

Karakterisasi Osilasi *Single Degree Of Freedom* Suspensi Kendaraan Terhadap Eksitasi Permukaan Jalan Berbasis Akselerometer *Smartphone*

Ananta Kusuma Yoga Pratama

Universitas 17 Agustus 1945 Banyuwangi, Jl. Adi Sucipto 26 Banyuwangi

Email Correspondent : ananta@untag-banyuwangi.ac.id

Abstract

The vehicle suspension system can be modeled as a damped single degree of freedom (SDOF) vibration system; however, validation of its dynamic characteristics generally requires specialized and relatively expensive instruments that are not always available for field measurements. This study proposes a smartphone accelerometer-based measurement approach as a low-cost method to characterize the in-situ dynamic response of an SDOF vehicle suspension system. The main contribution of this study is to demonstrate that SDOF oscillation characterization can explain resonance phenomena induced by road surface excitation, thereby bridging vibration signal analysis with the mechanical theory-based physical foundations of vehicle suspension systems. Vertical acceleration (z-axis) was measured by placing a smartphone on the vehicle dashboard, and the signals were analyzed in the time domain using root mean square (RMS) and in the frequency domain using power spectral density (PSD) analysis to identify vibration energy distribution and dominant system frequencies. The results show that the RMS acceleration on ordinary roads is approximately 42% higher than that on highways, and the PSD magnitude on ordinary roads is consistently higher over almost the entire frequency range. These results indicate that the combined RMS and PSD characteristics derived from smartphone data correlate with road surface roughness and provide consistent estimates of the dynamic response of the SDOF system.

Keywords: Oscillation, PSD, RMS, SDOF, Smartphone

Abstrak

Sistem suspensi kendaraan dapat dimodelkan sebagai sistem getaran teredam single degree of freedom (SDOF), namun validasi karakteristik dinamis model ini umumnya memerlukan instrumen khusus yang relatif mahal dan tidak selalu tersedia untuk pengukuran lapangan. Penelitian ini mengusulkan pendekatan pengukuran berbasis akselerometer smartphone sebagai metode berbiaya rendah untuk mengkarakterisasi respons dinamis sistem SDOF suspensi kendaraan secara in-situ. Kontribusi utama penelitian ini adalah menunjukkan karakterisasi osilasi SDOF dalam menjelaskan fenomena resonansi akibat eksitasi permukaan jalan yang bermanfaat untuk menjembatani analisis sinyal getaran dengan dasar fisika sistem suspensi kendaraan berbasis teori mekanika. Percepatan vertikal (sumbu z) diukur dengan menempatkan smartphone pada dashboard kendaraan, kemudian sinyal dianalisis pada domain waktu menggunakan Root Mean Square (RMS) dan pada domain frekuensi menggunakan analisis Power Spectral Density (PSD) untuk mengidentifikasi distribusi energi getaran dan frekuensi dominan sistem. Hasil menunjukkan bahwa nilai RMS akselerasi pada jalan biasa lebih tinggi sekitar 42% dibandingkan jalan tol, serta magnitudo PSD pada jalan biasa secara konsisten lebih besar pada hampir seluruh rentang frekuensi. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi parameter RMS dan karakteristik PSD dari data smartphone berkorelasi dengan tingkat kekasaran permukaan jalan dan serta memberikan estimasi yang konsisten terhadap respons dinamis sistem SDOF.

Kata Kunci: Osilasi, PSD, RMS, SDOF, Smartphone

PENDAHULUAN

Sistem suspensi kendaraan merupakan komponen kritis yang berfungsi meredam getaran akibat ketidakrataan permukaan

jalan, sehingga memberikan kenyamanan berkendara dan menjaga stabilitas kendaraan. Dari perspektif fisika, sistem suspensi dapat dimodelkan sebagai sistem osilasi *single*

degree of freedom (SDOF) dengan gerakan vertikal kendaraan direpresentasikan sebagai sistem massa-pegas-peredam (*mass-spring-damper system*) yang mengalami osilasi terpaksa (*forced oscillation*) akibat eksitasi dari ketidakrataan permukaan jalan (Xue dkk., 2017; Koichi, 2017; Botshekan dkk., 2021). Pendekatan SDOF menyederhanakan dinamika kendaraan yang kompleks menjadi model yang dapat dianalisis secara fundamental, namun tetap mampu menangkap karakteristik respons dinamis yang esensial untuk evaluasi kondisi jalan (Botshekan dkk., 2020).

