

ANALISA AERODINAMIKA PADA SEPEDA DENGAN FORMASI BERIRINGAN DENGAN VARIASI KECEPATAN DAN JARAK ANTAR SEPEDA MENGGUNAKAN CFD FLUENT 6.3

MSK. Tony Suryo Utomo*, Muhammad Iqbal
Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
*Email: msk_tony@undip.ac.id

ABSTRAK

Bersepeda secara beriringan merupakan suatu strategi penting dalam balapan sepeda seperti perlombaan Team Time Trial dimana didasarkan pada pemanfaatan efek aerodinamika. Dalam hal ini, koefisien tahanan udara diusahakan untuk diminimalkan agar dapat mengurangi daya (power) yang dikeluarkan oleh pengendara sepeda sehingga pengendara sepeda tidak cepat lelah. Tugas sarjana ini menganalisis fenomena yang terjadi pada sepeda dengan formasi beriringan yang diakibatkan dengan adanya kecepatan aliran fluida. Metodologi tugas sarjana ini disimulasikan menggunakan sistem computer dengan software CFD (Computational Fluid Dynamics).

Simulasi dilakukan oleh lima sepeda yang diposisikan sejajar dengan arah aliran udara dengan variasi kecepatan 30 km/jam, 40 km/jam, dan 50 km/jam. Pada tiap kecepatan tersebut, dilakukan juga simulasi terhadap variasi jarak antar sepeda, yaitu $\frac{1}{4}$ diameter roda, $\frac{1}{2}$ diameter roda, 1 diameter roda, dan 2 diameter roda dimana diameter roda adalah 674 mm. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai koefisien tahanan terbesar terjadi pada sepeda pertama (di depan) pada jarak antar sepeda 2 diameter roda pada kecepatan 30 km/jam yaitu sebesar 0.648, sedangkan koefisien tahanan terkecil terjadi pada sepeda ketiga (di tengah) pada jarak antar sepeda $\frac{1}{4}$ diameter roda pada kecepatan 50 km/jam yaitu sebesar 0.317. Semakin kecil jarak antar sepeda, semakin rendah pula koefisien tahanan (drag coefficient) yang terjadi pada sepeda.

Kemudian, perhitungan teoritis dilakukan untuk mencari daya yang dikeluarkan oleh pengendara sepeda. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai daya terbesar terjadi pada pengendara pertama (di depan) pada jarak antar sepeda 2 diameter roda pada kecepatan 50 km/jam yaitu 279.133 watt, sedangkan Daya terkecil terjadi pada pengendara ketiga (di tengah) pada jarak antar sepeda $\frac{1}{4}$ diameter roda pada kecepatan 30 km/jam yaitu 46.456 watt. Semakin besar jarak antar sepeda, semakin besar pula gaya hambat udaranya (F_d) dan semakin besar pula daya (P) yang dikeluarkan oleh pengendara sepeda.

Kata kunci: Sepeda, koefisien tahanan, kecepatan, jarak antar sepeda, daya, CFD.

PENDAHULUAN

Bersepeda dalam sebuah kelompok atau suatu balapan sepeda memerlukan suatu strategi atau formasi yang benar agar pengendara tidak cepat lelah. Strategi tersebut didasarkan pada pemanfaatan aerodinamika, dimana pengendara dapat mengurangi daya yang dibutuhkan untuk memutar pedal dengan cara bersepeda secara beriringan atau dikenal dengan istilah “*drafting*”. Hal ini terjadi karena pengendara bagian depan terkena efek gaya tahanan oleh angin yang lebih besar daripada pengendara bagian belakang sehingga memerlukan usaha yang lebih besar untuk memutar pedal dan lebih cepat lelah. Strategi ini biasa digunakan oleh tim pengendara sepeda nasional maupun profesional dalam suatu perlombaan sepeda untuk mengalahkan pesaingnya.

Salah satu aplikasinya adalah pada perlombaan sepeda *Team Time Trial*. *Team Time Trial* adalah suatu perlombaan balap sepeda dimana suatu tim pengendara sepeda berpacu dengan waktu untuk memenangkan pertandingan. Strategi utama perlombaan *Team Time Trial* adalah dengan melakukan formasi beriringan. Strategi tersebut adalah ketika pengendara paling

depan sudah mulai lelah, maka pengendara tersebut bisa melakukan rotasi untuk memulihkan tenaganya, sementara pengendara kedua mengambil alih posisi paling depan. Gambar 1 menunjukkan suatu tim pengendara sepeda sedang melakukan rotasi dalam *Team Time Trial* [10].



Gambar 1. Suatu tim pengendara sepeda sedang melakukan rotasi dalam *Team Time Trial* [4].

Aerodinamika adalah studi tentang bagaimana suatu benda padat bergerak melalui udara. Ketika definisi ini dihubungkan dengan olahraga bersepeda, maka hal ini marujuk pada bagaimana seorang pengendara sepeda mengatasi tahanan udara yang dihasilkan oleh gerak maju dan angin. Kecepatan yang dapat dicapai pada sepeda ditentukan oleh dua faktor. Yang pertama adalah berapa besar kekuatan yang pengendara keluarkan dan yang kedua adalah hambatan angin, sering disebut sebagai "drag force". Gaya pada sebuah benda yang melawan gerakan melalui fluida disebut gaya tahanan (*drag force*).

Gaya tahanan aerodinamika terdiri dari dua gaya, yaitu tahanan tekanan udara (*air pressure drag*) dan gesekan langsung (juga dikenal sebagai gesekan permukaan atau *skin-friction*). Daerah tekanan rendah di bagian belakang objek menghasilkan gaya tahanan terhadap objek. Dengan tekanan tinggi di bagian depan dan tekanan rendah di bagian belakang, pengendara sepeda secara harfiah sulit untuk bergerak maju.

Sepeda yang baik diciptakan untuk meminimalkan tahanan tekanan udara (*pressure drag*). Bentuk geometri yang tepat dapat memaksimalkan kemungkinan terbentuknya aliran yang melekat (bukan memisahkan aliran dan membentuk pusaran) yang meminimalkan gesekan permukaan. Hal ini dapat dilakukan dengan pengujian model sepeda menggunakan terowongan angin (*wind tunnel*). Namun, pengujian menggunakan terowongan angin ini membutuhkan peralatan dan ruang yang memadai serta biaya yang relatif tinggi untuk melakukannya.

