagaimana saat bergerak melewati tikungan, seperti melaju, melaju dengan *slip*, mengalami *slip* serta *skid*, dan berbelok. Semakin tinggi kecepatan mobil pada saat berbelok, pergeseran *center of gravity* pada mobil akan semakin besar. Dimulai dari melaju tanpa *slip* pada kecepatan 80 km/j dan 140 km/j mobil tidak memiliki pergeseran *center of gravity*, melaju dengan *slip* pada kecepatan 80 km/j dan 140 km/j mobil memiliki pergeseran *center of gravity* sebesar 5,33896 mm dan 50,0372 mm, dan melaju dengan *slip* dan *skid* pada kecepatan 80 km/j dan 140 km/j mobil memiliki pergeseran *center of gravity* sebesar 15,2613 mm dan 221,84 mm.

Kata kunci: Aerodinamika, Komputasi Dinamika Fluida, Slip, Skid, Dinamika Kendaraan, Titik Pusat Gravitasi

Abstract

Aerodynamic forces play a major role in causing accidents in vehicles. This occurs when the car is traveling at high speed and receives aerodynamic forces by the wind both *crosswind* and from the rear (*tailwind*). *Crosswind* will cause the car to *slip* which continues with *slippage*, and ends up rolling over. Meanwhile, the *tailwind* will cause the car to slide freely even though it does not *slip* directly. This research was conducted by analyzing the CFD (*Computational Fluid Dynamic*) application to analyze external flow and find out the value of the pressure gradient that occurs in the 3D model of the Tesla Model S car and it is simulated as when moving through a bend, such as driving, driving with a *slip*, experiencing a *slip* as well as *skid*, and turn. The higher the speed of the car when turning, the shift in the *center of gravity* of the car will be greater. Starting from going without a *slip* at a speed of 80 km/h and 140 km/h the car has no *center of gravity* shift, traveling with a *slip* at a speed of 80 km/h and 140 km/h the car has a shift of *center of gravity* of 5.33896 mm and 50.0372 mm, and traveling *slip* and *skid* at speeds of 80 km/h and 140 km/h the car had a shift in the *center of gravity* of 15.2613 mm and 221.84 mm.

Keywords: Aerodynamics, Computational Fluid Dynamics, Slip, Skid, Vehicle Dynamics, Center Of Gravity

1. Pendahuluan

Gaya aerodinamika ikut berperan dalam faktor terbesar penyebab kecelakaan pada kendaraan. Hal ini terjadi ketika mobil melaju dengan kecepatan tinggi dan menerima gaya aerodinamika oleh angin baik secara melintang (*crosswind*) maupun dari arah belakang (*tailwind*). *Crosswind* akan mengakibatkan mobil mengalami *slip* yang berlanjut dengan *skid*, dan berakhir dengan terguling. Sedangkan *tailwind* akan mengakibatkan mobil meluncur bebas meskipun tidak secara langsung mengalami *slip*.

Salah satu produsen mobil listrik asal Amerika Serikat, Tesla dengan tipe mobil Model X dan Model 3 masuk dalam kategori mobil dengan nilai uji tabrak terbaik yang dilakukan oleh penyelenggara uji tabrak pada kendaraan baru yang populer di Eropa, yaitu Euro NCAP.

Penelitian ini dilakukan dengan melakukan analisa pada aplikasi CFD (*Computational Fluid Dynamic*) yang bertujuan untuk mencari nilai gradien tekanan dengan besarnya gaya *slip* dan *skid* yang

terjadi serta pergerakan *Center of Gravity* pada model mobil Tesla Model S ketika melaju di tikungan.

Dalam hal ini maka ada beberapa permasalahan yang akan dikaji, yaitu:

1. Bagaimana aliran eksternal terhadap airfoil bodi mobil tersebut pada saat melaju di tikungan serta tekanan udara pada model mobil dengan aplikasi CFD (*Computational Fluid Dynamic*)?
2. Berapa besarnya gaya *slip* dan *skid* yang terjadi serta pergerakan *Center of Gravity* pada model mobil Tesla Model S ketika melaju di tikungan?

Beberapa batasan ditetapkan dalam penelitian ini meliputi:

1. Analisa CFD pada model mobil 3D dilakukan dengan menggunakan aplikasi ANSYS.
2. Simulasi dan analisa fluida dilakukan hanya pada bodi mobil saat terjadi *skid* di tikungan dengan kecepatan angin dan percobaan kecepatan kendaraan yang telah ditentukan.

