

Simulasi Penggunaan *Regenerative brake* pada Mobil Listrik Laksamana V.2

M. Syaiful Kirom, Reinaldi Teguh Setyawan²

^{1,2} Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Bengkalis

Jl. Bathin Alam, Sungai Alam, Bengkalis, Riau - 28714

Email: msyaifulkirom09@gmail.com, reinaldi@polbeng.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini menyajikan analisis dan simulasi sistem pengereman regeneratif pada kendaraan listrik Laksamana V.2 menggunakan MATLAB-Simulink, berdasarkan siklus mengemudi WLTP Kelas 1. Studi ini bertujuan untuk mengevaluasi efisiensi sistem dalam memulihkan energi kinetik selama perlambatan, dengan fokus khusus pada kinerjanya pada berbagai kecepatan kendaraan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem mampu mencapai efisiensi pemulihan energi maksimum sebesar 69,75% pada kecepatan rendah (10 km/jam), dengan efisiensi yang menurun seiring meningkatnya kecepatan akibat meningkatnya kerugian energi dari hambatan aerodinamis dan hambatan gelinding. Distribusi gaya pengereman antara roda depan dan belakang telah sesuai dengan regulasi keselamatan, sehingga menjamin stabilitas kendaraan saat pengereman sambil tetap mengoptimalkan pemulihan energi. Selain itu, sistem pengereman regeneratif berkontribusi dalam memperpanjang jarak tempuh kendaraan serta menjaga kesehatan baterai dengan mengurangi frekuensi pengisian daya eksternal. Temuan ini menegaskan pentingnya optimalisasi sistem pengereman regeneratif pada kondisi mengemudi perkotaan, di mana kejadian pengereman yang sering memberikan peluang lebih besar untuk pemulihan energi. Penelitian selanjutnya akan difokuskan pada validasi hasil simulasi melalui pengujian langsung di lapangan, integrasi dengan teknologi pemulihan energi lainnya, serta peningkatan performa pada kecepatan tinggi.

Kata kunci: Pengereman Regeneratif, Mobil Listrik, MATLAB-Simulink, Efisiensi Energi.

1. PENDAHULUAN

Mobil listrik pertama kali dikenalkan oleh Robert Anderson dari Skotlandia pada tahun 1832-1839, namun pada saat itu harga bahan bakar minyak (BBM) relatif murah sehingga masyarakat dunia cenderung mengembangkan Motor Bakar yang menggunakan BBM. Perkembangan teknologi otomotif saat ini mengalami kemajuan yang sangat pesat, dan hampir setiap tahun berbagai jenis kendaraan dikeluarkan oleh perusahaan-perusahaan produsen otomotif. Tentunya dengan berbagai keunggulan serta teknologi, yang masing-masing produsen selalu menampilkan kemewahan dan mengedepankan keamanan serta kenyamanan bagi pengendaranya (KMLI-POLBAN, 2024).

Seiring berjalannya waktu dan teknologi yang semakin berkembang, bidang otomotif ini tidak hanya mendominasi pada bidang transportasi saja. Teknologi otomotif mampu menjadi bagian olahraga, yaitu balap motor dan mobil. Olahraga tersebut menggunakan motor atau mobil khusus yang dirancang secara matang agar dapat melaju dengan kencang dilintasan khusus serta aman bagi pengendaranya. Oleh karena itu dengan berbekal

pengetahuan yang diperoleh dari bangku perkuliahan maka akan mengangkat mobil listrik yang merupakan salah satu jenis kendaraan masa depan yang sedang dikembangkan.

Sistem pengereman dirancang untuk menghentikan kendaraan sekaligus menjaga keamanan dan kenyamanan dalam berkendara. Teknologi pengereman terus berkembang untuk meningkatkan efisiensi dan keselamatan. Salah satu tantangan dalam sistem pengereman konvensional adalah hilangnya energi kinetik yang dibuang sebagai panas, menyebabkan inefisiensi energi, terutama dalam konteks kendaraan modern yang menuntut konsumsi energi lebih efisien. *Regenerative brake* mengubah energi kinetik kendaraan saat pengereman menjadi listrik yang disimpan dalam baterai, sehingga dapat meningkatkan efisiensi energi. *Regenerative brake* telah banyak dikembangkan khususnya pada mobil listrik. Hal ini disebabkan bahwa sistem pengereman ini disamping berfungsi untuk memperlambat putaran motor, juga dapat menghasilkan daya listrik. Daya listrik yang dihasilkan dapat digunakan untuk

pengisian baterai sebagai media penyimpan energi (Pulungan, 2018).