Validitas pendekatan SDOF untuk karakterisasi sistem suspensi kendaraan didasarkan pada beberapa pertimbangan fisika dan praktis. Pertama, gerakan vertikal (sumbu-z) kendaraan merupakan mode dominan dalam respons terhadap profil jalan, terutama pada kecepatan berkendara normal dan kondisi jalan yang relatif lurus (Rana dan Asaduzzaman, 2021). Kedua, untuk analisis respons frekuensi pada rentang 1-15 Hz yang merupakan rentang karakteristik sistem suspensi kendaraan, kopling antara gerakan vertikal dengan gerakan *pitch* dan *roll* dapat diabaikan sebagai aproksimasi orde pertama.

Pengukuran dan karakterisasi getaran kendaraan secara tradisional memerlukan peralatan khusus seperti akselerometer berkualitas tinggi dan sistem akuisisi data yang mahal (K. C. P. Wang, 2000). Namun, perkembangan teknologi sensor pada *smartphone* telah membuka peluang baru untuk merekam percepatan getaran kendaraan, sehingga membuka peluang analisis respons dinamis kendaraan secara praktis dan ekonomis (Opara dkk., 2021). Data percepatan vertikal yang diperoleh dapat dianalisis pada domain frekuensi

menggunakan *Power Spectral Density* (PSD) untuk mengidentifikasi distribusi energi getaran serta frekuensi resonansi yang muncul akibat eksitasi permukaan jalan (Ahmed dkk., 2022).

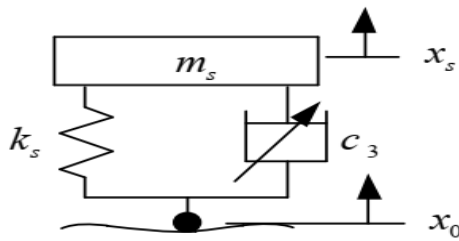
Beberapa penelitian sebelumnya telah mendemonstrasikan aplikasi *smartphone* untuk karakterisasi permukaan jalan (Alqaydi dkk., 2021; Chen dan Zhang, 2021; Shrestha dkk., 2024). Namun pendekatannya berfokus pada pengembangan model empiris hubungan antara indeks getaran, kecepatan, dan IRI, tanpa meninjau respons dinamis sistem suspensi sebagai sistem osilasi fisik yang mendasari sinyal getaran yang terukur. Pada penelitian ini, telah ditunjukkan model pendekatan karakterisasi osilasi SDOF untuk menjelaskan fenomena resonansi akibat eksitasi permukaan jalan. Pendekatan ini penting untuk menjembatani analisis sinyal getaran dengan dasar fisika sistem suspensi, sehingga interpretasi hasil tidak hanya bersifat deskriptif, tetapi juga memiliki landasan mekanika yang jelas. Dengan demikian, karakterisasi osilasi SDOF diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih sistematis mengenai bagaimana eksitasi permukaan jalan memengaruhi respons getaran vertikal kendaraan.

METODE

Model SDOF

Penelitian ini menggunakan pendekatan model SDOF *quarter-car model* (Turkay dan Akcay, 2005) untuk mengkarakterisasi respons dinamis sistem suspensi kendaraan terhadap eksitasi permukaan jalan. Model SDOF merepresentasikan sistem suspensi sebagai sistem massa-pegas-peredam dengan satu

derajat kebebasan vertikal, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Model pegas-massa tunggal

Kekakuan ban diasumsikan sangat besar (mendekati tak hingga) dibandingkan dengan kekakuan pegas suspensi k_s . Konsekuensinya, massa tak terpegas (unsprung mass) dapat diabaikan (dihilangkan) dari model. Parameter m_s merepresentasikan massa terpegas (*sprung mass*), dan c_3 adalah koefisien redaman kubik. Persamaan gerak untuk model tersebut dinyatakan sebagai berikut:

$$m_s \ddot{x}_s + c_3 (\dot{x}_s - \dot{x}_0)^3 + k_s (x_s - x_0) = 0 \quad (1)$$

