

SIMULASI AERODINAMIK KENDERAAN DENGAN MENGGUNAKAN FLUENT

Sheikh Ahmad Zaki Sheikh Salim

Jabatan Kejuruteraan Mekanikal, Program Pengajian Diploma, Universiti Teknologi Malaysia, Jalan Semarak, 54100 Kuala Lumpur. Tel : 03-26154297
sheikh@utmkl.utm.my

Prof. Dr. Mat Nawi Wan Hassan

Jabatan Termo Bendalir, Fakulti Kejuruteraan Mekanikal, Universiti Teknologi Malaysia, 81310 UTM Skudai, Johor Darul Ta'zim.

Abstrak

Aliran bendalir berkomputer di sekitar model dua dimensi (2D) dan tiga dimensi (3D) untuk bentuk kereta asas iaitu Proton Iswara Aeroback telah dijalankan dengan menggunakan pakej FLUENT. Model turbulen RNG k- ϵ telah digunakan untuk kes lantai statik dan lantai bergerak. Hasil keputusan secara berkomputer bagi tujuan pengesahan telah dibandingkan dengan pengukuran terowong angin yang sedia ada dan nilai-nilai seretan, tekanan dan halaju telah dianalisis secara berangka. Keputusan bagi nilai C_p , C_f , C_D dan C_L yang diperolehi telah dibandingkan secara eksperimen dan berangka dengan keputusan yang didapati daripada penyelidik yang lain.

Katakunci: FLUENT, Turbulen, RNG k- ϵ , Pekali Seretan, CFD

Abstract

Computations of fluid flow around a two dimensional (2D) and three dimensional (3D) basic car shape, the Proton Iswara Aeroback, have been conducted using Fluent. The RNG k- ϵ model is used for both stationary and moving floors. Results of different computations are compared to the available wind tunnel measurement and numerical predictions of drag, pressure and velocity. Results of C_p , C_f , C_D and C_L are comparable with experimental and numerical results of other research. ers.

Keywords: FLUENT, Turbulent, RNG k- ϵ , Drag Coefficient, CFD

Pengenalan

Secara amnya seretan aerodinamik kenderaan wujud disebabkan oleh aliran udara. Hal ini terjadi disebabkan oleh pergerakan kereta yang merintang arah aliran udara. Aliran udara tersebut menghasilkan daya tekanan dan daya kelikatan. Jumlah kesemua daya-daya tersebut telah menghasilkan daya seretan ke atas kereta. Faktor utama yang menyumbang kepada berlakunya kesan seretan adalah disebabkan oleh bentuk kereta tersebut. Namun demikian, terdapat juga faktor-faktor lain yang turut menyebabkan seretan seperti aliran yang memasuki bahagian radiator kereta, kesan tayar dan sebagainya.

Kesan seretan yang wujud telah menyebabkan peningkatan penggunaan bahan api atau tenaga. Ini berlaku disebabkan oleh kuasa yang diperlukan untuk mengatasi kesan rintangan udara. Secara umumnya, semakin besar kesan seretan maka semakin banyak tenaga diperlukan untuk mengatasi kesan tersebut. Bentuk luaran kenderaan merupakan penyumbang utama kepada kesan seretan. Hal ini menyebabkan berlakunya perubahan bentuk estatik ke atas industri automobil. Hasil kajian yang begitu gigih, telah menghasilkan bentuk kereta yang lebih aerodinamik. Kajian yang dijalankan ini bertujuan menentukan pekali seretan, C_D bagi sebuah kereta Proton Iswara Aeroback.

Dalam menyelesaikan masalah aerodinamik kereta ini terdapat dua kaedah yang sering digunakan iaitu secara eksperimen dan secara kaedah berangka. Kaedah eksperimen kebiasaannya menggunakan terowong angin adalah kaedah yang sering kali dilakukan untuk mendapatkan hasil secara ujikaji. Kaedah ini memerlukan sebuah model. Pembinaan model memakan masa yang agak lama dan kos untuk menjalankan ujikaji ini juga begitu tinggi. Hal yang demikian menyebabkan wujudnya alternatif baru iaitu menyelesaikan masalah tersebut secara dinamik bendalir berkomputer.

Hnas-Joachim Emmelmann, Helmut Berneburg, dan Josef Schulze [1] telah menjalankan kajian aerodinamik terhadap kereta model Opel Calibra. Kaedah yang digunakan adalah secara eksperimen iaitu menggunakan terowong angin. Takahide Nouzawa, Shigeru Haruna, Kazuhiko Hiasa dan Takaki Nakamura [2] telah menjalankan kajian secara eksperimen dan kaedah berangka ke atas kereta Mazda dari model *Notchback*. Takuya Kataoka, Horishi China, Kunio Nakagawa, Kazuo Yanagimoto, dan Masahiro Yoshida [3] telah menjalankan kajian dengan menggunakan CFD untuk membandingkan dengan hasil eksperimen bagi kereta model Mitsubishi. Perisian yang digunakan adalah NAGARE. Penyelesaian secara kaedah berangka iaitu menggunakan skema persamaan *Upwind* tertib ketiga dengan sistem koordinat *curvilinear* telah dijalankan oleh Kenji Ono dan Ryutara Himeno [4]. Kajian dilakukan ke atas model kereta Nissan.

Kajian aerodinamik ke atas bentuk kereta dalam bentuk tiga dimensi telah dilakukan oleh Dale K. Ota, Sekaripuram V. Ramakrishnan, Kuo-Yen Szema, dan Sukumar R. Chakravarthy [5]. Kajian secara simulasi itu dijalankan dengan menggunakan perisian *UNIS flow solver*. Model turbulen yang digunakan adalah *Baldwin-Lomax*. Lanjutan daripada itu, Kiyohira Aoki, Ming Zhu, Toshikazu Ohbayashi dan Hideaki Miyata [6] telah menjalankan kajian ke atas kereta model Isuzu. Kaedah yang digunakan adalah secara eksperimen dan juga berangka. Penyelesaian secara berangka yang berasaskan persamaan Navier-Stokes dikenali sebagai kaedah WISDAM-V. Hasil yang diperolehi dibandingkan dengan kaedah eksperimen iaitu menggunakan terowong angin dan *water basin*. Model turbulen yang digunakan adalah model SGS (*Sub-Grid-Scale*). Kajian yang dijalankan oleh J. Williams dan W.J. Quinlan [7] iaitu berkaitan dengan penentuan nilai pekali seretan, C_D bagi sebuah kereta model Ford. Perisian STAR-CD telah digunakan dalam meramalkan nilai C_D . Nilai tersebut dibandingkan dengan data ujikaji. Kajian dengan menggunakan pakej *STAR-CD* telah dijalankan oleh Kenji Okumura dan Toshihiko Kuriyama [8]. Mereka telah menggunakan skema persamaan *Upwind* tertib ketiga dalam menyelesaikan kajian tersebut. Kajian dilakukan ke atas model kereta Daihatsu.

Mats Ramnefors, Rikard Bensryd, Elna Holmberg, dan Sven Perzon [9] telah menjalankan kajian aerodinamik terhadap sebuah model kereta Volvo ECC. Kajian tersebut adalah dalam bentuk dua dimensi. Kaedah yang digunakan dalam menyelesaikan kajian tersebut adalah dengan menggunakan pakej iaitu perisian CFDS-FLOW3D. Bentuk taburan tekanan, C_p yang diperolehi dibandingkan dengan hasil ujikaji iaitu menggunakan terowong angin seperti ditunjukkan di dalam Rajah 1.

Berdasarkan kepada graf taburan tekanan yang diperolehi secara ujikaji ini, maka pengesahan kaedah menggunakan FLUENT telah dibuat dengan membandingkan graf yang diperolehi.

Metodologi

Dalam kajian ini, kaedah yang digunakan adalah kaedah dinamik bendalir berkomputer atau lebih dikenali dengan nama CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Namun begitu, pelaksanaan kaedah ini adalah dengan menggunakan pakej *FLUENT*. Tujuan menggunakan pakej sedia ada adalah untuk menjimatkan kos dan masa.

Dalam usaha memastikan bahawa keputusan yang diperolehi itu tepat, maka kerja-kerja pengesahan model 2D dan 3D dilakukan untuk memastikan ia sesuai digunakan dalam kajian ini.

Menurut John D. Anderson, JR [10] persamaan-persamaan asas yang digunakan di dalam kaedah CFD ini adalah seperti berikut:

Persamaan keterusan,

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

Persamaan Navier- Stokes dalam arah x,

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \nabla \cdot V + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \rho f_x \end{aligned} \tag{2a}$$

Persamaan Navier- Stokes dalam arah y,

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \nabla \cdot V + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + \rho f_y \end{aligned} \tag{2b}$$

Persamaan Navier -Stokes dalam arah z,

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \nabla \cdot V + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + \rho f_z \end{aligned} \tag{2c}$$

Menurut H.K. Versteeg dan W. Malalasekera [11] persamaan umum bagi model turbulen k-ε adalah seperti berikut:

$$\text{div}(\rho k U) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{grad } k \right] + 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - \rho \epsilon \tag{3}$$

$$\text{div}(\rho \epsilon U) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \text{grad } \epsilon \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - C_{2\epsilon\rho} \frac{\epsilon^2}{k} \tag{4}$$

Persamaan ini mengandungi lima pemalar yang boleh diubahsuai iaitu C_μ , σ_k , σ_ϵ , $C_{1\epsilon}$ dan $C_{2\epsilon}$. Bagi model turbulen RNG k-ε, nilai pemalar yang telah dianalisis adalah seperti berikut:

$$C_\mu = 0.085, \sigma_k = 0.72, \sigma_\epsilon = 0.72, C_{1\epsilon} = 1.42, C_{2\epsilon} = 1.68 \tag{5}$$

Model Kajian

Kajian sebenar aerodinamik kenderaan dilakukan ke atas kereta Proton Iswara Aeroback model 1.3s. Spesifikasi bagi kereta Proton Iswara Aeroback ini adalah seperti yang ditunjukkan di dalam Rajah 2 dan Jadual 1. Berdasarkan spesifikasi ini, geometri bagi model tersebut dapat dilukis dengan menggunakan perisian gambit.

Kajian yang dilakukan ke atas model ini melibatkan penentuan nilai pekali seretan, C_D bagi model 2D. Kerja-kerja pembinaan terowong angin berkomputer perlu dilakukan terlebih dahulu bagi model 2D. Saiz terowong angin yang digunakan bagi model 2D adalah seperti yang ditunjukkan di dalam Rajah 3.

Saiz kereta yang diuji adalah seperti berikut :

- (i) Panjang kereta, $L = 4.11$ m
- (ii) Tinggi kereta dari lantai, $H = 1.36$ m
- (iii) Lebar kereta (simetri), $W = 0.83$ m

Model dua dimensi yang telah siap digrid dan dibina domain adalah seperti yang ditunjukkan di dalam Rajah 4.

Data-data umum yang digunakan bagi analisis model 2D ditunjukkan di dalam Jadual 2.

Kerja-kerja pembinaan geometri bagi model 3D dilakukan terlebih dahulu seperti mana yang dijalankan ke atas model 2D sebelum ini. Penyalutan grid segitiga dilakukan ke atas permukaan model 3D seperti yang ditunjukkan di dalam Rajah 5. Kemudian, model tersebut dibina di dalam sebuah terowong angin yang telah disaluti dengan grid segitiga seperti yang ditunjukkan di dalam Rajah 6.