3. Pembahasan *Center of Gravity* 1 dimensi ke arah X.
4. Tidak membahas konstruksi dan kestabilan kendaraan.

2. Dasar Teori

Aliran kotor di atas bodi mobil diatur oleh hubungan antara kecepatan dan tekanan yang dinyatakan dalam Persamaan Bernoulli. (Persamaan Bernoulli mengasumsikan aliran yang tidak dapat dimampatkan, yang wajar untuk aerodinamika otomotif, sedangkan hubungan yang setara untuk aliran yang dapat dimampatkan adalah Persamaan Euler.) Persamaannya adalah:

$$P_{statis} + P_{dinamis} = P_{total} \quad (1)$$

$$P_s + 1/2 \rho V^2 = P_{total} \quad (2)$$

Keterangan :

ρ = Densitas udara (kg/m^3).

V = Kecepatan fluida relatif terhadap objek (m/s).

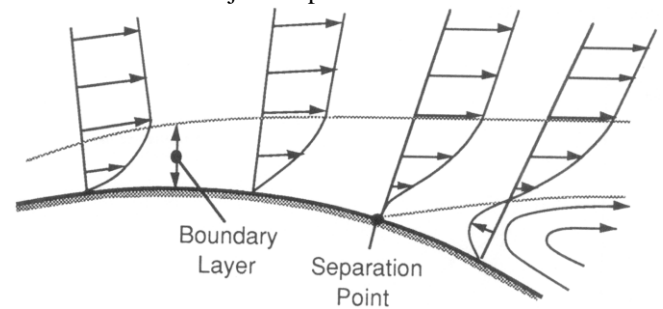
Pada jarak dari kendaraan, tekanan statis hanyalah tekanan ambien, atau barometrik, (P_{atm}). Tekanan dinamis dihasilkan oleh kecepatan relatif, yang konstan untuk semua garis arus yang mendekati kendaraan. Jadi tekanan total (P_t) adalah sama untuk semua garis aliran dan sama dengan $P_s + 1/2 \rho V^2$.

Saat aliran mendekati kendaraan, aliran terbelah, beberapa berada di atas kendaraan, dan lainnya di bawah. Sebagai kesimpulan, salah satu garis aliran harus langsung menuju bodi dan stagnan (yang ditunjukkan menimpa bumper mobil). Pada titik itu kecepatan relatif telah menjadi nol.

Pada bagian depan badan kendaraan, lapisan batas dimulai dari titik di mana garis aliran stagnasi menyentuh permukaan. Pada lapisan batas kecepatan berkurang karena gesekan. Tekanan pada titik stagnasi adalah tekanan total (statis plus dinamis) dan menurun kembali di sepanjang permukaan. Gradien tekanan di sepanjang permukaan bertindak untuk mendorong udara di sepanjang lapisan batas, dan pertumbuhan lapisan tersebut terhambat. Penurunan tekanan ke arah aliran dengan demikian dikenal sebagai "gradien tekanan yang disukai", karena menghambat pertumbuhan lapisan batas.

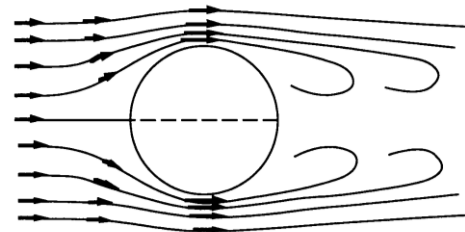
Sayangnya, saat aliran kembali mengikuti bodi, tekanan kembali meningkat. Tekanan yang meningkat bertindak untuk memperlambat aliran di lapisan batas, yang menyebabkannya bertambah tebal. Dengan demikian menghasilkan apa yang dikenal sebagai "gradien tekanan merugikan." Di beberapa titik, aliran di dekat permukaan sebenarnya dapat dibalik oleh aksi tekanan seperti yang diilustrasikan pada Gambar 1. Titik di mana aliran berhenti dikenal sebagai "titik pemisah". Perhatikan bahwa pada titik ini, arus utama tidak lagi "melekat" pada tubuh tetapi dapat membebaskan diri dan melanjutkan dalam garis lurus yang kurang lebih. Karena mencoba memasukkan udara dari daerah di belakang tubuh, tekanan di daerah ini turun di bawah ambien. Bentuk pusaran dan aliran sangat tidak

beraturan di wilayah ini. Aksi pusaran dalam aliran di atas silinder ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 1 Pemisahan Aliran dalam gradien tekanan yang merugikan.

Fenomena pemisahan mencegah aliran mengalir begitu saja ke sisi belakang mobil. Tekanan di daerah pemisah berada di bawah yang dikenakan di bagian depan kendaraan dan perbedaan gaya tekanan keseluruhan ini bertanggung jawab atas "gaya hambat". Gaya hambat yang timbul dari aksi gesekan kental pada lapisan batas pada permukaan mobil disebut "friction drag".



Gambar 2 Vortex yang mengalir di atas badan silinder.

Akibat aliran udara yang berinteraksi dengan kendaraan, gaya dan momen diberlakukan.

