

**Desain Sistem Pengereman Regeneratif Pada Sepeda Listrik Ringkas****Rizki Pratama Putra<sup>1</sup>; Ibnu Hajar<sup>2</sup>; Christine Widyastuti<sup>3</sup>**<sup>1,2,3</sup> Institut Teknologi PLN<sup>1</sup> rizki @itpln.ac.id**Abstract**

*Electric vehicle utilization to reduce environmental pollution becoming more popular nowadays that the energy efficiency of electric vehicles become important topic to discuss. In this paper the regenerative braking method to improve the efficiency of portable electric bike is proposed. This study aims to create a dynamic model of the proposed regenerative braking system, so that the hypothesis of the efficiency characteristics of the braking system can be built as consideration in making and optimizing the physical model later. The dynamic model will be simulated using Simulink to see the braking efficiency based on the initial speed of the bicycle, in addition, the braking system parameters such as Spur Gear will be varied to see the efficiency characteristic of the system. From the simulation results, the torque loss value resulting from the braking process is proportional to the initial braking speed. On the other hand braking efficiency also increases with higher initial braking speed, this indicates that the higher torque loss due to increased initial braking speed does not have a linear characteristic. A high spur gear ratio increases the braking torque and results in higher efficiency up to 90%. Nevertheless, the high conversion efficiency is a result from fixed total braking time which is difficult to achieve when the rider braking behavior is very dynamic. Implementation of secondary braking system or other method will be needed to obtain effective and efficient regenerative braking method.*

**Keywords:** Energy Conservation, Regenerative Braking, Electric Vehicle, Efficiency**Abstrak**

*Penggunaan kendaraan listrik yang semakin populer untuk mengurangi pencemaran lingkungan menuntut efisiensi penggunaan yang baik agar tujuan tersebut dapat tercapai. Penelitian diusulkan suatu metode pengereman regeneratif untuk meningkatkan efisiensi penggunaan energi dari sepeda listrik ringkas. Penelitian ini bertujuan untuk membuat suatu model dinamis dari sistem pengereman regeneratif yang diusulkan, sehingga hipotesis karakteristik efisiensi sistem pengereman dapat dibangun sebagai bahan pertimbangan dalam membuat dan mengoptimasi model fisik nantinya. Model dinamis akan disimulasikan menggunakan Simulink untuk melihat efisiensi pengereman berdasarkan kecepatan awal sepeda, selain itu pengaruh besar parameter sistem pengereman yaitu Spur Gear akan divariasikan untuk melihat variasi efisiensi. Dari hasil simulasi didapatkan bahwa nilai rugi torka yang dihasilkan dari proses pengereman sebanding dengan kecepatan awal pengereman. Di sisi lain efisiensi pengereman semakin meningkat dengan meningkatnya kecepatan awal pengereman, hal ini menandakan bahwa peningkatan rugi torka akibat peningkatan kecepatan awal pengereman tidak memiliki sifat linear. Rasio spur gear yang tinggi memperbesar torka pengereman dan menghasilkan efisiensi yang nilainya naik jika rasio spur gear diperbesar. Hasil simulasi ini memberikan informasi awal untuk mengembangkan desain dan mengoptimasi efisiensi dan efektivitas pengereman.*

**Kata kunci:** Konservasi Energi, Pengereman Regeneratif, Kendaraan Listrik, Efisiensi

## 1. PENDAHULUAN

Penggunaan kendaraan listrik untuk mengurangi polusi lingkungan semakin gencar disosialisasikan saat ini. Kendaraan listrik menggunakan baterai sebagai sumber energi listrik untuk menggerakkan motor listrik penggerak. Sehingga objektif utama dalam suatu desain kendaraan listrik adalah bagaimana memaksimalkan energi baterai untuk agar kendaraan listrik dapat menempuh jarak tempuh sejauh mungkin [1]. Terdapat beberapa metode atau cara yang ditempuh untuk memenuhi objektif tersebut diantaranya adalah dengan membuat bobot total kendaraan listrik seringan mungkin [2]. Metode yang lain adalah dengan menggunakan motor listrik efisiensi tinggi, hal ini dapat dicapai dengan rekayasa motor listrik menggunakan teknologi dan material maju [3].

Selain itu untuk memaksimalkan penggunaan energi listrik dari baterai cara lain yang dapat dilakukan adalah dengan memanfaatkan pengereman regeneratif. Ketika kendaraan listrik bergerak dan dilakukan pengereman, putaran roda akan diredam oleh rem mekanik sehingga terjadi konversi energi dari energi mekanik ke energi panas [4]. Pengereman regeneratif merupakan suatu mekanisme dimana ketika terjadi pengereman, energi mekanis dikonversi kembali menjadi energi listrik yang disalurkan ke baterai. Sehingga energi dapat terkonservasi kembali dan meningkatkan efisiensi kendaraan listrik.