Data-data umum yang digunakan bagi analisis model 3D ditunjukkan di dalam Jadual 3.

Kajian yang dilakukan ke atas model 2D dan 3D adalah berkaitan dengan penghalusan grid, halaju kereta, dan keadaan sempadan yang digunakan. Keadaan sempadan yang dimaksudkan di sini adalah untuk kes di mana lantai dalam keadaan statik dan lantai yang bergerak. Seterusnya, kajian dilakukan ke atas bentuk taburan aliran yang diperolehi.

Kerja-kerja penghalusan grid dilakukan bertujuan untuk mengetahui kesan yang berlaku ke atas nilai C_D apabila jumlah grid yang berlainan digunakan. Hal yang demikian begitu penting untuk memastikan hasil yang diperolehi boleh diterima. Ia dilakukan ke atas keadaan sempadan lantai statik dan lantai yang bergerak dengan menggunakan halaju 180 km/j bagi kedua-dua keadaan. Keadaan sempadan bagi lantai yang statik adalah merujuk kepada kajian yang dijalankan secara eksperimen dengan menggunakan terowong angin. Keadaan sempadan bagi lantai yang bergerak adalah merujuk kepada keadaan yang sebenar bagi kes kajian. Ia merupakan fenomena yang berlaku di atas jalan raya apabila kereta bergerak. Lantai dianggap seolah-olah bergerak dengan halaju yang sama dengan kereta. Kajian parametrik yang dilakukan terhadap halaju iaitu dari julat 60 km/j sehingga 240 km/j.

Keputusan

Pengesahan kaedah dilakukan dengan membandingkan bentuk taburan tekanan iaitu nilai pekali tekanan, C_p yang diperolehi daripada perisian *FLUENT*. Taburan tekanan yang berlaku ke atas model 2D dan 3D boleh dilihat di bahagian depan, belakang, atas, dan bawah kereta. Secara umumnya bentuk taburan tekanan ini adalah sama dengan hasil secara eksperimen kecuali nilainya sahaja yang berlainan berdasarkan model yang diuji. Taburan tekanan pada keseluruhan bahagian kereta bagi model 2D dan 3D ditunjukkan di dalam lampiran A dan B.

Graf penghalusan grid bagi keadaan sempadan lantai statik untuk model 2D adalah seperti yang ditunjukkan di dalam Rajah 7.

Graf penghalusan grid bagi keadaan sempadan lantai bergerak pula ditunjukkan di dalam Rajah 8.

Data bagi kajian parametrik ke atas halaju untuk kes lantai statik bagi model 2D adalah seperti yang ditunjukkan di dalam Jadual 4.

Hasil yang diperolehi daripada analisis tersebut telah diplotkan seperti ditunjukkan di dalam Rajah 9.

Data bagi kajian ke atas lantai bergerak bagi model 2D adalah seperti yang ditunjukkan di dalam Jadual 5.

Graf C_p , C_F , C_D , dan C_L melawan halaju (km/j) bagi kes lantai bergerak telah diplotkan seperti yang ditunjukkan di dalam Rajah 10.

Kajian ke atas kuasa yang diperlukan untuk mengatasi kesan seretan telah dilakukan bagi kes lantai statik dan lantai bergerak untuk model 2D. Graf yang diperolehi bagi kedua-dua kes tersebut adalah seperti yang ditunjukkan di dalam Rajah 11 dan Rajah 12.

Hasil kajian ke atas bentuk taburan tekanan yang dilakukan ke atas model 2D adalah seperti yang ditunjukkan di dalam Rajah 13. Graf keseluruhan taburan tekanan pula ditunjukkan pada Lampiran C dan D.

Seterusnya hasil kajian ke atas bentuk taburan halaju bagi model 2D adalah seperti yang ditunjukkan di dalam Rajah 14.

Berdasarkan hasil yang diperolehi, graf C_p , C_F , C_D , dan C_L melawan halaju diplotkan seperti yang ditunjukkan di dalam Rajah 15.

Seterusnya, hasil yang diperolehi bagi kes lantai bergerak pula ditunjukkan di dalam Jadual 7.

Berdasarkan kepada data-data yang diperolehi, graf bagi nilai C_p , C_F , C_D , dan C_L melawan halaju kereta diplotkan seperti yang ditunjukkan di dalam Rajah 16.

Seterusnya, analisis ke atas kuasa yang diperlukan untuk mengatasi kesan rintangan udara dilakukan untuk kes lantai statik dan lantai bergerak. Graf bagi kedua-dua analisis tersebut adalah seperti yang ditunjukkan di dalam Rajah 17 dan Rajah 18.

Kajian ke atas taburan tekanan turut dilakukan ke atas model 3D. Hasil yang diperolehi adalah seperti yang ditunjukkan di dalam Rajah 19. Graf taburan tekanan bagi keseluruhan bahagian kereta ditunjukkan di dalam lampiran E dan F.

Seterusnya, hasil kajian ke atas taburan halaju adalah seperti yang ditunjukkan di dalam Rajah 20.

Kesimpulan

Analisis aliran bendalir secara berkomputer dengan menggunakan pakej *FLUENT* telah dapat menyelesaikan masalah aerodinamik kenderaan. Kerja-kerja pengesahan kaedah telah dilakukan dengan cara membandingkan keputusan yang diperolehi daripada ujikaji iaitu menggunakan terowong angin dengan hasil yang diperolehi dengan penggunaan pakej *FLUENT*. Hasil yang diperolehi menunjukkan bahawa bentuk taburan tekanan adalah hampir sama dengan eksperimen. Perbandingan dilakukan untuk model 2D.

Kerja-kerja penghalusan grid yang telah dijalankan menunjukkan bahawa ia amat penting di dalam menghasilkan jejaring yang berkualiti dan sesuai digunakan. Bagi model 2D didapati bahawa penggunaan grid segitiga pada keseluruhan permukaan kecuali pada bahagian bawah kereta sahaja menggunakan grid segiempat adalah amat sesuai. Penggunaan grid tersebut dapat menghasilkan graf iterasi yang lebih cepat menumpu. Sementara itu, jumlah bilangan grid yang digunakan di dalam kajian ini adalah sekitar 23000. Perbezaan keputusan yang diperolehi jika dibandingkan dengan bilangan grid yang lain adalah sekitar 5% sahaja. Nilai ini boleh diterima di dalam kajian ini.

Kajian yang dijalankan terhadap model 2D ini melibatkan keadaan sempadan lantai statik dan lantai bergerak. Bagi model 2D, didapati bahawa nilai C_D untuk kedua-dua kes tidak banyak berubah iaitu ralat sekitar 0.5%. Namun begitu, bagi nilai C_L terdapat ralat sekitar 20%. Ini menunjukkan bahawa analisis terhadap C_D untuk kedua-dua kes boleh dijalankan tetapi analisis untuk C_L didapati tidak sesuai untuk kes lantai statik.

Kajian parametrik yang dijalankan pada halaju 60 km/j hingga 240 km/j menunjukkan bahawa nilai C_D yang diperolehi adalah hampir malar terhadap halaju. Hanya terdapat perbezaan sekitar 8%. Ini menunjukkan bahawa hasil yang diperolehi bertepatan dengan teori C_D yang menjelaskan bahawa C_D hanya berubah terhadap luas geometri.

Berdasarkan analisis yang dilakukan, didapati bahawa nilai C_D dan C_L bagi model 2D untuk kes lantai statik masing-masing ialah 0.3794 dan -0.4797. Bagi kes lantai bergerak pula nilai C_D dan C_L masing-masing ialah 0.3776 dan -0.6183. Ini menunjukkan bahawa nilai C_D untuk model 2D tidak banyak berubah. Namun begitu, didapati nilai C_L terdapat perbezaan sekitar 14%.

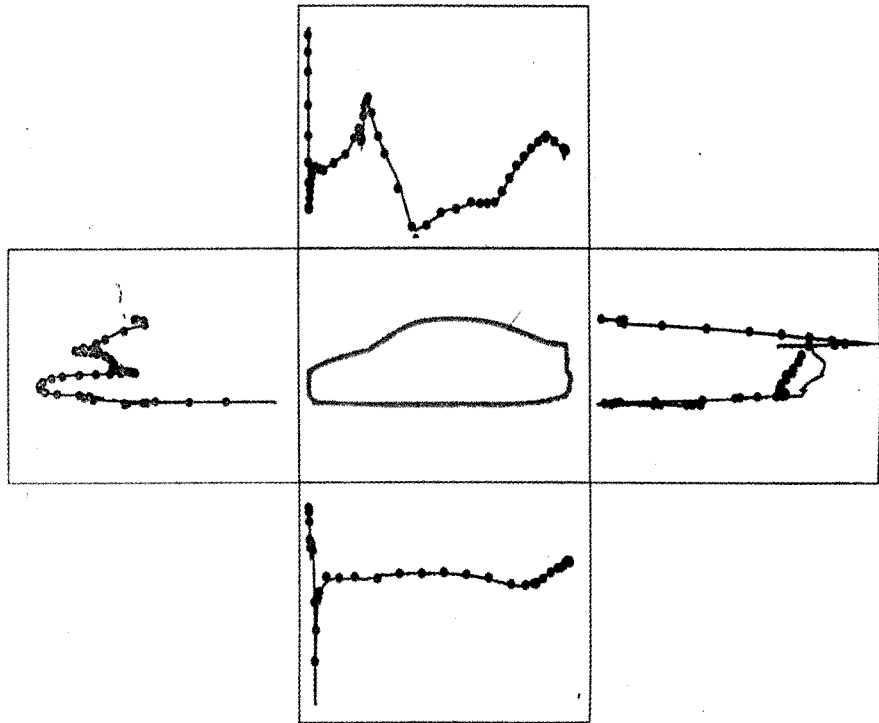
Seterusnya, analisis kuasa yang dijalankan menunjukkan bahawa kuasa yang diperlukan untuk mengatasi kesan rintangan udara didapati bermula pada halaju 60 km/j. Pada halaju tersebut kuasa yang diperlukan adalah sekitar 2%. Berdasarkan keputusan yang diperolehi jelas menunjukkan bahawa kuasa yang diperlukan untuk mengatasi rintangan udara semakin meningkat pada halaju yang semakin tinggi. Pada halaju 180 km/j didapati kuasa yang diperlukan adalah sekitar 56%. Kuasa yang diperlukan ini adalah berkaitan dengan penggunaan bahan api. Sekiranya semakin banyak kuasa diperlukan, maka semakin tinggi penggunaan bahan api.

Secara keseluruhannya, kajian yang dijalankan ini telah dibandingkan dengan hasil yang diperolehi oleh penyelidik yang lain. Melalui perbandingan tersebut didapati bahawa hasil yang diperolehi dalam kajian ini boleh diterima.

