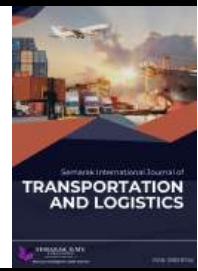




Semarak International Journal of Transportation and Logistics

Journal homepage:
<https://semarakilmu.my/index.php/sijtl/index>
ISSN: 3083-8746



Pengukuran Eksperimen dan Simulasi Tekanan yang Teraruh pada Pembahagi Jalan oleh Kenderaan yang Bergerak

Experimental and Simulation Quantification of Pressure Induced on Road Divider by Moving Vehicles

Kea Cheng Tan¹, Mohd Zulkifly Abdullah¹, Keng Wai Chan^{1,*}, Siti Isma Hani Ismail²

¹ School of Mechanical Engineering, Universiti Sains Malaysia, Engineering Campus, 14300 Nibong Tebal, Penang, Malaysia

² Civil Engineering Studies, College of Engineering, Universiti Teknologi MARA, Cawangan Pulau Pinang, 13500, Bukit Mertajam, Pulau Pinang, Malaysia

ARTICLE INFO

Article history:

Received 30 October 2025

Received in revised form 4 November 2025

Accepted 24 November 2025

Available online 7 December 2025

ABSTRACT

Satu medan tekanan dihasilkan ketika laluan kenderaan berinteraksi dengan pembahagi jalan raya menyebabkan beban tekanan dikenakan pada pembahagi jalan raya. Kajian dahulu memberi tumpuan kepada beban tekanan yang disebabkan oleh kenderaan tunggal; namun demikian, di jalan raya, kenderaan bergerak secara tandem atau lebih daripada dua. Tekanan yang teraruh pada pembahagi jalan di atas ketinggian kenderaan oleh kenderaan yang bergerak secara tandem belum pernah dikaji sebelum ini. Menggunakan model Ahmed dalam terowong angin dan simulasi ANSYS Aim 18.1 dengan model turbulensi $k-\omega$ SST, eksperimen dan simulasi telah dijalankan pada kelajuan angin antara 9.13 hingga 18.38 m/s. Keputusan menunjukkan bahawa apabila kelajuan angin meningkat, tekanan yang teraruh untuk susunan tandem meningkat dari 135.97 Pa kepada 280.90 Pa (eksperimen) dan 152.56 Pa kepada 304.79 Pa (simulasi). Tekanan yang teraruh di bahagian hadapan untuk dua set kereta yang bergerak tandem (0.25, 0.5, dan 1 kereta jarak) berada dalam julat 250-275 Pa. Manakala di bahagian belakang, tekanan yang teraruh berkurangan apabila jarak antara kereta meningkat. Untuk 2, 4, dan 6 kereta yang bergerak dengan jarak 0.5 kereta antara mereka, tekanan yang teraruh berhampiran kereta utama berkurangan apabila bilangan kereta meningkat. Sementara itu, tekanan di bahagian tengah dan belakang kereta terakhir masing-masing berada dalam julat 275-300 Pa dan 300-325 Pa.

A pressure field is generated when passing vehicles interacted with divider, leading to pressure load induced on the road divider. Previous studies focus on transient vehicle induced pressure load by single vehicle; however, on road, vehicles move in tandem or more than two. Pressure induced on roadside dividers above vehicle height by moving vehicles in tandem has not been previously studied. Using the Ahmed model in a wind tunnel and ANSYS Aim 18.1 simulation with the $k-\omega$ SST turbulence model, experiments and simulations were conducted at wind speeds ranging from 9.13 to 18.38 m/s. Results show that as wind speed increased, induced pressures for tandem settings rose from 135.97 Pa to 280.90 Pa (experiment) and 152.56 Pa to 304.79 Pa (simulation).

* Corresponding author.

E-mail address: kengwai.chan@usm.my (Keng Wai Chan)

<https://doi.org/10.37934/sijtl.4.1.926>

Keywords:

Kenderaan bergerak; Beban tekanan
teraruh kenderaan; Daya tekanan;
Pembahagi tepi jalan; asing dan tandem

*Moving vehicles; Vehicle-induced
pressure load; Pressure force; Roadside
dividers; Isolate and tandem*

Pressures induced at the frontal area for two sets of cars in tandem (0.25, 0.5, and 1 car apart) fell within the range of 250-275 Pa. While at the rear end, the induced pressure reduces as the distance between cars increases. For 2, 4, and 6 cars moving at a 0.5 car distance between them, the induced pressure near the lead car decreases as the number of cars increases. Meanwhile, pressures at the middle and rear ends of the last car range from 275-300 Pa and 300-325 Pa, respectively.

1. Pengenalan

Jalan raya merupakan infrastruktur utama yang menghubungkan orang ramai, menyediakan akses dan mobiliti. Setiap hari, jalan raya ini menampung volum trafik yang tinggi, dan zon tekanan tipikal akan terhasil apabila kenderaan bergerak. Bahagian hadapan kenderaan mengalami tekanan berlebihan, manakala zon sedutan terbentuk di pinggir hadapan kenderaan disebabkan oleh pecutan aliran udara. Oleh itu, kenderaan yang bergerak diliputi oleh taburan tekanan yang bergerak pada halaju yang sama dengan kenderaan tersebut. Slipstream teraruh di kawasan berhampiran, mewakili lapisan sempadan dengan turbulensi tidak tetap yang tinggi. Tekanan yang dihasilkan menyebabkan daya seret, dan taburan tekanan ini berinteraksi dengan slipstream serta dinding apabila kenderaan yang bergerak menghampiri dinding tepi jalan. Daya tekanan yang teraruh pada dinding bergantung pada saiz, bentuk, halaju, dan jarak kenderaan ke dinding.

Kesan kelajuan dan arah angin terhadap ciri aerodinamik kenderaan yang bergerak serta profil angin telah dikaji oleh Xiang et al. [21]. Baker et al. [2] mendedahkan bahawa medan tekanan dalam kawasan aliran slipstream kenderaan akan menyebabkan daya teraruh oleh kenderaan. Kajian lain yang serupa mengenai aerodinamik kenderaan termasuk Watkins et al. [20], dan Salvadori et al. [13]. Cali dan Covert [3] mengukur beban sementara pada papan tanda lebuhraya atas (skala 1:30) yang teraruh oleh model kenderaan ringkas yang melalui. Quinn et al. [11,12] menguji daya teraruh kenderaan yang bertindak pada plat rata dengan pelbagai bentuk dan kecondongan di tepi jalan, namun eksperimen berskala penuh tidak mengambil kira jenis kenderaan, halaju, dan jarak ke plat rata. Model matematik bagi beban sementara yang teraruh oleh kenderaan diperkenalkan oleh Sanz-Andrés et al. [14-16] yang boleh menganggarkan beban teraruh pada bahagian hadapan kenderaan berkaitan papan tanda trafik, pejalan kaki, dan halangan pejalan kaki.

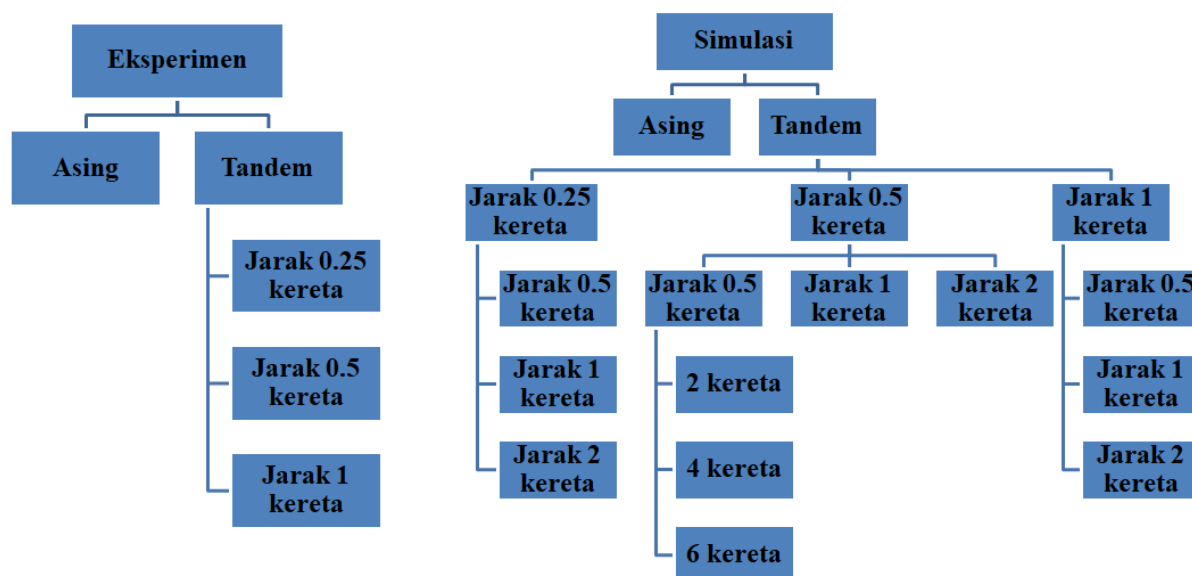
Eksperimen lapangan mengenai beban aerodinamik yang teraruh oleh kenderaan pada halangan bunyi lebuhraya telah dilakukan oleh Dalei et al. [18], di mana tiga jenis kenderaan dipertimbangkan, dan kajian tersebut dilanjutkan dengan kaedah berangka dan teori [19]. Lichtneger dan Ruck [7,9] menjalankan kerja eksperimen yang terdiri daripada kajian terowong angin, eksperimen lapangan pada plat dan dinding dengan pelbagai jenis kenderaan dan saiz papan ujian. Beban teraruh kenderaan pada elemen rata telah diukur secara sistematik sebagai fungsi jenis dan halaju kenderaan, saiz elemen, jarak melalui, dan penjarangan berbanding kenderaan. Walaupun eksperimen ini menyediakan pangkalan data yang besar dalam Pangkalan Data VIPAS, pangkalan data tersebut adalah untuk kenderaan tunggal, bukan untuk kenderaan yang bergerak secara tandem atau lebih. Persamaan teori yang diperoleh oleh Lichtneger dan Ruck [8] boleh digunakan untuk menganggarkan tekanan yang teraruh pada bahagian bawah ketinggian kenderaan, $0 < Z < H/2$, di mana Z ialah ketinggian anggaran, dan H ialah ketinggian kenderaan.