dengan x_0 adalah eksitasi permukaan jalan, x_s perpindahan massa kendaraan. Namun, lebih mudah untuk mempertimbangkan gerak relatif antara massa terisolasi dan masukan dasar (*base input*), yaitu $z = x_s - x_0$. Dengan demikian, Persamaan (1) menjadi

$$m_s \ddot{z} + c_3 \dot{z}^3 + k_s z = -m_s \ddot{x}_0 \quad (2).$$

Langkah eksperimen

Pengukuran respons dinamis sistem suspensi SDOF dilakukan menggunakan sensor akselerometer yang terintegrasi pada *smartphone*, sehingga metode ini bersifat berbiaya rendah, portabel, dan memungkinkan pelaksanaan pengukuran secara *in situ*. Meskipun memiliki keterbatasan dibandingkan akselerometer laboratorium, berbagai studi menunjukkan bahwa data akselerometer *smartphone* berkorelasi signifikan dengan parameter getaran dan indeks kekasaran jalan (Sandamal dan Pasindu, 2020; Wasiq dkk.,

2025; Zeng dkk., 2018). Oleh karena itu, sensor *smartphone* dapat dipandang sebagai instrumen pengukuran yang relatif andal untuk karakterisasi respons dinamis di lapangan, meskipun tidak setara dengan sensor laboratorium dalam hal ketelitian absolut.

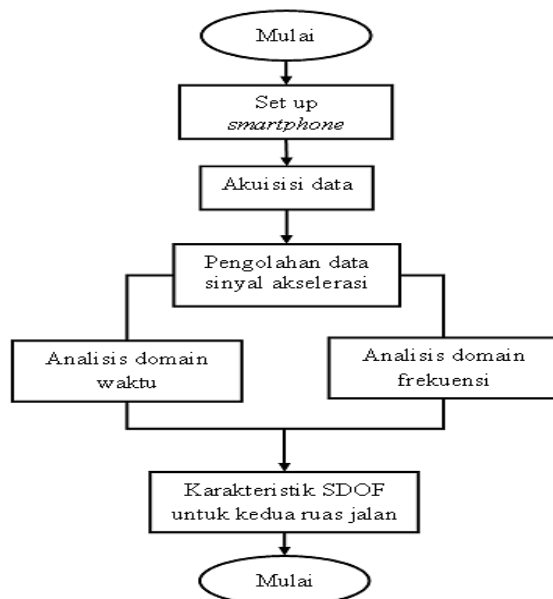
Spesifikasi akselerometer yang digunakan meliputi rentang pengukuran $\pm 2g$, resolusi 0,01 sekon dan frekuensi sampling 100 Hz. Frekuensi sampling yang memadai (umumnya ≥ 50 Hz) diperlukan untuk menangkap komponen frekuensi tinggi dari respons SDOF sesuai dengan teorema Nyquist (G. Wang dkk., 2020).

Kendaraan yang digunakan dalam eksperimen adalah jenis *MultiPurpose Vehicle* (MPV) tahun 2018. Meskipun parameter suspensi spesifik (massa (m), konstanta pegas (k), redaman (c)) tidak diidentifikasi secara eksplisit dalam penelitian ini, respons akselerasi yang diukur merepresentasikan perilaku sistem SDOF secara keseluruhan dapat diidentifikasi dari analisis spektral data akselerasi. *Smartphone* dipasang pada posisi kaca depan dengan orientasi sumbu-z akselerometer sejajar dengan arah vertikal kendaraan. Orientasi yang tepat sangat penting karena akselerasi vertikal (a_z) merupakan representasi langsung dari respons SDOF sistem suspensi. *Smartphone* diamankan dengan *holder* yang rigid untuk meminimalkan getaran relatif antara perangkat dan kendaraan, sehingga memastikan bahwa akselerasi yang terukur merepresentasikan respons SDOF massa tersprung kendaraan, ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Setup sensor pada kendaraan uji

Akuisisi data



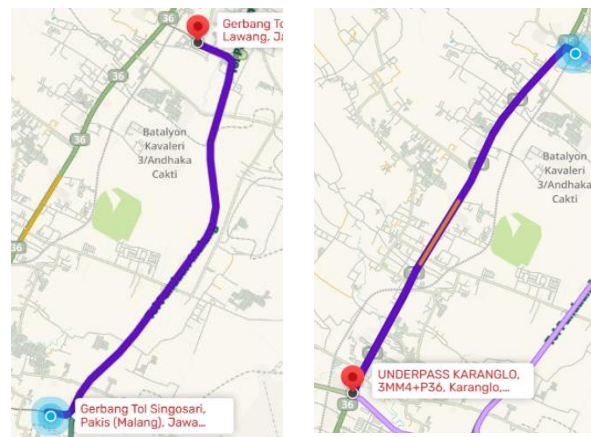
Gambar 3. Bagan alir penelitian.