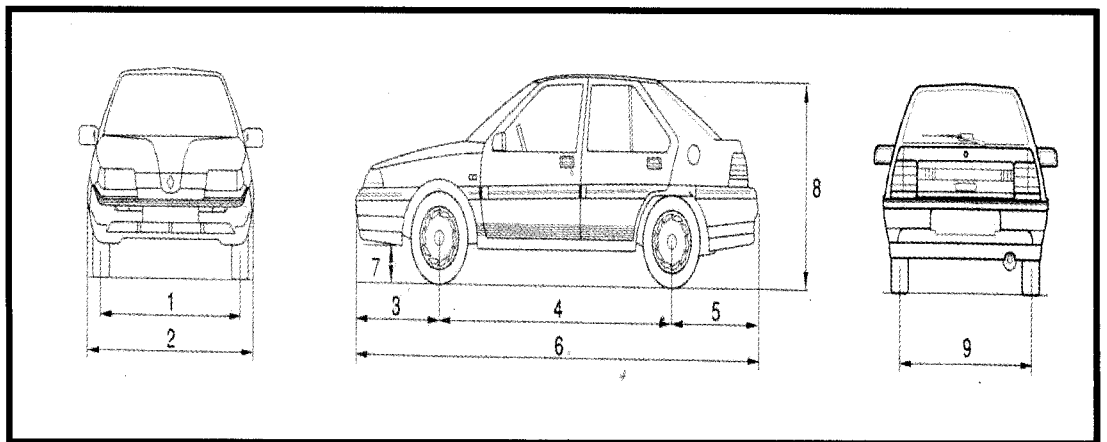
Rujukan

- [1] Hans-Joachim Emmelmann, Helmut Berneburg and Josef Schulze (Technical Development Centre of GM Europe, Russelsheim, Fed. Republic of Germany) (1990). "The Aerodynamic Development of the Opel Calibra." *Society of Automotive Engineers*. 472 – 485.
- [2] Takahide Nouzawa, Shigeru Haruna, Kazuhiko Hiasa and Takaki Nakamura (Aerodynamics Testing & Research Group, Vehicle Testing & Research Department, Mazda Motor Corporation) and Hiroshi Sato (Institute of Flow Research) (1990). "Analysis of Wake Pattern for Reducing Aerodynamic Drag of Notchback Model." *Society of Automotive Engineers*. 486 – 494.
- [3] Takuya Kataoka, Hiroshi China, Kunio Nakagawa, Kazuo Yanagimoto, and Masahiro Yoshida (Mitsubishi Motors Corp. Japan) (1991). "Numerical Simulation of Road Vehicle Aerodynamics and Effect of Aerodynamic Devices." *Society of Automotive Engineers*. 722 – 734.
- [4] Kenji Ono and Ryutaro Himeno (Nissan Research Center Nissan Motor Co., Ltd.), Katsuro Fujitani (Engineering Systems Center Nissan Motor Co., Ltd.) and Yutaka Uematsu (Body Experiment Department Nissan Motor Co., Ltd.) (1992). "Simultaneous Computation of the External Flow around a Car Body and the Internal Flow Through its Engine Compartment." *Society of Automotive Engineers*. 403 – 411.
- [5] Dale K. Ota, Sekaripuram V. Ramakrishnan, Kuo-Yen Szema, and Sukumar R. Chakravarthy (Rockwell International Science Center) and Domenico F. Vitali (Centro Ricerche/DVC, FIAT) (1993). "Computation of External Automobile Body Shapes." *Society of Automotive Engineers*. 2325 – 2329.
- [6] Kiyohira Aoki (Isuzu Motors Ltd.), Ming Zhu (University of Tokyo), Toshikazu Ohbayashi (Isuzu Motors Ltd.) and Hideaki Miyata (University of Tokyo) (1993). "Finite-Volume Simulation of 3-D Vortical Flow-Fields About Road Vehicles with Various After-Body Configuration." *Society of Automotive Engineers*. 2048 – 2061.
- [7] J. Williams and W. J. Quinian (Ford Motor Co.), J. E. Hackett and S. A. Thompson (Lockheed Aeronautical System Co.), T. Marinaccio and A. Robertson (Adapco) (1994). "A Calibration Study of CFD for Automotive Shapes and CD." *Society of Automotive Engineers*. 308 – 327.

- [8] Kenji Okumura and Toshihiko Kuriyama (Daihatsu Motor Co., Ltd) (1995). "Practical Aerodynamic Simulations (C_D , C_L , C_{YM}) Using a Turbulence Model and 3rd-Order Upwind Scheme." *Society of Automotive Engineers*. 1149 – 1161.
- [9] Mats Ramnefors (Volvo Data Corp.), Rikard Bensryd (Volvo Car Corp.), Elna Holmberg (Volvo Data Corp.) and Sven Perzon (Chalmers University of Technology) (1996). "Accuracy of Drag Predictions on Cars Using CFD – Effect of Grid Refinement and Turbulence Models." *Society of Automotive Engineers*. 865 – 879.
- [10] John D. Anderson, Jr. (1995). "Computational Fluid Dynamics : The Basics With Applications." Singapore : McGraw-Hill International Editions. 3 – 262.
- [11] H. K. Versteeg and W. Malalasekera (1995). "An introduction to computational fluid dynamics : The finite volume method". England : Longman Scientific & Technical. 1- 190.



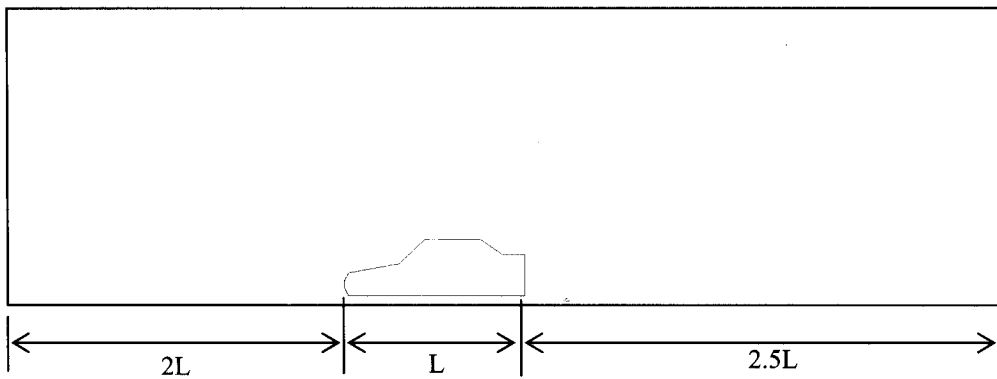
Rajah 1 Taburan tekanan pada kereta model ECC dan model turbulen *lowRe* k- ϵ dengan pengukuran terowong angin



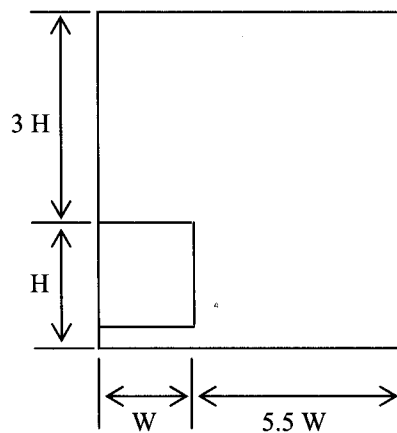
Rajah 2 Spesifikasi bagi model kajian

Jadual 1 Spesifikasi bagi model Proton Iswara Aeroback

No.	Bahagian	Dimensi (mm)
1.	Front Track	1,390
2.	Overall width	1,655
3.	Front overhang	850
4.	Wheelbase	2,380
5.	Rear overhang	880
6.	Overall length	4,110
7.	Minimum ground clearance	150
8.	Overall height	1,360
9.	Rear track	1,340

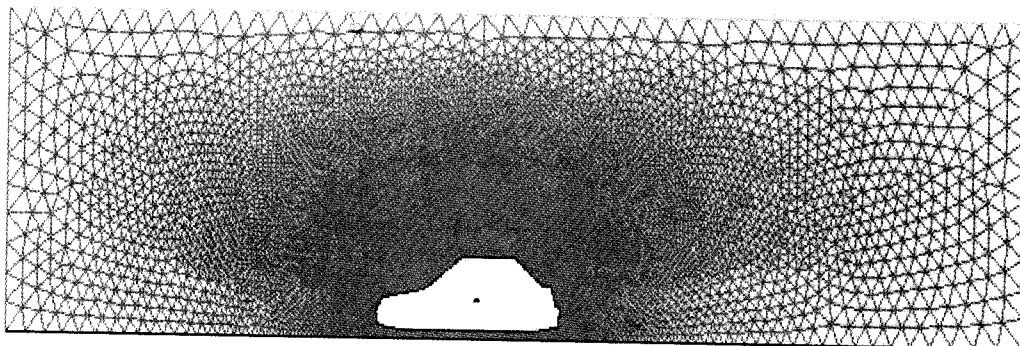


(a) Saiz terowong angin pada pandangan sisi



(b) Saiz terowong angin pada pandangan hadapan

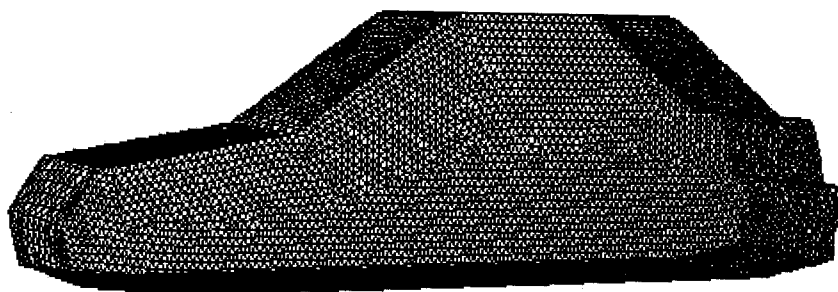
Rajah 3 Hubungan di antara saiz kereta dengan terowong angin



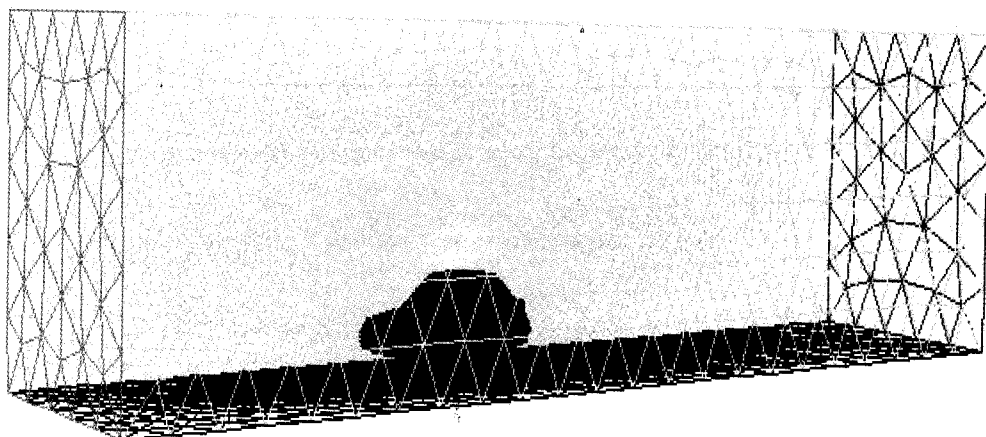
Rajah 4 Model 2D yang digridkan

Jadual 2 Data-data umum bagi model 2D

1.	Jenis grid	Quadrilateral
2.	Ketumpatan udara, ρ	1.225 kg/m ³
3.	Model turbulen	k-epsilon RNG
4.	Skema penyelesaian	Persamaan upwind tertib kedua
5.	Algoritma	SIMPLE