Untuk mengatasi masalah ini maka diperlukan suatu solusi alternatif dalam hal simulasi dinamik dengan menggunakan *software* CFD FLUENT 6.3 dengan harapan proses analisis studi kasus ini dapat dilakukan dengan lebih mudah, hemat dan cepat. Meskipun, simulasi ini menghasilkan data yang kurang valid karena interaksi aliran udara di sekitar sepeda bergerak secara konstan dan dengan ayunan kaki dan roda yang tidak berputar.

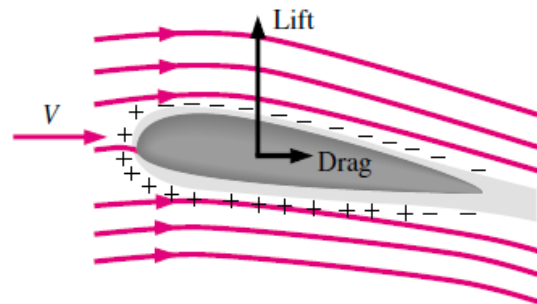
DASAR TEORI

1. Gaya – Gaya pada Benda

Suatu benda yang berada pada suatu fluida yang bergerak (atau benda yang bergerak pada suatu fluida yang diam) akan mengalami suatu gaya. Gaya – gaya yang terjadi pada kasus seperti ini sering disebut dengan gaya – gaya aerodinamika. Gaya – gaya yang terjadi adalah gaya di antara benda dengan fluida. Komponen – komponen gaya tersebut adalah [2]:

a. Gaya Tahanan (*Drag*) dan Gaya Angkat (*Lift*)

Tahanan adalah gaya yang diberikan oleh fluida yang mengalir terhadap suatu objek dalam arah paralel terhadap aliran tersebut. Sedangkan, gaya angkat adalah komponen dari tekanan dan gaya geser dinding dalam arah tegak lurus terhadap aliran cenderung menggerakkan objek ke arah tersebut [2].



Gambar 2. Sebuah *airfoil* yang menghasilkan gaya angkat dan gaya tahanan minimum [2].

Gaya tahanan dan angkat bergantung pada densitas fluida ρ , kecepatan *upstream* V , dan ukuran dan bentuk objek, dan tidak mudah untuk menentukan gaya ini untuk bermacam kondisi. Sebagai gantinya, data-data tersebut biasanya disajikan dalam bentuk bilangan tak berdimensi yaitu berupa koefisien tahanan (*drag coefficient*) dan koefisien gaya angkat (*lift coefficient*), didefinisikan sebagai:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A}$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho V^2 A}$$

dimana:

F_d = gaya tahanan

F_d = gaya angkat

ρ = densitas fluida

V = kecepatan *upstream* (m/s)

A = area frontal (m²)

b. Jenis – Jenis Tahanan

Bagian dari tahanan yang disebabkan secara langsung oleh tegangan geser τ_w pada dinding dinamakan tahanan permukaan (*skin friction drag*) karena disebabkan oleh pengaruh gesekan, dan bagian yang disebabkan secara langsung oleh tekanan P dinamakan tahanan tekanan (*pressure drag*) atau tahanan bentuk (*form drag*) karena sangat bergantung pada bentuk objek.

Tahanan permukaan merupakan komponen dari gaya geser dinding pada arah aliran, dan dengan demikian bergantung pada orientasi objek serta besar tegangan geser τ_w dinding. Tahanan permukaan adalah nol untuk permukaan datar yang normal terhadap aliran, dan *maximum* untuk permukaan datar paralel terhadap aliran karena tahanan permukaan dalam hal ini sama dengan gaya geser total pada permukaan. Tahanan permukaan merupakan sangat dipengaruhi oleh viskositas, dan meningkat dengan meningkatnya viskositas.

Tahanan tekanan sebanding dengan area frontal dan perbedaan antara tekanan di depan objek dan belakang objek. Oleh karena itu, tahanan tekanan biasanya paling besar untuk objek tumpul, kecil untuk objek streamline, misalnya airfoil, dan nol untuk

permukaan tipis parallel terhadap aliran. Tahanan tekanan menjadi sangat penting ketika kecepatan fluida terlalu tinggi untuk fluida yang mampu mengikuti kelengkungan objek. Tahanan tekanan dalam hal ini disebabkan perbedaan tekanan yang sangat besar antara di sisi depan dan belakang objek [2].

2. Menghitung Daya yang Dikeluarkan oleh Pengendara Sepeda

Daya merupakan kerja yang dibutuhkan per satuan waktu untuk menghadapi gaya total yang bekerja pada pengendara dan sepeda. Ada beberapa gaya yang melawan gerak dari sepeda sehingga pengendara sepeda membutuhkan daya yang cukup agar sepeda tersebut bisa bergerak maju. Gaya-gaya tersebut adalah:



Gambar 3. Gaya yang bekerja pada pengendara dan sepeda [6].

a. Rolling Resistance

Gaya ini merupakan gesekan pada roda yang berhubungan dengan jalan. Hal ini dipengaruhi oleh kualitas sepeda, roda, permukaan jalan, tekanan roda, dan berat pengendara dan sepeda. Pada kecepatan rendah, pada jalan datar, gaya ini merupakan gaya utama [6].

$$F_{rl} = m \times g \times C_r$$

dimana

F_{rl} = Gaya oleh *rolling resistance*

C_r = Koefisien *rolling resistance*

m = Total masa pengendara sepeda dan sepeda (kg)

g = Percepatan gravitasi (9.8 m/s^2)

b. Air and Wind Resistance

Udara merupakan suatu fluida dan objek yang bergerak melalui udara akan menghasilkan gesekan. Ini merupakan fungsi dari kecepatan sepeda ditambah kecepatan angin, luas frontal dan bentuk pengendara dan sepeda, dan kecepatan bergerak [6].