Diagram alir penelitian, ditunjukkan pada Gambar 4. Akuisisi data respons SDOF dilakukan pada dua kondisi jalan yang berbeda untuk membandingkan karakteristik eksitasi dan respons osilasi sistem:

1. Jalan Tol (*Toll Road*): Segmen jalan tol Lawang-Singosari sejauh 10 km (ditampilkan pada Gambar 4a).
2. Jalan Reguler (*Regular Road*): Segmen jalan Karanglo hingga exit tol Lawang sejauh 9 km (ditampilkan pada Gambar 4b).

Pemilihan segmen jalan merepresentasikan karakteristik permukaan jalan yang kontras, yaitu jalan tol yang merepresentasikan kondisi permukaan relatif

halus dan jalan biasa yang merepresentasikan kondisi permukaan dengan tingkat ketidakrataan lebih tinggi. Pemilihan dua tipe segmen ini bertujuan untuk mengevaluasi sensitivitas respons dinamis sistem suspensi terhadap variasi tingkat eksitasi permukaan jalan, sehingga perbedaan karakteristik getaran dapat dianalisis secara lebih jelas dan bermakna. Jarak tempuh pada masing-masing segmen ditetapkan cukup panjang untuk memperoleh data getaran yang representatif dan stabil secara statistik, serta memungkinkan analisis spektral menggunakan *Power Spectral Density* (PSD) dengan resolusi frekuensi yang memadai.



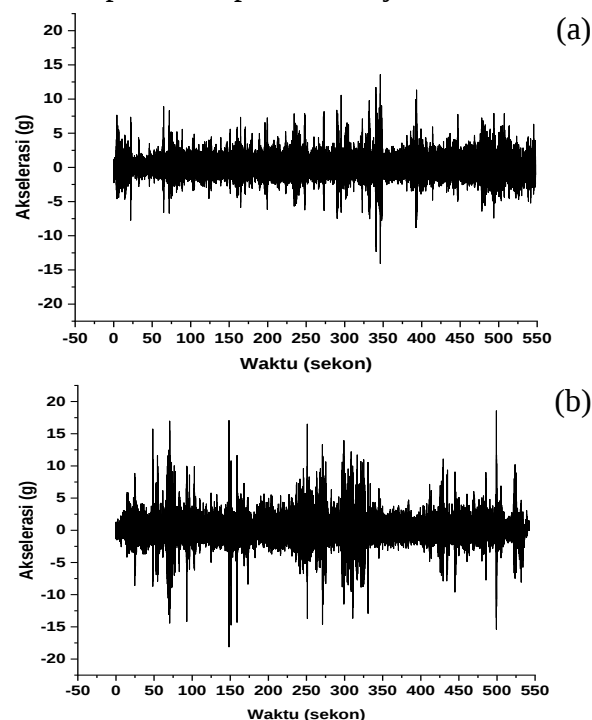
Gambar 4. Jalur pengujian a) ruas jalan tol, b) ruas jalan raya

Untuk setiap kondisi jalan, kendaraan diusahakan melaju dengan kecepatan 60 km/jam. Kecepatan kendaraan dijaga relatif konstan untuk meminimalkan variabilitas yang tidak terkait dengan karakteristik eksitasi jalan (Rana dan Asaduzzaman, 2021). Data akselerasi sumbu-z (vertikal) direkam secara kontinu selama perjalanan menggunakan dengan frekuensi sampling. Setiap kondisi jalan diukur dalam 2 kali perjalanan untuk memastikan reproduktibilitas data dan mengurangi pengaruh variabilitas acak (Ahmed dkk., 2022). Total durasi pengukuran untuk setiap kondisi adalah 9

menit, menghasilkan dataset yang cukup besar untuk analisis statistik dan spektral yang robust.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengukuran percepatan arah vertikal (sumbu z) dilakukan menggunakan sensor akselerometer pada *smartphone* yang ditempatkan pada dashboard kendaraan. Sinyal percepatan yang direkam menampilkan respons vertikal kendaraan terhadap eksitasi permukaan jalan.



