

Fenomena Keterbatasan Suspensi Pasif Sepeda Listrik Roda Tiga terhadap Pencapaian Standar Kenyamanan dan Keamanan pada *Bumpy Road*

Fahrul Ardiansyah^{1*}, Ferly Isnomo Abdi², Warju³, Sudirman Rizki Ariyanto⁴

¹Teknik Mesin, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Surabaya, 60231 Surabaya, Indonesia

^{2,3,4}Teknologi Rekayasa Otomotif, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Surabaya, 60231 Surabaya, Indonesia

ABSTRAK – Sepeda listrik roda tiga merupakan alternatif transportasi ramah lingkungan yang memerlukan sistem suspensi optimal untuk meningkatkan kenyamanan dan keamanan pengendara di jalan Indonesia yang masih banyak rusak dan bergelombang. Penelitian ini bertujuan menganalisis fenomena keterbatasan sistem suspensi pasif sepeda listrik roda tiga Aviator AT 230 terhadap pencapaian standar kenyamanan dan keamanan khususnya pada kondisi jalan *bumpy*. Metode penelitian dilakukan secara eksperimental berbasis simulasi menggunakan pemodelan *quarter-car* dan *software* MATLAB/Simulink dengan memvariasikan tiga mode kecepatan (Eco, Normal, Sport) pada profil jalan *bumpy*. Model matematis dibangun berdasarkan parameter kendaraan dan dianalisis untuk menghasilkan nilai RMS (*Root Mean Square*) percepatan vertikal sesuai Standar ISO 2631-1:1997. Hasil analisis menunjukkan bahwa semua kombinasi mode kecepatan menghasilkan RMS percepatan di atas $1,25 \text{ m/s}^2$ yang dikategorikan sebagai sangat tidak nyaman menurut Standar ISO 2631-1:1997, dengan peningkatan signifikan sebesar 265% dari mode Eco ke mode Sport. Selain itu, defleksi suspensi pada semua mode kecepatan tetap dalam batas aman secara struktural. Temuan ini membuktikan bahwa sistem suspensi pasif Aviator AT 230 memiliki keterbatasan dalam menjamin kenyamanan optimal, meskipun aman secara struktural. Penelitian ini merekomendasikan penggunaan mode Eco pada jalan gunduk untuk meningkatkan kenyamanan pengendara dan memberikan dasar bagi pengembangan strategi optimasi suspensi yang lebih adaptif di masa mendatang. Berbeda dengan penelitian terdahulu yang umumnya fokus pada kendaraan roda empat atau aspek desain struktural, penelitian ini secara khusus mengkaji respons dinamis suspensi pasif Aviator AT 230 pada *bumpy road*, menghasilkan profil performa kenyamanan sebagai referensi industri untuk optimasi kendaraan listrik roda tiga.

HISTORI ARTIKEL

Diterima: 21 Januari 2026

Revisi: 28 Januari 2026

Diterima: 10 Februari 2026

Diterbitkan: 31 Maret 2026

KATA KUNCI

Sepeda Listrik Roda Tiga,
Suspensi Pasif,
Quarter Car Model,
Bumpy Road,
MATLAB/Simulink

1.0 PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi transportasi modern telah mengalami pergeseran yang signifikan menuju alternatif berkelanjutan dan ramah lingkungan. Menurut laporan *Global EV Outlook 2023* dari *International Energy Agency* [1], sektor transportasi menyumbang sekitar 23% dari total emisi CO₂ global, di mana sebagian besar berasal dari kendaraan berbahan bakar minyak. Upaya pengembangan kendaraan listrik di Indonesia menjadi langkah strategis dalam mewujudkan transportasi yang lebih ramah lingkungan [2]. Sepeda listrik roda tiga banyak dipilih karena mampu mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil serta menekan emisi gas buang [3]. Data penjualan menunjukkan tren positif, dengan penjualan kendaraan listrik secara global mencapai 9 juta unit pada tahun 2022 [1], dan di Indonesia penjualan mencapai 15.437 unit dengan peningkatan 383,62% dibandingkan tahun sebelumnya [4]. Pemilihan sepeda listrik roda tiga juga didasarkan pada keunggulannya dalam aspek kenyamanan dan keamanan, dengan stabilitas yang lebih tinggi serta risiko kehilangan keseimbangan yang lebih rendah dibandingkan sepeda roda dua.