$$F_d = C_d \frac{1}{2} \rho V^2 A$$

dimana

F_d = Gaya pada pengendara dan sepeda oleh tahanan angin

C_d = Koefisien tahanan

ρ = Densitas udara

V = Kecepatan sepeda dalam m/s

A = Luas frontal dari pengendara dan sepeda (m^2)

c. Slope resistance

Ketika mendaki, pengendara membutuhkan daya yang cukup untuk “mengangkat” dirinya sendiri ditambah berat sepedanya. Ini merupakan pengaruh dari kemiringan jalan dan kecepatan. Semakin bertambahnya ketinggian, maka energi potensial juga meningkat. Energi potensial dapat menghasilkan energy balik setiap kali pengendara sepeda turun [6].

$$F_{sl} = m \times g \times \text{Gradhill}$$

dimana

F_{sl} = Gaya disebabkan kemiringan jalan

m = Total masa pengendara sepeda dan sepeda (kg)

g = Percepatan gravitasi

Gradhill = Gradien kemiringan jalan, rasio kenaikan untuk jangka horizontal

Daya total yang dikeluarkan pengendara sepeda merupakan penjumlahan dari semua gaya di atas dikali dengan kecepatannya atau dapat ditulis dengan [6]:

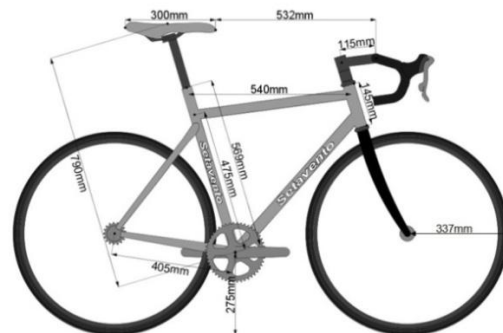
$$\text{Daya total} = F_{rl} + F_d + F_{sl} V$$

Di mana V = kecepatan sepeda dalam (m/s)

PEMODELAN BENDA

1. Model Benda

Simulasi dalam tugas sarjana ini dilakukan pada sepeda berjenis sepeda balap berjumlah lima sepeda dengan formasi beriringan sejajar terhadap arah aliran udara. Adapun dimensi sepeda dan model yang telah dibuat dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Dimensi sepeda yang akan dimodelkan pada Ansys 12.

2. Proses Simulasi

a. Preprocessing

Preprocessing merupakan langkah pertama dalam membangun dan menganalisa sebuah model CFD. Dalam tahapan ini, dilakukan dua hal, yaitu pembuatan model benda dengan menggunakan *software CAD (Computer Aided Design)* dan membuat *mesh* yang cocok/sesuai. Dalam tugas sarjana ini dalam pembuatan model benda dan penggenerasian *mesh* dilakukan pada *software Ansys 12*.

b. *Solving*

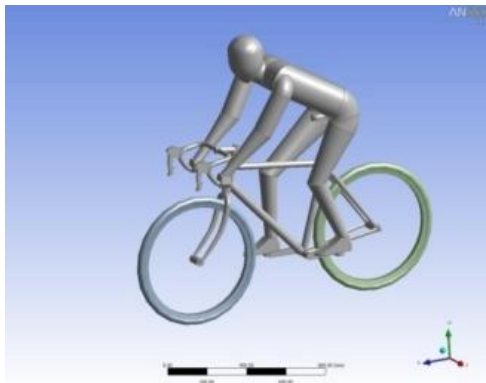
Solver (program inti pencari solusi) CFD menghitung kondisi-kondisi batas yang diterapkan pada saat *preprocessing*, lalu melakukan iterasi atau perhitungan.

c. *Postprocessing*

Langkah terakhir dalam analisis CFD. Hal yang dilakukan dalam mengorganisasi dan menginterpretasi data hasil simulasi CFD yang bisa berupa gambar, kurva, dan animasi.

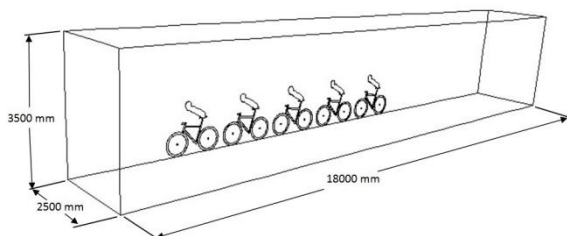
3. Simulasi Aerodinamika Kelima Model Sepeda

a. Model Komputasi



Gambar 5. Model sepeda pada Ansys 12 yang akan dianalisa.

Model sepeda dibuat di *software Ansys 12* dengan cara membuat satu model sepeda dahulu kemudian disalin menjadi 5 buah sepeda yang disusun beriringan. Kemudian membuat model *wind tunnel* dengan kelima sepeda tersebut berada di dalamnya dimana *wind tunnel* tersebut digunakan sebagai *domain* dalam FLUENT. Model sepeda dan dimensi *wind tunnel* ditunjukkan pada Gambar 5 dan 6.



Gambar 6. Dimensi Domain komputasi setengah bagian.

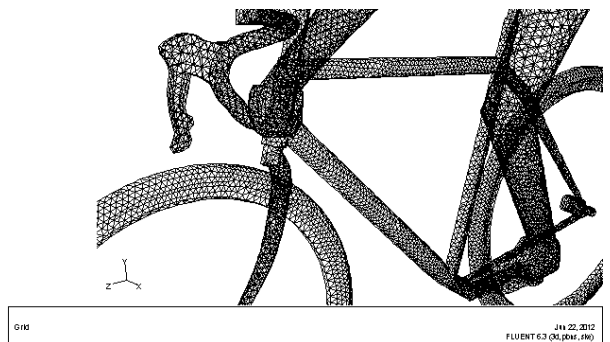
b. Penggenerasian Mesh

Dalam pemodelan sepeda ini, penggenerasian *mesh* dilakukan secara otomatis di Ansys 12. Sebelum penggenerasian *mesh*, dilakukan beberapa pengaturan ukuran mesh dilihat pada Tabel 1 sebagai berikut :

Tabel 1. Pengaturan ukuran mesh

Use Advanced Size Function	On: Curvature
Relevance Center	Coarse
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	High
Transition	Slow
Span Angle Center	Medium
Curvature Normal Angle	Default (18.0 °)
Min Size	1.0 mm
Max Face Size	500.0 mm
Max Tet Size	1500.0 mm
Growth Rate	1.3

Pengaturan ukuran *mesh* di atas dimaksudkan untuk mendapat kerapatan *mesh* yang berbeda sehingga diperoleh kerapatan yang lebih besar pada daerah-daerah yang menjadi pusat perhatian dan sebaliknya pada daerah-daerah lain kerapatannya lebih kecil. Dengan demikian, dapat diperoleh suatu bentuk penggenerasian *mesh* yang optimal dan dapat menghemat waktu dan usaha perhitungan komputasi. Pada penggenerasian *volume mesh* Ansys menggunakan jenis elemen *Tet/Hybrid* dengan tipe mesh *Tgrid* karena geometri benda yang rumit, dimana terdapat lebih dari 1 juta sel yang selanjutnya dijadikan sebagai model komputasi pada FLUENT.