Penelitian mengenai pengereman regenerative telah banyak dilakukan pada kendaraan listrik dengan berbagai macam metode dan karakteristik efisiensi sistem pengereman. Penerapan algoritma kontrol yang mempertimbangkan karakteristik pengereman telah diusulkan dan diteliti salah satunya oleh Jiweon Ko, dkk. Algoritma kontrol yang diusulkan pada penelitian tersebut menghasilkan respon torka pengereman yang lebih tepat sehingga gradien gaya pengereman menjadi meningkat dan mempercepat proses regenerasi energi [5]. Dalam penelitian yang lain, metode kontrol PID untuk mengatur distribusi gaya pengereman telah diteliti oleh Xiaohong Nian. Penelitian tersebut menggunakan dinamo DC untuk merecover energi dan kontrol PID untuk mengatur distribusi gaya pengereman pada beberapa rem di kendaraan listrik, dengan metode ini jarak tempuh dari kendaraan listrik bertambah jauh dari sebelumnya [6].

Pemodelan konsumsi energi listrik dari kendaraan listrik yang menggunakan pengereman regenerative telah diteliti oleh beberapa penelitian diantaranya yaitu oleh C. Fiori, dkk. Dimana model dinamis yang dihasilkan dalam penelitian tersebut hanya memiliki eror sebesar 5.9% dari hasil eksperimen [7]. Penggunaan sistem pengereman regenerative berbasis open differensial dan media elastic untuk menyimpan energi telah diteliti oleh David H., dkk. Sistem tersebut menghasilkan efisiensi sebesar 5.1% yang diaplikasikan pada mobil sedan [8].

## 2. METODE/PERANCANGAN PENELITIAN

### 2.1. Prinsip Kerja Secara Umum

Suatu sepeda listrik dan muatannya dengan massa total  $m$  yang bergerak dengan kecepatan  $v$  akan memiliki energi dan momentum menurut persamaan di bawah ini :

$$p = mv \quad (1)$$

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2)$$

Dari persamaan tersebut terlihat bahwa  $v$  atau kecepatan sangat berpengaruh terhadap peningkatan energi kinetik kendaraan, sehingga efek pengereman regeneratif lebih tampak ketika kendaraan tersebut melaju dengan kecepatan tinggi dibandingkan pada kecepatan rendah. Pada mobil listrik, efisiensi kendaraan umumnya hanya sekitar 20%, dengan 80% sisa energi habis dikonversi menjadi panas ketika dilakukan pengereman [9]. Torka mekanik dari putaran roda sepeda akan

disalurkan ke generator atau dinamo DC untuk diubah kembali menjadi energi listrik, dan sebagian torka lagi disalurkan ke kampas rem yang diubah menjadi energi panas [10].

Ketika pengereman dilakukan maka akan terjadi perlambatan pada sepeda, pada metode pengereman dengan menggunakan piringan cakram, hal ini dicapai dengan memberikan gaya dorong pada kanvas cakram sehingga terjadi perlambatan pergerakan piringan cakram. Besar gaya rata-rata yang diperlukan untuk menghentikan pergerakan sepeda dalam selang waktu  $\Delta t$  adalah

$$\overline{F_b} = -\frac{\Delta p}{\Delta t} \tag{3}$$

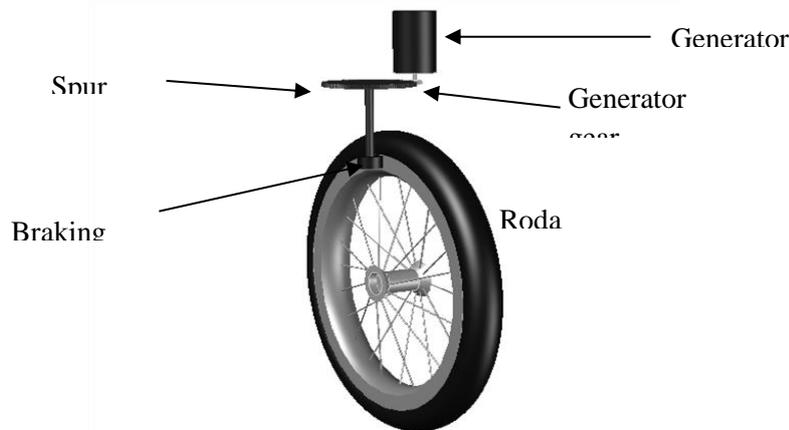
Pada pengereman konvensional, kanvas rem terikat pada bagian statis kemudian digerakkan oleh tali rem atau sistem hidraulik ke cakram rem sehingga terjadi gesekan dan gaya gesek ini merupakan gaya pengereman  $\overline{F_b}$  yang akan membuat perlambatan perputaran piringan cakram. Proses ini akan menghasilkan panas sehingga energi menjadi terkonservasi dimana energi kinetik dari putaran cakram berubah seluruhnya menjadi energi panas yang diakibatkan gesekan antara kanvas rem dan piringan cakram.