Keberadaan jalan rusak dan bergelombang yang masih sering dijumpai di Indonesia berpengaruh negatif terhadap kenyamanan maupun keselamatan pengendara. Menurut Badan Pusat Statistik tahun 2022, dari total 546.116 km panjang jalan di Indonesia, tercatat 15,9% atau sekitar 86.844 km berada dalam kondisi rusak berat. Ketidakrataan permukaan jalan, khususnya jalan bergelombang, memerlukan sistem suspensi yang efektif untuk meredam getaran dan menjaga kestabilan kendaraan [5]. Sistem suspensi memegang peranan krusial dalam menentukan kenyamanan dan kestabilan kendaraan dengan cara mengurangi gerakan osilasi seperti *rolling*, *pitching*, *bouncing*, dan *yawing* yang dapat meningkatkan risiko kecelakaan. Pada kendaraan seperti sepeda listrik roda tiga, sistem suspensi yang tidak optimal dapat

menyebabkan guncangan berlebih dan menurunkan stabilitas berkendara. Suspensi pasif, yang merupakan sistem konvensional tersusun atas pegas dan peredam tanpa mekanisme kontrol aktif, tetap menjadi pilihan utama pada kendaraan ringan karena efektivitas, kesederhanaan konstruksi, dan kemudahan perawatan.

Dalam perancangan sistem suspensi sepeda listrik roda tiga yang optimal, parameter keselamatan dan kenyamanan harus mempertimbangkan standar teknis internasional yang relevan. Suspensi pasif dikatakan optimal apabila memenuhi parameter *ride comfort* (kenyamanan) dan *safety* (keamanan) sesuai dengan standar ISO 2631-1:1997 [6] untuk evaluasi paparan getaran seluruh tubuh manusia (*whole-body vibration*). Penelitian terbaru menunjukkan bahwa sistem suspensi pasif masih menjadi tantangan utama dalam meningkatkan kenyamanan berkendara pada kendaraan listrik roda tiga, dengan studi [7] dan [8] menunjukkan bahwa evaluasi *ride comfort* menggunakan *quarter-car model* dan standar ISO 2631-1:1997 sangat penting untuk memastikan keselamatan dan kenyamanan pengguna. Untuk memastikan kinerja suspensi memenuhi standar tersebut, maka pada penelitian ini akan menggunakan *software* MATLAB/Simulink sebagai alat analisis dinamis yang efektif dalam mensimulasikan dan mengevaluasi tingkat kenyamanan pada kendaraan.

MATLAB (*Matrix Laboratory*) adalah perangkat lunak yang digunakan untuk analisis dan perhitungan numerik, serta merupakan bahasa pemrograman tingkat lanjut yang dikembangkan dengan dasar konsep matriks dan operasinya [9]. Dengan memanfaatkan kemampuan MATLAB/Simulink, penelitian ini mensimulasikan respons sistem suspensi pasif sepeda listrik roda tiga Aviator AT 230 terhadap kondisi jalan gunduk (*bumpy road*) dengan variasi mode kecepatan operasional (Eco, Normal, Sport), kemudian mengevaluasi hasil berdasarkan Standar ISO 2631-1:1997. Kontribusi utama penelitian ini adalah menganalisis efektivitas suspensi pasif dalam meningkatkan kenyamanan dan keamanan berkendara melalui pendekatan simulasi numerik yang sistematis, yang sebelumnya belum banyak dilakukan pada kendaraan roda tiga. Berbeda dengan penelitian terdahulu yang umumnya fokus pada kendaraan roda empat atau aspek desain struktural, penelitian ini secara khusus mengkaji respons dinamis suspensi pasif Aviator AT 230 pada *bumpy road*, menghasilkan kurva performa kenyamanan sebagai referensi bagi industri dalam pengembangan dan optimasi kendaraan serupa.

2.0 METODE PENELITIAN

2.1 Jenis Penelitian

Jenis penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah penelitian eksperimen. Fokus penelitian diarahkan untuk menganalisis tingkat kenyamanan dan keamanan pada sistem suspensi sepeda listrik roda tiga dengan menggunakan model seperempat kendaraan (*quarter-car*) berbasis simulasi, yang kemudian dibandingkan dengan hasil dari simulasi *software* numerik.