Gambar 7. Hasil penggenerasian mesh pada sepeda.

c. Turbulence Models

Dalam tugas sarjana ini, model turbulensi yang digunakan untuk proses simulasi adalah *k-epsilon standard wall functions*. Hal ini karena model *k-epsilon standard wall functions* juga model turbulensi ini lebih stabil, ekonomis (dari segi komputasi), dan akurasi yang memadai untuk berbagai jenis aliran turbulen serta, cocok untuk simulasi untuk aliran eksternal. Alasan lain dalam penggunaan model viskos simulasi ini dikarenakan pertimbangan faktor lamanya waktu yang dibutuhkan untuk melakukan proses simulasi serta keterbatasan kemampuan komputer dalam melakukan proses simulasi.

d. Pendefinisian Material

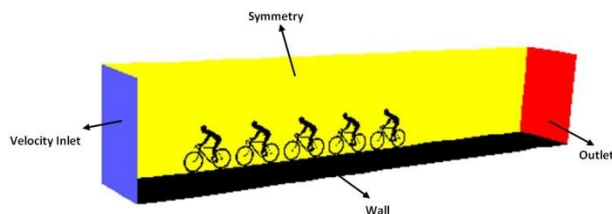
Fluida yang digunakan dalam kasus ini adalah udara. Adapun sifat-sifat udara yang digunakan adalah sebagai berikut:

- Jenis Fluida = Udara
- Densitas (ρ) = 1,225 kg/m³
- Viskositas (μ) = 1,7894 x 10⁻⁵ kg/ms

e. Pendefinisian Kondisi Operasi dan Kondisi Batas

Dalam kasus kali ini, sepeda terpengaruh oleh udara dari lingkungan luar, maka kondisi operasi yang digunakan pada simulasi Tugas Akhir ini menggunakan nilai atmosfer yaitu 1 atm atau 101325 Pa.

Kondisi batas yang digunakan pada simulasi ini yaitu *Velocity Inlet*, *Outflow*, *Symmetry*, dan *Wall*. Pada Gambar 8 menunjukkan letak kondisi batas yang digunakan pada domain *wind tunnel*.



Gambar 8. Kondisi batas pada domain setengah bagian.

Pada kondisi batas *Velocity inlet*, besar kecepatan diatur sesuai dengan variasi yang digunakan yaitu 30 km/jam, 40 km/jam, dan 50 km/jam. Dinding – dinding seksi pengujian bagian atas dan samping diidealisasikan dan didefinisikan sebagai batas simetri. Batas bawah diidealisasikan layaknya jalan raya sehingga kondisi batas adalah *wall*. Untuk pendefinisian kondisi batas *wall* dan juga *Outflow* menggunakan nilai *default* dari ANSYS FLUENT.

Idealisasi juga dilakukan pada model sepeda sendiri diantaranya adalah rantai dan jari-jari roda sepeda tidak disertakan dalam simulasi, roda dan pedal sepeda diidealisasikan tidak berputar atau diam.

f. Proses Iterasi

Sebelum proses iterasi dilakukan, perlu dilakukan inisiasi aliran (*initialization*), yaitu memasukkan input awal. Setelah diinisialisasi, iterasi dijalankan hingga memenuhi kriteria konvergensi yang disyaratkan. Untuk kasus aliran *steady*, iterasi awal dilakukan 1000 kali. Jika belum konvergen, jumlah iterasi bisa ditambahkan lalu lakukan kembali iterasi. Jika masih belum konvergen, maka iterasi dapat dihentikan bila koefisien tahanan hasil simulasi sudah dirasa konstan. Adapun kontrol solusi yang digunakan pada komputasi ini dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Kontrol solusi dalam komputasi dan simulasi

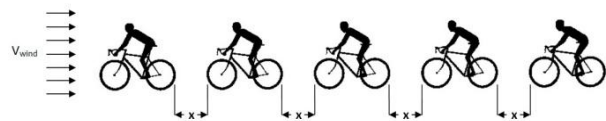
<i>Viscous Model</i>	<i>k-epsilon</i>
<i>k-e model</i>	<i>Standard</i>

<i>Near Wall Treatment</i>	<i>Standard Wall Functions</i>
<i>Discretization</i>	
<i>Pressure</i>	<i>Standard</i>
<i>Momentum</i>	<i>Second Order Upwind</i>
<i>Turbulent Kinetic Energy</i>	<i>Second Order Upwind</i>
<i>Turbulent Dissipation Rate</i>	<i>Second Order Upwind</i>
<i>Pressure</i>	0,3
<i>Density</i>	1
<i>Momentum</i>	0,7
<i>Turbulent kinetic energy</i>	0,8
<i>Turbulent dissipation rate</i>	0,8
<i>Turbulent viscosity</i>	1
<i>Kriteria konvergensi</i>	1e-06

g. Variasi Simulasi

Di sini dilakukan variasi dari beberapa tingkat kecepatan untuk membandingkan koefisien tahanan dan gaya tahanan berdasarkan kecepatan. Variasi kecepatan yang digunakan adalah : 30 km/jam, 40 km/jam, dan 50 km/jam.

Dalam melakukan analisa, dilakukan pula beberapa variasi jarak antar sepeda untuk memberikan perbedaan koefisien tahanan tiap sepeda pada setiap variasi jarak antar sepeda. Variasi jarak yang diberikan adalah 1/4 diameter roda, 1/2 diameter roda, 1 diameter roda, dan 2 diameter roda dimana diameter roda adalah 674 mm.



Gambar 9. Variasi kecepatan aliran udara (V_{wind}) dan Jarak antar sepeda (x).