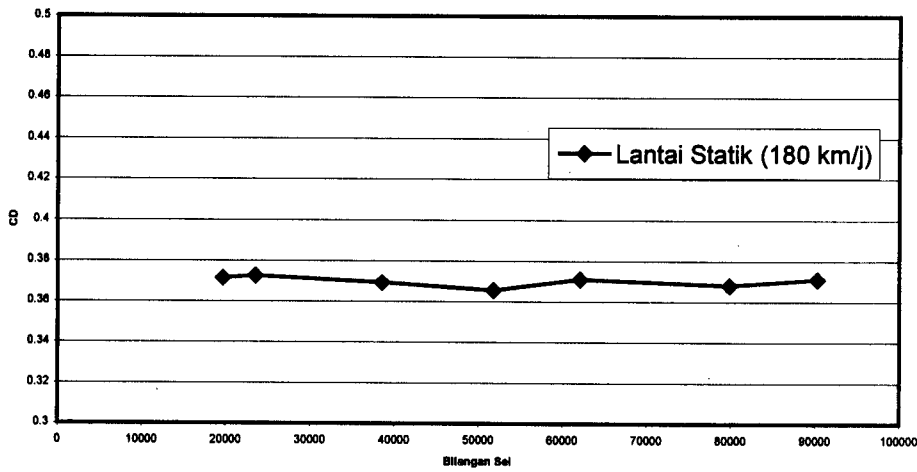
Rajah 5 Penyalutan grid segitiga bagi model 3D



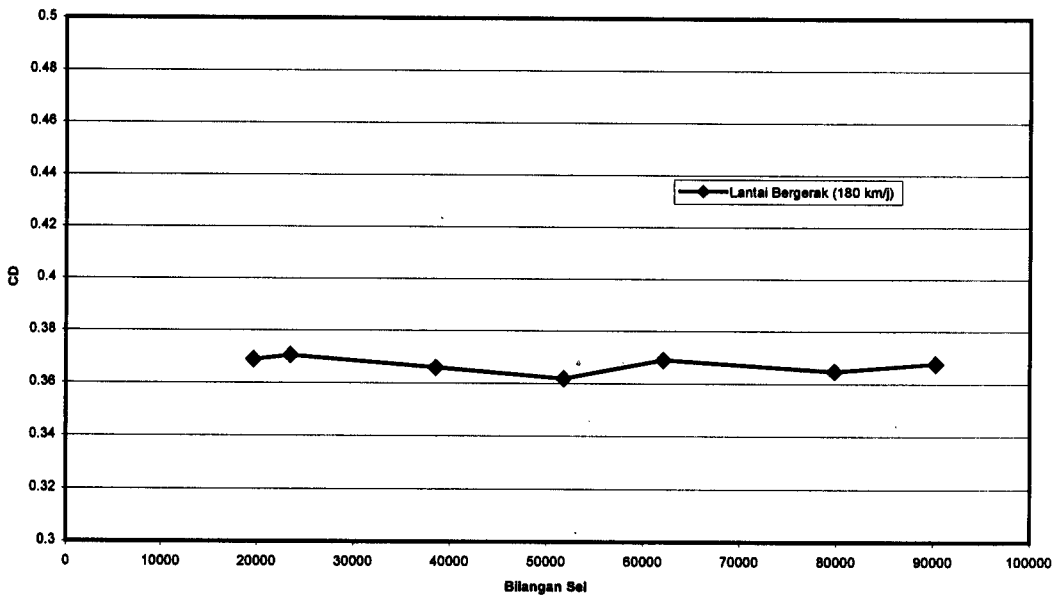
Rajah 6 Model 3D yang dikelilingi oleh terowong angin

Jadual 3 Data-data umum bagi model 3D

1.	Jenis grid	Tetrahedral
2.	Bilangan sel	220392
3.	Ketumpatan udara, ρ	1.225 kg/m ³
4.	Model turbulen	k-epsilon RNG
5.	Skema penyelesaian	Persamaan upwind tertib kedua
6.	Algoritma	SIMPLE



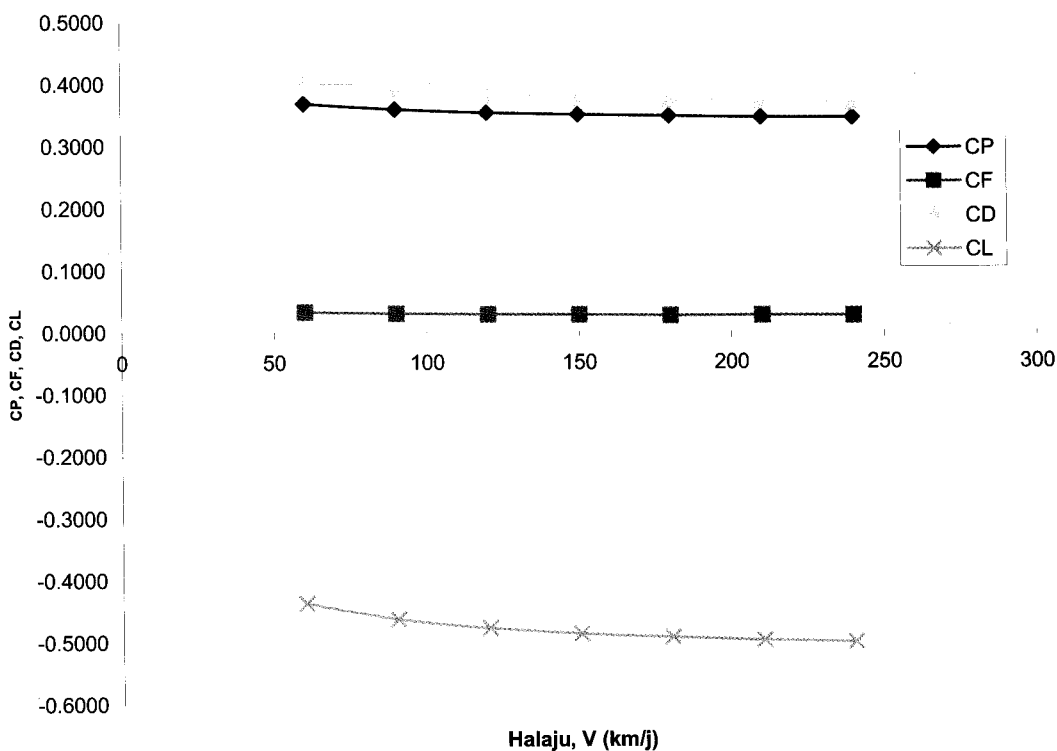
Rajah 7 Graf penghalusan grid bagi keadaan sempadan lantai statik



Rajah 8 Graf penghalusan grid bagi keadaan sempadan lantai bergerak

Jadual 4 Data bagi kes lantai statik (model 2D)

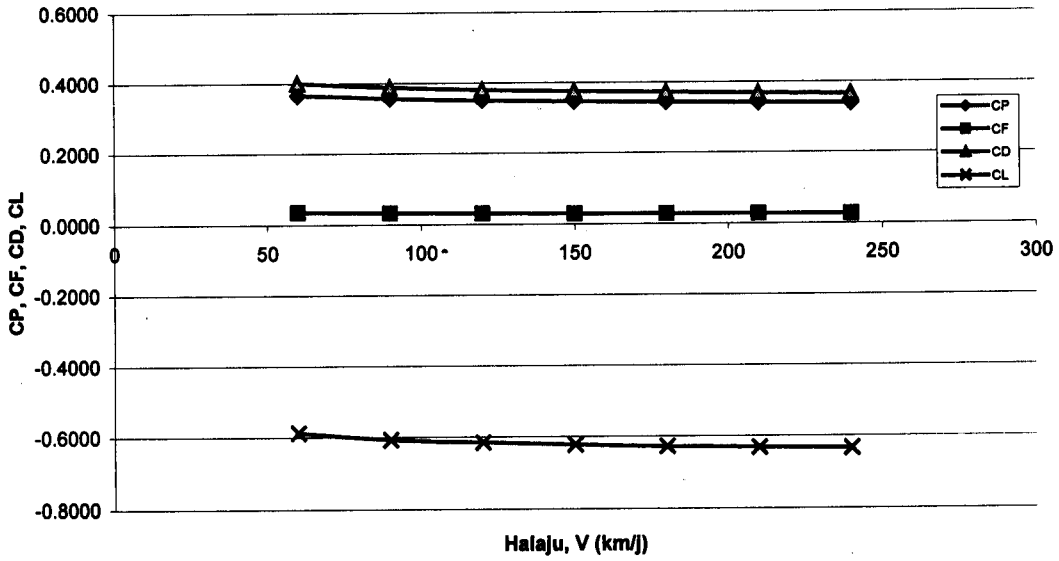
No.	Halaju (km/j)	F _P (N)	F _F (N)	F _D (N)	F _L (N)	C _P	C _F	C _D	C _L
1	60	75.713398	6.690064	82.403461	-305.656280	0.3678	0.0325	0.4003	-0.4371
2	90	165.963540	13.880832	179.844380	-728.134940	0.3583	0.0300	0.3883	-0.4628
3	120	290.554790	23.339165	313.893950	-1335.691500	0.3528	0.0283	0.3812	-0.4775
4	150	449.200470	34.950044	484.150510	-2127.818200	0.3491	0.0272	0.3763	-0.4869
5	180	641.570800	48.649980	690.220780	-3102.649700	0.3463	0.0263	0.3725	-0.4930
6	210	868.319920	64.378959	932.698880	-4270.380400	0.3443	0.0255	0.3698	-0.4985
7	240	1128.867500	82.093480	1210.961000	-5614.596700	0.3427	0.0249	0.3676	-0.5018
8	Purata					0.3516	0.0278	0.3794	-0.4797



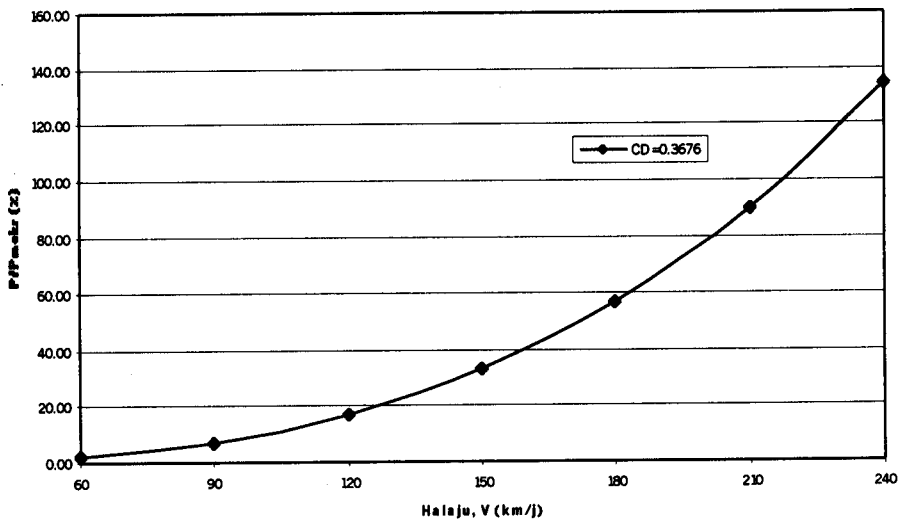
Rajah 9 Graf C_P, C_F, C_D, dan C_L melawan halaju (km/j) bagi kes lantai statik (model 2D)

Jadual 5 Data bagi kes lantai bergerak (model 2D)