2.2 Variabel Penelitian

Objek penelitian ini adalah sepeda listrik roda tiga Aviator AT 230 yang diproduksi oleh Pacific Bike dan dipasarkan melalui kanal ritel nasional, dan mode kecepatan yang akan diujikan pada penelitian ini (Mode Eco: kecepatan maksimal 20 km/jam, Mode Normal: kecepatan maksimal 30 km/jam, dan Mode Sport: kecepatan maksimal 40 km/jam).



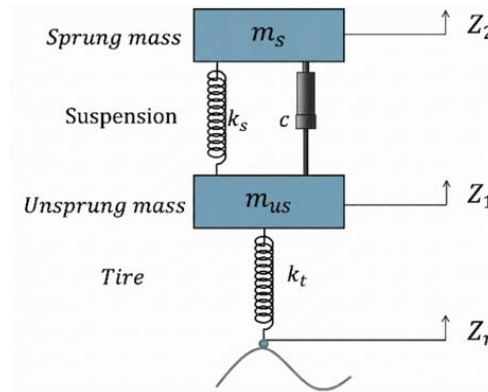
Gambar 1. Ilustrasi Sepeda Listrik Roda Tiga Aviator AT 230

2.3 Prosedur Penelitian

Pada penelitian ini menggunakan model seperempat kendaraan (*quarter-car*) untuk kendaraan sepeda listrik roda tiga Aviator AT 230 berbasis simulasi MATLAB/Simulink. Sebelum melakukan simulasi, terdapat beberapa langkah - langkah yang harus dilakukan antara lain:

1. Pemodelan Sistem Suspensi

Pemodelan konvensional struktur getaran merupakan metode dasar untuk menganalisis respons dinamis sistem mekanik terhadap gaya luar menggunakan hukum Newton. Penelitian ini bertujuan menunjukkan bahwa metode konvensional dapat memahami perilaku dinamis sistem dan menjadi dasar pengembangan pemantauan kondisi berbasis getaran. Berikut adalah pemodelan konvensional *quarter-car* suspensi sepeda listrik roda tiga Aviator AT 230.



Gambar 2. Pemodelan *Quarter Car* Suspensi

2. Pemodelan Matematis

Sistem suspensi pasif sepeda listrik roda tiga Aviator AT 230 dimodelkan secara matematis menggunakan pendekatan *quarter-car model* dengan dua derajat kebebasan untuk mendapatkan persamaan gerak yang merepresentasikan dinamika vertikal kendaraan dan dapat diimplementasikan dalam simulasi MATLAB/Simulink. Berdasarkan pemodelan konvensional yang ditampilkan pada Gambar 2, bisa diperoleh persamaan matematis sebagai berikut.

$$m_s \ddot{Z}_2 = c(\dot{Z}_1 - \dot{Z}_2) + K_s(Z_1 - Z_2) \quad (1)$$

$$m_{us} \ddot{Z}_1 = c(\dot{Z}_2 - \dot{Z}_1) + K_s(Z_2 - Z_1) + K_t(Z_r - Z_1) \quad (2)$$

3. Nilai Parameter Kendaraan

Parameter yang digunakan dalam penelitian *quarter car* sepeda listrik roda tiga Aviator AT 230 ini sebagai berikut:

Tabel 1. Parameter *Quarter Car* Suspensi

Notasi	Keterangan	Nilai
M_s	<i>Sprung mass</i>	Massa total
	M_{s1} = roda depan	$= M_{s1} + M_{s2} + M_{s3}$
	M_{s2} = roda belakang kiri	$= 30 + 33 + 33$
	M_{s3} = roda belakang kanan	$= 96 \text{ kg}$
M_{us_f}	<i>Unsprung mass front</i>	4 kg
M_{us_r}	<i>Unsprung mass rear</i>	$2,8 \text{ kg}$
c	<i>Stiffnes koefisien damper</i>	518 Ns/m
k_s	<i>Stiffnes koefisien suspension</i>	13.900 N/m
k_t	<i>Stiffnes koefisien ban</i>	85.000 N/m
	Berat pengendara	60 kg

Parameter sistem suspensi diperoleh dari tiga sumber utama, yaitu data pabrikan melalui buku panduan pengguna sepeda listrik roda tiga Aviator AT 230, pengukuran eksperimental langsung di laboratorium pada unit kendaraan, dan hasil penelitian jurnal terdahulu tentang sistem suspensi pada kendaraan roda tiga sejenis.