HASIL DAN ANALISA

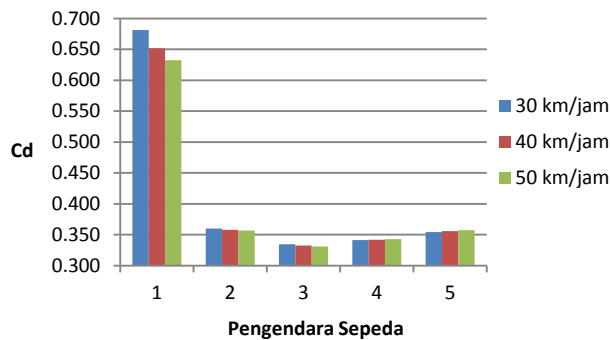
1. Hasil Simulasi Variasi Kecepatan

Pada simulasi ini jarak antara sepeda yang satu dengan yang lain adalah 1/4 diameter (164,5 mm) roda dimana diameter roda sepeda adalah 674 mm. Sedangkan variasi kecepatan aliran udara adalah 30 km/jam, 40 km/jam, dan 50 km/jam. Hasil simulasinya adalah sebagai berikut:

Tabel 3. Koefisien tahanan untuk jarak antar sepeda 1/4 diameter roda (168.5 mm)

		30 km/jam	40 km/jam	50 km/jam
Sepeda 1	<i>Cd</i>	0.681	0.652	0.632
	<i>Fd (N)</i>	6.659	11.329	17.186
Sepeda 2	<i>Cd</i>	0.360	0.358	0.357
	<i>Fd (N)</i>	3.520	6.218	9.692
Sepeda 3	<i>Cd</i>	0.334	0.332	0.331
	<i>Fd (N)</i>	3.269	5.777	8.995
Sepeda 4	<i>Cd</i>	0.341	0.342	0.343
	<i>Fd (N)</i>	3.337	5.946	9.323
Sepeda 5	<i>Cd</i>	0.354	0.356	0.357

	$F_d (N)$	3.462	6.190	9.716
--	-----------	-------	-------	-------



Gambar 10. Grafik hubungan koefisien tahanan (C_d) dengan sepeda untuk jarak $\frac{1}{4}$ diameter roda (168,5 mm).

Dari gambar 10, dapat disimpulkan bahwa semakin besar kecepatan aliran udara, maka semakin rendah koefisien tahanan yang terjadi pada tiap sepeda. Koefisien tahanan terbesar dialami oleh sepeda pertama pada kecepatan 30 km/jam yaitu sebesar 0.681. Sedangkan koefisien tahanan terkecil dialami oleh sepeda ketiga pada kecepatan 50 km/jam yaitu sebesar 0.331.

2. Analisa Fenomena Aerodinamika Pada Tiap Sepeda

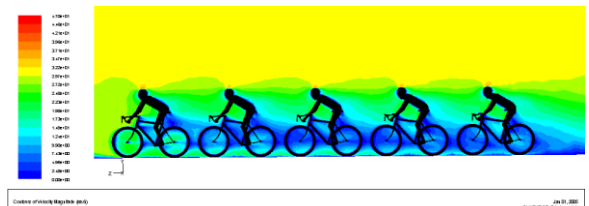
Pada setiap hasil simulasi, koefisien tahanan (C_d) paling rendah selalu terjadi pada sepeda ketiga (di tengah). Untuk menganalisa kasus tersebut, maka dilakukan analisa berdasarkan kontur tekanan statis, kontur kecepatan, dan *path lines* partikel fluida pada tiap sepeda. Sebagai contoh untuk dianalisa adalah simulasi pada variasi kecepatan udara 30 km/jam pada jarak antar sepeda $\frac{1}{4}$ diameter roda (168,5 mm).



Gambar 11. Perbandingan kontur tekanan statis pada tiap sepeda untuk jarak $\frac{1}{4}$ diameter roda (168,5 mm) dan kecepatan aliran 30 km/jam.

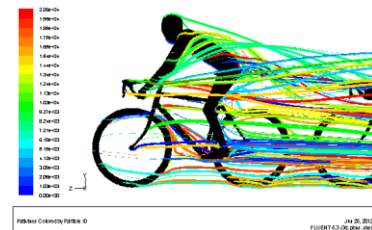
Pada Gambar 11 terlihat bahwa selisih distribusi tekanan statis terbesar terjadi pada sepeda pertama. Hal ini dapat dilihat dengan warna kontur tekanan yang tinggi pada bagian depan sepeda sedangkan kontur tekanan rendah pada bagian belakang sepeda pertama. Semakin besar selisih distribusi tekanan statiknya maka semakin besar pula koefisien tahanannya. Selisih distribusi tekanan statis yang paling kecil terjadi pada sepeda ketiga (di tengah). Hal itu terjadi karena selisih distribusi tekanan pada bagian depan dan bagian

belakang pengendara sepeda ketiga lebih rendah, maka terjadi reduksi nilai koefisien tahanan.

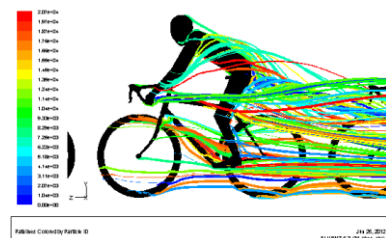


Gambar 12. Perbandingan kontur kecepatan pada tiap sepeda untuk jarak $\frac{1}{4}$ diameter roda (168,5 mm) dan kecepatan aliran 30 km/jam.

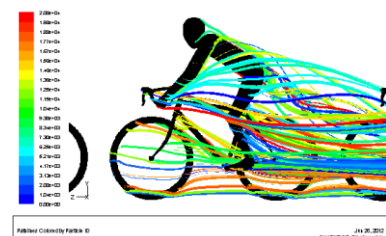
Gambar 12 memperlihatkan bagaimana perbedaan besar nilai kecepatan yang terjadi ketika kecepatan aliran udara melewati masing-masing sepeda. Warna kontur kecepatan pada sekitar sepeda ketiga adalah biru tua tebal. Warna biru tua berarti kecepatan udara yang melintasi sepeda ketiga adalah kecil karena terhalang oleh sepeda pertama dan kedua, oleh karena itu koefisien tahanannya pun juga rendah. Sedangkan, koefisien tahanan terbesar terjadi pada sepeda pertama. Hal ini dapat diketahui pada gambar di atas bahwa warna kontur kecepatan di sekitar sepeda pertama didominasi oleh warna hijau.