Lebih banyak kajian wujud mengenai beban teraruh kereta api, contohnya berkaitan struktur tepi landasan atau halangan bunyi di landasan kereta api berkelajuan tinggi, berbanding beban tekanan teraruh oleh kereta. Laluan kerap pada kelajuan tinggi ini boleh menyebabkan tindak balas dinamik dan kegagalan keletihan [2,6].

Walau bagaimanapun, interaksi medan tekanan teraruh kenderaan dengan elemen statik tepi jalan belum dikaji secara menyeluruh. Interaksi kenderaan-dinding dengan kenderaan yang bergerak secara tandem belum pernah dikaji sebelum ini. Oleh itu, tujuan kajian ini adalah untuk mengukur tekanan yang teraruh pada pembahagi tepi jalan dalam keadaan terpencil dan tandem.

2. Metodologi

Untuk meneroka kesan kenderaan yang bergerak terhadap taburan daya dan tekanan pada pembahagi, satu siri penyiasatan telah dijalankan secara eksperimen dan simulasi. Gambaran keseluruhan kajian ini ditunjukkan dalam Rajah 1. Kajian mengenai taburan daya dan tekanan pada pembahagi untuk keadaan terpencil dan tandem (tiga jarak berbeza antara kereta) telah dijalankan dalam kedua-dua eksperimen dan simulasi. Walau bagaimanapun, disebabkan oleh batasan persediaan eksperimen (terowong angin), beberapa penyiasatan hanya dijalankan menggunakan simulasi. Sebagai contoh, dua set kereta yang bergerak secara tandem dengan tiga jarak antara kereta (jarak 0.5 kereta, jarak 1 kereta, dan jarak 2 kereta); serta bilangan kereta yang berbeza (2 kereta, 4 kereta, dan 6 kereta) yang bergerak pada jarak 0.5 kereta antara satu sama lain.



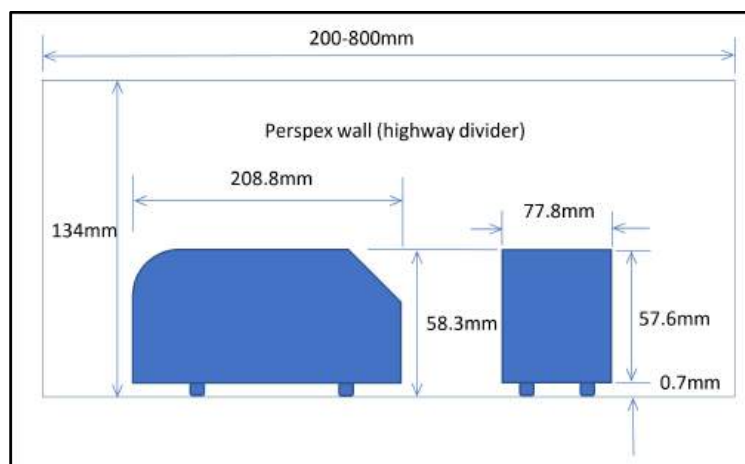
Raj. 1. Gambaran Kajian Keseluruhan

2.1 Persediaan Eksperimen

Model Ahmed berskala yang mewakili kenderaan pendek seperti kereta penumpang kecil telah digunakan untuk mengkaji tekanan teraruh kenderaan pada pembahagi jalan. Model Ahmed, yang merupakan penanda aras aerodinamik yang telah mantap, dipilih kerana kesederhanaan dan kebolehpercayaannya. Eksperimen membandingkan susunan kenderaan tunggal dan tandem untuk menilai kesan tekanan, dengan tidak memasukkan variasi saiz dan bentuk kenderaan sebenar.

Model Ahmed yang ditunjukkan dalam Rajah 2 (berskala 1:15) telah digunakan untuk kajian ini, dengan dimensi 208.8mm x 77.8mm x 57.6mm dan sudut kecondongan 40°. Kenderaan ringkas (generik) ini merupakan penanda aras standard, di mana sifat geometri umum dan kesannya terhadap aliran boleh dianalisis dan dikaji. Model kereta ini diletakkan bersebelahan dengan dinding Perspeks sebagai pembahagi lebuhraya. Pembahagi tersebut dibina daripada Perspeks (setiap satu

dengan dimensi 200mm x 134mm x 13mm) yang mempunyai 36 lubang ($\varnothing 4\text{mm}$). Kendaraan diletakkan 50mm dari dinding, dan jarak antara kendaraan ialah 32mm untuk susunan tandem. Tekanan yang teraruh pada pembahagi tepi jalan (36 koordinat berbeza) diukur menggunakan manometer digital (Dwyer Series 477-1-FM), yang disambungkan terus kepada tiub yang dihubungkan ke setiap titik pada pembahagi.

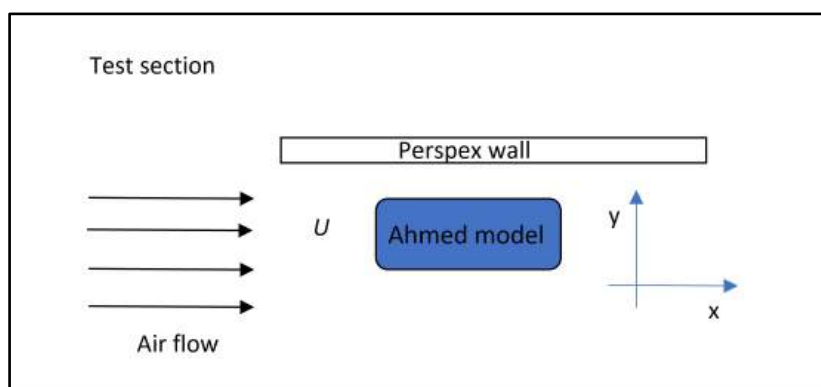


Raj. 2. Dimensi model Ahmed dan dinding Perspeks (tidak mengikut skala)

Halaju pergerakan kendaraan U dikira berdasarkan Persamaan (1) seperti di bawah, di mana P ialah perbezaan tekanan yang diukur menggunakan manometer digital, ρ ialah ketumpatan udara ISA (International Standard Atmosphere), iaitu 1.225 kg/m^3 .

$$U = \frac{\sqrt{2P}}{\rho} \quad (1)$$

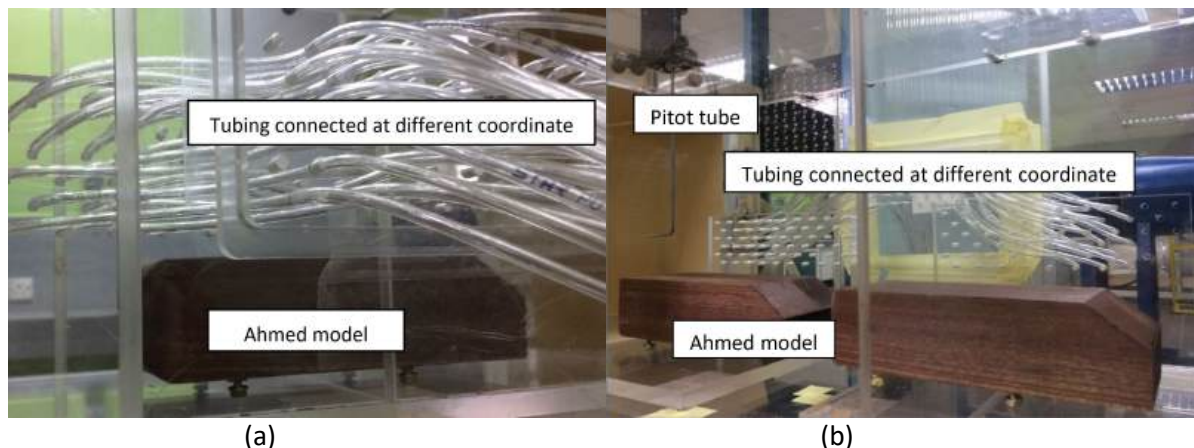
Seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 3, susun atur persediaan eksperimen, kendaraan bergerak dengan halaju U , yang bertentangan dengan arah paksi-x. Oleh itu, aliran mantap diselaraskan dengan paksi-x sistem koordinat kendaraan (x, y). Di mana, x ialah jarak dari hadapan kendaraan, dan y ialah jarak mutlak antara sisi kendaraan dan dinding.



Raj. 3 Susunan eksperimen yang menunjukkan parameter utama

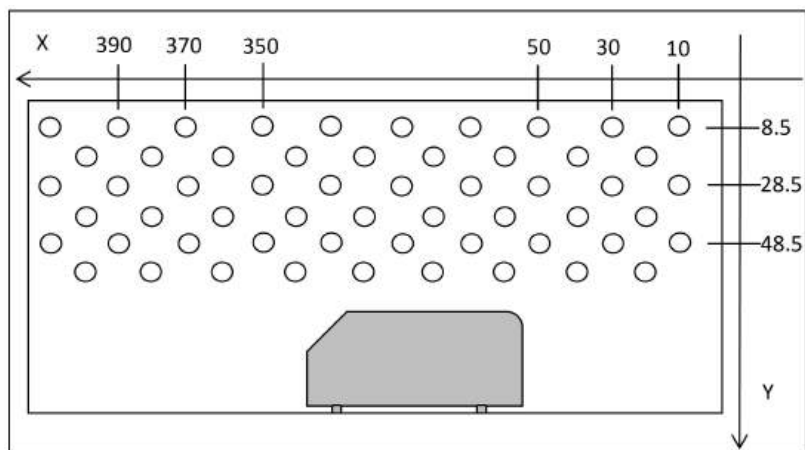
Kajian ini dijalankan dalam terowong angin litar terbuka pendidikan (seperti ditunjukkan dalam Rajah 4), dengan bahagian ujian berukuran $0.2\text{m} \times 0.2\text{m} \times 0.4\text{m}$ dan kelajuan maksimum yang dibenarkan ialah 37 m/s . Tiub Pitot digunakan untuk mengukur tekanan di bahagian hadapan dan belakang kendaraan yang bergerak. Kelajuan terowong angin yang dipilih adalah berdasarkan

penambahan kelajuan terowong angin sebanyak 200 rpm bermula dari 1200 rpm (≈ 9.13 m/s), dengan julat kelajuan antara 9.13 m/s hingga 18.38 m/s. Kajian dimulakan pada kelajuan 9.13 m/s kerana tekanan yang teraruh adalah tidak ketara pada kelajuan yang lebih rendah. Manakala, 18.38 m/s dipilih sebagai kelajuan tertinggi dalam kajian ini kerana penambahan seterusnya akan melebihi 19.4 m/s (70 km/h), iaitu had laju jalan raya yang dipilih.