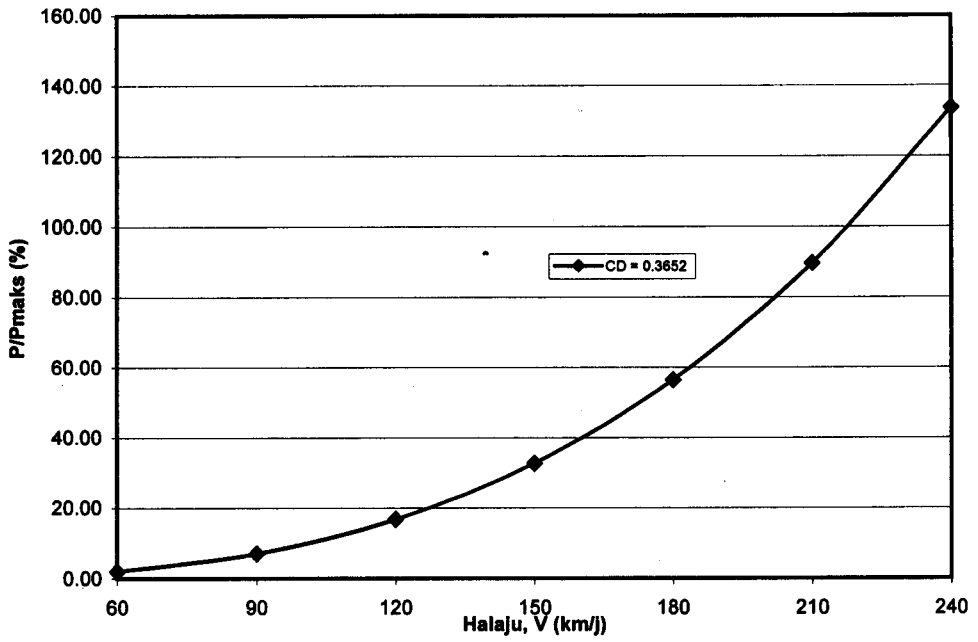
No.	Halaju (km/j)	F _P (N)	F _F (N)	F _D (N)	F _L (N)	C _P	C _F	C _D	C _L
1	60	75.235615	7.075918	82.311532	-411.26995	0.3655	0.0344	0.3998	-0.5881
2	90	164.51419	14.693843	179.20804	-954.88395	0.3552	0.0317	0.3869	-0.6069
3	120	287.63503	24.689884	312.32491	-1722.2954	0.3493	0.0300	0.3793	-0.6157
4	150	444.41558	36.970101	481.38568	-2721.8697	0.3454	0.0287	0.3741	-0.6228
5	180	635.05746	51.456507	686.51397	-3954.1095	0.3428	0.0278	0.3705	-0.6283
6	210	858.80718	68.069092	926.87627	-5411.3982	0.3405	0.0270	0.3675	-0.6317
7	240	1116.292	86.769781	1203.0618	-7095.3758	0.3389	0.0263	0.3652	-0.6342
8	Purata					0.3482	0.0294	0.3776	-0.6183



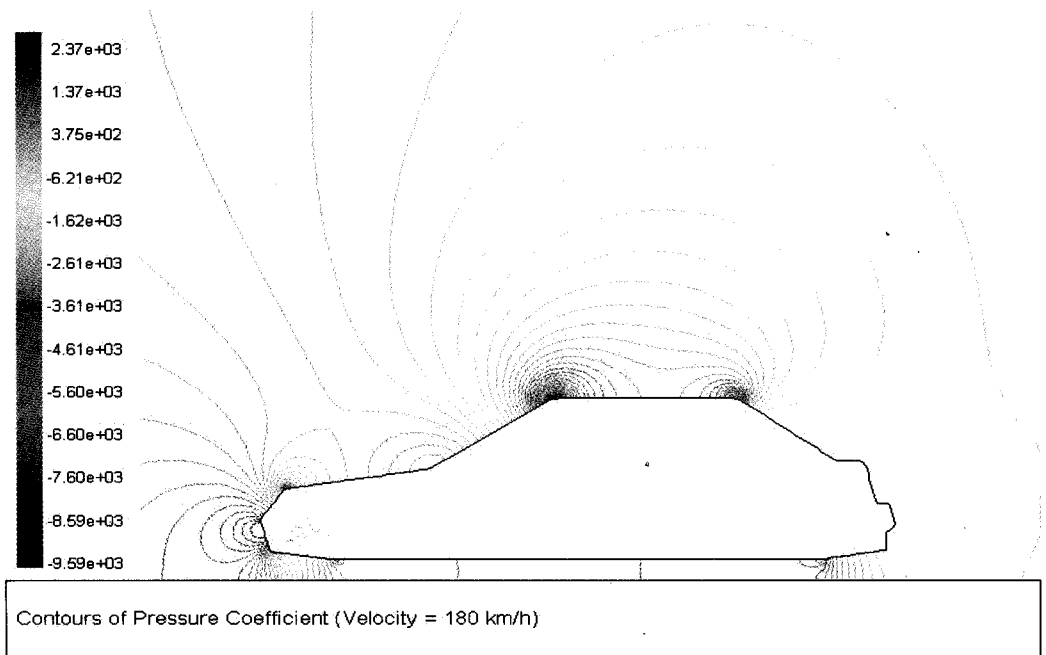
Rajah 10 Graf C_p , C_f , C_D , dan C_L melawan halaju (km/j) bagi kes lantai bergerak (model 2D)



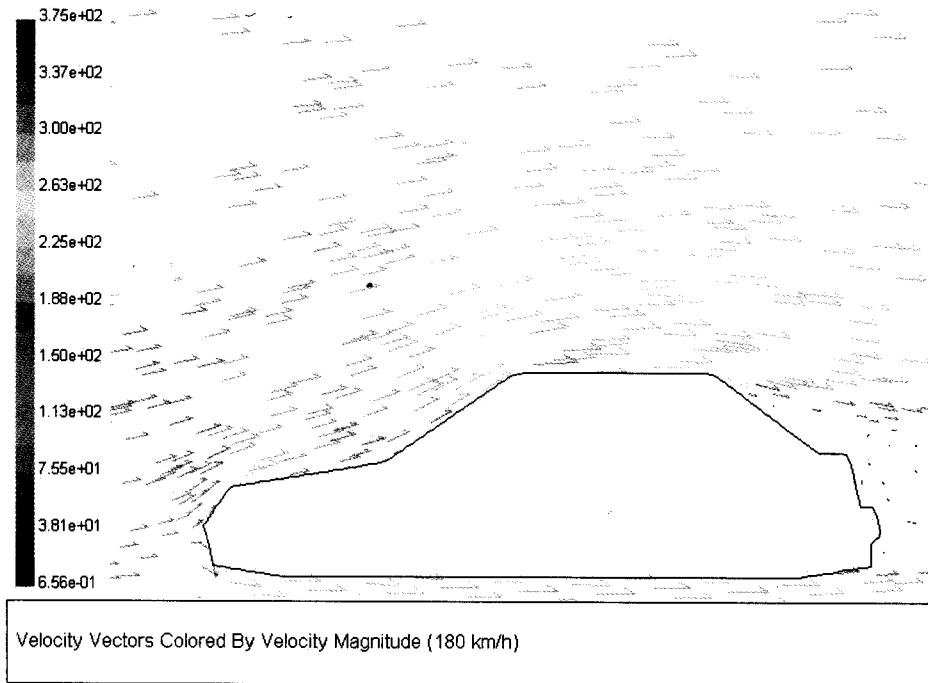
Rajah 11 Graf P/P_{maks} (%) melawan halaju (km/j) bagi kes lantai statik (model 2D)



Rajah 12 : Graf P/P_{maks} (%) melawan halaju (km/j) bagi kes lantai bergerak (model 2D)



Rajah 13 Graf kontur taburan tekanan pada halaju 180 km/j bagi kes lantai statik

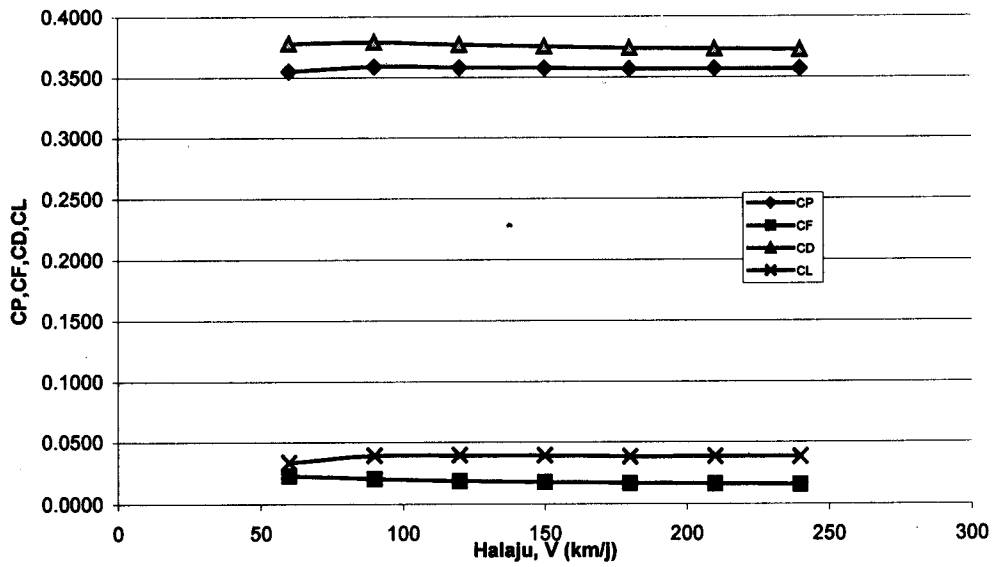


Rajah 14 Graf vektor halaju pada 180 km/j bagi kes lantai statik

Kajian yang dilakukan ke atas model 3D adalah sama seperti yang dilakukan ke atas model 2D. Berikut adalah data bagi kajian ke atas lantai statik.

Jadual 6 Data bagi kes lantai statik (model 3D)

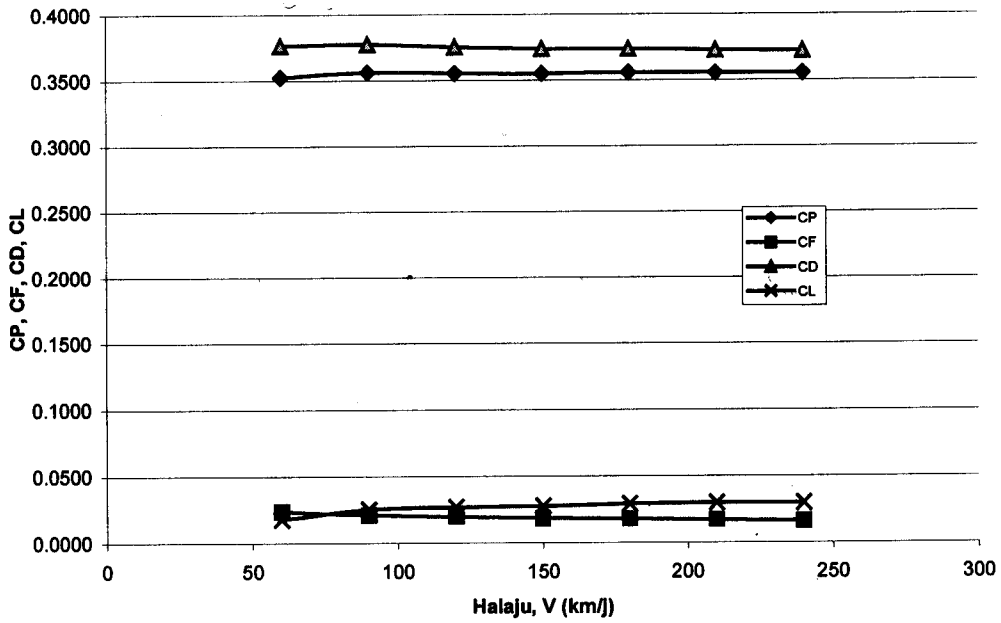
No.	Halaju (km/j)	F _P (N)	F _F (N)	F _D (N)	F _L (N)	C _P	C _F	C _D	C _L
1	60	74.022626	4.7883204	78.810947	22.088025	0.3548	0.0229	0.3777	0.0334
2	90	168.41888	9.5617766	177.98066	58.158051	0.3587	0.0204	0.3791	0.0391
3	120	298.82575	15.653776	314.47952	103.96784	0.3580	0.0188	0.3768	0.0393
4	150	466.44171	23.01441	489.45612	161.98839	0.3577	0.0176	0.3753	0.0392
5	180	670.2993	31.606949	701.90624	227.71136	0.3569	0.0168	0.3738	0.0383
6	210	912.2993	41.360855	953.87295	310.91216	0.3569	0.0162	0.3732	0.0384
7	240	1190.9407	52.358552	1243.2992	405.07773	0.3567	0.0157	0.3724	0.0383
8	Purata					0.3571	0.0183	0.3755	0.0380