Gambar 5. Karakterisasi respons akselerasi vertikal (sumbu z) pada a) ruas jalan tol, b) ruas jalan raya (biasa)

Karakteristik respons akselerasi vertikal (sumbu-z) sistem suspensi kendaraan terhadap eksitasi permukaan jalan ditunjukkan pada Gambar 5a untuk jalan tol dan Gambar 5b untuk jalan biasa. Analisis domain waktu memberikan informasi langsung tentang perilaku osilasi SDOF sistem suspensi dalam merespons fungsi pemaksa yang berasal dari profil kekasaran jalan.

Analisis domain waktu (*time domain analysis*)

Analisis domain waktu dilakukan menggunakan sinyal akselerasi vertikal yang telah melalui tahap pra-pemrosesan, meliputi penghilangan komponen offset dan penyaringan (*filtering*) untuk mereduksi noise frekuensi tinggi yang tidak terkait dengan respons dinamis sistem suspensi. Nilai RMS dihitung dari sinyal akselerasi hasil penyaringan, sehingga merepresentasikan energi getaran yang relevan secara fisis.

Sinyal akselerasi vertikal untuk jalan tol menunjukkan karakteristik osilasi dengan amplitudo yang relatif kecil dan konsisten sepanjang waktu pengukuran. Nilai akselerasi berkisar antara -14,1 hingga 13,6 g dengan nilai RMS (*root mean square*) sebesar 1,3 g. Pola temporal menunjukkan fluktuasi yang relatif halus dengan sedikit kejadian transien yang signifikan, mengindikasikan bahwa profil permukaan jalan tol memiliki tingkat kekasaran yang minimal dan terdistribusi secara relatif merata. Dari perspektif osilasi SDOF, amplitudo respons yang kecil mengindikasikan bahwa gaya eksitasi yang berasal dari kekasaran profil jalan memiliki magnitudo yang rendah, sehingga perpindahan dan akselerasi arah sumbu z sistem massa-pegas-peredam tetap dalam rentang yang kecil.

Sebaliknya, pada jalan biasa, sinyal akselerasi vertikal menunjukkan variabilitas yang jauh lebih tinggi dengan kejadian transien yang lebih sering dan amplitudo puncak yang lebih besar. Nilai akselerasi berkisar antara -18,1 hingga 18,6 g, dengan nilai RMS sebesar 1,7 g, yang secara signifikan lebih tinggi dibandingkan jalan tol

(peningkatan sekitar 42%). Pola temporal menunjukkan fluktuasi yang lebih kasar dengan banyak kejadian impulsif yang berkorespondensi dengan profil kekasaran lokal seperti lubang (*potholes*), retakan, atau ketidakrataan permukaan lainnya. Kejadian transien ini menghasilkan eksitasi impulsif pada sistem SDOF, yang memicu respons osilasi teredam (*damped oscillation*) dengan amplitudo awal yang besar yang kemudian meluruh secara eksponensial.

Perbandingan langsung antara kedua jenis jalan menunjukkan bahwa jalan biasa menghasilkan respons akselerasi dengan amplitudo rata-rata yang 0,4 kali lebih besar dibandingkan jalan tol. Hal ini mengindikasikan bahwa energi eksitasi yang ditransfer dari permukaan jalan ke sistem suspensi jauh lebih tinggi pada jalan biasa (Botshekan dkk., 2020).