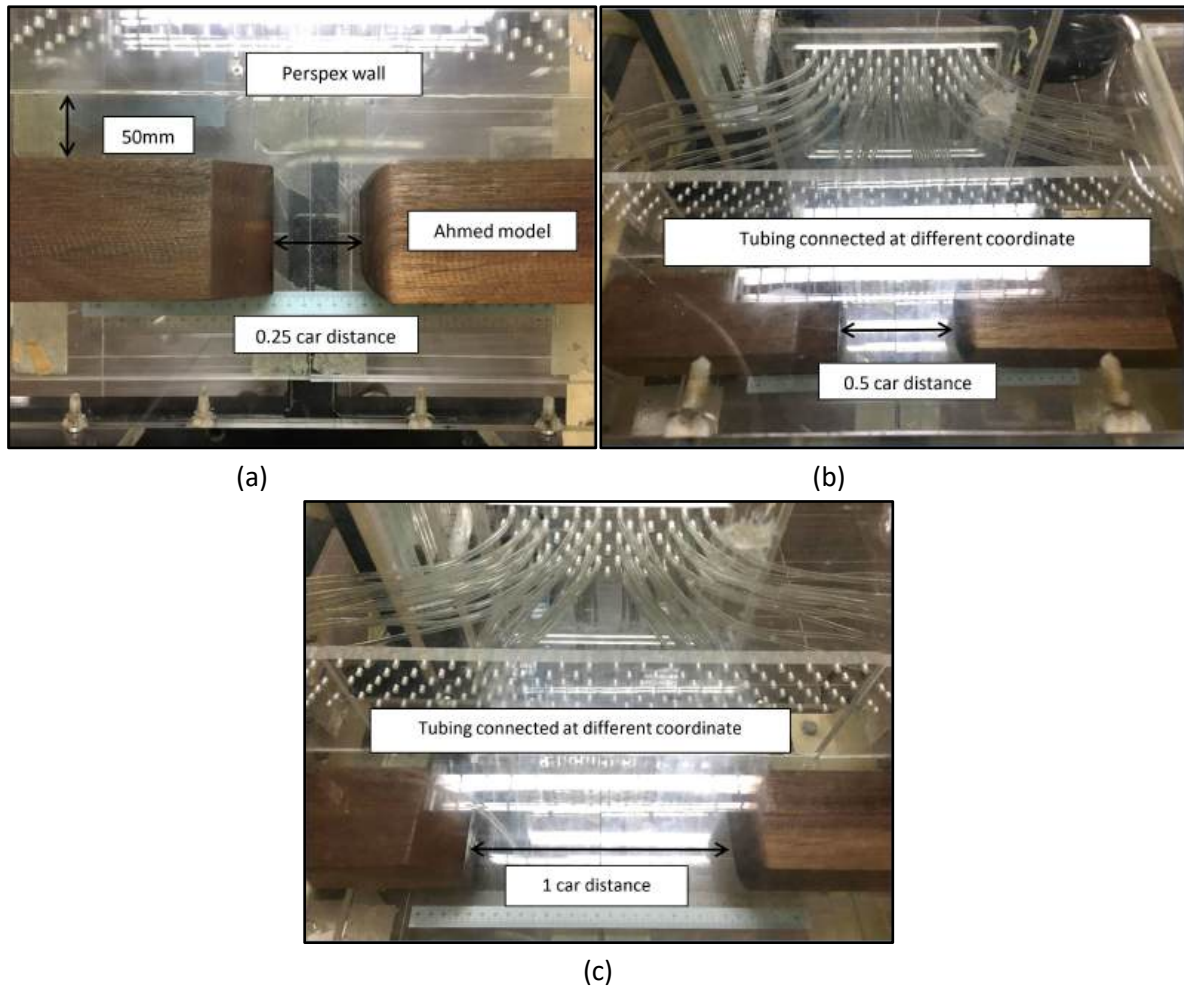
Raj. 4 Persediaan terowong angin yang menunjukkan model Ahmed dan dinding perspeks – (a) pengasingan, dan (b) tandem

Untuk susunan terencil, sejumlah 36 titik dengan koordinat berbeza (dalam mm) (seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 5), yang terletak di bahagian hadapan dan belakang model kenderaan, telah dipilih untuk pengukuran perbezaan tekanan. Manakala untuk susunan tandem, sejumlah 42 titik telah dipilih, di mana koordinat ini merangkumi bahagian hadapan dan pinggir utama kedua-dua model kenderaan. Model eksperimen disusun sebagai satu lorong, dengan model Ahmed diletakkan kira-kira di tengah lorong, pada jarak yang sama dari pembahagi dan tepi yang lain.

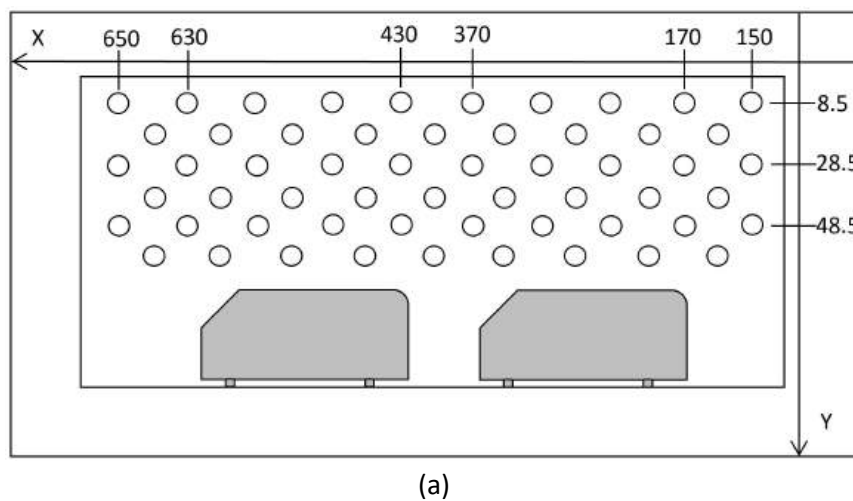


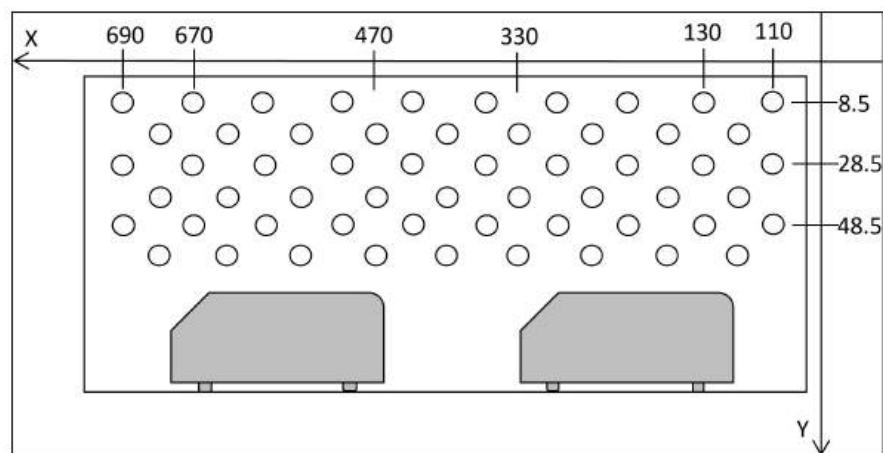
Raj. 5 Titik koordinat untuk pengukuran perbezaan tekanan – asing

Untuk mengkaji kesan jarak celah antara kenderaan terhadap beban tekanan yang teraruh pada pembahagi, tiga jarak berbeza (0.25 jarak kereta, 0.5 jarak kereta, dan 1 jarak kereta) telah digunakan untuk susunan tandem. Jarak ini dipilih berdasarkan suku panjang, separuh panjang, dan panjang penuh model yang dibina. Persediaan eksperimen ini ditunjukkan dalam Rajah 6(a) (0.25 jarak kereta), Rajah 6(b) (0.5 jarak kereta), dan Rajah 6(c) (1 jarak kereta). Manakala Rajah 7 menunjukkan susunan koordinat (dalam mm) untuk jarak berbeza antara kenderaan.

