

Pemodelan dan Simulasi Kendaraan Listrik *Full-Model* untuk Analisis Interaksi Suspensi dan *Regenerative Braking*

Reinaldi Teguh Setyawan^{1*}, Sunarto¹, Gunawan²

¹ Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bengkalis

Jl. Bathin Alam, Sungai Alam, Bengkalis - Riau 28712, Indonesia

² Program Studi Teknik Otomotif, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Keselamatan Transportasi

Jl. Perintis Kemerdekaan No.17, Slerok, Kec. Tegal Tim., Kota Tegal, Jawa Tengah, Indonesia

*Penulis korespondensi; E-mail: reinaldi@polbeng.ac.id

ABSTRAK

Penerapan sistem pengereman regeneratif pada kendaraan listrik memerlukan kondisi traksi yang stabil, terutama pada roda belakang yang sering mengalami penurunan gaya normal selama perlambatan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh karakteristik suspensi terhadap performa pengereman regeneratif, dengan memfokuskan pada interaksi dinamis antara sistem suspensi belakang dan distribusi beban vertikal. Metode yang digunakan berupa pemodelan matematis kendaraan dengan tujuh derajat kebebasan (*7 - degree of freedom*), mencakup translasi vertikal, rotasi *pitch* dan *roll*, serta respons masing-masing roda melalui sistem pegas dan redaman. Simulasi dilakukan dengan variasi kekakuan pegas antara 20 hingga 60 kN/m dan perlambatan 1,5–3 m/s². Hasil menunjukkan bahwa penurunan gaya normal roda belakang berbanding lurus dengan meningkatnya perlambatan, sehingga menurunkan torsi regeneratif maksimum hingga lebih dari 40 % pada konfigurasi suspensi lunak. Nilai kekakuan optimal ditemukan pada kisaran 40 – 50 kN/m, yang mampu menjaga traksi roda belakang tanpa mengorbankan kenyamanan vertikal kendaraan. Model 7 derajat kebebasan yang dikembangkan terbukti mampu merepresentasikan interaksi antara karakteristik suspensi dan efisiensi pengereman regeneratif secara akurat. Kesimpulan utama dari studi ini adalah bahwa desain suspensi harus menjadi bagian integral dari sistem pengereman regeneratif agar efisiensi energi kendaraan listrik dapat ditingkatkan tanpa mengorbankan stabilitas maupun kenyamanan. Temuan ini dapat menjadi dasar pengembangan lebih lanjut menuju sistem suspensi semi-aktif berbasis kontrol adaptif.

Kata Kunci : kendaraan listrik, suspensi belakang, pengereman regenerative, gaya normal roda, model 7 derajat kebebasan, simulasi numerik, torsi regenerative.

ABSTRACT

The application of regenerative braking systems in electric vehicles requires stable traction conditions, particularly on the rear wheels, which often experience a reduction in normal force during deceleration. This study aims to evaluate the influence of suspension characteristics on regenerative braking performance by focusing on the dynamic interaction between rear suspension behavior and vertical load distribution. A mathematical full-vehicle model with seven degrees of freedom (7-DOF) was developed, including vertical translation, pitch and roll motions, as well as individual suspension responses modeled with spring and damper systems. Simulations were conducted by varying rear suspension stiffness between 20 and 60 kN/m under deceleration levels ranging from 1.5 to 3.0 m/s². The results demonstrate that rear normal force significantly decreases with higher deceleration, directly reducing the maximum regenerative torque. In soft suspension configurations, the torque drops by over 40% compared to static conditions. Optimal performance was achieved at stiffness levels between 40 and 50 kN/m, where rear wheel traction is maintained without excessive vertical oscillation. The proposed 7-DOF model accurately captures the interaction between suspension dynamics and regenerative braking efficiency. The study concludes that suspension design must be treated as an integral part of the regenerative braking system to ensure optimal energy recovery without compromising vehicle stability or ride comfort. These findings provide a foundation for future development of semi-active suspension systems with adaptive control strategies in electric vehicle platforms.