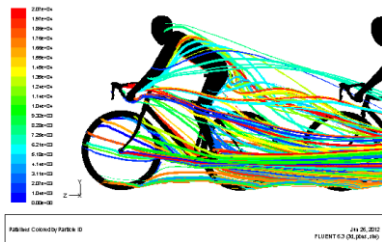
Gambar 13. *Path lines* partikel fluida pada sepeda 1.



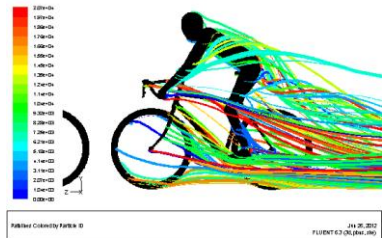
Gambar 14. *Path lines* partikel fluida pada sepeda 2.



Gambar 15. *Path lines* partikel fluida pada sepeda 3.



Gambar 16. Path lines partikel fluida pada sepeda 4.



Gambar 17. Path lines partikel fluida pada sepeda 5.

Path lines merupakan lintasan dari pergerakan aliran fluida. Path lines merupakan gambaran yang baik untuk visualisasi aliran fluida tiga dimensi yang kompleks. Pada gambar di atas, path lines digunakan untuk memeriksa gerak aliran partikel fluida di belakang tiap sepeda. Garis path lines menunjukkan terjadi aliran yang berputar pada bagian belakang sepeda. Aliran tersebut terjadi akibat adanya perbedaan tekanan pada bagian depan dan belakang sepeda. Aliran dengan putaran lebih banyak

menunjukkan bahwa sepeda memiliki koefisien tahanan lebih besar. Dari perbandingan path lines tersebut, sepeda pertama memiliki aliran berputar lebih banyak. Oleh karena itu koefisien tahanan sepeda pertama lebih besar daripada yang lain. Sementara, sepeda ketiga memiliki aliran berputar paling sedikit dan garis aliran didominasi oleh warna biru tua. Oleh karena itu koefisien tahanan sepeda ketiga adalah yang paling lebih rendah.

3. Simulasi Variasi Jarak Antar Sepeda untuk Tiap Kecepatan

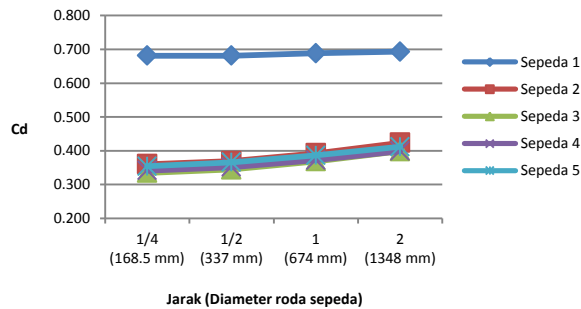
Perubahan jarak antar sepeda menyebabkan perubahan koefisien tahanan yang terjadi pada masing-masing sepeda. Pada Tabel 4 dapat dilihat koefisien tahanan yang terjadi pada setiap sepeda dengan variasi jarak 1/4, 1/2, 1, dan 2 diameter roda sepeda dimana diameter roda sepeda adalah 674 mm. Terjadi hubungan bahwa semakin besar jarak antar sepeda, semakin meningkat pula koefisien tahanannya. Maka ini merupakan suatu strategi bagi pengendara sepeda balap agar selalu berusaha berdekatan dengan sepeda di depannya untuk meminimalkan daya yang dikeluarkan pengendara.

Gaya tahanan (*drag force*) untuk tiap kecepatan pada tiap jarak antar sepeda dimana densitas udara ρ adalah 1.225 kg/m^3 dan luas frontal sepeda 0.231 m^2 juga ditunjukkan pada Tabel 4.

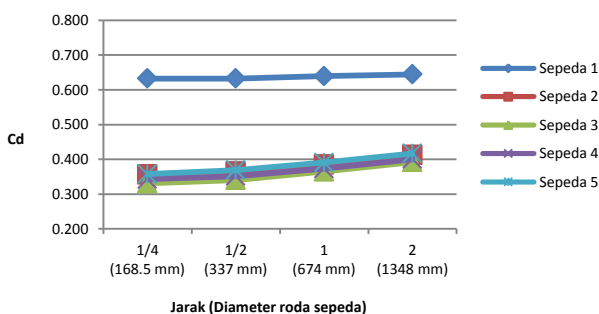
Tabel 4. Data koefisien tahanan dan gaya tahanan hasil simulasi

Jarak antar Sepeda	V (km/jam)	Sepeda 1		Sepeda 2		Sepeda 3		Sepeda 4		Sepeda 5	
		Fd (N)	Cd	Fd (N)	Cd	Fd (N)	Cd	Fd (N)	Cd	Fd (N)	Cd
1/4 Diameter roda (168,5 mm)	30	6.659	0.681	3.520	0.360	3.269	0.334	3.337	0.341	3.462	0.354
	40	11.329	0.652	6.218	0.358	5.777	0.332	5.946	0.342	6.190	0.356
	50	17.186	0.632	9.692	0.357	8.995	0.331	9.323	0.343	9.716	0.357
1/2 Diameter roda (337 mm)	30	6.662	0.682	3.610	0.369	3.370	0.345	3.439	0.352	3.577	0.366
	40	11.334	0.652	6.366	0.366	5.948	0.342	6.118	0.352	6.397	0.368
	50	17.192	0.633	9.911	0.365	9.253	0.340	9.564	0.352	10.034	0.369
1 Diameter roda (674 mm)	30	6.729	0.688	3.836	0.392	3.603	0.369	3.636	0.372	3.775	0.386
	40	11.453	0.659	6.738	0.387	6.370	0.366	6.482	0.373	6.766	0.389
	50	17.378	0.639	10.464	0.385	9.927	0.365	10.153	0.374	10.628	0.391
2 Diameter roda (1348 mm)	30	6.777	0.693	4.143	0.424	3.896	0.399	3.902	0.399	4.026	0.412
	40	11.546	0.664	7.243	0.417	6.852	0.394	6.950	0.400	7.217	0.415
	50	17.522	0.645	11.221	0.413	10.666	0.392	10.879	0.400	11.338	0.417

*kuning = koefisien tahanan terendah
 *hijau = koefisien tahanan terbesar



Gambar 19. Grafik hubungan koefisien tahanan dengan jarak antar sepeda pada kecepatan 40 km/jam.