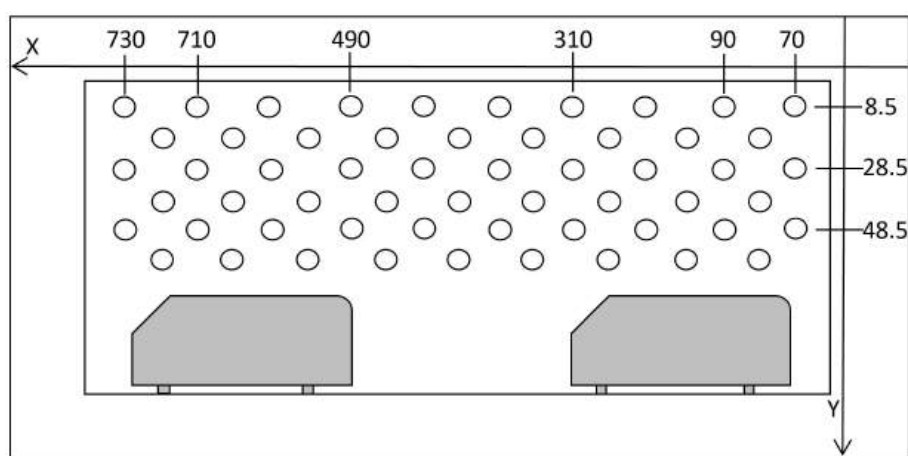


Raj. 6 Persediaan eksperimen dengan jarak jurang yang berbeza: (a) Jarak tandem 0.25 kereta; (b) Jarak tandem 0.5 kereta; dan (c) Jarak tandem 1 kereta





(b)



(c)

Raj. 7 Koordinat titik untuk pengukuran perbezaan tekanan: (a) jarak tandem 0.25 kereta; (b) jarak tandem 0.5 kereta; (c) jarak tandem 1 kereta

2.2 Simulasi

Perisian ANSYS Aim 18.1 telah digunakan untuk simulasi berangka dan pemodelan. Model Ahmed dengan panjang, lebar, tinggi, dan sudut kecondongan masing-masing 208.8mm, 77.8mm, 57.6mm, dan 40°, telah dicipta sebagai model kenderaan. Domain pengiraan (200mm x 200mm) dengan panjang 410mm telah ditetapkan, dan titik koordinat (0, 0, 0) terletak di hujung belakang kenderaan.

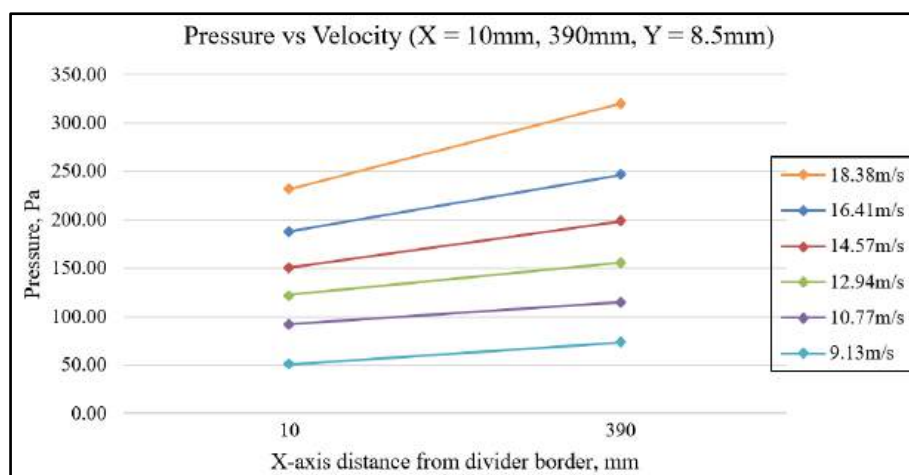
Persamaan Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) (dengan penutupan tambahan) model k- ω SST telah digunakan. Pressure inlet ditetapkan sebagai sempadan aliran masuk, manakala pressure outlet digunakan untuk aliran keluar. Semua permukaan lain dianggap sebagai dinding tanpa gelinciran (no-slip wall). Keputusan mencapai penumpuan pada lalaran sekitar 200, dengan toleransi baki lalai ditetapkan pada 0.001. Skema pendiskretan second order upwind telah digunakan untuk meningkatkan ketepatan pengiraan. Untuk meningkatkan kelakuan penumpuan, tetrahedron ditukar kepada mesh polihidral; kaedah kecerunan berasaskan sel kuasa dua terkecil (least square cell based gradient method) telah dipilih untuk kawalan pendiskretan. Daripada ujian kebebasan mesh, saiz mesh 130,000 telah dipilih untuk susunan terpencil, manakala untuk semua susunan tandem, saiz mesh 60,000 telah dipilih.

3. Keputusan dan Perbincangan

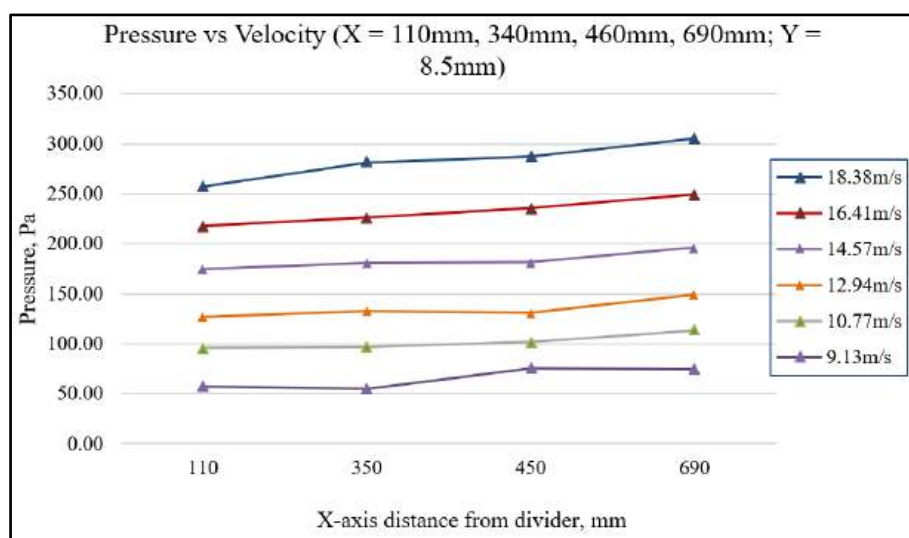
Tekanan yang teraruh pada pelbagai titik di pembahagi tepi jalan pada kelajuan terowong angin yang berbeza telah direkodkan dan dibandingkan. Tiga jarak berbeza telah dipilih untuk mengkaji kesan jarak antara kereta terhadap tekanan yang teraruh pada pembahagi.

3.1 Keputusan Eksperimen

Untuk susunan terpencil (Rajah 8), tekanan yang teraruh di hujung belakang kereta adalah 6.65-38.19% lebih tinggi berbanding di bahagian hadapan. Perbezaan tekanan ini meningkat terutamanya pada kelajuan yang lebih tinggi. Manakala untuk susunan tandem dengan jarak 0.5 kereta (Rajah 9), tekanan yang teraruh di lokasi antara dua kereta dan di hujung belakang kereta adalah 7.63-37.56% lebih tinggi berbanding di bahagian hadapan. Tenaga kinetik turbulen yang tinggi terhasil pada vorteks di belakang kereta, dan ini selari dengan kajian sebelumnya yang dilakukan oleh Musa et al. [10].



Raj. 8. Bacaan tekanan pada baris pertama dan baris terakhir pada kelajuan berbeza – asing



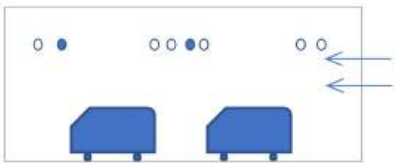
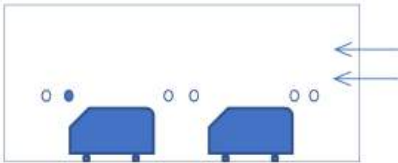
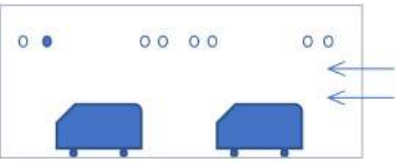
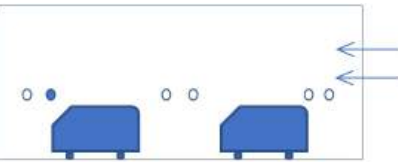
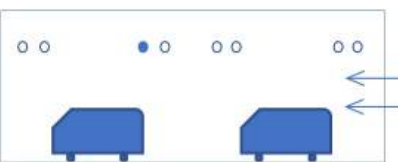
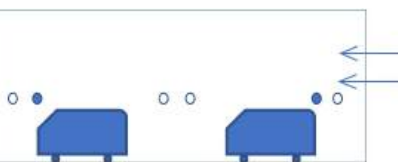
Raj. 9. Tekanan teraruh pada pembahagi di kawasan hadapan kereta, di antara kereta dan kawasan belakang kereta – jarak tandem 0.5 kereta

Didapati bahawa tekanan maksimum berlaku pada koordinat berbeza bagi konfigurasi tandem yang berlainan, dan ringkasan koordinat ini disenaraikan dalam Jadual 1. Untuk jarak 0.25 kereta antara kenderaan, terdapat dua koordinat dengan tekanan maksimum, iaitu di antara dua kereta ($x = 390$ mm) dan di bahagian belakang kereta ($x = 630$ mm). Walau bagaimanapun, apabila jarak paksi-y dari pembahagi meningkat, tekanan maksimum hanya diperhatikan di bahagian belakang kereta ($x = 640$ mm).

Apabila jarak antara kereta meningkat kepada 0.5 kereta, tekanan maksimum hanya berlaku di bahagian belakang kereta. Jarak paksi-y dari pembahagi tiada kesan ke atas tekanan maksimum yang teraruh. Bagi konfigurasi tandem dengan jarak 1 kereta antara kenderaan, tekanan maksimum dikesan di antara kereta ($x = 310$ mm dan $x = 490$ mm). Apabila jarak paksi-y meningkat, koordinat di mana tekanan maksimum teraruh ditemui di bahagian hadapan kereta ($x = 110$ mm) dan bahagian belakang kereta ($x = 770$ mm).