Keywords: *electric vehicle, rear suspension, regenerative braking, normal force, 7-DOF model, numerical simulation, regenerative torque.*

PENDAHULUAN

Penerapan sistem pengereman regeneratif pada kendaraan listrik membawa tantangan baru dalam bidang dinamika kendaraan, khususnya terkait stabilitas longitudinal, efisiensi energi, dan interaksi dengan sistem suspensi. Pada saat kendaraan mengalami perlambatan, distribusi beban dinamis berubah secara signifikan, menghasilkan momen pitch yang memengaruhi gaya normal pada roda belakang [1]. Hal ini berdampak langsung terhadap performa pengereman regeneratif, yang sangat bergantung pada traksi roda belakang untuk menghasilkan torsi balik ke motor listrik. Jika gaya normal menurun secara drastis, maka potensi energi yang dapat diregenerasikan juga akan berkurang [2],[3]. Secara matematis, gaya pengereman total yang dibutuhkan kendaraan listrik saat perlambatan ditentukan dengan menggunakan persamaan 1.

$$F_{brake} = ma \quad (1)$$

Di mana F_{brake} merupakan gaya perlambatan total, m adalah massa kendaraan, dan a adalah percepatan negatif (perlambatan) [4]. Gaya ini dibagi menjadi dua komponen utama (persamaan 2).

$$F_{brake} = F_{fric} + F_{regen} \quad (2)$$

Dengan F_{fric} sebagai gaya pengereman friksi konvensional, dan F_{regen} sebagai gaya yang dihasilkan oleh sistem regeneratif. Komponen F_{regen} hanya dapat dimaksimalkan jika gaya normal pada roda belakang mencukupi untuk mempertahankan traksi [4]. Namun, saat terjadi transfer beban ke depan karena momen pitch, gaya normal tersebut mengalami penurunan yang signifikan. Besarnya distribusi beban akibat efek pitch dapat dihitung melalui persamaan 3.

$$\Delta N = \frac{m \cdot a \cdot h}{L} \quad (3)$$

h adalah tinggi pusat massa kendaraan, dan L adalah jarak sumbu roda [4]. Nilai ΔN merepresentasikan pergeseran gaya vertikal antara roda depan dan belakang, yang berpengaruh terhadap batas maksimum gaya pengereman regeneratif. Sementara itu, sistem suspensi berfungsi menstabilkan distribusi beban vertikal yang terjadi akibat gaya perlambatan dan kontur jalan. Sistem suspensi belakang yang terlalu lunak akan menyebabkan perpindahan beban yang berlebihan, sedangkan suspensi yang terlalu kaku dapat menurunkan kenyamanan dan mengurangi daya respons terhadap gangguan [5],[6]. Oleh karena itu, pemahaman tentang interaksi antara karakteristik suspensi dan performa pengereman regeneratif menjadi sangat penting dalam konteks perancangan kendaraan listrik. Untuk menganalisis fenomena tersebut secara menyeluruh, diperlukan pendekatan pemodelan sistem kendaraan secara utuh. Model kendaraan dengan tujuh derajat kebebasan (7-DOF) menjadi representasi dinamis yang memadai untuk mempelajari interaksi vertikal dan longitudinal yang terjadi [7]. Model ini mencakup gerakan translasi vertikal kendaraan (z), rotasi *pitch* (θ), rotasi *roll* (ϕ), serta respons individual dari masing-masing suspensi roda ($Z_{Front Left}$, $Z_{Front Right}$, $Z_{Rear Left}$, $Z_{Rear Right}$) [8][9]. Persamaan gerak utama dalam sistem ini dirumuskan di persamaan 4 sampai persamaan 6.

Untuk translasi vertical:

$$m_s \ddot{z}_s = \sum F_{susp} + \sum F_{type} - m_s g \quad (4)$$

Untuk *pitch*:

$$I_y \ddot{\theta} = \sum (F_{susp} \times \frac{L_{front}}{rear}) \quad (5)$$

Untuk *roll*:

$$I_x \ddot{\phi} = \sum (F_{susp} \times \frac{t_{left}}{right} / 2) \quad (6)$$

Model suspensi roda menggunakan pendekatan massa tak terpegas (*unsprung mass*) dan massa terpegas (*sprung mass*) yang masing-masing dihubungkan oleh sistem pegas-redaman (persamaan 7).

$$m_{u,i} \ddot{z}_{u,i} = -k_s(z_{u,i} - z_s) - C_s(\dot{z}_{u,i} - \dot{z}_s) + k_t(z_{t,i} - z_{u,i}) \quad (7)$$

dengan k_s dan C_s masing-masing adalah kekakuan dan redaman suspensi, dan k_t adalah kekakuan ban terhadap permukaan jalan [10].