Keunggulan utama dari *regenerative brake* dibandingkan pengereman konvensional adalah efisiensinya dalam mengurangi konsumsi energi dan memperpanjang jarak tempuh kendaraan listrik. *Regenerative brake* akan memanfaatkan energi saat pengereman yang terbuang lalu dikonversikan menjadi energi listrik oleh generator. Untuk meningkatkan efisiensi dari *regenerative brake*, pada umumnya penggunaan sistem ini dikombinasikan dengan sistem pengereman mekanik, dan diperlukan juga porsi pengereman antara sistem *regenerative brake* dan sistem rem mekanik. Dapat disimpulkan bahwa proses dari sistem *regenerative brake* ini dapat memperpanjang jangka waktu pemakaian dan meningkatkan efisiensi dari bahan bakar kendaraan tersebut (Guntur, Analisa Energi Bangkitan dan Efisiensi dari Penggunaan *Regenerative brake* pada Multipurpose Electric Vehicle ITS (MEvITS), 2023).

Untuk memastikan kendaraan listrik memenuhi standar efisiensi dan emisi global, banyak negara mengadopsi standar pengujian seperti WLTP (*Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure*) yang ditetapkan oleh UNECE (*United Nations Economic Commission for Europe*). WLTP mensimulasikan kondisi berkendara nyata dan digunakan untuk mengukur konsumsi energi serta efisiensi sistem kendaraan termasuk sistem pengereman regeneratif. Dalam penelitian ini, model simulasi sistem *regenerative brake* pada kendaraan listrik Laksamana V.2 juga mempertimbangkan parameter-parameter yang selaras dengan siklus berkendara WLTP untuk meningkatkan keakuratan evaluasi efisiensi energi.

Penelitian ini juga bertujuan untuk merancang dan mengembangkan teknologi *regenerative brake* pada mobil Listrik laksamana v.2 dengan memanfaatkan simulasi menggunakan MATLAB-Simulink. Melalui simulasi ini, penulis memodelkan dan menganalisis kinerja sistem *regenerative brake*, termasuk efisiensi energi yang dihasilkan, proses pengembalian daya ke baterai, serta dampak terhadap daya tahan baterai. Selain itu, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan teknologi otomotif yang lebih efisien dan ramah lingkungan, khususnya pada kendaraan listrik.

2. METODOLOGI

2.1 Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode simulasi berbasis MATLAB-Simulink dengan pendekatan pemodelan dan analisis sistem *regenerative brake*. Metode ini memungkinkan simulasi parameter-parameter sistem *regenerative brake* secara virtual berdasarkan profil pengujian WLTP sebagaimana diatur dalam regulasi UNECE No. 154. Dengan demikian, hasil simulasi lebih mendekati kondisi

aktual berkendara dan dapat menjadi dasar untuk evaluasi performa kendaraan listrik yang sesuai standar global. Metode ini lebih efisien dalam hal waktu dan biaya karena memungkinkan pengujian berbagai parameter tanpa menggunakan pengujian fisik.

2.2 Diagram Alir



Gambar. 1 Diagram Alir

2.3 Spesifikasi Mobil Listrik Laksamana V.2

Tabel. 1 Parameter Kendaraan

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Panjang kendaraan	-	2	m
Berat kendaraan	W	1913.95	N
Massa kendaraan	m	195	kg
Jarak titik berat ke roda depan	I_f	0.64	m
Jarak titik berat ke roda belakang	I_r	0.76	m
Jarak antara roda depan dan belakang	L	1.4	m
Tinggi titik pusat massa	h	0.1778	m
Perlambatan kendaraan	a	0.1-0.8	m/s ²

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Distribusi Gaya Pengereman

a. Pengereman Ideal

Distribusi ideal terjadi ketika roda depan dan belakang menerima gaya proporsional sesuai beban normalnya. Namun, regulasi ECE menetapkan batas minimum distribusi pengereman untuk mencegah roda belakang mengunci terlebih dahulu.