Jadual 1

Ringkasan koordinat di mana tekanan maksimum berlaku untuk konfigurasi tandem yang berbeza

Konfigurasi tandem (jarak antara)	Koordinat-X untuk tekanan maksimum		Sisihan piawai maksimum
	Y = 8.5 mm	Y = 58.5 mm	
0.25 kereta	$x = 390$ mm, 630 mm 	$x = 640$ mm 	9.02
0.5 kereta	$x = 670$ mm 	$x = 660$ mm 	12.17
1 kereta	$x = 310$ mm, 490 mm 	$x = 100$ mm, 770 mm 	10.21

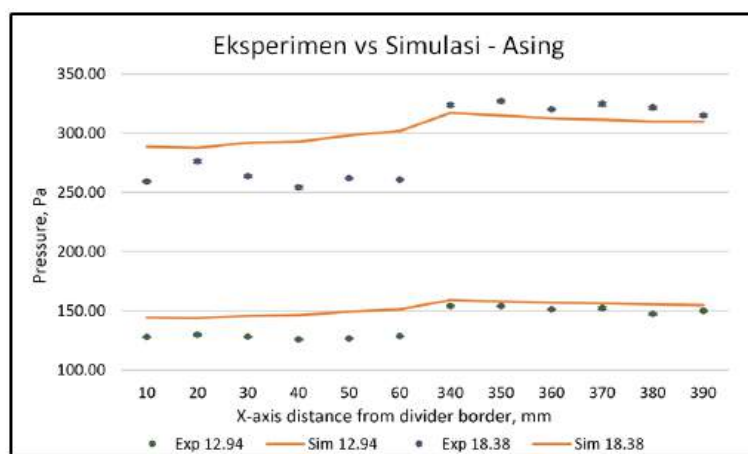
3.2 Keputusan Simulasi

Data eksperimen kemudian dibandingkan dengan keputusan simulasi yang dihasilkan menggunakan ANSYS AIM 18.1. Bacaan tekanan yang dikira daripada model Ahmed menunjukkan persetujuan yang baik dengan keputusan eksperimen.

Susunan Terpencil

Bacaan tekanan eksperimen dan simulasi untuk susunan terpencil telah diplot dan dibandingkan dalam Rajah 10. Pada kelajuan terowong angin yang rendah, taburan tekanan kurang berubah-ubah, dan kedua-dua bacaan eksperimen (121.67–156.67 Pa) dan keputusan simulasi (141.38–159.76 Pa) adalah hampir sama. Pada kelajuan yang lebih tinggi, bacaan eksperimen (259.22–276.17 Pa) di bahagian hadapan kereta adalah jauh lebih rendah berbanding keputusan simulasi (287.44–301.86 Pa). Di bahagian belakang kereta, kedua-dua bacaan eksperimen (314.72–324.61 Pa) dan keputusan simulasi (309.78–317.66 Pa) adalah lebih hampir.

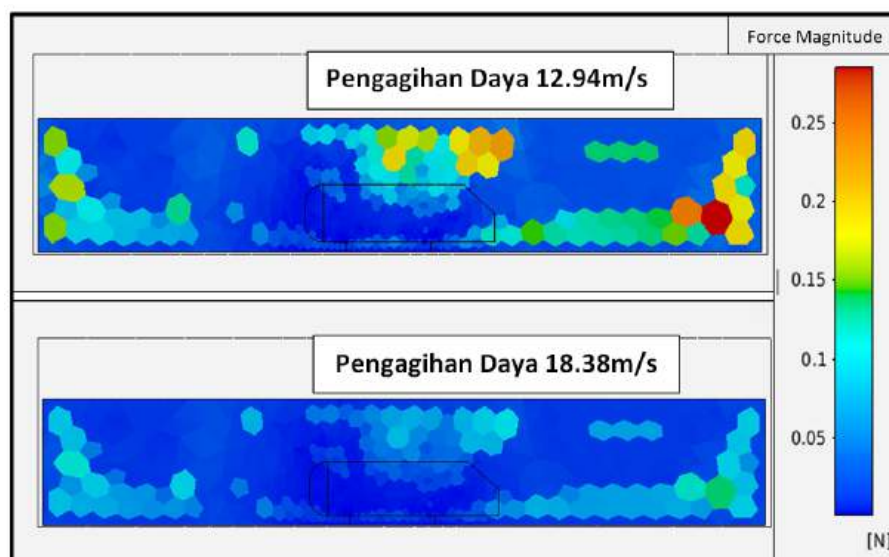
Perbezaan antara bacaan eksperimen dan keputusan simulasi pada kelajuan yang lebih tinggi mungkin disebabkan oleh turun naik yang lebih tinggi semasa eksperimen terowong angin, di mana tindak balas manometer terhadap perubahan keadaan mungkin mempengaruhi bacaan pada kelajuan tinggi. Berbanding dengan bahagian hadapan kereta, bacaan di bahagian belakang adalah kurang berubah-ubah dan lebih stabil. Pada masa yang sama, julat taburan tekanan yang lebih besar diperhatikan daripada bacaan eksperimen (259.22–326.72 Pa) di kedua-dua bahagian hadapan dan belakang kereta berbanding keputusan simulasi (288.37–317.16 Pa).



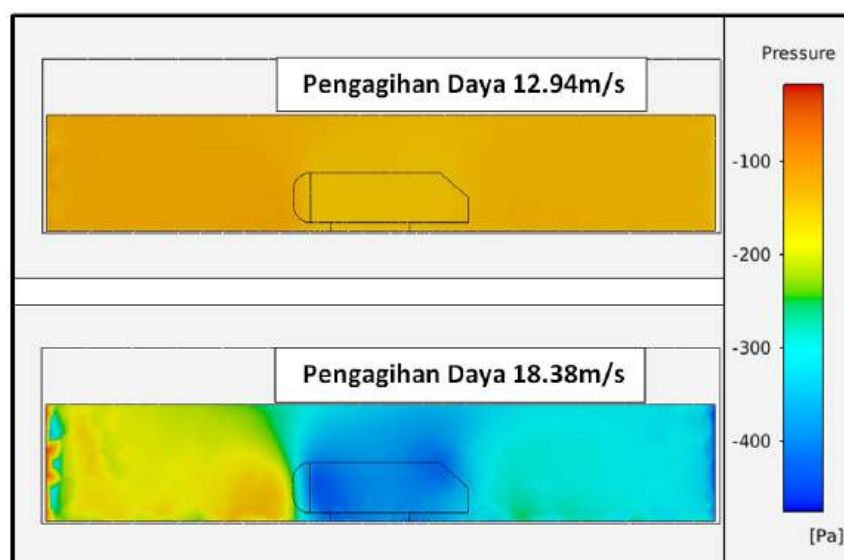
Raj. 10 Perbandingan bacaan tekanan pada titik yang berbeza untuk kereta tunggal yang bergerak pada kelajuan 12.94m/s dan 18.38m/s

Penemuan ini selari dengan kajian sebelumnya [1,18] di mana beban aerodinamik terhasil apabila aliran udara memenuhi kawasan vakum yang terbentuk apabila kenderaan bergerak pada kelajuan tinggi. Beban aerodinamik yang lebih tinggi diperhatikan pada kelajuan yang lebih tinggi, terutamanya di bahagian belakang dan sisi kenderaan.

Taburan daya dan taburan tekanan untuk satu kereta pada dua kelajuan terpilih (12.94 m/s dan 18.38 m/s) ditunjukkan dalam Rajah 11. Dapat diperhatikan bahawa nilai tekanan negatif diperoleh dan dipersembahkan. Nilai negatif ini menunjukkan bahawa tekanan yang lebih rendah daripada tekanan atmosfera telah disimulasikan daripada susunan tersebut. Dapat disimpulkan bahawa tekanan sedutan yang lebih tinggi berlaku di hujung belakang kereta yang bergerak. Selain itu, taburan daya yang rendah ditemui pada kelajuan yang lebih tinggi, yang disebabkan oleh tekanan sedutan yang lebih tinggi.



(a)



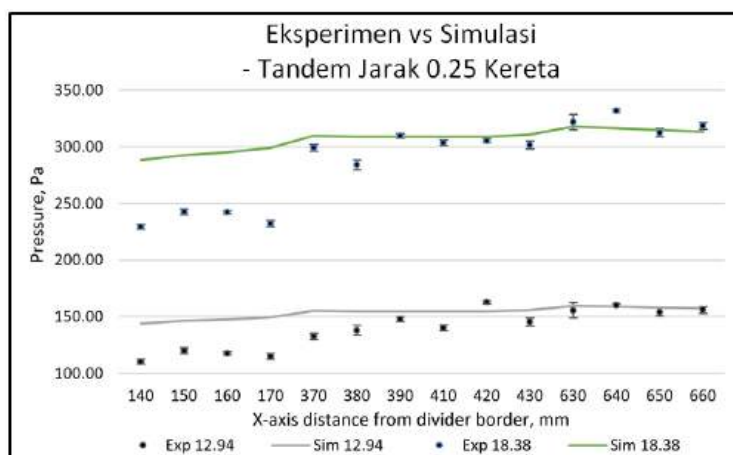
(b)

Raj. 11 Taburan Daya (a) dan Tekanan (b) untuk kereta tunggal pada 12.94m/s dan 18.38m/s

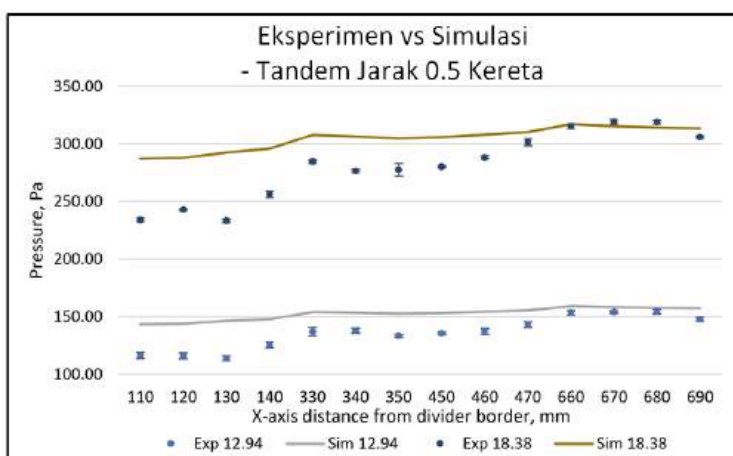
Susunan Tandem

Keputusan eksperimen dan simulasi untuk susunan tandem dengan jarak 0.25 kereta, 0.5 kereta, dan 1 kereta ditunjukkan dalam Rajah 12. Keputusan ini menunjukkan corak taburan tekanan yang serupa dengan susunan terpencil, di mana tekanan teraruh yang lebih tinggi ditemui di hujung belakang kereta. Di lokasi antara kereta, tenaga kinetik turbulen terhasil pada vorteks di belakang kereta pertama. Tekanan yang teraruh di lokasi antara kereta adalah lebih tinggi berbanding bahagian hadapan kereta tetapi lebih rendah berbanding hujung belakang kereta.