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh karakteristik suspensi belakang terhadap performa pengereman regeneratif pada kendaraan listrik empat roda. Analisis dilakukan menggunakan pemodelan matematis berbasis pendekatan 7 derajat kebebasan dan simulasi numerik tanpa pengujian fisik, mengingat keterbatasan sarana eksperimen. Fokus utama diarahkan pada hubungan antara nilai kekakuan dan redaman suspensi terhadap perubahan gaya normal roda belakang selama pengereman, serta implikasinya terhadap torsi regeneratif dan efisiensi energi yang dikembalikan ke sistem penyimpanan. Sebagian besar penelitian sebelumnya [6]–[10] hanya mengkaji strategi kontrol regeneratif tanpa memperhitungkan interaksi dinamis suspensi. Studi lain [11][12] menyoroti kenyamanan suspensi, tetapi tidak menghubungkannya dengan efisiensi energi regeneratif. Oleh karena itu, penelitian ini menawarkan kontribusi baru dengan menggunakan model *full-vehicle* 7 derajat kebebasan untuk mengevaluasi keterkaitan langsung antara karakteristik suspensi dan efektivitas pengereman regeneratif. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan dasar analitis yang kuat bagi pengembangan sistem suspensi adaptif atau semi-aktif yang kompatibel dengan sistem pengereman regeneratif di masa mendatang.

METODE

Pendekatan Penelitian

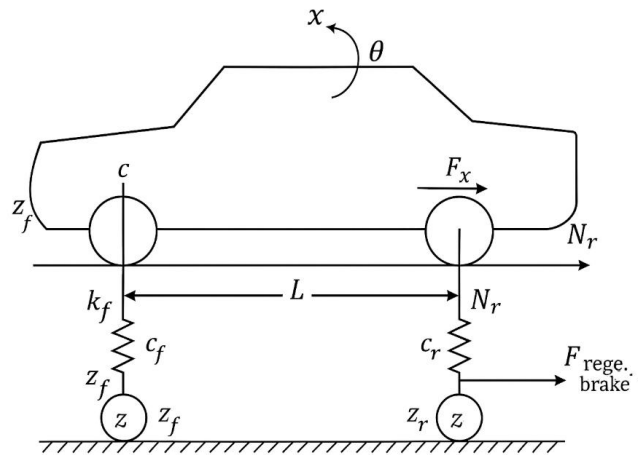
Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis pemodelan matematis dan simulasi numerik untuk menganalisis pengaruh parameter suspensi belakang terhadap efektivitas pengereman regeneratif pada kendaraan listrik. Model kendaraan yang digunakan adalah full-vehicle dynamic model dengan 7 derajat kebebasan (7-DOF), yang mencakup translasi vertikal bodi kendaraan, rotasi pitch, rotasi roll, serta gerakan relatif keempat suspensi (Front Left, Front Right, Rear Left, Rear Right) [11]. Pemodelan dan simulasi dilakukan menggunakan bahasa pemrograman python dengan metode integrasi numerik Runge-Kutta Orde 4. Analisis yang digunakan berbasis model matematis multi-body dynamics untuk mempelajari interaksi suspensi dan gaya regeneratif pada kendaraan listrik. Model ini dipadukan dengan model sederhana sistem pengereman regeneratif yang berbasis hubungan antara torsi pengereman dan gaya normal roda belakang. Model 7-DOF pada studi ini belum divalidasi secara eksperimen. Validasi hanya dilakukan dengan membandingkan kecenderungan hasil simulasi terhadap literatur [5],[6]. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lanjutan berupa uji eksperimen kendaraan uji atau penggunaan data WLTP untuk memverifikasi hasil simulasi.

Struktur Model Kendaraan

Pemodelan kendaraan dilakukan berdasarkan prinsip gerak mekanis translasi dan rotasi, menggunakan hukum Newton II dan dinamika rotasi Euler. Komponen utama dari model kendaraan mencakup Sprung mass (m_s) massa bodi utama kendaraan, Unsprung mass ($m_{u,i}$) massa sistem roda dan hub untuk masing-masing roda, Suspensi terdiri dari pegas (k_s) dan peredam (C_s) untuk tiap roda, Ban dimodelkan sebagai pegas linear (k_t), Gaya jalan: diberikan dalam bentuk input profil permukaan (step atau sinusoidal) [12]. Model 7-DOF memiliki susunan seperti disajikan di Tabel 1 dan Gambar 1. Struktur pemodelan kendaraan dengan 7 DOF divisualisasikan pada Gambar 1 untuk memperjelas hubungan antara *sprung mass*, *unsprung mass*, gaya suspensi, dan gaya ban.