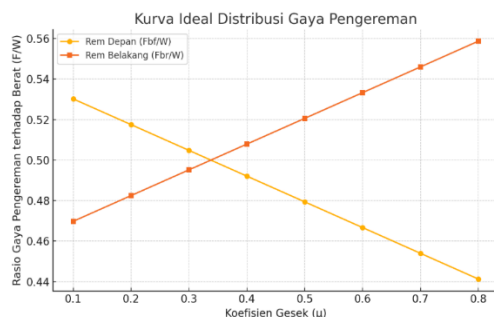
$$\frac{F_{br}}{W} = \left(\frac{L_f - \frac{a}{g}h}{L_r + \frac{a}{g}h} \right) \cdot \frac{F_{bf}}{W} \quad (1)$$

L_f = jarak titik berat ke roda depan

L_r = jarak titik berat ke roda belakang

h = tinggi titik berat

a = deselerasi (dalam variasi a/g)



Gambar. 2 Kurva Ideal Distribusi Pengereman

Grafik ini menunjukkan distribusi gaya pengereman ideal antara roda depan (F_{bf}/W) dan roda belakang (F_{br}/W) terhadap variasi koefisien gesek jalan (μ). Terlihat bahwa semakin besar koefisien gesek, porsi gaya pengereman pada roda belakang meningkat, sementara pada roda depan menurun. Pola ini menunjukkan distribusi yang seimbang untuk menjaga stabilitas pengereman, sesuai teori distribusi ideal berdasarkan parameter geometri kendaraan Laksamana V.2.

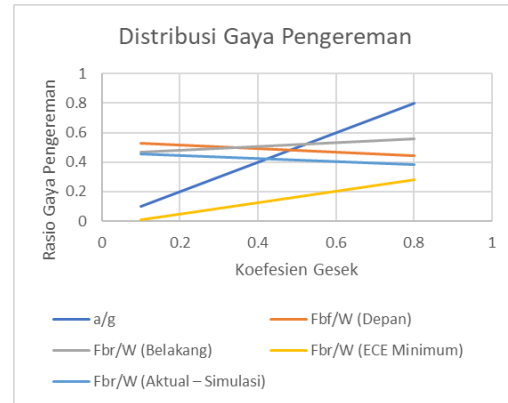
b. Pengereman Minimum (ECE)

Pengereman minimum dihitung melalui persamaan dibawah:

$$\frac{F_{bf}}{W} = \frac{\mu}{L} \cdot (L_r + (0.1 + 0.85(\mu - 0.2)) \cdot h) \quad (2)$$

$$\frac{F_{br}}{W} = (0.1 + 0.85(\mu - 0.2)) - \frac{F_{bf}}{W} \quad (3)$$

Distribusi gaya pengereman digunakan untuk membandingkan antara distribusi gaya rem ideal, batas minimum sesuai regulasi, dan distribusi aktual kendaraan listrik Laksamana V.2. Kemudian perbandingan ini memberikan gambaran visual terhadap stabilitas dan kinerja sistem pengereman dalam berbagai kondisi koefisien gesek (μ).



Gambar. 3 Distribusi Gaya Pengereman

Grafik di atas menunjukkan hubungan antara rasio percepatan deselerasi terhadap gravitasi (a/g) dengan distribusi gaya pengereman pada roda depan dan roda belakang. Pada nilai a/g yang rendah, distribusi gaya pengereman didominasi oleh roda depan, mengingat perpindahan beban kendaraan cenderung mengarah ke depan saat proses pengereman berlangsung. Namun, seiring meningkatnya nilai a/g , kontribusi roda belakang terhadap total gaya pengereman juga meningkat secara bertahap.

Hal ini mencerminkan bahwa sistem pengereman telah dirancang secara proporsional, di mana porsi pengereman roda belakang disesuaikan dengan intensitas deselerasi kendaraan. Peningkatan kontribusi roda belakang bertujuan untuk menjaga stabilitas kendaraan serta mengoptimalkan efisiensi pengereman, tanpa menyebabkan gejala *overbrake* pada roda belakang.

Pada grafik ini juga ditampilkan batas minimum gaya pengereman roda belakang sesuai regulasi internasional yang berlaku. Hasil simulasi distribusi aktual menunjukkan bahwa nilai gaya pengereman roda belakang selalu berada di atas batas minimum tersebut. Hal ini membuktikan bahwa sistem pengereman kendaraan telah memenuhi standar keselamatan yang ditetapkan dan dapat beroperasi secara aman dalam berbagai kondisi deselerasi.