Pada metode pengereman regenerative yang diusulkan di penelitian ini, untuk menghindari konversi energi kinetic menjadi energi panas, mekanisme kerja dari kanvas rem akan dibuat sedemikian rupa sehingga gaya pengereman bukan berasal dari gesekan antara kanvas rem dan piringan cakram, gaya pengereman akan berasal dari torka pembebanan dan inersia generator DC. Gaya pengereman akan memutar rotor generator DC untuk menghasilkan listrik yang akan disimpan kembali ke baterai.

**2.2. Pemodelan Matematis**

***Model dinamis interaksi roda sepeda, gear dan generator***

Untuk memperlambat pergerakan sepeda dengan momentum p, maka jika menggunakan mekanisme yang diusulkan, torka beban atau torka minimum yang diperlukan untuk memutar rotor generator DC harus sama atau lebih besar dari torka pengereman yang diperlukan untuk memperlambat pergerakan sepeda dalam jangka waktu  $\Delta t$  yang bergerak dengan momentum p. Metode yang diusulkan untuk memperbesar torka pengereman yang dihasilkan oleh kanvas rem adalah dengan mengimplementasikan spur gear pada dinamika perputaran rotor generator dan kanvas rem. Desain mekanisme pengereman yang diusulkan dapat dilihat pada gambar di bawah ini



**Gambar 1.** Konsep sistem pengereman yang diusulkan

Persamaan dinamis relasi torka dan putaran generator diberikan sebagai berikut :

$$I \frac{d^2\theta_g}{dt^2} = \tau_g - \tau_m - \tau_e - \tau_l = F_g r_g - \tau_m - \tau_e - \tau_l \tag{4}$$

Dimana

$$\tau_l = \tau_b + \tau_s \tag{5}$$

$$F_g = \frac{\tau_s}{r_s} \tag{6}$$

$$\tau_s = F_b r_b \tag{7}$$

$$I \frac{d^2\theta_g}{dt^2} = F_b \frac{r_b}{r_s} r_g - \tau_m - \tau_e \tag{8}$$

Sehingga

$$\frac{r_s}{r_b r_g} \left( I \frac{d^2\theta_g}{dt^2} + \tau_m + \tau_e + \tau_l \right) = F_b \tag{9}$$

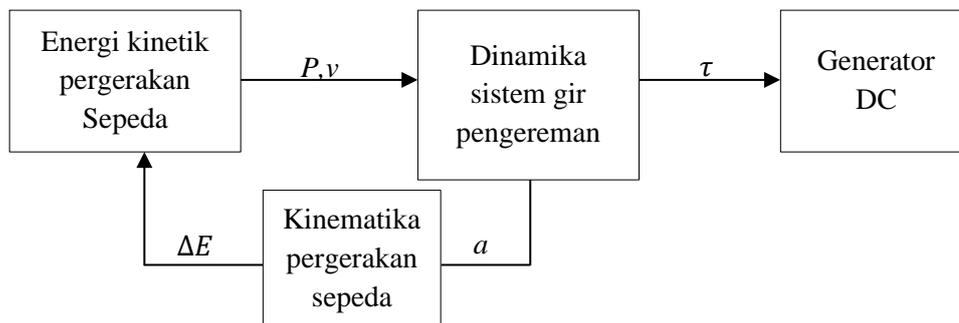
Jika kendaraan melaju dengan momentum  $p$  kemudian bergerak melambat dengan perlambatan  $a$  maka

$$\frac{dp}{dt} - F_b = ma \tag{10}$$

Sementara itu kecepatan pergerakan sepeda akan berkurang menurut persamaan kinematika

$$v_t = v_0 - at \tag{11}$$

Model diagram alir pada proses pengereman ini dapat digambarkan sebagai berikut :