Gaya hambat aerodinamis dicirikan oleh persamaan:

$$D_A = P_s + 1/2 \rho V^2 C_D A \quad (3)$$

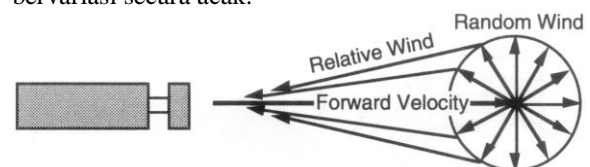
Keterangan :

D_A = Gaya hambat.

P_s = Tekanan statis.

A = Luas frontal area kendaraan (m^2).

Dalam praktiknya, kendaraan yang melaju di sepanjang jalan mengalami angin atmosfer selain komponen angin yang timbul dari kecepatannya. Angin atmosfer bervariasi dalam intensitas di seluruh Amerika Serikat, dengan nilai rata-rata tipikal 10-20 mph, dan angin kencang hingga 50 dan 60 mph. Arah angin di atmosfer akan acak sehubungan dengan arah perjalanan kendaraan. Dengan demikian angin relatif yang dilihat oleh kendaraan akan terdiri dari komponen besar karena kecepatannya, ditambah komponen angin atmosfer yang lebih kecil ke segala arah. Gambar 3 mengilustrasikan bagaimana angin relatif akan bervariasi secara acak.



Gambar 3 Angin relatif yang terlihat oleh kendaraan bermotor di jalan raya.

Ketika angin atmosfer bertiup ke arah kendaraan, ada "headwind", dan kecepatan total yang digunakan dalam persamaan (4) adalah:

$$V = V_V + V_W \quad (4)$$

Keterangan :

V_V = Kecepatan kendaraan.

V_W = Kecepatan angin.

Hembusan ke arah perjalanan disebut "tailwind", dan kecepatannya dikurangi. Karena kecepatan dikuadratkan dalam persamaan (4), peningkatan drag dari headwind jauh lebih besar daripada penurunan drag dari tailwind dengan kecepatan yang sama [1].

Gaya gradien tekanan adalah gaya yang dihasilkan ketika ada perbedaan tekanan di seluruh permukaan. Secara umum, tekanan adalah gaya per satuan luas, melintasi suatu permukaan. Perbedaan tekanan pada suatu permukaan berarti adanya perbedaan gaya, yang dapat menghasilkan percepatan menurut hukum gerak kedua Newton, jika tidak ada gaya tambahan untuk menyeimbangkannya. Gaya yang dihasilkan selalu diarahkan dari wilayah bertekanan lebih tinggi ke wilayah bertekanan lebih rendah. Ketika fluida berada dalam keadaan kesetimbangan (yaitu tidak ada gaya total, dan tidak ada percepatan), sistem tersebut disebut berada dalam kesetimbangan hidrostatis. Dalam kasus atmosfer, gaya gradien tekanan diimbangi oleh gaya gravitasi, menjaga kesetimbangan hidrostatis [2].

Dalam dinamika fluida, gradien tekanan yang merugikan terjadi ketika tekanan statis meningkat ke arah aliran. Secara matematis ini dinyatakan sebagai: $dp/dx > 0$ untuk aliran dalam arah x positif. Meningkatkan tekanan fluida sama dengan meningkatkan energi potensial fluida, yang mengarah pada energi kinetik yang berkurang dan perlambatan fluida. Karena fluida di bagian dalam lapisan batas lebih lambat, itu lebih dipengaruhi oleh peningkatan gradien tekanan. Untuk peningkatan tekanan yang cukup besar, fluida ini dapat melambat ke kecepatan nol atau bahkan menjadi terbalik yang menyebabkan pemisahan aliran. Ini memiliki konsekuensi yang sangat signifikan dalam aerodinamika karena pemisahan aliran secara signifikan mengubah distribusi tekanan di sepanjang permukaan dan karenanya juga karakteristik gaya angkat dan gaya hambat [3].

Pusat tekanan adalah titik di mana jumlah total medan tekanan bekerja pada benda, menyebabkan gaya bekerja melalui titik itu. Vektor gaya total yang bekerja di pusat tekanan adalah nilai dari medan tekanan vektorial terintegrasi. Gaya resultan dan lokasi pusat tekanan menghasilkan gaya dan momen ekuivalen pada benda sebagai medan tekanan awal. Medan tekanan terjadi pada mekanika fluida statis dan dinamis. Spesifikasi pusat tekanan, titik referensi dari mana pusat tekanan direferensikan, dan vektor gaya terkait memungkinkan momen yang dihasilkan

tentang titik mana pun untuk dihitung dengan terjemahan dari titik referensi ke titik baru yang diinginkan. Biasanya pusat tekanan ditempatkan pada benda, tetapi dalam aliran fluida dimungkinkan bagi medan tekanan untuk memberikan momen pada benda sebesar itu sehingga pusat tekanan terletak di luar benda [4].