Gambar 20. Grafik hubungan koefisien tahanan dengan jarak antar sepeda pada kecepatan 50 km/jam.

Pada Tabel di atas dapat disimpulkan bahwa semakin besar kecepatan udara (V), maka semakin kecil koefisien tahanan (Cd) yang terjadi, tetapi semakin besar gaya hambat udaranya (Fd). Dapat disimpulkan bahwa semakin besar jarak antar sepeda, maka semakin besar pula koefisien tahanan yang terjadi. Jadi, koefisien tahanan terkecil tetap terjadi pada sepeda ketiga (di tengah) pada jarak antar sepeda $\frac{1}{4}$ diameter roda pada kecepatan 50 km/jam yaitu sebesar 0.331. Sedangkan, koefisien tahanan terbesar terjadi pada sepeda pertama (di depan) pada jarak antar sepeda 2 diameter roda pada kecepatan 30 km/jam yaitu sebesar 0.693.

4. Menghitung Daya yang Dikeluarkan oleh Pengendara Sepeda

Tujuan para pengendara sepeda melakukan formasi beriringan adalah untuk mengurangi energi yang dikeluarkan oleh pengendara sepeda. Pengurangan energi ini dihubungkan dengan adanya

gaya tahanan udara (Fd), gaya rolling resistance (Frl), dan gaya slope resistance (Fsl).

Setelah melakukan simulasi untuk mencari koefisien tahanan (Cd) dan gaya tahanan udara (Fd), lalu dilakukan perhitungan untuk mencari daya yang dikeluarkan oleh tiap pengendara sepeda. Nilai-nilai yang dibutuhkan adalah sebagai berikut :

- Masa sepeda : 9 kg
- Masa pengendara sepeda : 75 kg
- Koefisien rolling resistance, C_r : 0.003
- Gaya rolling resistance, F_{rl} : 2.471 N

Sebagai contoh perhitungan, diambil salah satu dari beberapa variasi simulasi yang telah dilakukan. Variasi yang diambil adalah pada pengendara sepeda pertama dengan jarak antar sepeda $\frac{1}{4}$ diameter roda dengan kecepatan 30 km/jam (8.33 m/s). Langkah perhitungannya adalah sebagai berikut:

a. Gaya hambat udara (Fd)

Gaya hambat udara (Fd) diambil dari hasil simulasi yang telah dilakukan. Hasil simulasi dapat dilihat pada Tabel 4 dimana gaya hambat udara pada sampel adalah 6.659 N.

b. Gaya rolling resistance (Frl)

$$F_{rl} = m \times g \times C_r$$

$$F_{rl} = 84 \times 9.807 \times 0.003$$

$$F_{rl} = 2.471 \text{ N}$$

Maka, gaya rolling resistance (Frl) adalah 2.471 N.

c. Gaya slope resistance (Fsl)

Pada simulasi ini kemiringan jalan adalah nol karena jalan dianggap datar. Oleh karena itu gaya slope resistance adalah nol.

Setelah mendapatkan nilai-nilai diatas, maka kita sudah dapat menghitung daya total yang dikeluarkan pengendara sepeda. Daya totalnya dapat dihitung dengan persamaan :

$$\text{Daya total} = F_{rl} + F_d + F_{sl} V$$

$$\text{Daya total} = 2.471 + 6.659 + 0 \quad 8.33$$

$$\text{Daya total} = 76.053 \text{ watt}$$

Jadi, daya total yang dikeluarkan oleh pengendara sepeda pertama dengan jarak antar sepeda $\frac{1}{4}$ diameter roda dengan kecepatan 30 km/jam (8.33 m/s) adalah 76.053 watt. Sedangkan untuk melihat daya seluruh pengendara sepeda pada semua variasi, dapat dilihat pada Tabel 5 berikut:

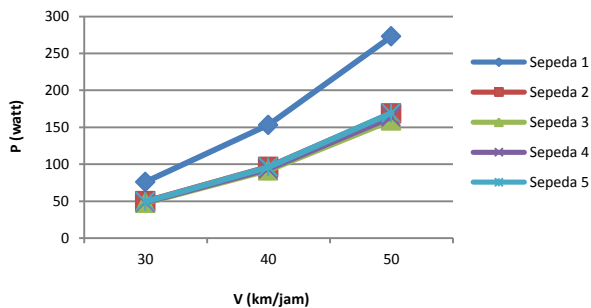
Tabel 5. Daya yang dikeluarkan oleh tiap pengendara sepeda

Jarak antar Sepeda	V (km/jam)	Sepeda 1	Sepeda 2	Sepeda 3	Sepeda 4	Sepeda 5
1/4 Diameter roda (168,5 mm)	30	76.053	49.905	47.814	48.381	49.422
	40	153.318	96.535	91.635	93.513	96.224
	50	273.036	168.944	159.263	163.819	169.277
1/2 Diameter roda (337 mm)	30	76.078	50.655	48.656	49.230	50.380
	40	153.374	98.179	93.535	95.424	98.523
	50	273.119	171.986	162.846	167.166	173.694
1 Diameter roda	30	76.636	52.537	50.596	50.871	52.029

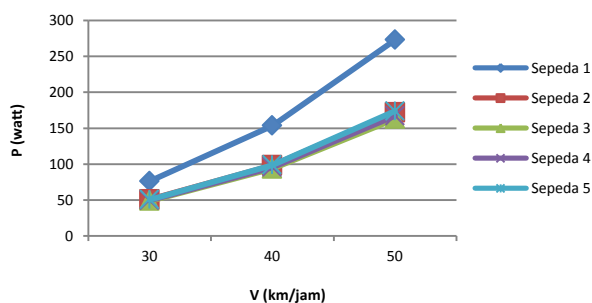
(674 mm)	40	154.696	102.312	98.224	99.468	102.623
	50	275.703	179.667	172.208	175.347	181.945
2 Diameter roda (1348 mm)	30	77.036	55.095	53.037	53.087	54.120
	40	155.729	107.923	103.579	104.667	107.634
	50	277.703	190.182	182.473	185.432	191.807