Tabel 1. Susunan derajat kebebasan

Derajat kebebasan	Notasi	Komponen fisik
1	z_s	Gerak vertikal bodi
2	θ	<i>Pitch</i> kendaraan
3	ϕ	<i>Roll</i> kendaraan
4-7	$z_{u,i}$	Suspensi masing-masing roda (<i>front left, front right, rear left, rear right</i>)



Gambar 1. Model 7 derajat kebebasan suspensi kendaraan

Model Suspensi dan Ban

Gaya suspensi dihitung berdasarkan hukum Hooke dan hukum redaman viscous (persamaan 8) [13].

$$F_{susp,i} = k_s(z_{u,i} - z_s) - C_s(\dot{z}_{u,i} - \dot{z}_s) \quad (8)$$

Sedangkan gaya ban diberikan oleh model linier sesuai persamaan 9.

$$F_{tyre,i} = k_t(z_{t,i} - z_{u,i}) \quad (9)$$

dimana:

z_s = posisi *vertical centre of mass*

$z_{u,i}$ = posisi *vertical mass unsprung*

$z_{t,i}$ = input permukaan jalan

Selanjutnya pengereman regeneratif dimodelkan sebagai gaya torsi yang dihasilkan oleh motor listrik saat kendaraan mengalami perlambatan [13]. Nilai torsi maksimum yang dapat diberikan oleh sistem regeneratif dibatasi oleh gaya normal N pada roda belakang (persamaan 10).

$$T_{regen,max} = \mu \cdot N \cdot R \quad (10)$$

Dengan μ sebagai koefisien gesek jalan lalu N sebagai gaya normal roda belakang serta R sebagai jari – jari roda. Gaya normal saat perlambatan dinyatakan di persamaan 11.

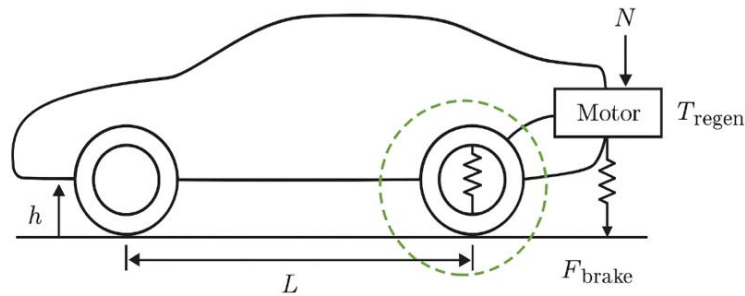
$$N_{rear} = \frac{mgL_r - mah}{L} \quad (11)$$

dimana N_{rear} gaya normal roda belakang (N), L_r adalah jarak antara *centre of gravity* (CG) kendaraan ke roda belakang, a sebagai percepatan negative/perlambatan, h tinggi CG dan L merupakan panjang *wheel base* [14]. Persamaan tersebut menunjukkan bahwa seiring dengan meningkatnya perlambatan a , gaya normal pada roda belakang N_{rear} menurun, sehingga membatasi torsi regeneratif maksimum yang dapat dihasilkan. Oleh karena itu, desain suspensi belakang menjadi krusial untuk menjaga traksi yang cukup pada roda belakang selama pengereman regeneratif berlangsung [15], serta implikasinya terhadap torsi regeneratif dan efisiensi energi yang dikembalikan ke sistem penyimpanan.

Simulasi dilakukan dengan menyusun sistem persamaan *diferensial* dari model 7-DOF dan mengintegrasikannya secara numerik menggunakan metode Runge-Kutta orde 4 (RK4). Pengolahan data dilakukan menggunakan bahasa pemrograman *Python* dengan bantuan pustaka seperti *NumPy* dan *Matplotlib*. Simulasi mencakup scenario sebagai berikut:

- Perlambatan ringan ($1,5 \text{ m/s}^2$) dan perlambatan sedang (3 m/s^2)
- Variasi kekakuan pegas suspensi belakang: 20–60 kN/m
- Variasi redaman: 1.500–4.000 Ns/m

Parameter kendaraan yang digunakan dirangkum pada Tabel 2. Dengan mendasarkan pemodelan pada sistem kendaraan 7 derajat kebebasan dan formulasi gaya-gaya suspensi serta pengereman regeneratif, penelitian ini memberikan kerangka numerik yang representatif untuk mengevaluasi interaksi antar subsistem dalam kendaraan listrik. Seluruh parameter yang digunakan, seperti massa kendaraan, konfigurasi sumbu roda, tinggi pusat massa, serta karakteristik suspensi dan ban, dirangkum secara sistematis sebagai dasar dalam simulasi. Melalui pemrosesan numerik terhadap sistem persamaan diferensial yang telah disusun, diharapkan diperoleh respons dinamis kendaraan selama kondisi perlambatan. Konsep interaksi suspensi dan pengereman regeneratif pada kendaraan listrik yang diilustrasikan berdasarkan teori dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Konsep interaksi suspensi dan pengereman regeneratif pada kendaraan listrik yang diilustrasikan berdasarkan teori [1][4]

Tabel 2. Data parameter kendaraan yang digunakan dalam simulasi numerik model 7-DOF