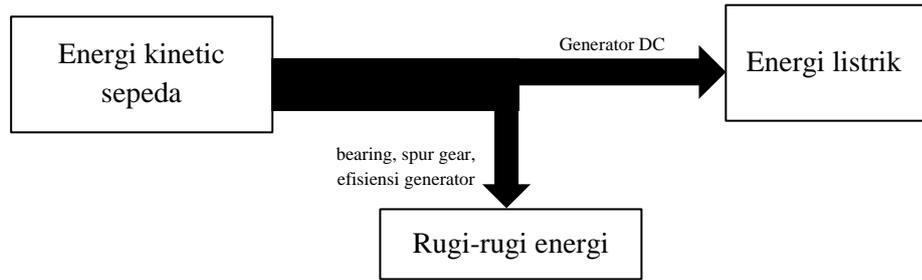


**Gambar 2.** Diagram alir proses pengeraman

Berdasarkan persamaan (4) rugi torka yang berasal dari bearing, spur gear, gaya magnet generator dan torka elektromagnetik dalam keadaan berbeban akan memperlambat pergerakan roda sepeda. Penggunaan spur gear memperbesar efek rugi torka yang kemudian menjadi torka redaman pada roda sepeda dengan faktor  $r_s r_v / r_b r_g$ , sementara itu kecepatan sudut yang dirasakan oleh generator akibat perputaran roda sepeda juga akan diperbesar dengan faktor yang sama.

**Model dinamis konversi energi**

Generator bekerja memanfaatkan putaran dari roda sepeda yang telah diperlambat oleh beberapa faktor seperti rugi torka dan torka elektromagnetik dari generator itu sendiri. Diagram aliran energi dari proses konversi ini dapat dilihat pada gambar berikut ini:



**Gambar 3.** Aliran energi mekanisme pengereman

Adapun persamaan energi output generator dapat di tuliskan sebagai berikut :

$$E = \int_{t_0}^{t_a} P_{dc} dt \tag{12}$$

Sementara untuk  $P_{dc}$  dapat dicari dengan persamaan:

$$P_{dc} = VI \tag{13}$$

Dari persamaan (9)-(12), energi output yang dihasilkan dari pengereman tidak konstan sejak pengereman dilakukan, sebab nilai dari torca yang ada dalam persamaan tersebut nilainya dipengaruhi oleh variable dinamis seperti kecepatan sepeda. Momentum dari sepeda juga akan menentukan berapa besar energi yang akan dihasilkan oleh generator.

***Efektivitas pengereman dan besar energi yang terkonversi***

Persamaan-persamaan yang ditunjukkan diatas menunjukkan bahwa lama waktu yang dibutuhkan oleh sepeda untuk berhenti tergantung dari besar torca-torca pengereman dari sistem pengereman dan besar momentum sepeda. Sedangkan pada kondisi nyata, pengereman bersifat dinamis, sewaktu-waktu dibutuhkan pengereman yang cepat dan pada waktu yang lain dibutuhkan pengereman yang lambat. Oleh karena itu dalam sistem pengereman ini, penambahan pengereman mekanis masih dibutuhkan. Kehadiran pengereman ini akan mengurangi energy mekanik yang dapat terkonversi menjadi energi listrik. Hubungan pengereman mekanis dan pengereman regenerative dalam kaitannya dengan efisiensi konversi regenerative dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\eta = \frac{E_k - E_{bm}}{E_k} \times 100\%$$

Untuk memperlambat laju sepeda sebesar  $a \text{ m/s}^2$ , maka dibutuhkan torca pengereman sebesar  $\sum \tau$ . Torca ini adalah jumlah torca pengereman regenerative dan pengereman mekanis, karena torca pengereman regeneratif adalah konstan sedangkan torca pengereman mekanis dapat diatur maka semakin besar momentum atau inersia ekivalen dari sepeda yang akan direm, torca pengereman mekanis yang diperlukan semakin besar yang akan mengurangi efektivitas pengereman regeneratif.

Penggunaan inersia atau magnet permanent yang besar pada generator DC dapat meningkatkan torca pengereman dan mengurangi keterlibatan pengereman mekanis dalam mengurangi kecepatan sepeda.