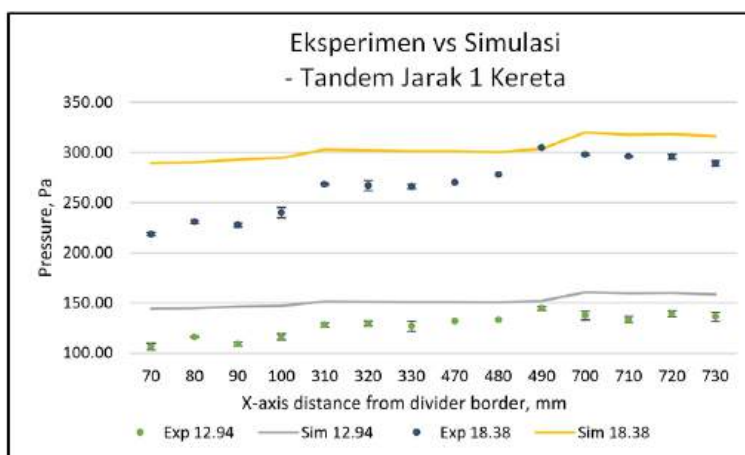
Pada setiap jarak antara kereta, dua kelajuan telah dipilih untuk perbandingan tekanan yang teraruh. Didapati bahawa tekanan teraruh menjadi dua kali ganda apabila kelajuan meningkat sebanyak 1/3 bagi ketiga-tiga susunan tandem yang berbeza.



(a)



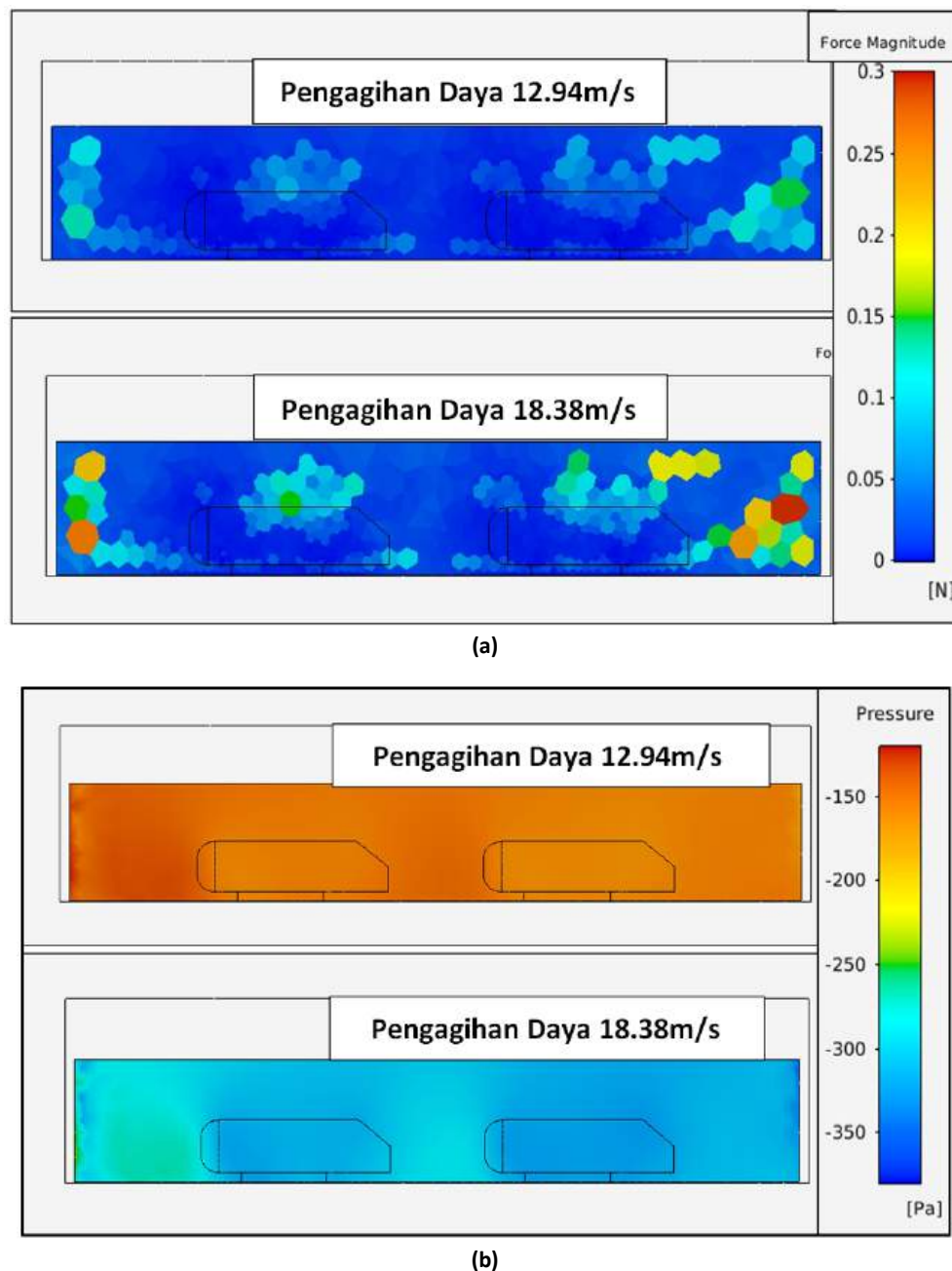
(b)



(c)

Raj. 12 Perbandingan bacaan tekanan pada titik berbeza untuk kereta yang bergerak seiring pada 12.94m/s dan 18.38m/s: (a) jarak 0.25 kereta; (b) jarak 0.5 kereta; dan (c) jarak 1 kereta

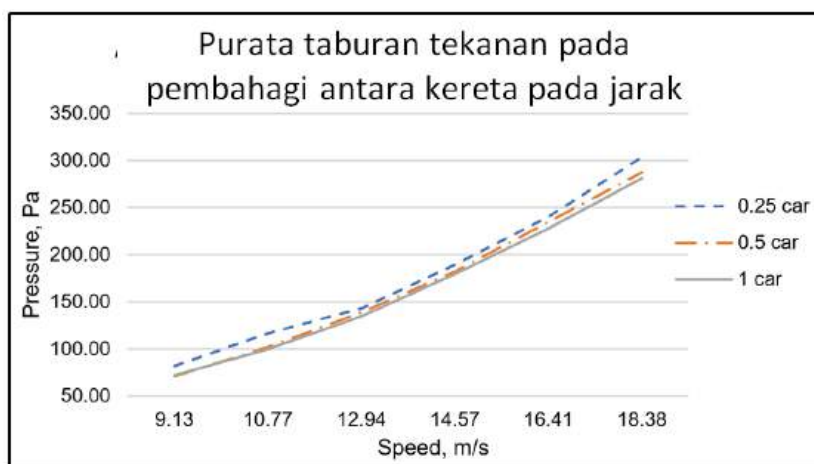
Daripada taburan tekanan yang disimulasikan, ia menunjukkan bahawa beban aerodinamik yang lebih tinggi diperhatikan di hujung belakang kereta kedua (Rajah 13(a)). Kelajuan tinggi juga akan menyebabkan tekanan yang lebih tinggi teraruh pada pembahagi (Rajah 13(b)). Beban tekanan yang teraruh pada pembahagi telah diukur sebagai rujukan untuk memanfaatkan tenaga yang belum digunakan ini.



Raj. 13 Taburan Daya (a) dan Tekanan (b) untuk jarak 0.5 kereta pada 12.94m/s dan 18.38m/s

Kesan Jarak Antara Kenderaan

Bagi susunan tandem, kesan jarak antara kereta terhadap tekanan yang teraruh telah dikaji. Tiga jarak berbeza antara kereta, iaitu 0.25 jarak kereta, 0.5 jarak kereta, dan 1 jarak kereta, telah dipilih untuk penyiasatan. Tekanan purata yang lebih tinggi ditemui pada pembahagi di sebelah kereta yang bergerak dengan jarak 0.25 kereta antara mereka. Tekanan yang teraruh pada pembahagi oleh kereta pertama ditindih oleh tekanan yang teraruh oleh kereta kedua di belakang. Namun, apabila jarak antara kereta meningkat, tekanan yang teraruh mungkin hilang ke atmosfera sebelum mencapai permukaan pembahagi. Taburan tekanan purata pada pembahagi antara kereta dirumuskan seperti di bawah dalam Rajah 14.



Raj. 14 Purata taburan tekanan pada pembahagi antara kereta pada jarak kereta yang berbeza

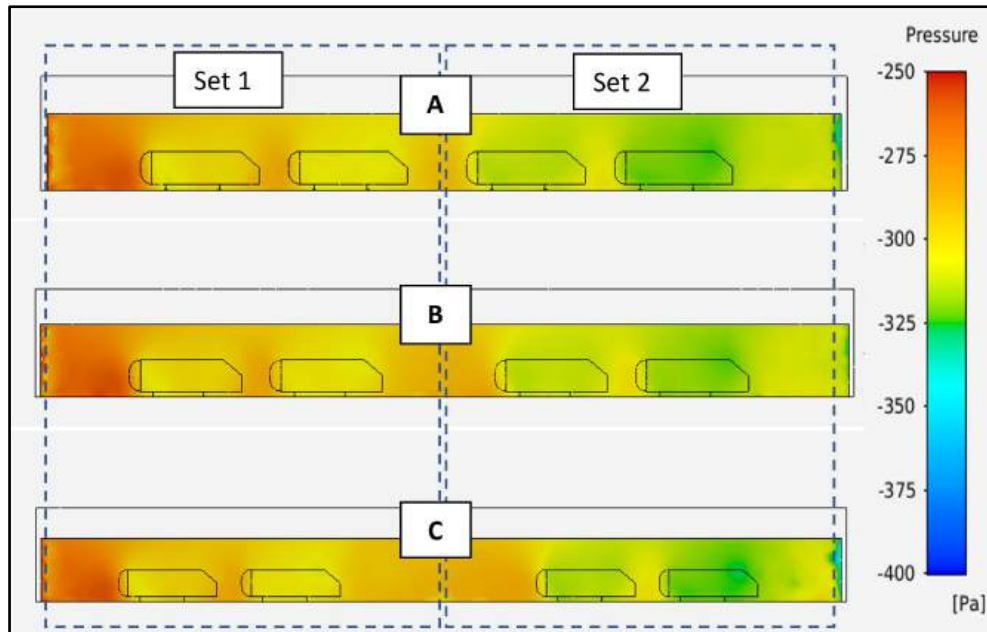
Apabila jarak antara kereta berganda, tekanan purata menurun pada nilai purata 7 Pa (penurunan kira-kira 3.03% - 4.07%). Keputusan juga menunjukkan bahawa apabila kelajuan kereta meningkat, jarak antara kereta yang lebih kecil menyebabkan perbezaan tekanan yang lebih besar, di mana kecerunan menjadi semakin curam. Dapat dianggarkan bahawa tekanan purata yang lebih tinggi akan "diterima" oleh pembahagi daripada aliran trafik harian yang padat di sepanjang lebuh raya.