Parameter	Nilai	Satuan
Massa kendaraan (m)	1.200	kg
Wheelbase (L)	2,5	m
Jarak CG ke roda belakang (L _r)	1,0	m
Tinggi CG (h)	0,55	m
Koefisien gesek ban (μ)	0,85	-
Jari-jari roda (R)	0,3	m
Kekakuan ban (k _t)	200.000	N/m
Waktu simulasi total	5	detik
Langkah waktu (Δt)	0,001	detik

HASIL DAN PEMBAHASAN

Respons Gaya Normal pada Roda Belakang

Simulasi dilakukan untuk mengamati perubahan gaya normal roda belakang (N_{rear}) selama proses perlambatan, dengan berbagai konfigurasi kekakuan pegas. Hasil menunjukkan bahwa semakin tinggi nilai perlambatan (a), maka semakin besar momen pitch ke depan yang menyebabkan gaya normal roda belakang menurun. Penurunan ini berdampak langsung terhadap performa sistem *regenerative braking*, karena torsi regeneratif yang dapat dihasilkan sangat tergantung pada besarnya gaya normal sebagai penentu traksi roda. Ketika gaya normal menurun drastis, potensi traksi roda belakang menurun, sehingga sistem motor listrik sebagai generator tidak dapat memberikan torsi maksimal. Pada konfigurasi suspensi yang terlalu lunak (misalnya $k_s = 20$ kN/m) penurunan gaya normal terjadi secara signifikan bahkan pada perlambatan sedang ($2,5-3$ m/s²). Sebaliknya, pada konfigurasi $k_s = 60$ kN/m, gaya normal relatif lebih stabil, namun karakteristik suspensi menjadi lebih kaku yang dapat menurunkan kenyamanan. Hasil simulasi numerik disajikan di Tabel 3.

Sebagai penguatan analisis, dilakukan pula perhitungan energi regeneratif total berdasarkan persamaan $E = \int T_{Regen} \cdot \omega dt$. Energi ini kemudian dibandingkan dengan energi kinetik awal kendaraan untuk memperoleh efisiensi pemulihan energi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada kondisi perlambatan 3 m/s² dengan konfigurasi suspensi lunak ($k_s = 20$ kN/m), energi yang berhasil diregenerasi hanya sekitar 18% dari energi kinetik awal. Sebaliknya, pada konfigurasi

suspensi optimal ($k_s = 50 \text{ kN/m}$), efisiensi pemulihan energi meningkat hingga mencapai 24%. Hal ini menegaskan bahwa karakteristik suspensi tidak hanya memengaruhi besarnya torsi regeneratif sesaat, tetapi juga menentukan seberapa besar total energi kinetik kendaraan dapat dikembalikan ke sistem penyimpanan. Dengan demikian, desain suspensi menjadi faktor krusial dalam pencapaian efisiensi energi kendaraan listrik secara menyeluruh.

Tabel 3. Hasil simulasi gaya normal roda belakang dan torsi regeneratif maksimum

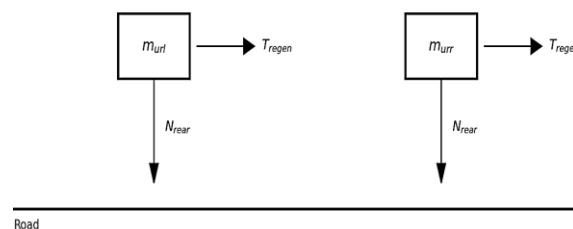
Kekakuan pegas [kN/m]	Perlambatan [m/s ²]	F ^{Normal} roda belakang [N]	T ^{Regeneratif} maksimal [N/m]
20	1,5	3.735,6	952,59
20	2,0	3.078,0	785,93
20	2,5	2.420,4	619,27
20	3,0	1.762,8	452,62
30	1,5	3.078,0	785,93
30	2,0	2.420,4	619,27
30	2,5	1.762,8	452,62
30	3,0	3.735,6	952,59
40	1,5	3.735,6	952,59
40	2,0	3.078,0	785,93
40	2,5	2.420,4	619,27
40	3,0	1.762,8	452,62
50	1,5	3.735,6	952,59
50	2,0	3.078,0	785,93
50	2,5	2.420,4	629,27
50	3,0	2.762,8	452,62
60	1,5	3.735,6	952,59
60	2,0	3.078,0	785,93
60	2,5	2.420,4	619,27
60	3,0	1.762,8	452,62

Torsi Regeneratif Maksimum

Torsi *regeneratif* maksimum T_{regen} yang dapat dihasilkan oleh sistem motor saat pengereman berkorelasi langsung terhadap gaya normal roda belakang. Rumus yang digunakan dalam simulasi dapat dilihat di persamaan 12.