3. Metode Penelitian

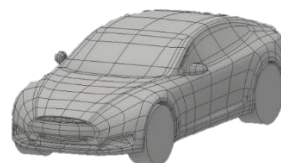
Penelitian ini dilakukan dengan melakukan simulasi pada aplikasi CFD (*Computational Fluid Dynamic*) untuk menganalisa satu variabel dengan variabel lainnya dengan batasan – batasan yang ada. Adapun simulasi ini dikerjakan sesuai dengan tujuan pelaksanaan penelitian, yaitu mencari pengaruh Kecepatan kendaraan, kecepatan udara, tekanan udara, dan kerapatan/kepadatan udara terhadap setiap permukaan luar kendaraan.

3.1. Alur Penelitian

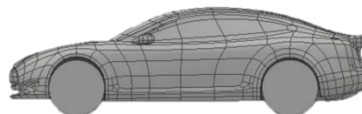
1. Mengumpulkan dan mempelajari literatur.
Mengumpulkan dan mempelajari dari berbagai jurnal penelitian yang sudah ada tentang aerodinamika, variabel penyebab kecelakaan, dan gaya-gaya aerodinamika yang terjadi pada mobil. Selanjutnya mempelajari simulasi CFD menggunakan ANSYS 19.2.

2. Mengimport model mobil dari CAD ke Ansys

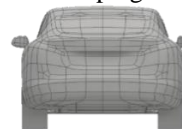
Model 3D mobil diimport ke dalam format yang diinginkan aplikasi CFD untuk dapat dilakukan proses analisa dari geometri yang diinginkan seperti format .IGES atau .stp.



Gambar 4 Model 3D mobil Tesla model S.



Gambar 5 Model 3D mobil Tesla model S tampak samping.



Gambar 6 Model 3D mobil Tesla model S tampak belakang.

3. Meshing.
Proses meshing merupakan proses diskretisasi domain fluida dimana segmen-segmen dari model mobil disatukan sehingga simulasi dapat dilakukan. Pada proses ini kita memilih elemen yang diperlukan

dan sesuai dengan spesifikasi komputer yang digunakan untuk melakukan proses perhitungan numerik.

4. Penentuan kondisi batas.

Simulasi aerodinamika yang akan dilakukan dipengaruhi oleh udara pada lingkungan sekitar dengan nilai tekanan atmosfer sebesar 1 atm. Penentuan kondisi batas juga ditentukan pada *inlet*, *outlet* dan juga pada dinding. Pada bagian *inlet* dimasukan kecepatan kendaraan yang divariasikan dari 80-140 km/j, lalu dimasukan kecepatan angin sebesar 58 km/j dan juga sudut serang angin. Hal ini dilakukan dengan cara mengatur kecepatan arah u, v dan w masing masing untuk arah x, y dan z.

Fluida yang digunakan pada penelitian ini adalah udara dengan sifat fisik sebagai berikut: density 1,225 kg/m. Udara yang mengalir pada bodi mobil diasumsikan sebagai gas ideal dan *incompressible*. Pada outlet Neumann yang diaplikasikan adalah $\frac{dp}{dx} = \frac{dp}{dy} = \frac{dp}{dz} = 0$, sedangkan pada *body* mobil yang diaplikasikan adalah $\frac{du}{dx} = \frac{dv}{dy} = \frac{dw}{dz} = 0$.

5. Hasil simulasi.

Hasil dari simulasi yang akan didapat berupa perubahan tekanan, kecepatan aliran, dan gaya tekan di sekitar bodi mobil yang nantinya akan dihitung untuk mencari gaya *slip* dan *skid* yang terjadi pada model mobil.

6. Analisa gaya-gaya aerodinamika

Analisa gaya-gaya aerodinamika dilakukan untuk mencari penyebab mobil mengalami kecelakaan seperti gaya *slip* dan gaya *skid*.

3.2. Perhitungan

Untuk melakukan perhitungan gaya *slip* dan gaya *skid* pada penelitian ini, diperlukan data spesifikasi dimensi eksterior mobil. Digunakan juga nilai gradien tekanan pada bagian bawah roda sesuai dengan nilai *pressure contour* pada *result* dari setiap simulasi yang akan dilakukan perhitungan.

Untuk mengetahui apakah mobil mengalami gaya *slip* maupun gaya *skid*, $\Sigma F = 0$ dipakai dalam penelitian ini. Jika $\Sigma F = 0$ artinya mobil tidak mengalami gaya *slip* atau gaya *skid*, tetapi jika $\Sigma F \neq 0$ maka gaya *slip* atau gaya *skid* terjadi dimana ΣF dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\Sigma F = P1 \times X + P2 \times X - P3 \times X - P4 \times X$$

Dimana :

P1 = Tekanan pada roda depan kanan.

P2 = Tekanan pada roda depan kiri.

P3 = Tekanan pada roda belakang kanan.