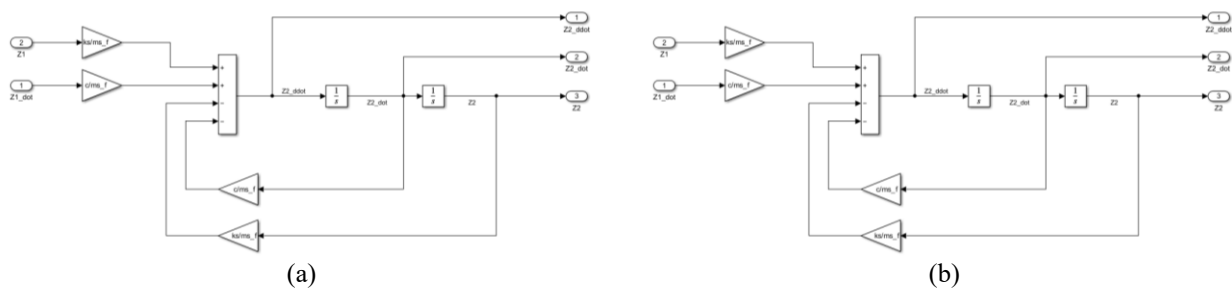
4. Persamaan Pemodelan Gangguan Jalan

Pemodelan gangguan jalan (*road disturbance*) digunakan sebagai *input* ketidakrataan permukaan berupa *bumpy road*, dengan parameter ketinggian (H) sebesar 0,1 meter, lebar (l) 5 meter, dan kecepatan kendaraan (v) 20, 30 dan 40 km/jam, sesuai dengan yang dijelaskan oleh [10]. Persamaan yang digunakan dapat dituliskan sebagai berikut:

$$w(t) = \begin{cases} \frac{H}{2} \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi v}{l} t\right) \right), & \text{untuk } 0 \leq t \leq \frac{l}{v} \\ 0, & \text{untuk } t > \frac{l}{v} \end{cases} \quad (3)$$

5. Pembuatan Blok Simulink

Tahap selanjutnya adalah pembuatan blok Simulink berdasarkan persamaan *state-space* yang telah dikonversi, menggunakan komponen-komponen dasar Simulink untuk merepresentasikan dinamika *sprung mass*, *unsprung mass*, dan interaksi suspensi dengan tujuan menghasilkan respon sistem yang dapat dianalisis terhadap Standar ISO 2631-1:1997.



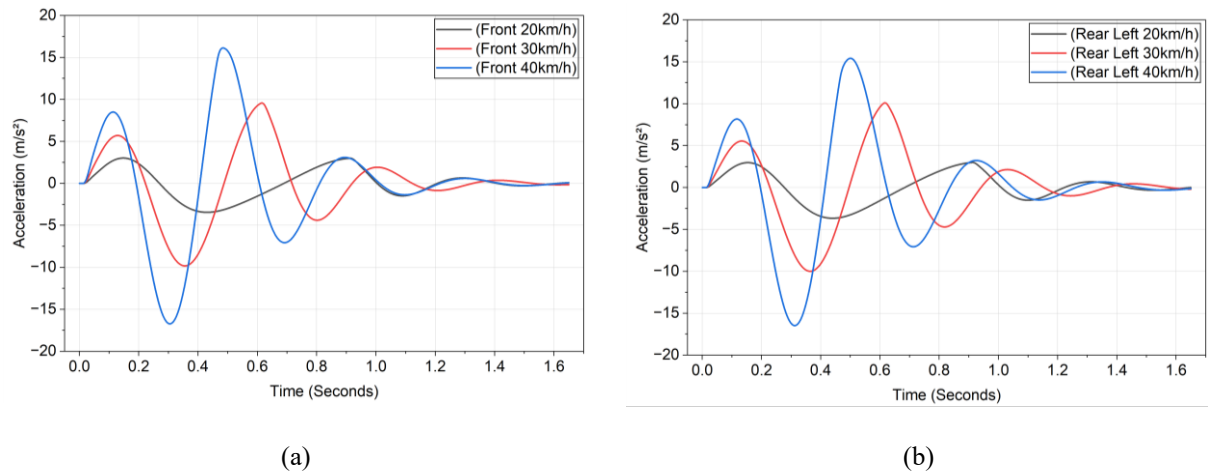
Gambar 3. Blok Simulink pada Sepeda Listrik Roda Tiga (a) *Sprung Mass* dan (b) *Unsprung Mass*