Taburan Tekanan untuk Kereta Bergerak secara Tandem pada Konfigurasi Berbeza

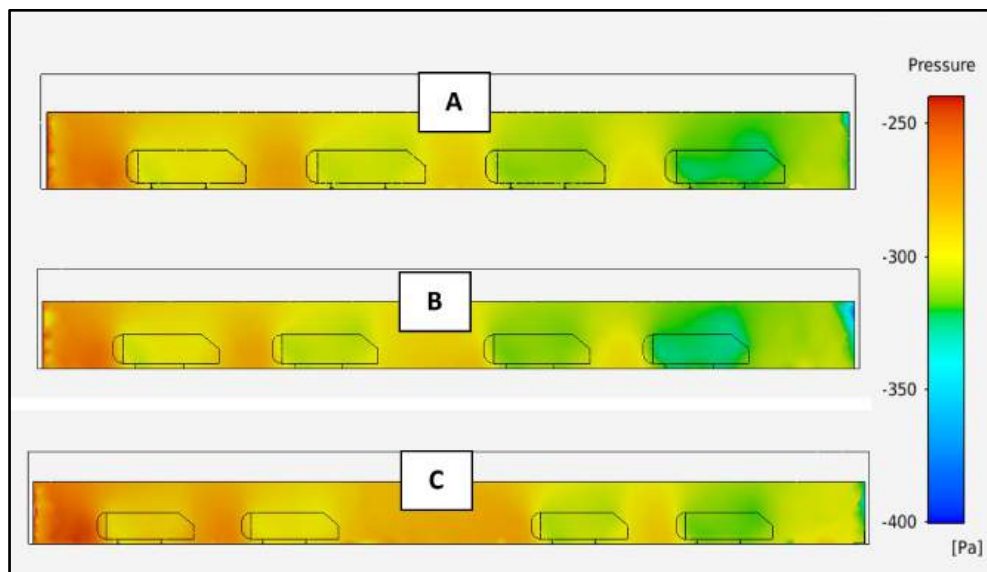
Taburan tekanan pada pembahagi bagi dua set kereta yang bergerak secara tandem dengan jarak antara 0.25 kereta, 0.5 kereta, dan 1 kereta telah dikaji lebih lanjut. Taburan tekanan untuk kedua-dua set kereta ini disiasat pada tiga jarak terpilih: 0.5 jarak kereta (A), 1 jarak kereta (B), dan 2 jarak kereta (C). Tiga kelajuan berbeza, iaitu 9.13 m/s (minimum), 12.94 m/s (sederhana), dan 18.38 m/s (maksimum), telah dikaji untuk setiap jarak set yang berbeza.

Taburan tekanan untuk susunan ini pada kelajuan maksimum (18.38 m/s) ditunjukkan dalam Rajah 15, Rajah 16, dan Rajah 17. Bagi ketiga-tiga konfigurasi, taburan tekanan di bahagian hadapan pembahagi berada dalam julat tekanan -250 Pa hingga -275 Pa, menunjukkan corak taburan tekanan yang serupa.

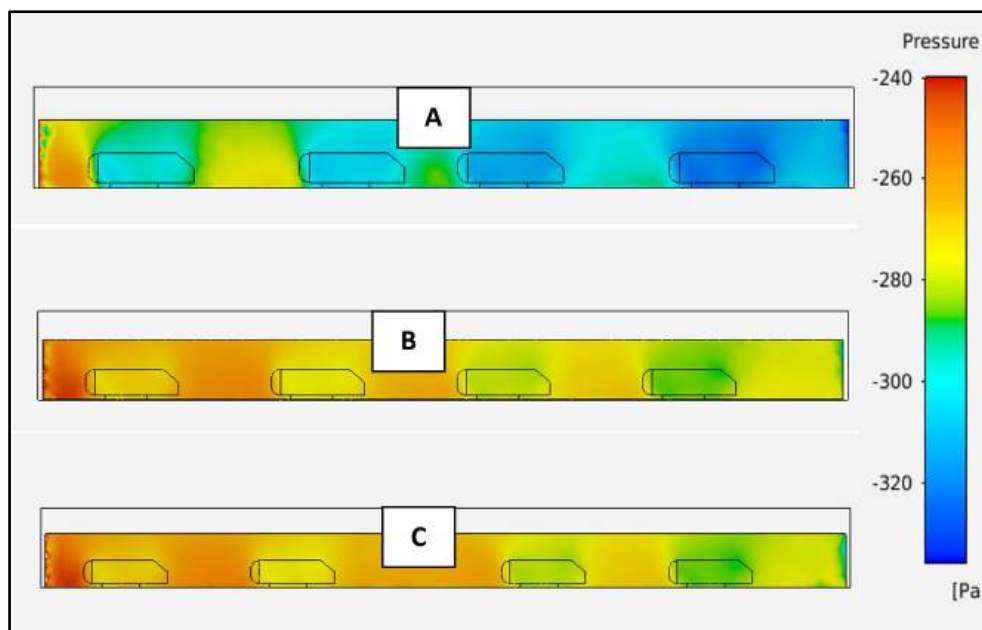
Untuk jarak 0.25 kereta antara kenderaan, julat tekanan di hujung belakang set kereta pertama berada dalam -275 Pa hingga -300 Pa, manakala set kereta kedua berada antara -300 Pa hingga -325 Pa. Peningkatan tekanan sedutan sebanyak 8.33% - 9.09% diperhatikan untuk susunan jarak ini. Apabila jarak antara kereta meningkat kepada 0.5 kereta, julat tekanan di hujung belakang set pertama dan kedua didapati serupa. Bagi jarak 1 kereta antara kenderaan, tekanan teraruh di hujung belakang set kereta pertama dan kedua masing-masing berada dalam julat -260 Pa hingga -300 Pa dan -275 Pa hingga -320 Pa. Tekanan teraruh di hujung belakang kedua adalah 5.77% - 6.67% lebih tinggi berbanding hujung belakang pertama. Tekanan yang teraruh pada pembahagi berkurangan apabila jarak antara kereta meningkat.



Raj. 15 Dua set kereta dengan jarak 0.25 kereta di antara, diuji pada 3 jarak berbeza di antara (0.5 kereta, 1 kereta, dan 2 kereta) untuk pengagihan tekanan



Raj. 16 Dua set kereta dengan jarak 0.5 kereta di antara, diuji pada 3 jarak berbeza di antara (0.5 kereta, 1 kereta, dan 2 kereta) untuk pengagihan tekanan

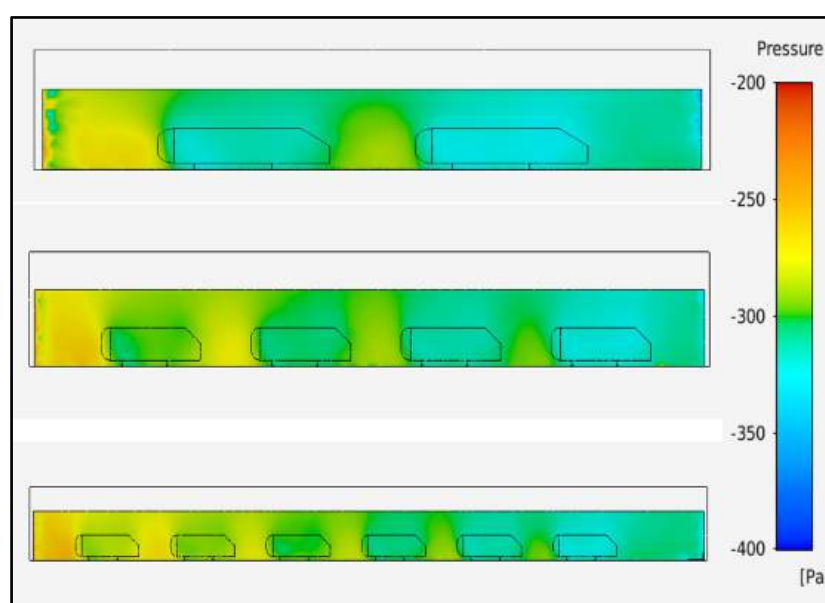


Raj. 17 Dua set kereta dengan jarak 1 kereta di antara, diuji pada 3 jarak berbeza di antara (0.5 kereta, 1 kereta, dan 2 kereta) untuk pengagihan tekanan

Taburan Tekanan untuk Bilangan Kereta Berbeza Bergerak pada Jarak 0.5 Kereta Antara Satu Sama Lain

Taburan tekanan untuk bilangan kereta berbeza (2 kereta, 4 kereta, dan 6 kereta) yang bergerak pada jarak 0.5 kereta antara satu sama lain telah dikaji lebih lanjut. Keputusan simulasi taburan tekanan dibandingkan untuk konfigurasi bilangan kereta yang berbeza. Taburan tekanan untuk 2 kereta, 4 kereta, dan 6 kereta pada kelajuan 18.38 m/s ditunjukkan dalam Rajah 18.