P4 = Tekanan pada roda belakang kiri.

X = Jarak dari roda ke *center of gravity*.

Dan untuk mengetahui berapa pergeseran *center of gravity* yang terjadi menggunakan rumus sebagai berikut:

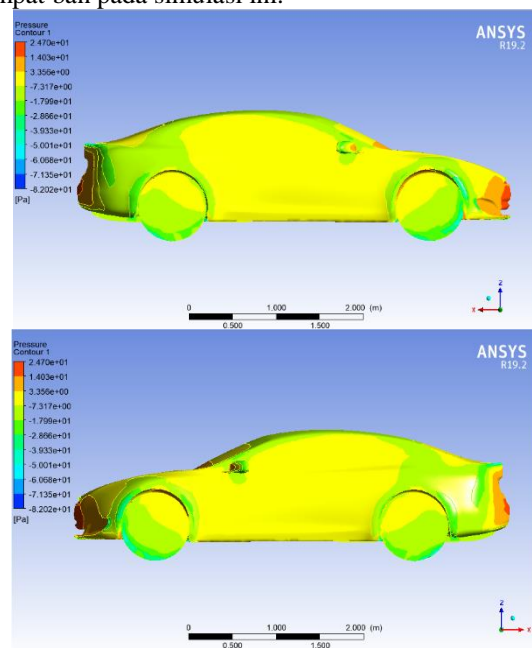
$$Cg = \frac{\Sigma F}{(g \times W)}$$

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Distribusi Tekanan Pada Kecepatan 80 km/j tanpa slip

Pada bagian depan mobil tepatnya di bagian hidung atau sekitar *air dam* mobil saat mobil melaju yang memiliki nilai gradien tekanan yang paling tinggi pada mobil dikarenakan bagian tersebut merupakan bagian yang paling depan saat mobil menabrak aliran udara. Bentuk distribusi tekanan yang terjadi pada bagian kiri dan kanan mobil saat mobil maju tanpa slip pada kecepatan 80 km/j terlihat sama.

Untuk mengetahui perbedaan nilai gradien tekanan, dapat dilihat melalui warna *pressure contour* pada hasil simulasi dimulai dari nilai gradien tekanan terbesarnya yang berwarna merah, yaitu sebesar 24,7 Pa, warna jingga sebesar 14,03, warna kuning sebesar 3,356 Pa, warna hijau yang berkisar dari angka -39,33 hingga -7,137 Pa, dan nilai gradien tekanan terendah yang berwarna biru tua sebesar -82,02 yang juga terletak pada permukaan bawah ke empat ban pada simulasi ini.



Gambar 7. Distribusi tekanan bagian samping maju tanpa slip pada kecepatan 80 km/j.

P1 = -82,02 Pa

P2 = -82,02 Pa

P3 = -82,02 Pa

P4 = -82,02 Pa

X = 1840,72 cm

W = 2250 kg

$$\Sigma F = (P1 \times X) + (P2 \times X) - (P3 \times X) - (P4 \times X)$$

$$\Sigma F = (-82,02 \times 1840,72) + (-82,02 \times 1840,72) - (82,02 \times 1840,72) - (-82,02 \times 1840,72) = 0$$

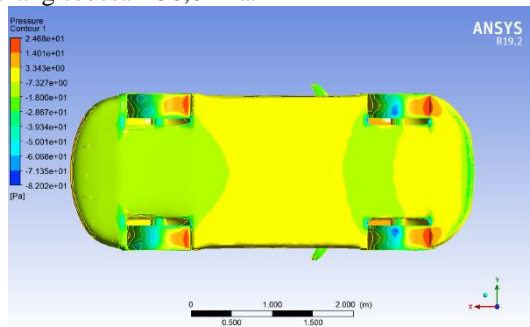
$$\text{Pergeseran Center of Gravity} = \Sigma F / (9,81 \times W) = 0 / (9,81 \times 2250 \text{ kg}) = 0$$

Jadi, tidak ada pergeseran *Center of Gravity* ketika mobil disimulasikan melaju tanpa *slip*.

4.2. Distribusi Tekanan Pada Kecepatan 80 km/j dengan slip

Bentuk distribusi tekanan pada simulasi ini masih terlihat sama seperti saat mobil maju tanpa slip pada kecepatan 80 km/j. Hanya saja nilai gradien tekanan yang dihasilkan pada simulasi ini terlihat sedikit berbeda dengan maju tanpa slip.

Dapat dilihat melalui warna *pressure contour* pada hasil simulasi ini gradien tekanan yang terjadi pada roda depan dan belakang mengalami perbedaan yang signifikan dimana gradien tekanan yang terjadi pada kedua roda depan sebesar -82,02 Pa dan gradien tekanan yang terjadi pada kedua roda belakang sebesar -50,01 Pa.