3.0 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Acceleration pada Bumpy Road

Tabel 2. Hasil Simulasi *Acceleration* Roda Depan dan Roda Belakang

Mode Kecepatan	Hasil Simulasi <i>Acceleration</i>					
	Roda Depan			Roda Belakang		
	Maksimum (m/s ²)	Minimum (m/s ²)	RMS (m/s ²)	Maksimum (m/s ²)	Minimum (m/s ²)	RMS (m/s ²)
Eco (20 km/jam)	3.020e+00	-3.444e+00	1.736e+00	2.995e+00	-3.661e+00	1.783e+00
Normal (30 km/jam)	9.571e+00	-9.824e+00	4.082e+00	1.011e+01	-9.990e+00	4.234e+00
Sport (40 km/jam)	1.613e+01	-1.672e+01	6.336e+00	1.543e+01	-1.647e+01	6.301e+00

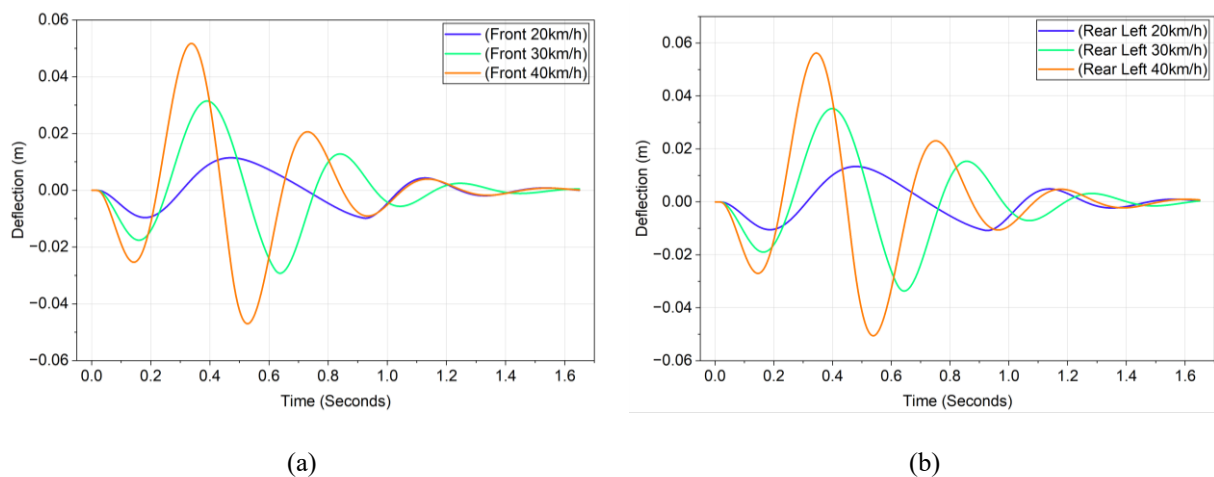


Gambar 4. Grafik Acceleration pada Bumpy Road (a) Roda depan dan (b) Roda belakang

3.2 Deflection pada Bumpy Road

Tabel 3. Hasil Simulasi *Deflection* Roda Depan dan Roda Belakang

Mode Kecepatan	Hasil Simulasi <i>Deflection</i>					
	Roda Depan			Roda Belakang		
	Maksimum (m)	Minimum (m)	Rata-rata (m)	Maksimum (m)	Minimum (m)	Rata-rata (m)
Eco (20 km/jam)	1.147e-02	-9.820e-03	1.956e-05	1.340e-02	-1.078e-02	2.191e-05
Normal (30 km/jam)	3.146e-02	-2.922e-02	-9.783e-06	3.528e-02	-3.363e-02	-3.314e-05
Sport (40 km/jam)	5.174e-02	-4.699e-02	1.775e-05	5.626e-02	-5.052e-02	7.698e-06