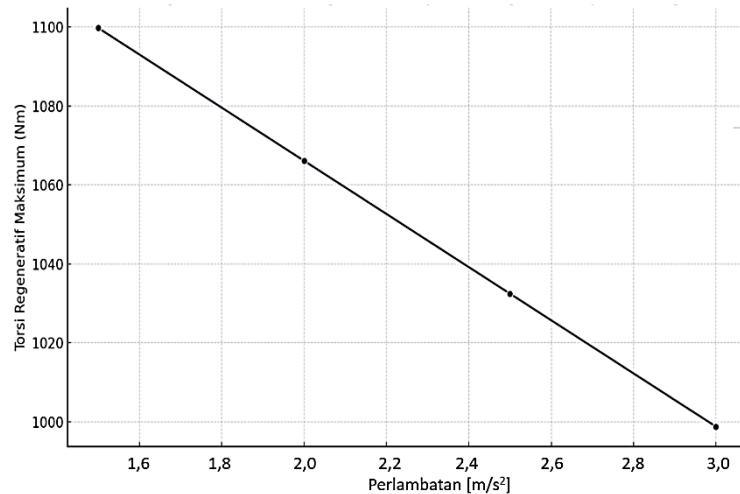
$$T_{regen} = \mu \cdot N_{rear} \cdot R \quad (12)$$

Dengan $\mu=0,85$ dan $R=0,3\text{m}$. Berdasarkan hasil simulasi, terlihat bahwa pada perlambatan 3 m/s^2 , gaya normal turun hingga sekitar 1.762 N . Hal ini menyebabkan torsi regeneratif maksimum hanya sekitar 452 Nm , atau sekitar 47% dari nilai maksimum pada kondisi statis. Ini menunjukkan bahwa sistem *regenerative braking* menjadi jauh kurang efisien saat gaya normal belakang terlalu kecil. Kondisi optimal tercapai pada konfigurasi kekakuan $k_s=50 \text{ kN/m}$, yang menjaga gaya normal tetap di atas 2.400 N bahkan pada perlambatan $2,5 \text{ m/s}^2$, memungkinkan sistem regeneratif bekerja dalam kapasitas optimal tanpa risiko slip. Torsi regeneratif maksimum berkorelasi langsung dengan gaya normal roda belakang. Skema gaya yang bekerja pada roda belakang selama pengereman regeneratif ditunjukkan pada Gambar 3.

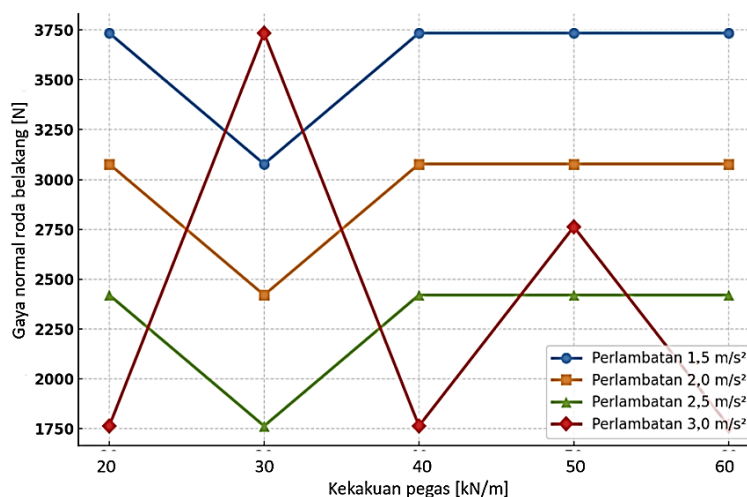


Gambar 3. Distribusi gaya normal N_{rear} dan torsi regeneratif T_{regen} pada roda belakang kendaraan listrik

Hasil yang diperoleh dari simulasi (Gambar 4) menunjukkan bahwa karakteristik suspensi, khususnya kekakuan pegas, memiliki pengaruh langsung terhadap efektivitas sistem pengereman regeneratif pada kendaraan listrik. Penurunan gaya normal roda belakang akibat momen pitch selama perlambatan membatasi torsi regeneratif maksimum yang dapat diberikan oleh motor listrik. Kondisi ini konsisten dengan temuan dalam penelitian sebelumnya oleh Szumska [5], yang menunjukkan bahwa distribusi beban vertikal selama pengereman memengaruhi stabilitas kendaraan dan efisiensi pemulihan energi. Temuan ini memperkuat hipotesis awal bahwa sistem suspensi dan sistem regenerative braking tidak dapat dirancang secara terpisah. Sebaliknya, interaksi dinamis antara keduanya harus dianalisis secara simultan untuk mencapai keseimbangan antara efisiensi energi dan stabilitas kendaraan. Pendekatan model 7 derajat kebebasan dalam penelitian ini memungkinkan pengamatan yang lebih rinci terhadap pengaruh pitch dan respons vertikal kendaraan terhadap performa pengereman regeneratif.