Gambar 8. Distribusi tekanan bagian samping maju dengan *slip* pada kecepatan 80 km/j.

$$P1 = -82,02 \text{ Pa}$$

$$P2 = -82,02 \text{ Pa}$$

$$P3 = -50,01 \text{ Pa}$$

$$P4 = -50,01 \text{ Pa}$$

$$X = 1840,72 \text{ cm}$$

$$W = 2250 \text{ kg}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$\Sigma F = (P1 \times X) + (P2 \times X) - (P3 \times X) - (P4 \times X)$$

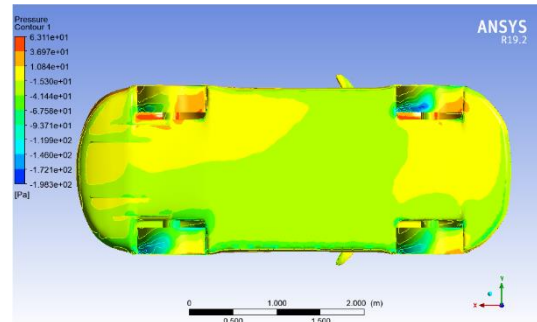
$$\Sigma F = (-82,02 \times 1840,72) + (-82,02 \times 1840,72) - (50,01 \times 1840,72) - (-50,01 \times 1840,72) = -117844$$

$$\text{Pergeseran Center of Gravity} = \Sigma F / (9,81 \times W) = (-117844) / (9,81 \times 2250 \text{ kg}) = -5,33896$$

Jadi, ada pergeseran *Center of Gravity* ke arah belakang sebesar 5,33896 mm ketika mobil disimulasikan melaju dengan *slip*.

4.3. Distribusi Tekanan Pada Kecepatan 80 km/j dengan slip dan skid

Perbedaan nilai gradien tekanan juga terjadi pada setiap tapak ban mobil dimana pada roda depan bagian kanan, yaitu sebesar -198,3 Pa, roda depan bagian kiri sebesar -67,58 Pa, roda belakang bagian kanan -15,30 Pa dan roda depan bagian kiri sebesar -67,58 Pa.



Gambar 9. Distribusi tekanan bagian samping maju dengan *slip* dan *skid* pada kecepatan 80 km/j.

$$P1 = -198,3 \text{ Pa}$$

$$P2 = -93,71 \text{ Pa}$$

$$P3 = -15,3 \text{ Pa}$$

$$P4 = -93,71 \text{ Pa}$$

$$X = 1840,72 \text{ cm}$$

$$W = 2250 \text{ kg}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$\Sigma F = (P1 \times X) + (P2 \times X) - (P3 \times X) - (P4 \times X)$$

$$\Sigma F = (-198,3 \times 1840,72) + (-93,71 \times 1840,72) - (15,3 \times 1840,72) - (-93,71 \times 1840,72) = -336856$$

$$\text{Pergeseran Center of Gravity} = \Sigma F / (9,81 \times W) = (-336856) / (9,81 \times 2250 \text{ kg}) = -15,2613$$

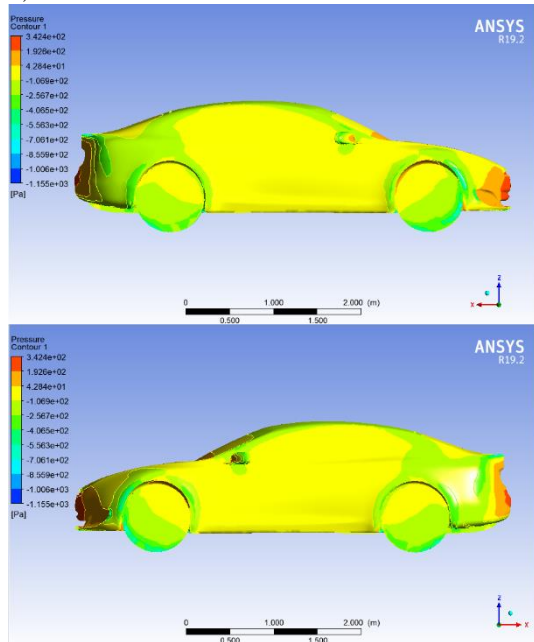
Jadi, ada pergeseran *Center of Gravity* ke arah belakang sebesar 15,2613 mm ketika mobil disimulasikan pada saat melaju dengan *slip* dan *skid*.

4.4. Distribusi Tekanan Pada Kecepatan 140 km/j tanpa slip

Hasil simulasi 140 km/j maju tanpa slip menunjukkan adanya peningkatan nilai gradien tekanan pada setiap warna dari *pressure contour* yang terjadi pada *frontal area* bodi mobil dari simulasi maju tanpa slip dengan kecepatan 80 km/j.