Gambar 5. Grafik *Deflection* pada Bumpy Road (a) Roda depan dan (b) Roda belakang

3.3 Analisis Tingkat Kenyamanan Menurut Standar ISO 2631-1:1997

Standar ISO 2631-1:1997 mendefinisikan tingkat kenyamanan kendaraan berdasarkan nilai RMS *acceleration* (*weighted root mean square*) dalam satuan m/s^2 . Klasifikasi kenyamanan adalah sebagai berikut:

Tabel 4. Klasifikasi Kenyamanan Standar ISO 2631-1:1997

RMS Percepatan (m/s ²)	Kategori Kenyamanan	Deskripsi
< 0.315	Nyaman	Tidak ada keluhan, nyaman untuk berkendara lama
0.315 - 0.63	Agak Tidak Nyaman	Sedikit kelelahan, perjalanan panjang mulai tidak nyaman
0.63 - 1.25	Tidak Nyaman	Ketidaknyamanan yang jelas, perjalanan lama tidak disarankan
> 1.25	Sangat Tidak Nyaman	Sangat mengganggu, berkendara dibatasi

Berdasarkan Tabel 2, RMS percepatan pada mode eco mencapai 1.736 m/s², melampaui ambang kenyamanan Standar ISO 2631-1:1997. Peningkatan RMS percepatan seiring bertambahnya kecepatan disebabkan oleh meningkatnya energi kinetis roda yang dikonversi menjadi gaya impulsif lebih besar saat menabrak gundukan. Pada mode normal (30 km/jam), energi kinetis meningkat 2,25 kali lipat dibanding mode eco, menghasilkan gaya impulsif yang melampaui kapasitas peredaman efektif, sehingga RMS percepatan meningkat drastis menjadi 4.082 m/s² (+135%). Pada mode sport (40 km/jam), gaya impulsif yang ekstrem dikombinasikan dengan saturasi kapasitas damper, nonlinearitas pegas pada defleksi besar (5,174 cm), dan kehilangan traksi roda, menghasilkan RMS percepatan tertinggi 6.336 m/s² (+265% dari mode eco). Peningkatan RMS percepatan ini menunjukkan bahwa suspensi pasif semakin tidak mampu mereduksi guncakan seiring bertambahnya kecepatan, membuat kendaraan tidak aman untuk digunakan pada mode sport di jalan bergelombang.

3.4 Analisis Keamanan (Safety) - Road Holding dan Suspension Travel

Keamanan kendaraan dilihat dari dua aspek utama yaitu *suspension travel* (defleksi suspensi) yang mengukur kemampuan kendaraan dalam mengabsorpsi gangguan jalan, dan *road holding* (traksi roda) yang memastikan roda selalu dalam kontak dengan jalan.

Tabel 5. Analisis Defleksi Suspensi terhadap Batas Aman

Mode Kecepatan	Defleksi Maks (m)	Batas Aman (m)	Status	Keterangan
Eco (20 km/jam)	0.0134	0.08	Aman	Nilai defleksi jauh di bawah batas aman. Suspensi bekerja ringan dan tidak berisiko <i>bottoming out</i> .
Normal (30 km/jam)	0.0352	0.08	Aman	Defleksi meningkat namun masih dalam rentang aman. Sisa <i>travel</i> suspensi masih cukup besar.
Sport (40 km/jam)	0.0562	0.08	Aman	Defleksi tertinggi terjadi di sini (mencapai ~70% batas aman), tetapi masih tidak terjadi <i>bottoming out</i> . Suspensi masih mampu mengakomodasi guncangan ekstrem tanpa kerusakan mekanis.

Catatan:

1. Nilai defleksi maksimum diambil dari nilai terbesar (*absolut*) antara roda depan atau belakang pada tabel hasil simulasi.
2. Batas aman (0.08 m) merupakan asumsi standar *travel* suspensi kendaraan roda tiga (80-100 mm).