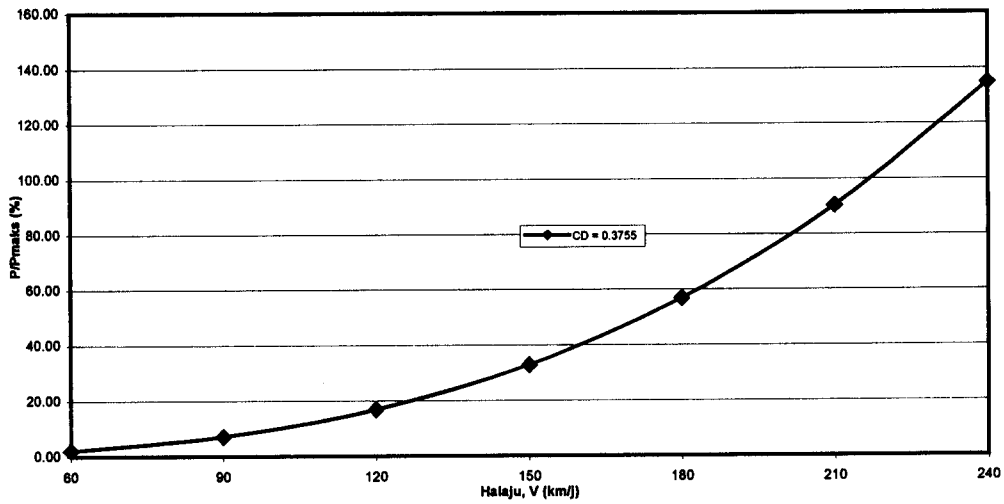
Rajah 15 Graf C_p , C_F , C_D , dan C_L melawan halaju (km/j) bagi kes lantai statik (model 3D)

Jadual 7 Data-data bagi kes lantai bergerak (model 3D)

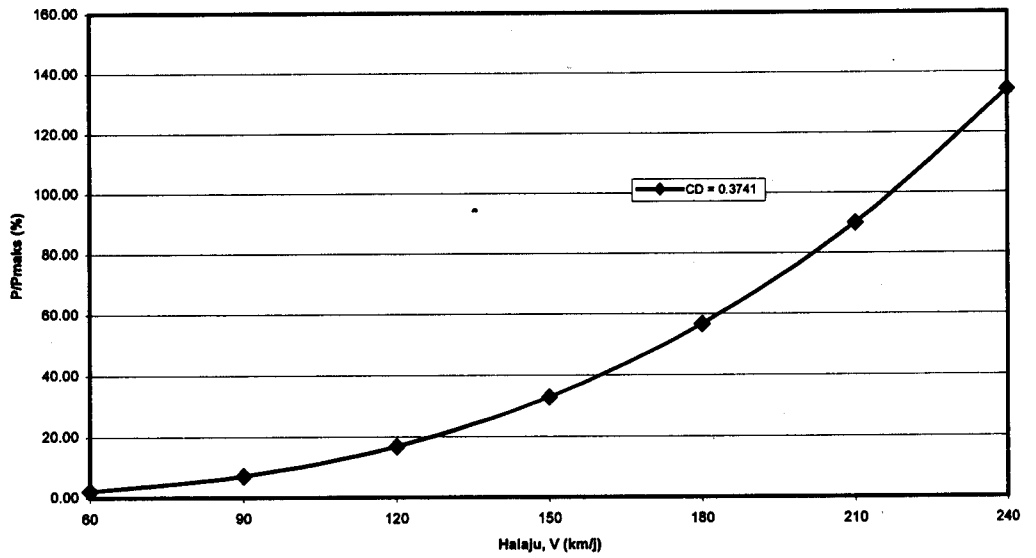
No.	Halaju (km/j)	F_P (N)	F_F (N)	F_D (N)	F_L (N)	C_P	C_F	C_D	C_L
1	60	73.502664	4.9761194	78.478784	11.852175	0.3523	0.0238	0.3761	0.0179
2	90	167.04066	10.002059	177.04271	37.770455	0.3558	0.0213	0.3771	0.0254
3	120	296.43905	16.450555	312.8896	71.279696	0.3552	0.0197	0.3749	0.0270
4	150	462.66386	24.210191	486.87406	114.21331	0.3548	0.0186	0.3733	0.0277
5	180	667.72639	33.239568	700.96596	173.1574	0.3556	0.0177	0.3733	0.0291
6	210	907.84806	43.525594	951.37366	242.66261	0.3552	0.0170	0.3722	0.0300
7	240	1186.2053	55.057941	1241.2633	317.94291	0.3553	0.0165	0.3718	0.0301
8	Purata					0.3549	0.0192	0.3741	0.0267



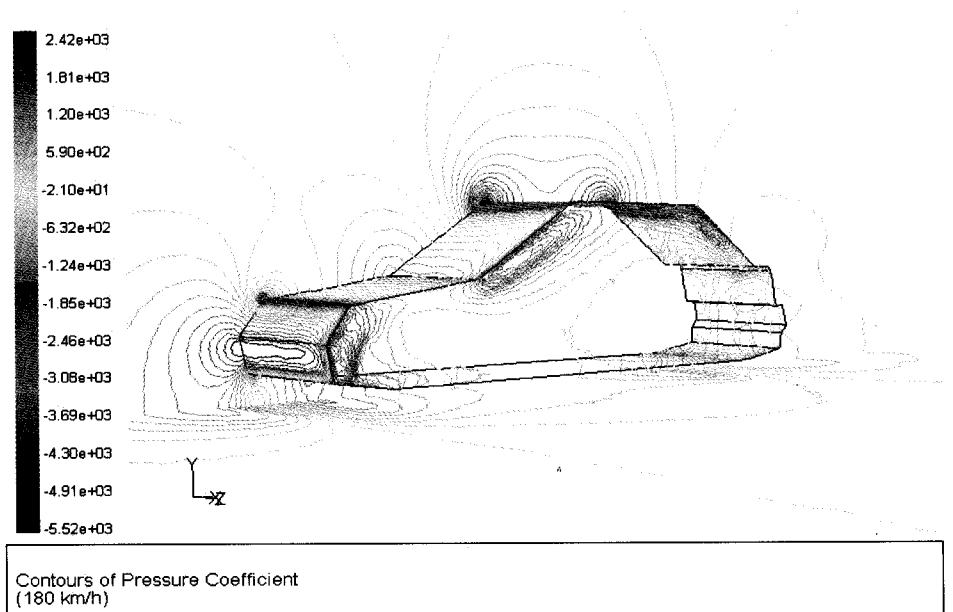
Rajah 16 Graf C_p , C_f , C_D , dan C_L melawan halaju (km/j) bagi kes lantai bergerak (model 3D)



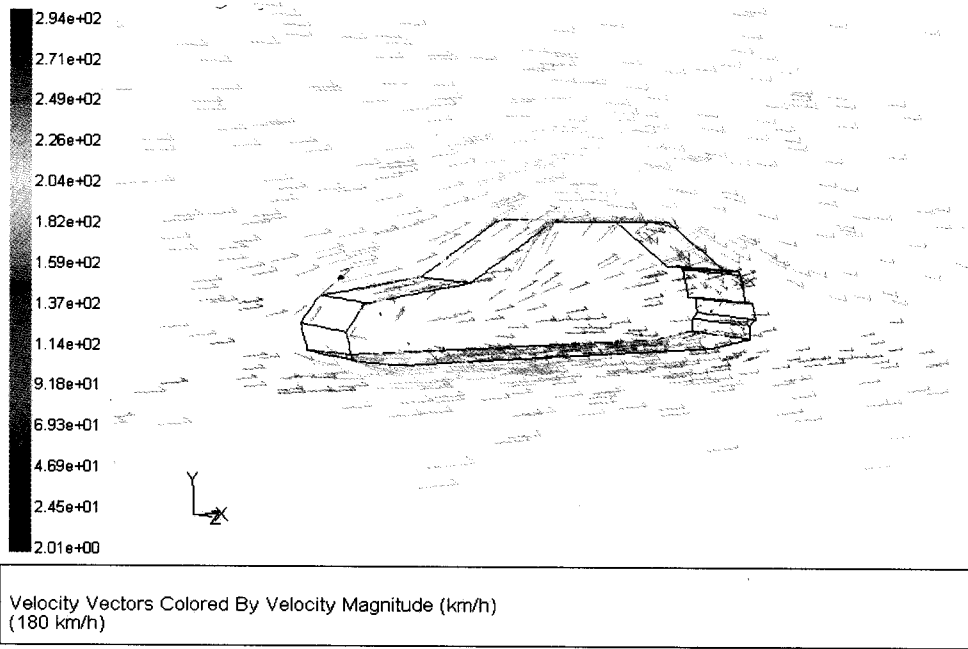
Rajah 17 Graf P/P_{maks} (%) melawan halaju (km/j) bagi kes lantai statik (model 3D)



Rajah 18 Graf P/P_{maks} (%) melawan halaju (km/j) bagi kes lantai bergerak (model 3D)