Namun, bentuk distribusi tekanan yang terjadi pada *frontal area* bodi mobil tidak mengalami

perubahan. Untuk mengetahui nilai gradien tekanan dari setiap *pressure contour* dapat dilihat dari warna merah sebesar 342,4 Pa, warna jingga menunjukkan tekanan sebesar 192,6 Pa, warna kuning sebesar 42,84 Pa, warna hijau berkisar dari -556,3 Pa hingga -10,69 Pa dan warna biru tua -1155 Pa.



Gambar 10. Distribusi tekanan bagian samping maju tanpa *slip* pada kecepatan 140 km/j.

- P1 = -1155 Pa
 P2 = -1155 Pa
 P3 = -1155 Pa
 P4 = -1155 Pa
 X = 1840,72 cm
 W = 2250 kg
 g = 9,81 m/s²

$$\Sigma F = (P1 \times X) + (P2 \times X) - (P3 \times X) - (P4 \times X)$$

$$\Sigma F = (-1155 \times 1840,72) + (-1155 \times 1840,72) - (-1155 \times 1840,72) - (-1155 \times 1840,72)$$

$$= 0$$

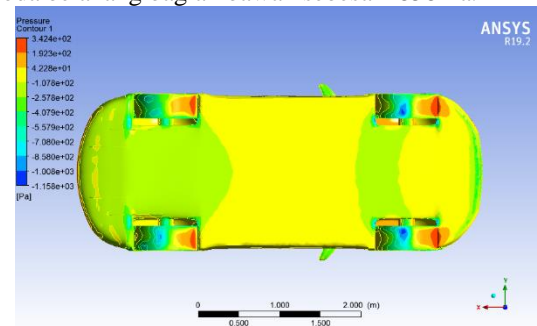
Pergeseran *Center of Gravity* = $\Sigma F / (9,81 \times W)$
 = $0 / (9,81 \times 2250 \text{ kg}) = 0$

Jadi, tidak ada pergeseran *Center of Gravity* ketika mobil disimulasikan melaju tanpa *slip*.

4.5. Distribusi Tekanan Pada Kecepatan 140 km/j dengan *slip*

Dapat dilihat melalui warna *pressure contour* pada hasil simulasi ini gradien tekanan pada roda depan dan belakang mengalami perbedaan yang signifikan dimana nilai gradien tekanan yang terjadi pada kedua roda depan bagian bawah sebesar -1158

Pa dan nilai gradien tekanan yang terjadi pada kedua roda belakang bagian bawah sebesar -858 Pa.



Gambar 11. Distribusi tekanan bagian samping maju dengan *slip* pada kecepatan 140 km/j.

- P1 = -1158 Pa
 P2 = -1158 Pa
 P3 = -858 Pa
 P4 = -858 Pa
 X = 1840,72 cm
 W = 2250 kg
 g = 9,81 m/s²

$$\Sigma F = (P1 \times X) + (P2 \times X) - (P3 \times X) - (P4 \times X)$$

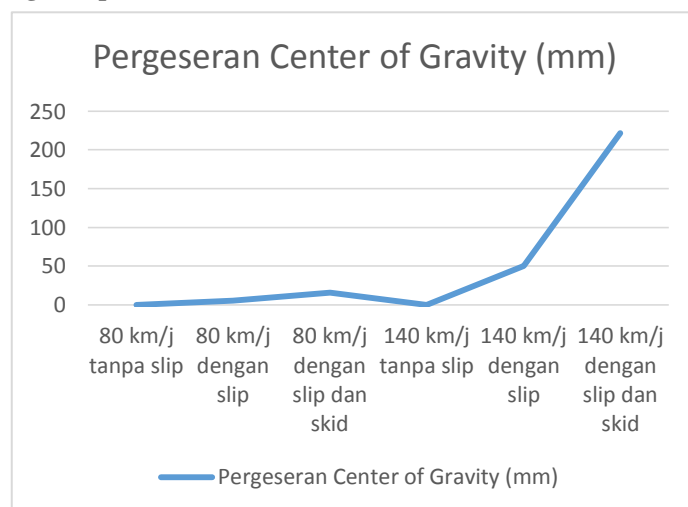
$$\Sigma F = (-1158 \times 1840,72) + (-1158 \times 1840,72) - (-858 \times 1840,72) - (-858 \times 1840,72)$$

$$= -1104445$$

Pergeseran *Center of Gravity* = $\Sigma F / (9,81 \times W)$
 = $(-1104445) / (9,81 \times 2250 \text{ kg}) = -50,0372$

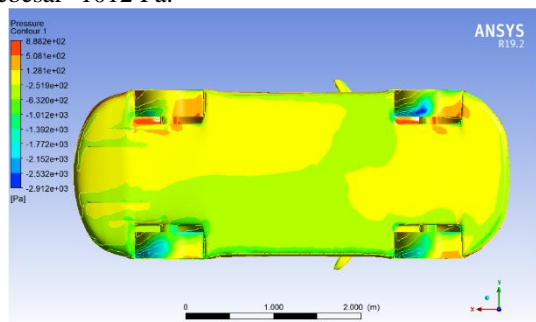
Jadi, ada pergeseran *Center of Gravity* ke arah belakang sebesar 50,03872 mm ketika mobil disimulasikan melaju dengan *slip*.