Analisis domain frekuensi (*frequency domain analysis*)

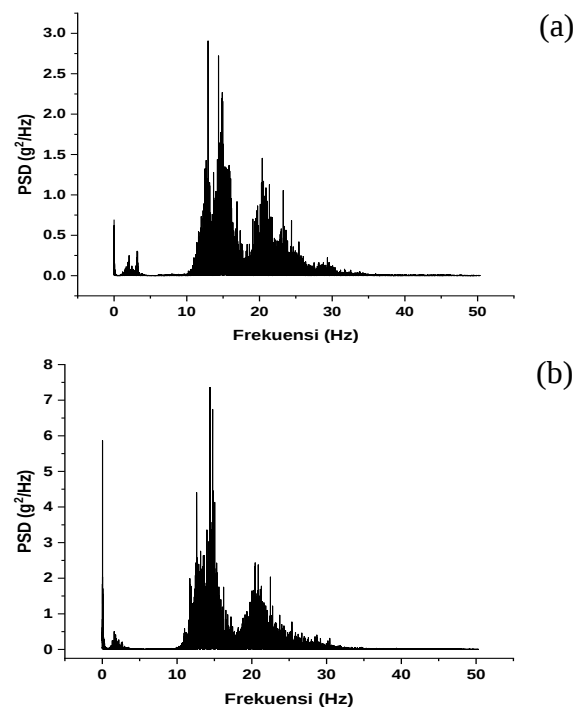
Transformasi sinyal akselerasi dari domain waktu ke domain frekuensi melalui analisis *Power Spectral Density* (PSD) memberikan wawasan mendalam tentang distribusi energi getaran di berbagai komponen frekuensi dan memungkinkan identifikasi karakteristik dinamis sistem SDOF (Yu dkk., 2024). Plot PSD untuk jalan tol ditunjukkan pada (Gambar 6a), sedangkan untuk jalan biasa ditunjukkan pada (Gambar 6b).

a) Karakteristik PSD jalan tol

Spektrum *Power Spectral Density* (PSD) akselerasi pada jalan tol menunjukkan bahwa pada rentang frekuensi rendah (0–5 Hz) magnitudo PSD relatif kecil, dengan nilai di bawah sekitar $0,3 \text{ g}^2/\text{Hz}$, yang mengindikasikan bahwa kontribusi energi getaran pada frekuensi sangat rendah tidak

dominan. Hal ini menunjukkan bahwa respon bodi kendaraan pada mode frekuensi rendah (*long-wavelength excitation*) relatif terbatas pada segmen jalan tol yang diuji.

Peningkatan magnitudo PSD terlihat pada rentang frekuensi menengah (10–25 Hz), dengan puncak utama pada kisaran 13–15 Hz dan puncak sekunder pada 18–22 Hz. Pola ini menunjukkan bahwa respons getaran kendaraan didominasi oleh dinamika sistem roda–ban–suspensi, bukan oleh mode getaran bodi kendaraan yang umumnya berada pada frekuensi rendah (1–3 Hz). Spektrum PSD menampilkan satu mode dominan dengan magnitudo tertinggi, sehingga respons sistem pada rentang frekuensi tersebut dapat direpresentasikan sebagai sistem SDOF ekuivalen. Parameter dinamis diekstraksi dari puncak spektrum, dengan frekuensi natural sekitar $f_n \approx 12,9 \text{ Hz}$. Pada frekuensi di atas 30 Hz, magnitudo PSD menurun tajam akibat atenuasi oleh sistem suspensi, struktur kendaraan, serta keterbatasan respons sensor



Gambar 6. Karakteristik PSD a) ruas jalan tol, b) ruas jalan raya (biasa)

b) Karakteristik PSD jalan biasa

Spektrum PSD akselerasi untuk jalan biasa menunjukkan magnitudo PSD pada jalan biasa lebih tinggi di hampir semua rentang frekuensi, mengindikasikan kandungan energi getaran yang jauh lebih besar (Abbondati dkk., 2021). Pada rentang frekuensi rendah (0 sampai 2 Hz), magnitudo PSD mencapai sekitar 0,2–0,5 g^2/Hz , dengan adanya lonjakan sangat yaitu 6 g^2/Hz pada frekuensi sangat rendah, yang menunjukkan kontribusi gerakan bodi global akibat kekasaran permukaan jalan.

Puncak resonansi utama pada jalan biasa teramati pada frekuensi sekitar 14,4 Hz dengan magnitudo puncak mencapai sekitar $(7,4 \pm 0,1) \text{ g}^2/\text{Hz}$. Frekuensi puncak yang sedikit berbeda dari jalan tol (sekitar ± 1 Hz) dapat disebabkan oleh beberapa faktor: (1) variasi dalam kecepatan kendaraan yang mempengaruhi frekuensi eksitasi efektif (Botshekan dkk., 2020) (2) efek nonlinearitas suspensi (Turkay dan Akcay, 2005) atau (3) kontribusi dari mode getaran tambahan.