3.2 Simulasi Gaya Pengereman

Simulasi dilakukan pada *MATLAB-Simulink* dengan menggunakan data kendaraan Laksamana V.2 dan profil kecepatan *WLTP Class 1*. Simulasi dibagi ke dalam beberapa subsistem, antara lain gaya deselerasi, hambat *rolling*, hambat *drag*, dan pengereman total.

a. Gaya Deselerasi

Gaya deselerasi merupakan gaya utama yang timbul saat kendaraan mengalami perlambatan akibat pengereman. Gaya ini merupakan bagian

penting dalam simulasi distribusi pengereman karena mempengaruhi besarnya torsi dan daya yang dibutuhkan oleh sistem pengereman. Hubungan gaya deselerasi dengan massa dan percepatan dapat dituliskan sebagai:

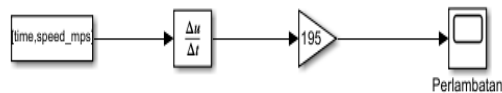
$$F = m \cdot a \quad (3)$$

di mana:

F = gaya deselerasi (N)

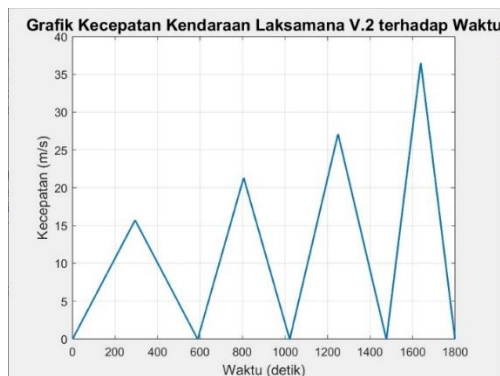
m = massa kendaraan (kg)

a = percepatan negatif (deselerasi) dalam m/s^2



Gambar. 4 Blok Simulink Deselerasi

Dalam simulasi ini, data kecepatan kendaraan diperoleh dari variabel `speed_mps` yang merupakan hasil keluaran MATLAB-Simulink. Data tersebut menggambarkan profil kecepatan kendaraan Laksamana V.2 terhadap waktu sepanjang 1800 detik dengan 1804 titik data, mengacu pada siklus *WLTP Class 1*. Profil kecepatan ini penting untuk mengevaluasi dinamika perlambatan yang terjadi selama proses pengereman.



Gambar. 5 Grafik Kecepatan Terhadap Waktu

Grafik tersebut menunjukkan perubahan kecepatan kendaraan dari kondisi diam, mengalami akselerasi, mempertahankan kecepatan tertentu, hingga kembali ke kecepatan nol. Pola kecepatan yang berfluktuasi ini mencerminkan proses berkendara dinamis seperti yang terjadi dalam kondisi lalu lintas nyata. Penurunan nilai kecepatan pada grafik menandakan fase deselerasi, yang akan digunakan untuk menghitung gaya deselerasi pada setiap segmen waktu.

Nilai deselerasi kemudian akan digunakan untuk menghitung gaya pengereman total yang diperlukan selama proses *regenerative braking*. Gaya ini menjadi dasar dalam menentukan distribusi pengereman antara sistem rem

regeneratif dan mekanik, yang akan dibahas pada subbab selanjutnya.

b. Gaya Hambat *rolling*

Gaya hambat *rolling* (*rolling resistance*) merupakan gaya resistif yang terjadi akibat deformasi elastis antara ban dan permukaan jalan selama kendaraan bergerak. Meskipun nilainya relatif kecil dibandingkan gaya deselerasi dan gaya hambat aerodinamika, gaya ini tetap penting untuk diperhitungkan dalam analisis total gaya pengereman kendaraan listrik.

$$F_r = C_r \cdot m \cdot g \quad (4)$$

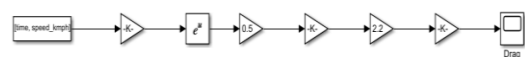


Gambar. 6 Blok Simulink Gaya Hambat Rolling

c. Gaya Hambat *Drag*

Gaya hambat aerodinamika (*drag*) adalah gaya resistif yang timbul akibat interaksi antara kendaraan dengan udara saat bergerak. Gaya ini sangat tergantung pada kecepatan kendaraan dan meningkat secara *kuadratik*, sehingga berperan signifikan pada kondisi kecepatan tinggi. *Drag* menjadi salah satu komponen penting dalam total beban pengereman kendaraan listrik.