4.6. Distribusi Tekanan Pada Kecepatan 140 km/j dengan *slip* dan *skid*



Kali ini nilai gradien tekanan mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya kecepatan.

Perbedaan nilai gradien tekanan juga terjadi pada setiap bagian bawah roda mobil dimana pada roda depan bagian kanan, yaitu sebesar -2912 Pa, roda depan bagian kiri sebesar -1012 Pa, roda belakang bagian kanan -251,9 Pa dan roda depan bagian kiri sebesar -1012 Pa.



Gambar 12. Distribusi tekanan bagian samping maju dengan *slip* dan *skid* pada kecepatan 140 km/j.

$$P1 = -2912 \text{ Pa}$$

$$P2 = -1012 \text{ Pa}$$

$$P3 = -251,9 \text{ Pa}$$

$$P4 = -1012 \text{ Pa}$$

$$X = 1840,72 \text{ cm}$$

$$W = 2250 \text{ kg}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$\Sigma F = (P1 \times X) + (P2 \times X) - (P3 \times X) - (P4 \times X)$$

$$\Sigma F = (-2912 \times 1840,72) + (-1012 \times 1840,72) - (251,9 \times 1840,72) - (-1012 \times 1840,72) = -4896558$$

$$\text{Pergeseran Center of Gravity} = \Sigma F / ((9,81 \times W)) = (-4896558) / (9,81 \times 2250 \text{ kg}) = -221,84$$

Jadi, ada pergeseran *Center of Gravity* ke arah belakang sebesar 221,84 mm ketika mobil disimulasikan melaju dengan *slip* dan *skid*.

5. Kesimpulan

Setelah melakukan perhitungan gaya *slip* dan *skid*, maupun perhitungan pergeseran *center of gravity* didapati hasil perhitungan yang negatif. Hal tersebut menunjukkan bahwa kecepatan fluida yang berada pada simulasi tersebut berlawanan dengan arah pergerakan tersebut yang berarti bahwa nilai gradien tekanannya lebih kecil dari 0 dan pergerakan *center of gravity* menuju ke arah belakang. Nilai gradien tekanan pada setiap ban yang kecil dapat menghasilkan gaya yang besar jika ditambahkan dengan tekanan atmosfer yang akan menghasilkan *absolute pressure*. Hal ini dikarenakan nilai Pa (*Pascal*) pada simulasi merupakan *gauge pressure*.

Gambar 13. Grafik pergeseran *Center of Gravity*.

Dapat dilihat pada gambar bahwa semakin tinggi kecepatan mobil maka jika terjadi gaya *slip* maupun *skid* akan semakin besar pergeseran *center of gravity* yang terjadi pada mobil.

Salah satu hal yang dapat mengindikasikan kestabilan kendaraan saat melaju adalah tekanan yang sama besar pada masing-masing rodanya baik itu roda depan, maupun roda belakang. Perbedaan tekanan yang terjadi pada salah satu roda atau lebih dapat menyebabkan terjadinya gaya pada mobil yang sedang melaju. Gaya yang dimaksud disini merupakan gaya *slip*, *skid* maupun *rolling*, semua itu tergantung pada perbedaan tekanan pada masing-masing roda. Dari pengujian diperoleh bahwa terjadi pergeseran *centre of gravity* dari mobil saat maju tanpa *slip*, maju dengan *slip*, dan maju dengan *slip* dan *skid*. Dimulai pada kecepatan 80 km/j masing-masing berurutan dari sebesar 0 mm, 5,33896 mm, dan 15,2613 mm untuk kecepatan 80 km/h. Sedangkan pada kecepatan 140 km/j masing-masing berurutan dari sebesar 0 mm, 50,0372 mm, dan 221,84 mm.

Daftar Pustaka

- [1] Gillespie, T. (1992). *Fundamental Of Vehicle Dynamics*. Pennsylvania: Society of Automotive Engineers, Inc.
- [2] *Pressure-gradient force*. (2019, July 19). Retrieved from Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Pressure-gradient_force
- [3] Eckert, E. R., & Drake Jr, R. M. (1959). *Heat and Mass Transfer*. McGraw-Hill.
- [4] Carpenter, C. (1997). *Flightwise Volume 2 Aircraft Stability and Control*.

	<p>Alief Fadil Djanuarno menyelesaikan pendidikan S1 program studi Teknik Mesin di Universitas Udayana pada tahun 2021.</p>
	<p>Bidang penelitian yang menjadi konsentrasi adalah topik pembahasan konversi energi.</p>