Berdasarkan data karakteristik PSD, perbandingan parameter utama antara jalan tol dan jalan biasa ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter utama PSD

Parameter	Jalan Tol	Jalan Biasa
RMS akselerasi (g)	1,3	1,7
Frekuensi dominan (Hz)	12,9	14,4
Magnitudo PSD puncak (g^2/Hz)	3	7
Lebar puncak resonansi (Hz)	4	3,2

Dari tabel terlihat, magnitudo puncak yang jauh lebih tinggi, yaitu sekitar 2 kali lipat dibandingkan jalan tol, mengindikasikan bahwa eksitasi pada frekuensi resonansi jauh lebih kuat pada jalan biasa, menghasilkan amplifikasi respons yang lebih besar.

Lebar puncak resonansi pada jalan biasa diestimasi sedikit lebih lebar dibandingkan jalan tol. Hal ini dapat mengindikasikan peningkatan efektif dalam redaman sistem, kemungkinan akibat aktivasi mekanisme redaman nonlinear pada amplitudo getaran yang besar (Barethiye dkk., 2017). Karakteristik yang paling mencolok pada spektrum PSD jalan biasa adalah keberadaan energi yang signifikan pada rentang frekuensi tinggi (10 sampai 20 Hz). Kandungan energi frekuensi tinggi ini berkorespondensi dengan ketidakrataan jalan dengan panjang gelombang pendek, seperti tekstur permukaan kasar, retakan kecil, atau agregat yang tidak rata (Ahmadian dan Pare, 2001; Dimaunahan et al., 2020).

Sistem kendaraan secara fisik merupakan sistem *multi degree of freedom* (MDOF), namun dominasi satu puncak spektral pada kisaran menunjukkan bahwa respons getaran vertikal kendaraan pada kedua jenis jalan dikendalikan oleh satu mode dinamis utama. Respons sistem pada rentang frekuensi tersebut dapat direpresentasikan secara memadai sebagai sistem SDOF ekuivalen. Pendekatan ini memungkinkan interpretasi parameter respons getaran, seperti frekuensi natural dan tingkat redaman, dalam kerangka mekanika getaran dasar serta menjembatani analisis sinyal eksperimental dengan model fisika sistem suspensi kendaraan.

KESIMPULAN

Respons getaran vertikal kendaraan pada jalan biasa lebih besar dibandingkan jalan tol, yang tercermin dari nilai RMS akselerasi dan magnitudo PSD yang lebih tinggi pada hampir seluruh rentang frekuensi. Hasil ini menegaskan bahwa parameter

berbasis respons kendaraan, khususnya RMS akselerasi dan distribusi energi PSD, efektif digunakan sebagai indikator tidak langsung tingkat kekasaran jalan. Secara praktis, penggunaan akselerometer *smartphone* menawarkan solusi pemantauan kondisi jalan yang berbiaya rendah, portabel, dan mudah diimplementasikan untuk survei cepat dan berkelanjutan. Penelitian lanjutan disarankan untuk memperluas variasi kecepatan dan tipe kendaraan, melakukan validasi terhadap indeks standar seperti *International Roughness Index*, mengevaluasi konsistensi antar perangkat, serta mengembangkan pemrosesan sinyal yang lebih adaptif guna meningkatkan akurasi dan reproduktibilitas metode.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbondati, F., Antonio, S., Veropalumbo, R., & Dell, G. (2021). Surface monitoring of road pavements using mobile crowdsensing technology. *Measurement*, 171(August 2020), 108763.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108763>
- Ahmadian, M., & Pare, C. A. (2001). A Quarter-Car Experimental Analysis of Alternative. *Journal Of Intelligentmaterial Systems And Structures*, 11(August 2000), 604–612.
<https://doi.org/10.1106/MR3W-5D8W-0LPL-WGUQ>
- Ahmed, H. U., Hu, L., Yang, X., Bridgelall, R., & Huang, Y. (2022). Effects of smartphone sensor variability in road roughness evaluation. *International Journal of Pavement Engineering*, 8436.
<https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1946059>
- Alqaydi, S., Zeiada, W., Llor, D., & Elwakil, A. (2021). Using Smart Phones to Assessment Road Roughness in the UAE. *Proceedings of the 11th Annual International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Singapore, March 7-11, 2021*, 1660–1669.
- Barethiye, V. M., Pohit, G., & Mitra, A. (2017). Analysis of a quarter car suspension system based on nonlinear shock absorber damping models. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 14(3), 4401–4418.
- Botshekan, M., Asaadi, E., Roxon, J., Ulm, F., & Tootkaboni, M. (2021). Smartphone-enabled road condition monitoring : from accelerations to road roughness and excess energy dissipation. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, January.
<https://doi.org/10.1098/rspa.2020.0701/725653/rspa.2020.0701.pdf>
- Botshekan, M., Roxon, J., Wanichkul, A., & Chirananthavat, T. (2020). Roughness-induced vehicle energy dissipation from crowdsourced smartphone measurements through random vibration theory. *Data-Centric Engineering*, May 2021, 1–25.
<https://doi.org/10.1017/dce.2020.17>
- Chen, G., & Zhang, J. (2021). Influence of Unit Length on Pavement Roughness Evaluation Results Based on Driving Vibration Data Influence of Unit Length on Pavement Roughness Evaluation Results Based on Driving Vibration Data. *The 7th International Conference on Environmental Science and Civil Engineering*.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/719/3/032081>
- Dimaunahan, E. D., Abo, K. A. P., Ricafort, C. D., Gabayeron, X. R., & Teope, L. M. L. (2020). Road Surface Quality Assessment using Fast- Fourier Transform. *International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and*