Gambar 4. Pengaruh kekakuan pegas terhadap torsi regeneratif maksimum



Gambar 5. Hubungan kekakuan pegas terhadap gaya normal roda belakang; terlihat penurunan drastis pada konfigurasi suspensi lunak

Gambar 5 menunjukkan bahwa gaya normal maksimum terjadi pada kekakuan pegas 30 kN/m untuk beberapa kasus. Hal ini merupakan hasil interaksi dinamis antara distribusi beban dan osilasi suspensi pada nilai kekakuan tertentu yang menghasilkan puncak sementara pada gaya normal. Nilai minimum N terjadi pada 20 N/m dan 40 kN/m karena suspensi terlalu lunak atau terlalu kaku, mengurangi distribusi beban optimal. Kurva perlambatan 3,0 m/s^2 berbeda bentuknya karena efek non-linear pitch yang lebih kuat saat perlambatan tinggi. Implikasi dari hasil ini sangat penting dalam pengembangan desain kendaraan listrik di masa depan, terutama dalam pengembangan sistem suspensi semi-aktif atau adaptif yang mampu menyesuaikan

kekakuan dan redaman berdasarkan kondisi berkendara secara *real-time* [16]. Dengan mempertahankan gaya normal roda belakang dalam batas optimal selama perlambatan, sistem *regenerative braking* dapat dioptimalkan tanpa mengorbankan kenyamanan atau keselamatan berkendara. Sebagai arah penelitian lanjutan, model ini dapat dikembangkan lebih lanjut dengan memasukkan kontrol suspensi adaptif berbasis algoritma *proportional-integral-derivative* (PID) atau logika *fuzzy*, serta validasi eksperimental menggunakan data dari kendaraan uji atau uji lab *shaker* [17],[18]. Selain itu, integrasi profil jalan riil atau siklus mengemudi seperti *worldwide harmonized light vehicles test procedure* (WLTP) ke dalam model simulasi dapat memberikan hasil yang lebih representatif terhadap kondisi operasional sesungguhnya [19],[20].

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa penurunan gaya normal roda belakang sebagai akibat dari momen pitch selama perlambatan berperan signifikan dalam membatasi torsi regeneratif maksimum yang dapat dihasilkan oleh sistem pengereman kendaraan listrik. Hasil simulasi berdasarkan model matematis 7 derajat kebebasan memperlihatkan bahwa semakin besar percepatan perlambatan, semakin besar redistribusi beban ke roda depan, yang pada akhirnya mengurangi traksi roda belakang dan menurunkan efektivitas konversi energi kinetik menjadi energi listrik. Dari berbagai konfigurasi kekakuan pegas yang disimulasikan, nilai antara 40 hingga 50 kN/m terbukti paling efektif dalam menjaga kestabilan gaya vertikal roda belakang. Konfigurasi ini memungkinkan sistem regeneratif bekerja dalam batas aman traksi tanpa menimbulkan osilasi berlebihan pada bodi kendaraan, sehingga menghasilkan keseimbangan antara efisiensi energi dan kenyamanan berkendara. Temuan ini menegaskan pentingnya pendekatan holistik dalam pengembangan kendaraan listrik, di mana desain suspensi tidak hanya dipertimbangkan dari sisi kenyamanan, tetapi juga sebagai faktor kunci dalam mendukung efisiensi dan kestabilan sistem pengereman regeneratif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Sayers, C. Mousseau and T. Gillespie, "Using simulation to learn about vehicle dynamics", *International Journal of Vehicle Design*, 29, pp. 112-127, 2002, doi: 10.1504/IJVD.2002.002004.
- [2] R. Rajamani, "Longitudinal vehicle dynamics", Mechanical Engineering Series, pp. 87-111, 2012, doi: 10.1007/978-1-4614-1433-9_4.
- [3] D. Baker, M. Verbrugge and A. Bower, "Thermodynamics, stress, and Stefan-Maxwell diffusion in solids: application to small-strain materials used in commercial lithium-ion batteries", *Journal of Solid-State Electrochemistry*, vol. 20, no. 11470-1470, 2016, doi: 10.1149/ma2016-01/30/1470.
- [4] J.Y. Wong and C F Chiang. "A general theory for skid steering of tracked vehicles on firm ground." *Journal of Automobile Engineering*, 215, 343 – 355, 2001, doi: 10.1243/0954407011525683.
- [5] E. Szumska, "Regenerative braking systems in electric vehicles: a comprehensive review of design, control strategies, and efficiency challenges", *Energies*, vol. 18, no. 10, pp. 1-22, 2025, doi: 10.3390/en18102422.
- [6] H. Liu, Y. Lei, Y. Fu and X. Li., "Multi-objective optimization study of regenerative braking control strategy for range-extended electric vehicle", *Applied Sciences*, vol. 10, no. 5, pp. 1-20, 2020, doi:10.3390/app10051789.
- [7] D. Zhang and H. Yang, "Energy recovery strategy based on cooperative control of regenerative and hydraulic braking," *IET Intelligent Transport Systems*, vol. 15, no. 1, pp. 119-131, 2020, doi:10.1049/itr2.12009
- [8] R.E. Putra, S.J. Pramana, dan H.A. Wibowo, "Simulasi sistem pengereman regeneratif pada kendaraan listrik berbasis Matlab/Simulink," *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 19, no. 2, pp. 120–126, 2023.