$$F_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_d \cdot A \cdot v^2 \quad (5)$$



Gambar. 7 Blok Simulink Gaya Hambat Drag

3.2 Gaya dan Porsi Pengereman

Gaya pengereman total pada kendaraan merupakan hasil kombinasi dari tiga komponen utama, yaitu gaya deselerasi, gaya hambat *rolling*, dan gaya hambat aerodinamika (*drag*). Ketiganya bekerja melawan arah gerak kendaraan dan harus diatasi oleh sistem pengereman, baik mekanik maupun regeneratif.



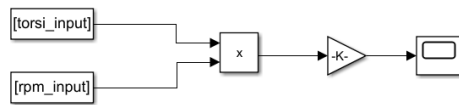
Gambar. 8 Blok Simulink Gaya Pengereman Total

3.3 Daya dan Energi yang Tersedia

a. Daya Pengereman

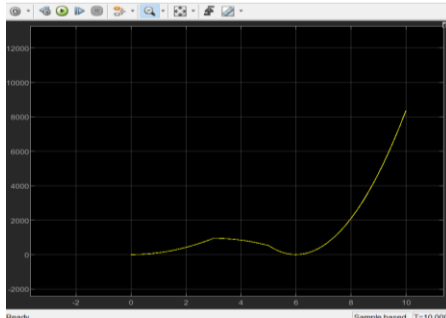
Simulasi daya pengereman dilakukan menggunakan MATLAB-Simulink dengan memanfaatkan input berupa *torsi_input* dan *rpm_input* dari *workspace*. Gambar 4.14

menunjukkan konfigurasi blok yang digunakan.



Gambar. 9 Daya Pengereman

Hasil simulasi kemudian divisualisasikan melalui blok *Scope*, yang memperlihatkan grafik daya terhadap waktu.



Gambar. 10 Grafik Daya Terhadap Waktu

Berdasarkan grafik output dari simulasi, kurva daya menunjukkan peningkatan tajam pada detik ke-3, yang merupakan puncak dari kombinasi antara torsi dan RPM tertinggi. Perhitungan rinci dari data input sebagai berikut:

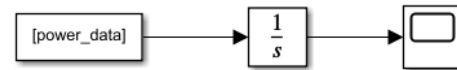
Tabel. 2 Data Torsi

Waktu (s)	Torsi (Nm)	RPM	Daya (Watt)
0	0	0	0
1	10	100	104,71
2	20	200	418,32
3	30	300	943,84
4	40	200	837,04
5	50	100	523,56
6	0	0	0

Nilai daya maksimum sebesar 942.13 Watt terjadi pada detik ke-3, ketika motor menerima torsi sebesar 30 Nm dan berputar pada 300 RPM.

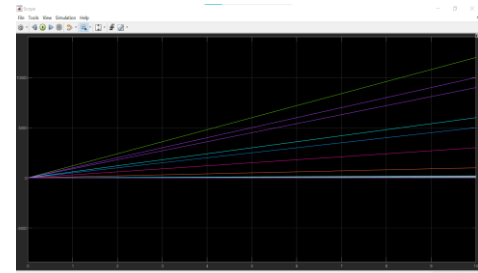
b. Energi yang tersedia

Energi yang tersedia dari proses pengereman adalah akumulasi dari daya pengereman selama periode waktu tertentu. Dalam sistem *regenerative brake*, energi ini berpotensi untuk dikonversi kembali menjadi energi listrik yang dapat disimpan dalam baterai kendaraan.



Gambar. 11 Energi yang Tersedia

Hasil simulasi energi ini kemudian ditampilkan melalui blok *Scope (Energy)* dalam bentuk grafik energi terhadap waktu, yang menggambarkan seberapa besar energi yang berhasil dikumpulkan kendaraan selama siklus pengereman.