- Management*.
- Koichi, Y. (2017). Response type roughness measurement and cracking detection method by using smartphone. *World Conference on Pavement and Asset Management*.
- Opara, K. R., Brzezinsli, K., & Bukowicki, M. (2021). Road Roughness Estimation Through Smartphone-Measured Acceleration. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 3(February 2021), 2–13.
- Rana, S., & Asaduzzaman. (2021). Vibration based pavement roughness monitoring system using vehicle dynamics and smartphone with estimated vehicle parameters. *Results in Engineering*, 12, 100294.
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100294>
- Sandamal, R. M. K., & Pasindu, H. R. (2020). Applicability of smartphone-based roughness data for rural road pavement condition evaluation. *International Journal of Pavement Engineering*, 0(0), 1–10.
<https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1765243>
- Shrestha, S., Pradhananga, R., Thapa, S. K., & Shrestha, A. R. (2024). Assessment of Relationship between Asphalt Concrete Pavement Performance Indicators : Pavement Condition Index and RoadRoid based International Roughness Index. *The Special Issue of InJET, KEC Conference 2024 Condition.*, 191–201.
- Turkay, S., & Akcay, H. (2005). A study of random vibration characteristics of the quarter-car model. *Journal of Sound and Vibration*, 282, 111–124.
<https://doi.org/10.1016/j.jsv.2004.02.049>
- Wang, G., Burrow, M., & Ghataora, G. (2020). Study of the Factors Affecting Road Roughness Measurement Using Smartphones. *Journal of Infrastructure Systems*, 26(3).
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000558](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000558)
- Wang, K. C. P. (2000). Designs and Implementations of Automated Systems for Pavement Surface Distress Survey. *Journal Of Infrastructure Systems*, 6(March), 24–32.
- Wasiq, S., Golroo, A., Amani, M. J., & Hajikarimi Pourai. (2025). Scientific Reports Article in Press Prediction of pavement performance via smatrphone vibration-induced unevenness signature using machine learning IN AR IN. *Scientific Reports*.
- Xue, G., Zhu, H., Hu, Z., & Member, S. (2017). Pothole in the Dark : Perceiving Pothole Profiles with Participatory Urban Vehicles. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 16(5), 1408–1419.
<https://doi.org/10.1109/TMC.2016.2597839>
- Yu, Q., Sang, Y., Fang, Y., Vo, V., & Wix, R. (2024). Estimate Road Roughness Using Samrtphone Response Data - A Semi-Supervised Learning Approach. *European Conference on Computing in Construction*.
- Zeng, H., Park, H., Smith, B. L., & Parkany, E. (2018). Feasibility Assessment of a Smartphone-Based Application to Estimate Road Roughness. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(8), 3120–3129.
<https://doi.org/10.1007/s12205-017-1008-9>