* kuning = daya pengendara terendah

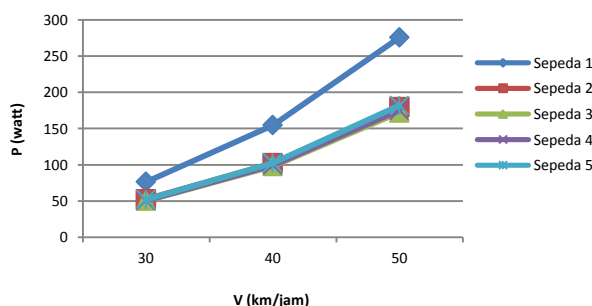
* hijau = daya pengendara terbesar



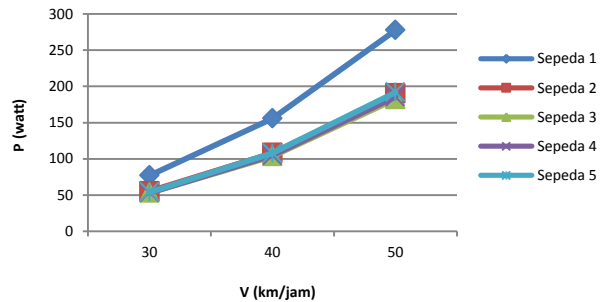
Gambar 21. Grafik hubungan daya pengendara sepeda dengan kecepatan udara pada jarak antar sepeda $\frac{1}{4}$ diameter roda sepeda (168,5 mm).



Gambar 22. Grafik hubungan daya pengendara sepeda dengan kecepatan udara pada jarak antar sepeda $\frac{1}{2}$ diameter roda sepeda (337 mm).



Gambar 23. Grafik hubungan daya pengendara sepeda dengan kecepatan udara pada jarak antar sepeda 1 diameter roda sepeda (674 mm).



Gambar 24. Grafik hubungan daya pengendara sepeda dengan kecepatan udara pada jarak antar sepeda 2 diameter roda sepeda (1348 mm).

Daya yang dikeluarkan oleh pengendara sepeda dipengaruhi oleh besar gaya hambatan udara (F_d), gesekan antara ban sepeda dengan jalan, dan kemiringan jalan yang dilalui sepeda. Dari Tabel 5 dapat disimpulkan bahwa semakin besar jarak antar sepeda, makin besar pula gaya hambat udaranya dan semakin besar pula daya yang dikeluarkan oleh pengendara sepeda. Daya keluaran yang paling kecil adalah 47.814 watt terjadi pada pengendara ketiga (di tengah) pada jarak antar sepeda $\frac{1}{4}$ diameter roda (168,5 mm) pada kecepatan 30 km/jam (8.33 m/s). Sedangkan, Daya keluaran yang paling besar adalah 277.703 watt terjadi pada pengendara pertama (di depan) pada jarak antar sepeda 2 diameter roda (1348 mm) pada kecepatan 50 km/jam (13.89 m/s).

Di sini dapat disimpulkan bahwa sangat besar pengaruh gaya tahanan terhadap daya yang dikeluarkan pengendara sepeda. Untuk itu agar dapat meminimalkan daya yang dikeluarkan pengendara sepeda, disarankan untuk memakai pakaian khusus dengan berbahan halus untuk meminimalkan gesekan udara terhadap pengendara sepeda dan juga menggunakan sepeda dengan geometri yang streamline. Posisi sepeda juga sangat mempengaruhi koefisien tahanan yang dihasilkan seperti posisi *time trial* sangat dianjurkan saat sedang balapan sepeda.

KESIMPULAN

Dari simulasi yang telah dilakukan terhadap sepeda dengan formasi beriringan yang diposisikan garis lurus terhadap aliran udara, dapat diambil beberapa kesimpulan bahwa :

1. Koefisien tahanan terbesar adalah 0.693 terjadi pada sepeda pertama (di depan) pada jarak 2

diameter roda pada kecepatan 30 km/jam, sedangkan koefisien tahanan terkecil adalah 0.331 terjadi pada sepeda ketiga (di tengah) pada jarak antar sepeda $\frac{1}{4}$ diameter roda pada kecepatan 50 km/jam.

2. Koefisien tahanan paling kecil selalu terjadi pada posisi sepeda ketiga (di tengah).
3. Dilihat dari koefisien tahanan pada tiap sepeda, koefisien tahanan terkecil terjadi pada jarak antar sepeda $\frac{1}{4}$ diameter roda (168,5 mm). Ini mengindikasikan bahwa semakin kecil jarak antar sepeda, semakin kecil pula koefisien tahanan yang dialami pada tiap sepeda.
4. Daya keluaran terbesar yang dikeluarkan oleh pengendara sepeda adalah sebesar 277.703 watt terjadi pada pengendara pertama (di depan) pada jarak antar sepeda 2 diameter roda pada kecepatan 50 km/jam (13.89 m/s), sedangkan daya keluaran terkecil yang dikeluarkan oleh pengendara sepeda adalah sebesar 47.814 watt terjadi pada pengendara ketiga (di tengah) pada jarak antar sepeda $\frac{1}{4}$ diameter roda pada kecepatan 30 km/jam (8.33 m/s).

REFERENSI

1. Fox, Robert W dan Alan T. McDonald. 1985. *Introduction to Fluid Mechanics, fourth edition, SI Version*. USA: John Wiley & Sons, Inc.
2. Cengel, Yunus A. dan John M. Cimbala. 2006. *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*. NewYork: McGraw-Hill.
3. Munson, Bruce R. 2009. *Fundamentals of Fluid Mechanics, sixth edition*. USA: John Wiley & Sons, Inc.
4. "Team Time Trial", http://en.wikipedia.org/wiki/Team_time_trial.
5. Wilson, David Gordon. 2004. *Bicycle Science, third edition*. Massachusetts: The MIT Press.
6. "Cycling Power Calculations", <http://www.blog.ultracycle.net/2010/05/cycling-power-calculations>.
7. Chowdhury, Harun, dkk. 2011. *A Full Scale Bicycle Aerodynamics Testing Methodology*. School of Aerospace, Mechanical and Manufacturing Engineering, RMIT University, Melbourne, Australia.