Gambar. 12 Grafik Energi yang Tersedia

Dari hasil simulasi dapat disimpulkan bahwa sistem pengereman menghasilkan total energi yang dapat dimanfaatkan ulang oleh sistem *regenerative brake*. Nilai energi ini diperoleh dari area di bawah kurva daya dan menunjukkan potensi efisiensi pemulihan energi kendaraan. Semakin besar daya pengereman dan semakin lama durasinya, maka semakin besar pula energi yang dihasilkan.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis sistem *regenerative brake* pada Mobil Listrik Laksamana V.2 menggunakan *MATLAB-Simulink* berbasis siklus berkendara *WLTP Class 1*, maka diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- Sistem *regenerative brake* berhasil disimulasikan berdasarkan siklus *WLTP Class 1* sesuai regulasi UNECE, yang merepresentasikan kondisi berkendara nyata secara lebih akurat. Hasil simulasi menunjukkan bahwa distribusi gaya pengereman antara roda depan dan belakang telah memenuhi standar keselamatan, serta sistem *regenerative brake* bekerja efektif saat deselerasi dengan mengalirkan energi balik ke baterai tanpa menyebabkan ketidakstabilan kendaraan.
- Simulasi dan evaluasi performa sistem *regenerative brake* menunjukkan efisiensi pemulihan energi yang signifikan, berkisar antara 63% hingga 70%, dengan efisiensi tertinggi tercapai pada kecepatan rendah. Energi yang diregenerasikan meningkat seiring kecepatan awal, namun efisiensi menurun

akibat dominasi gaya hambat pada kecepatan tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa sistem paling optimal digunakan dalam kondisi lalu lintas kota yang sering melibatkan pengereman.

Tabel. 3 Efisiensi yang Dihasilkan

Kecepatan Awal (km/jam)	Energi Tersimpan (Joule)	Efisiensi (%)
10	524,62	69,75
30	4.605,29	68,05
50	12.976,73	69,03
70	24.103,78	65,45
100	47.388,22	62,98

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Negeri Bengkalis atas fasilitas dan dukungan yang diberikan selama pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Ali Basrah Pulungan¹), S. T. (2018). Buck Converter Sebagai Regulator Aliran Daya Pada Pengereman Regeneratif. *Jurnal Eccis*, 12, 93-97.
- Ashari Didik H., D. I. (2024). Optimasi Efisiensi Energi Pada Mobil Listrik Empat Penumpang Melalui Sistem *Regenerative brake*. *Jurnal Ilmiah Teknik Industri*, 12, 12-22.
- Europe, U. N. (2021, March). Un Regulation No. 154: WLTP – Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure. Retrieved From <https://unece.org/info/transport/vehicle-regulations/un-regulations/2021-03/un-regulation-no-154-wltp>
- Gillespie, T. D. (1992). *Fundamentals Of Vehicle Dynamics*. Warrendale, Pa: Society Of Automotive Engineers.
- Guntur, A. E. (2023). Analisa Energi Bangkitan Dan Efisiensi Dari Penggunaan *Regenerative brake* Pada Multipurpose Electric Vehicle Its (Mevits). *Jurnal Teknik Its* Vol. 12, No.3, (2023) Issn: 2337-3539 (2301-9271 Print), 1.
- Kesavan Valis Subramaniam, S. C. (2020). Wheel Slip Regulation Of Electrified Heavy Road Vehicles Using Regenerative Braking. *Ifac*, 422-427.
- Kmli-Polban. (2024). In *Kompetisi Mobil Listrik Indonesia Xiii* (P. 2). Bandung.
- Nur Windasari¹, S. Y. (2023). Analisis Efisiensi Mobil Listrik Berbasis Panel Surya Sebagai Upaya Pemanfaatan Energi Terbarukan. *Journal Of Health, Education, Economics, Science, And Technology (J-Hest)*, 41-47.
- Perdana, P. B. (2019). Analisa Penggunaan *Regenerative brake* Pada Mobil Multiguna Pedesaan Bertenaga Listrik. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Prakoso, M. A. (2020). Analisis Rasio, Tingkat Transmisi, Sistem Tenaga, Dan *Regenerative brake* Pada Truk Bertenaga Listrik. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Rajamani, R. (2012). *Vehicle Dynamics And Control*. New York: Springer.
- Unece. (2020, July 17). Unece Adopts More Accurate Fuel Efficiency And Co₂ Test For New Cars: WLTP. Retrieved From <https://unece.org/press/unece-adopts-more-accurate-fuel-efficiency-and-co2-test-new-cars-wltp>