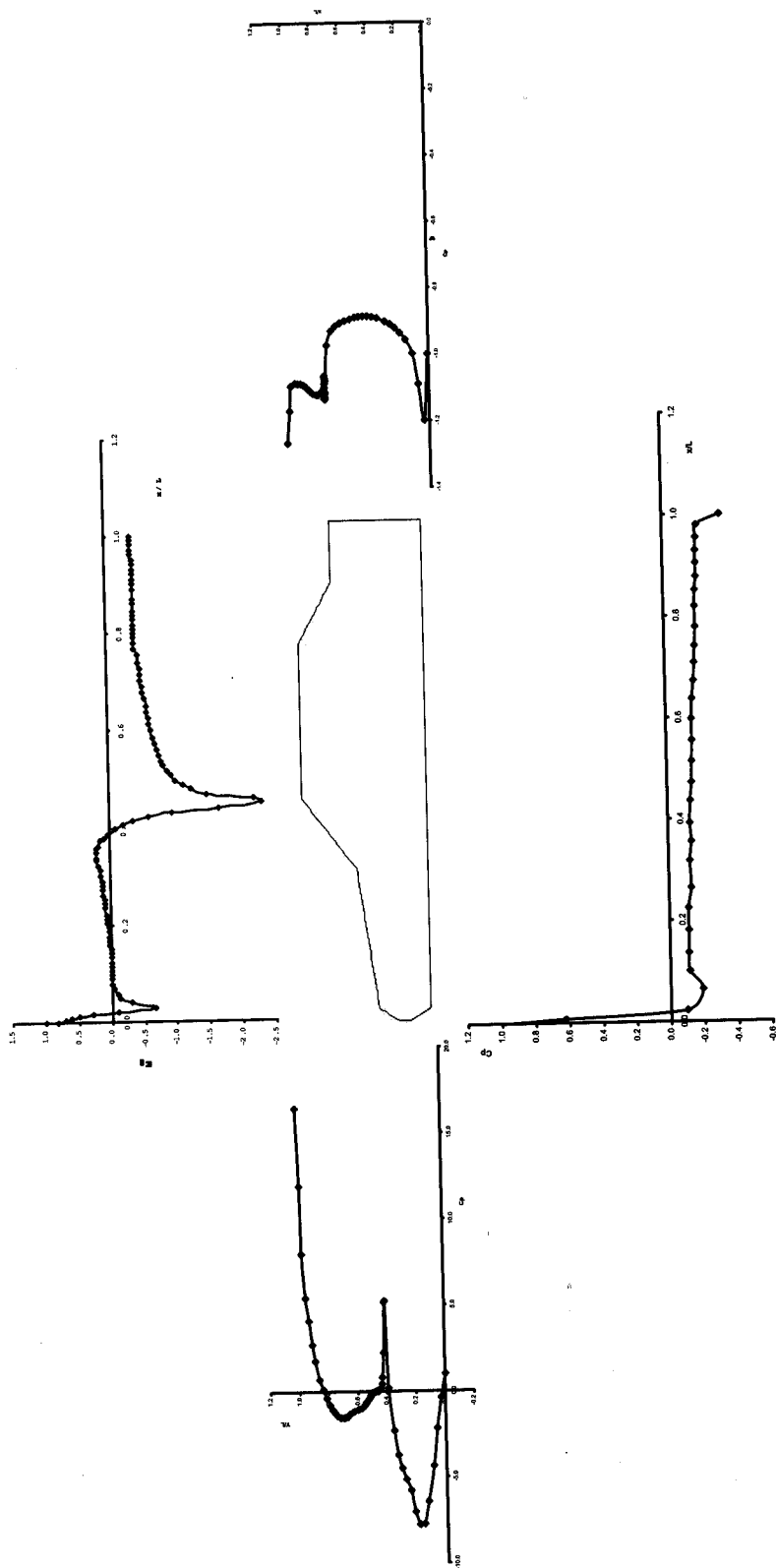
Rajah 19 Graf kontur tekanan pada halaju 180 km/j bagi kes lantai statik (model 3D) Seterusnya, hasil kajian ke atas taburan halaju adalah seperti yang ditunjukkan di dalam Rajah 20.



Rajah 20 Graf vektor halaju pada 180 km/j bagi kes lantai statik (model 3D)

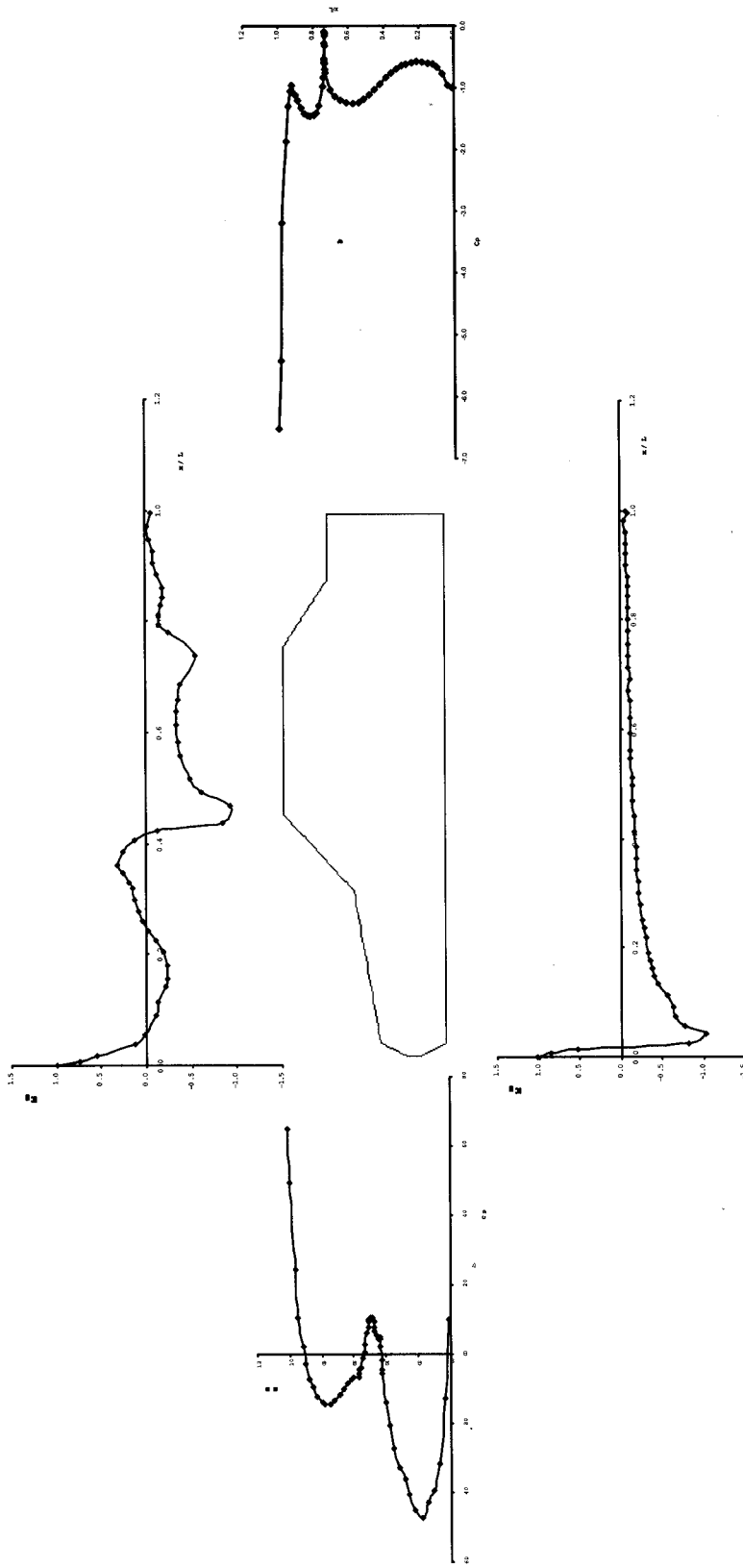
6

LAMPIRAN A



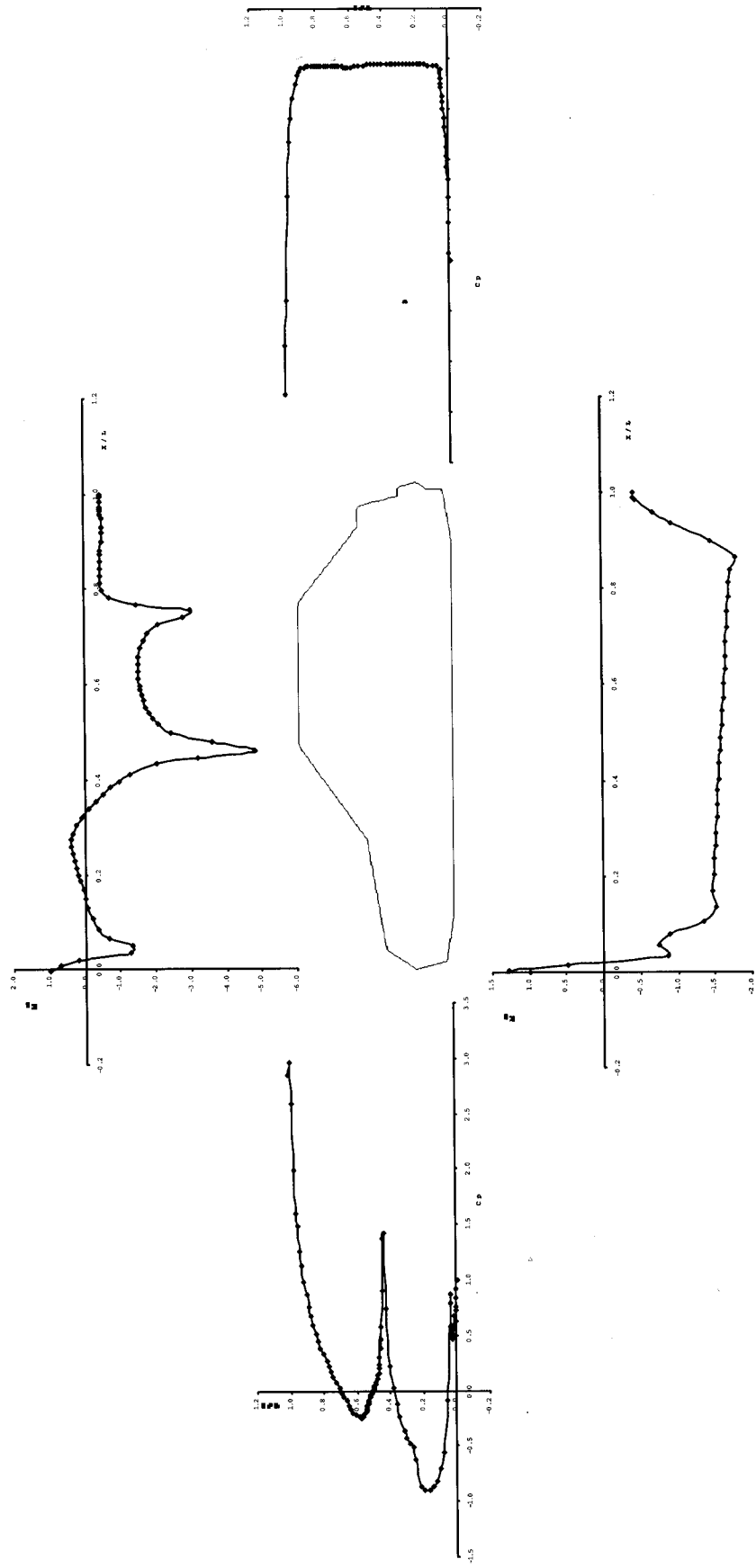
Rajah 21 : Graf taburan tekanan ke atas model 2D bagi pengesahan kaedah