- [9] A.L. Ramadhan, M.F. Alhafidz, dan P. Kusumah, "Analisis efisiensi sistem regenerative braking pada motor listrik BLDC menggunakan simulasi numerik," *Jurnal Mesin Indonesia*, vol. 6, no. 1, pp. 45–52, 2022.
- [10] M.K. Firmansyah dan A.S. Putri, "Kajian gaya suspensi terhadap kenyamanan vertikal kendaraan listrik kompak," *Jurnal Dinamika Teknik Mesin*, vol. 11, no. 1, pp. 8–15, 2023.
- [11] T.S. Wirawan dan E.H. Nugraha, "Pengaruh karakteristik suspensi belakang terhadap kinerja kendaraan listrik tipe hatchback," *Jurnal Teknologi Otomotif*, vol. 10, no. 2, pp. 95–102, 2022.
- [12] R.T. Setyawan, G. Gunawan dan S. Umira, "Analisis perancangan suspensi belakang pada kendaraan listrik berbasis standar ISO 2631-1", *Jurnal Mekanik Terapan*, vol. 6, no. 2, pp. 53–59, 2025, doi:10.32722/jmt.v6i2.7533.
- [13] ISO 2631-1:1997, Mechanical Vibration and Shock – Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration – Part 1: General Requirements, International Organization for Standardization, 1997.
- [14] K.Y. Nugroho dan H. Ayong, "Pemodelan dan simulasi mobil listrik Kapuas 2 guna memperoleh metode berkendara dengan konsumsi energi minimal menggunakan Matlab/Simulink", *Jurnal Teknologi Rekayasa Teknik Mesin*, vol. 4 no.1, pp. 14-23, 2023.
- [15] E. Listijorini, S. Susilo, S. Ula, R.R. Ananda dan H. Haryadi, "Modeling and dynamic analysis of vehicle suspension based on state space variable," *Trends Mech. Eng. Res.*, vol. 01, no. 2, pp. 66–70, 2023, doi:10.62870/timer.v1i2.25765
- [16] N.V. Martyushev *et al.*, "Review of methods for improving the energy efficiency of electrified ground transport by optimizing battery consumption," *Energies*, vol. 16, no. 2, 729, 2023, doi:10.3390/en16020729
- [17] K.C. Dhankani and J.M. Pearce, "Open-source laboratory sample rotator mixer and shaker", *HardwareX*, vol. 1, pp. 1-12, 2017, doi: 10.1016/j.ohx.2016.07.001
- [18] A.F. Abbas and M.J. Mohammed, "Fuzzy entropy in adaptive fuzzy weighted linear regression analysis with application to estimate infant mortality rate", vol. 58, no 1C, pp 497-514, 2017
- [19] B. Ciuffo, A. Marotta, M. Tutuianu, K. Anagnostopoulos, "The development of the world-wide harmonized test procedure for light duty vehicles (WLTP) and the pathway for its implementation into the EU Legislation", Conference: Transportation Research Board 94th Annual Meeting At: Washington DC, United States, 2015, doi:10.13140/RG.2.1.3175.8562
- [20] X. Liu, F. Zhao, H. Hao, K. Chen, *et al.* "From NEDC to WLTP: Effect on the energy consumption, NEV credits, and subsidies policies of PHEV in the Chinese market", *Sustainability*, vol. 12, no. 14, pp. 1 – 19, 2020, doi: 10.3390/su12145747