Apabila bilangan kereta meningkat, tekanan teraruh berkurangan, terutamanya berhampiran kereta utama. Selain itu, satu senario unik ditemui dalam simulasi, di mana julat tekanan di bahagian tengah dan hujung belakang kereta terakhir bagi susunan ini berada dalam julat yang serupa, iaitu -275 Pa hingga -300 Pa dan -300 Pa hingga -325 Pa, masing-masing.



Raj. 18 Taburan tekanan untuk 2 kereta, 4 kereta dan 6 kereta pada kelajuan 18.38m/s

Jarak antara kendaraan sangat mempengaruhi tekanan yang dialami oleh pembahagi jalan, terutamanya apabila kelajuan kendaraan meningkat. Apabila jarak antara kendaraan berkurangan, pertindihan kesan tekanan meningkatkan tekanan keseluruhan pada pembahagi. Keputusan menunjukkan bahawa jarak sehingga satu panjang kereta menghasilkan tekanan teraruh maksimum, maka semasa aliran trafik yang sibuk boleh meningkatkan beban pembahagi dengan ketara.

5. Kesimpulan

Apabila kendaraan bergerak pada kelajuan tinggi, taburan tekanan yang meliputi kendaraan adalah tinggi, dan lapisan sempadan dengan gelora tidak mantap yang tinggi akan teraruh di kawasan berhampiran. Para penyelidik telah mengkaji tingkah laku aerodinamik kendaraan yang bergerak serta kesan angin terhadap pengangkutan darat. Bagi tujuan keselamatan, kajian mengenai tekanan yang dihasilkan pada panel struktur, pembahagi jalan, dan pejalan kaki oleh kendaraan yang bergerak di sepanjang jalan juga telah dijalankan.

Untuk susunan terpencil pada kelajuan 12.94 m/s, bacaan eksperimen ialah 156.67 Pa, manakala keputusan simulasi ialah 159.76 Pa. Apabila kelajuan meningkat kepada 18.38 m/s, bacaan eksperimen (324.61 Pa) dan keputusan simulasi (317.66 Pa) adalah hampir dengan perbezaan peratusan sebanyak 2.18%. Untuk susunan tandem dengan jarak 0.5 kereta antara kendaraan, bacaan eksperimen dan keputusan simulasi masing-masing ialah 135.97 Pa dan 152.56 Pa pada kelajuan 12.94 m/s. Apabila kelajuan meningkat kepada 18.38 m/s, bacaan eksperimen dan keputusan simulasi meningkat kepada 280.90 Pa dan 304.79 Pa. Untuk kendaraan yang bergerak secara tandem, koordinat di mana tekanan maksimum berlaku bagi jarak berbeza antara kereta telah dipersembahkan.

Bagi konfigurasi dua set kereta yang bergerak secara tandem, taburan tekanan di bahagian hadapan pembahagi untuk ketiga-tiga jarak terpilih (0.25, 0.5, dan 1 kereta) berada dalam julat tekanan yang serupa, iaitu -250 Pa hingga -275 Pa. Untuk jarak 0.25 dan 0.5 kereta, tekanan teraruh di hujung belakang set 1 dan set 2 masing-masing berada dalam julat -275 Pa hingga -300 Pa dan -300 Pa hingga -325 Pa, dengan peningkatan tekanan sedutan sebanyak 8.33% - 9.09%. Untuk jarak 1 kereta, tekanan teraruh pada set kereta pertama diperhatikan dalam julat -260 Pa hingga -300 Pa, manakala set kedua berada dalam julat -275 Pa hingga -320 Pa. Tekanan sedutan di hujung belakang kedua adalah 5.77% - 6.67% lebih tinggi berbanding hujung belakang pertama. Oleh itu, apabila jarak antara kereta meningkat, tekanan yang teraruh pada pembahagi akan berkurangan.

Taburan tekanan untuk bilangan kereta berbeza (2 kereta, 4 kereta, dan 6 kereta) yang bergerak pada jarak 0.5 kereta antara satu sama lain turut dikaji. Apabila bilangan kereta meningkat, tekanan teraruh berhampiran kereta utama akan berkurangan. Sementara itu, julat tekanan di bahagian tengah dan hujung belakang kereta terakhir bagi susunan ini masing-masing berada dalam julat yang serupa, iaitu -275 Pa hingga -300 Pa dan -300 Pa hingga -325 Pa.

Maka, jarak antara kendaraan mempengaruhi tekanan pada pembahagi jalan. Jarak dekat meningkatkan pertindihan tekanan, dengan jarak satu panjang kereta menghasilkan tekanan maksimum. Aliran trafik sibuk mampu meningkatkan beban pembahagi.

Keputusan yang dibentangkan dalam kajian ini terhadap kepada satu model kendaraan terpilih. Dalam kerja masa hadapan, model kendaraan berbeza boleh disertakan untuk pengkuantitian tekanan teraruh pada pembahagi. Jenis kendaraan berbeza membolehkan perbandingan tekanan teraruh yang diperolehi.

Pengakuan

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada Kerajaan Malaysia kerana menganugerahkan *Hadiah Latihan Persekutuan* untuk menyokong kajian penyelidikan ini dan sokongan kewangan sebahagian daripada Universiti Sains Malaysia (geran penyelidikan 304/PMEKANIK/60313039).

Rujukan

- [1] Al-Aqel, A.A., Lim, B.K., Noor, E.E.M., Yap, T.C., and Alkaff, S.A., 2016. Potentiality of small wind turbines along highway in Malaysia, 2016 International Conference on Robotics, Automation and Sciences (ICORAS), pp. 1-6.
- [2] Baker, C.J., Dalley, S.J., Johnson, T., Quinn, A., and Wright, N.G., 2001. The slipstream and wake of a high-speed train, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 215 (2), pp. 83-99.
- [3] Cali, P.M. and Covert, E.E., 2000. Experimental measurements of the loads induced on an overhead highway sign structure by vehicle-induced gusts, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 84 (1), pp. 87-100.
- [4] Carassale, L. and Marrè Brunenghi, M., 2013. Dynamic response of trackside structures due to the aerodynamic effects produced by passing trains, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 123, pp. 317-24.
- [5] Castro, G., Paz, R.R., Storti, M.A., Sonzogni, V., Marighetti, J. and Bortoli, M.D., 2010. Experimental and Numerical Study of The Aerodynamic Behavior of A Simplified Road Vehicle, MECOM 2010 - IX Congreso Argentino de Mecánica Computacional. II Congreso Sudamericano de Mecánica Computacional. CILAMCE 2010 - XXXI Congreso Ibero-Latino-Americano de Métodos Computacionales en la Ingeniería, Buenos Aires, Argentina, Mecánica Computacional, vol XXIX, pp. 3291 - 3303.
- [6] Lee, H.S-H, 2009. The Aerodynamic Effects of Passing Trains to Surrounding Objects and People: Safety of High-speed Ground Transportation Systems: Final Report, Washington, DC: U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration, Office of Railroad Policy and Development.
- [7] Lichtneger, P. and Ruck, B., 2015. Full scale experiments on vehicle induced transient loads on roadside plates, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 136, pp. 73-81.
- [8] Lichtneger, P. and Ruck, B., 2018. Full scale experiments on vehicle induced transient pressure loads on roadside walls, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 174, pp. 451-57.
- [9] Lichtneger, P. and Ruck, B., 2014. Wind loads on flat boards and walls induced by passing vehicles, Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", Karlsruhe.
- [10] Musa, Nor, Md., Osman, Kahar, and Hamat, A., Malik A., 2012. Renewable Energy from Induced Airflow Generated by Cruising Ground Vehicles in Tandem using RANS, Energy Procedia, 14, pp. 1877-82.
- [11] Quinn, A.D., Baker, C.J., and Wright, N.G., 2001a. Wind and vehicle induced forces on flat plates—Part 1: wind induced force, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 89 (9), pp. 817-29.
- [12] Quinn, A.D., Baker, C.J., and Wright, N.G. 2001b. 'Wind and vehicle induced forces on flat plates—Part 2: vehicle induced force', Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 89 (9), pp. 831-47.
- [13] Salvadori, S., Morbiato, T., Mattana, A., and Fusto, E., 2012. On the Characterization of Wind Profiles Generated by Road Traffic, The Seventh International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications (BBAA7), Shanghai, China.
- [14] Sanz-Andrés, A., Santiago-Prowald, J., Baker, C., and Quinn, A., 2003. Vehicle-induced loads on traffic sign panels, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 91 (7), pp. 925-42.
- [15] Sanz-Andrés, A., Laverón, A., Cuerva, A., and Baker, C., 2004a. Vehicle-induced force on pedestrians', Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 92 (2), pp. 185-98.
- [16] Sanz-Andrés, A., Laverón, A., Baker, C., and Quinn, A. 2004b. Vehicle induced loads on pedestrian barriers, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 92 (5), pp. 413-26.
- [17] Strachan, R.K., Knowles, K., and Lawson, N.J., 2004. A CFD and Experimental Study of an Ahmed Reference Model, SAE International.
- [18] Wang, D., Wang, B., and Chen, A., 2013a. Vehicle-induced aerodynamic loads on highway sound barriers part1: Field experiment, Wind and Structures An International Journal, 17, pp. 435-49.
- [19] Wang, D., Wang, B., and Chen, A., 2013b. Vehicle-induced aerodynamic loads on highway sound barriers part 2: Numerical and theoretical investigation, Wind and Structures An International Journal, 17, pp. 479-94.
- [20] Watkins, S., Saunders, J.W., and Hoffmann, P.H., 1995. Turbulence experienced by moving vehicles. Part I. Introduction and turbulence intensity, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 57 (1), pp. 1-17.
- [21] Xiang, H., Li, Y., Chen, S., and Li, C., 2017. A wind tunnel test method on aerodynamic characteristics of moving vehicles under crosswinds, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 163, pp. 15-23.