LAMPIRAN B



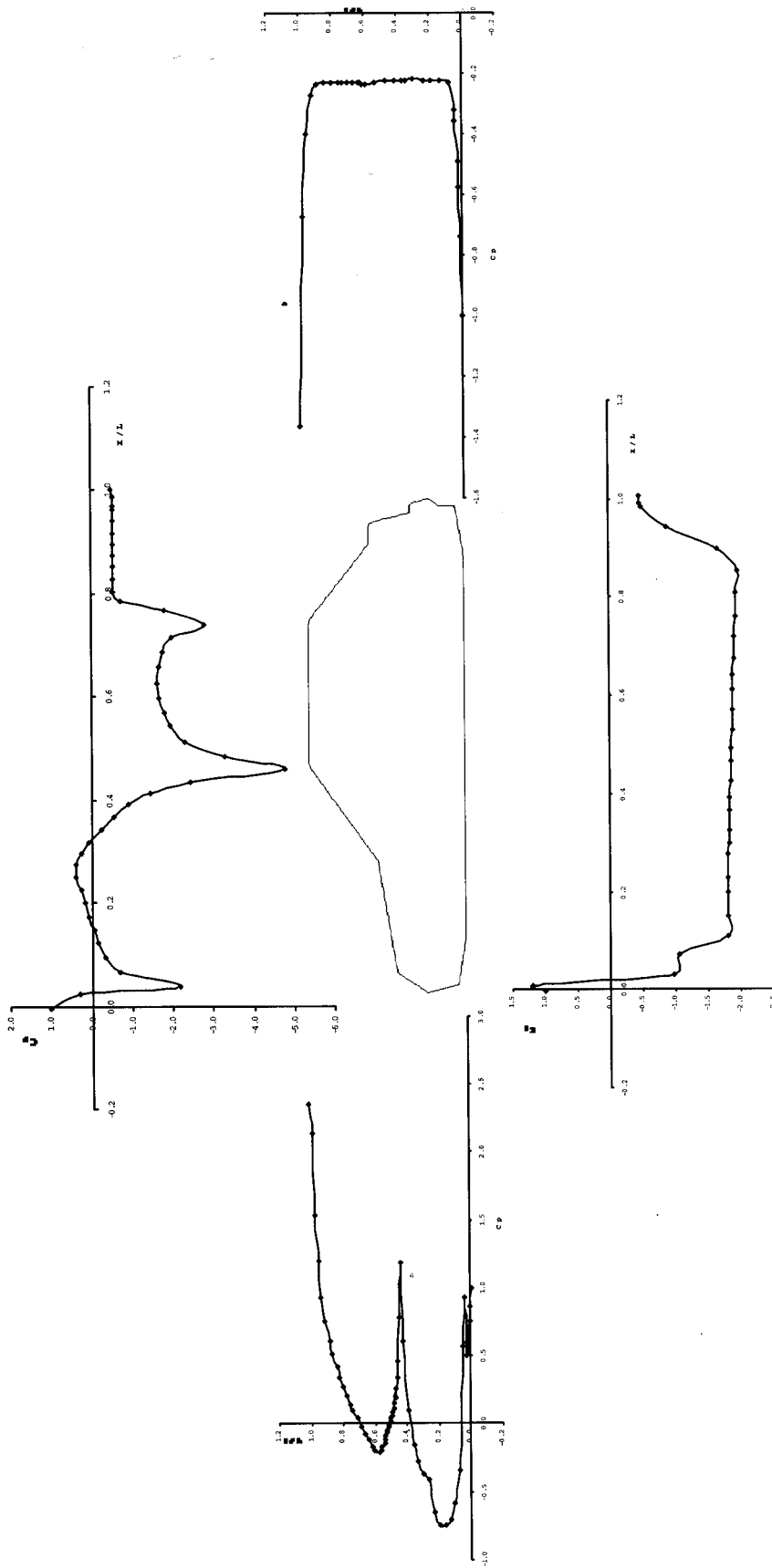
Rajah 22 : Graf taburan tekanan ke atas model 3D bagi pengesahan kaedah

LAMPIRAN C



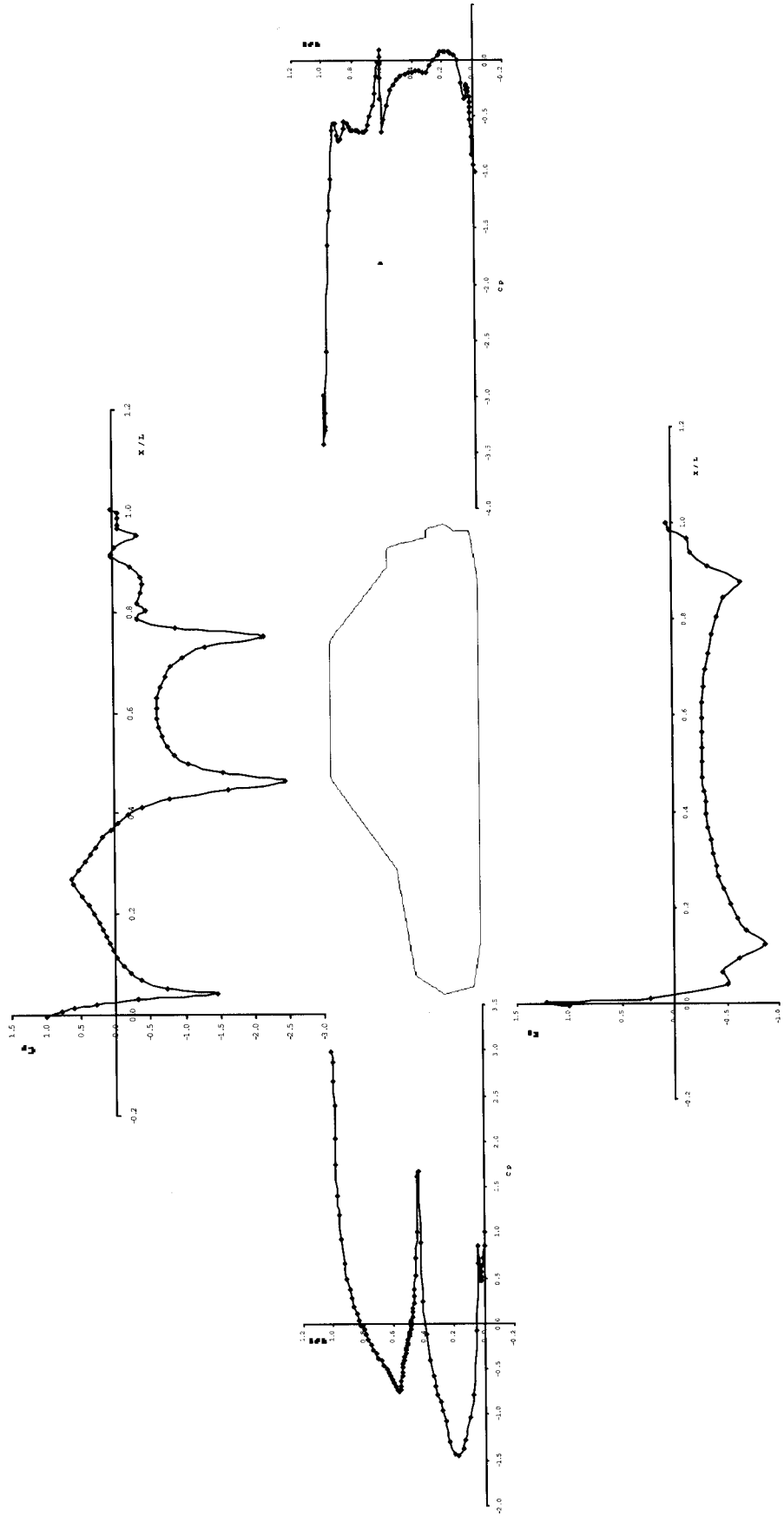
Rajah 23 : Graf Taburan Tekanan Pada Halaju 180 km/j Bagi Model 2D (lantai statik)

LAMPIRAN D



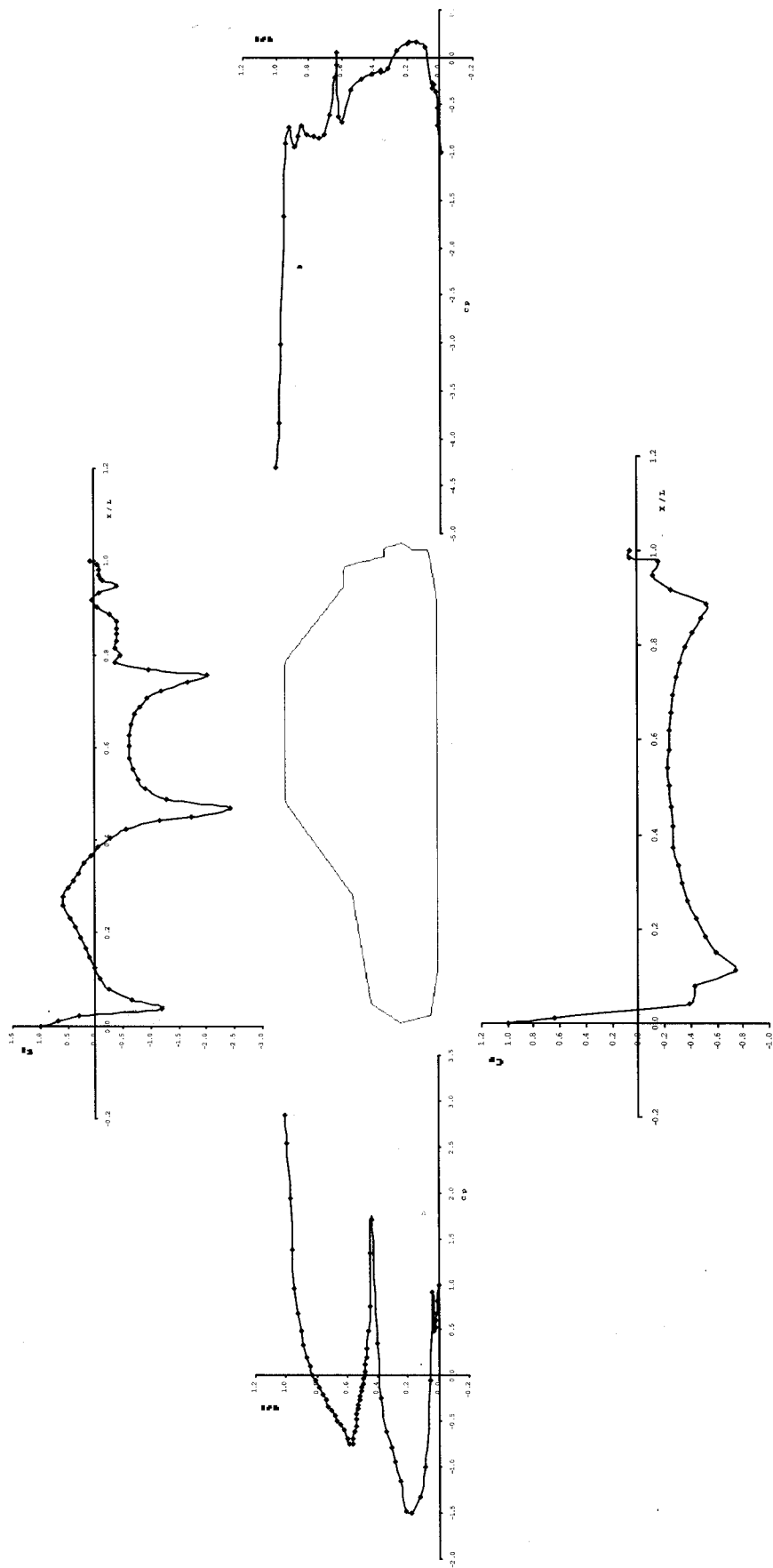
Rajah 24 : Graf Taburan Tekanan Pada Halaju 180 km/j Bagi Model 2D (lantai bergerak)

LAMPIRAN E



Rajah 25 : Graf Taburan Tekanan Pada Halaju 180 km/j Bagi Model 3D (lantai statik)

LAMPIRAN F



Rajah 26 : Graf Taburan Tekanan Pada Halaju 180 km/j Bagi Model 3D (lantai bergerak)