4.0 KESIMPULAN

Analisis sistem suspensi pasif sepeda listrik roda tiga Aviator AT 230 pada *bumpy road* menunjukkan *trade-off* antara keamanan dan kenyamanan. Pada mode Eco (20 km/jam), RMS percepatan mencapai 1,736 m/s² dengan defleksi 0,01147 m, sedangkan mode Sport (40 km/jam) meningkat drastis menjadi 6,336 m/s², peningkatan 265% dengan defleksi 0,05174 m. Semua nilai berada dalam kategori "Sangat Tidak Nyaman" menurut Standar ISO 2631-1:1997. Dari aspek keamanan, sistem suspensi tetap aman secara struktural pada semua mode dengan defleksi yang tidak melampaui batas toleransi material, sehingga kendaraan tetap stabil dan *road holding* terjaga. Namun, dari sisi kenyamanan pengendara, peningkatan intensitas percepatan pada mode Sport menciptakan guncangan berlebih yang melampaui standar kenyamanan internasional, sehingga merekomendasikan penggunaan mode Eco pada jalan bergunduk (*bumpy*). Kesimpulannya, suspensi pasif Aviator AT 230 terbukti aman secara mekanis namun terbatas dalam memberikan kenyamanan optimal, sehingga pengembangan ke suspensi semi-aktif atau aktif sangat diperlukan untuk meningkatkan adaptabilitas dan kenyamanan berkendara.

5.0 REFERENSI

- [1] I. E. Agency, “Global EV Outlook 2023,” *IEA Rep.*, 2023.
- [2] A. Efendi, “Rancang Bangun Mobil Listrik Sula Politeknik Negeri Subang,” *J. Pendidik. Teknol. dan Kejuru.*, vol. 17, no. 1, p. 75, 2020, doi: 10.23887/jptk-undiksha.v17i1.23057.
- [3] A. A. Ar-razy, F. Anam, A. Rifqi, and H. Andito, “Analisis Perbandingan Pemakaian Mobil Listrik dan Mobil Konvensional di Indonesia dari Segi Keunggulan dan Biaya,” vol. 2, no. 1, pp. 1–7, 2025.
- [4] D. Ardiyanti, F. Kurniawan, U. Raokter, and R. Wikansari, “Analisis Penjualan Mobil Listrik Di Indonesia Dalam Rentang Waktu 2020-2023,” *ECOMA J. Econ. Manag.*, vol. 1, no. 3, pp. 114–122, 2023, doi: 10.55681/ecoma.v1i3.26.
- [5] G. Gunawan, “Optimasi Kinerja Suspensi Untuk Meningkatkan Kenyamanan Dengan Variasi Tekanan Ban Dan Berat Pada Kendaraan Innova 2000 Cc,” *J. Keselam. Transp. Jalan (Indonesian J. Road Safety)*, vol. 6, no. 2, pp. 38–47, 2019, doi: 10.46447/ktj.v6i2.31.
- [6] I. O. for Standardization, “Mechanical vibration and shock — Evaluation of human exposure to whole-body vibration — Part 1: General requirements,” 1997, *International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland*. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/7612.html>
- [7] VanCuong Bui, Xiaofeng Yang, Yujie Shen, and Tianyi Zhang, “Control of semi-active inertial suspension system for hub motor driven vehicles,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng.*, vol. 240, no. 1, pp. 187–204, Feb. 2025, doi: 10.1177/09544070251315857.
- [8] T. D. Hoang, N. Thi, H. Ngoc, L. Van Quynh, N. D. Tan, and T. M. Huong, “Optimal Design Parameters of In-Wheel Motor Suspension System using Genetic Algorithm,” vol. 1997, no. 6, pp. 12–15, 2023.
- [9] M. Fatwa, R. Rizki, P. Sriwinarty, and E. Supriyadi, “Pengaplikasian Matlab pada Perhitungan Matriks,” *Papanda J. Math. Sci. Res.*, vol. 1, no. 2, pp. 81–93, 2022, doi: 10.56916/pjmsr.v1i2.260.
- [10] J. T. Mesin *et al.*, “Kineto-Dynamic Pada Variable Geometry Suspension (VGS) Ferly Isnomo Abdi Unggul Wasiwitono Heru Arizal Ali Hasbi Ramadani,” pp. 57–62, 2010.