**3. HASIL DAN PEMBAHASAN**

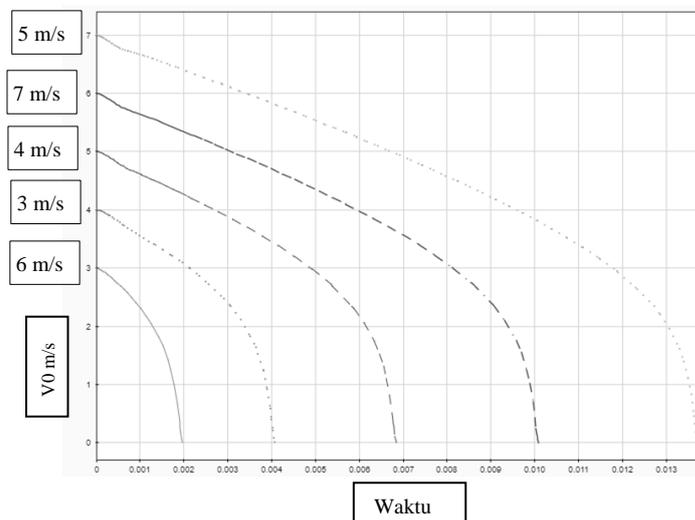
Pada bagian ini, hasil yang akan ditunjukkan dibagi menjadi 2 bagian yaitu : bagaimana perubahan rugi-rugi pengereman terhadap momentum sepeda yang akan direm, seberapa besar efisiensi regenerasi energi terhadap perubahan parameter-parameter pengereman dan bagaimana efektivitas pengereman regenerative yang dikombinasikan dengan pengereman mekanik. Adapun parameter yang digunakan dalam simulasi adalah sebagai berikut :

**Tabel 1.** Parameter yang digunakan dalam simulasi

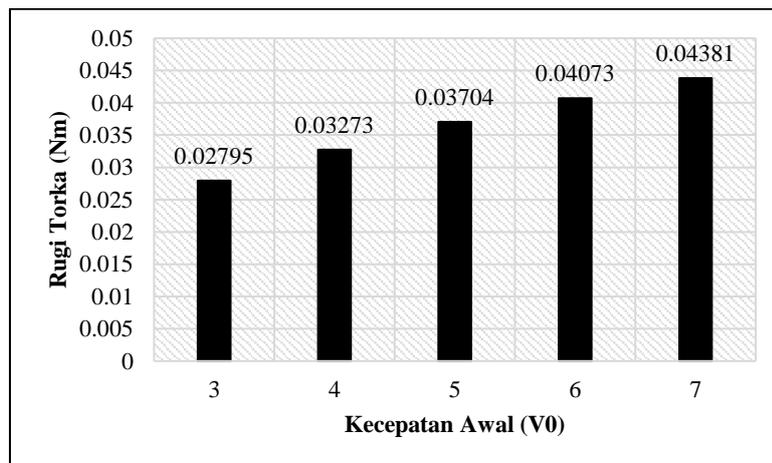
Parameter	Satuan	Nilai
Brake gear radius	m	0.005
Bike rim radius	m	0.3
Bike total inertia	Kg.m <sup>2</sup>	2.7
Generator DC inertia	Kg. m <sup>2</sup>	6.2e-4
Magnetic torque force	N	2
Jumlah bearing		2

### 3.1. Hubungan Kecepatan Sepeda Terhadap besar Energi yang Dihasilkan

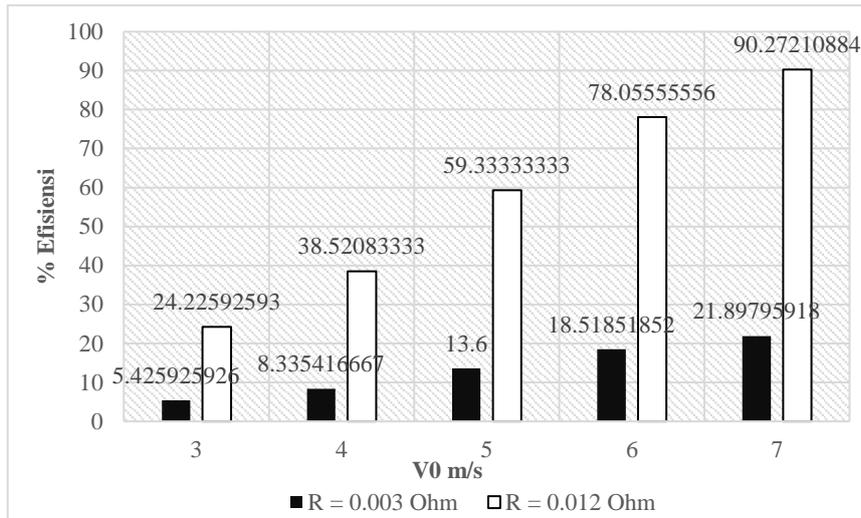
Dalam penggunaan rem, kecepatan dan massa total sepeda dan pengendara akan bervariasi, sementara itu energi output dari generator dan juga rugi-rugi sistem pengereman seperti pada bearing dan spur gear sangat bergantung pada faktor tersebut. Di bawah ini ditampilkan bagaimana pengaruh kecepatan atau momentum sepeda terhadap energi yang dihasilkan :



**Gambar 4.** Lama waktu pengereman berdasarkan kecepatan awal pengereman



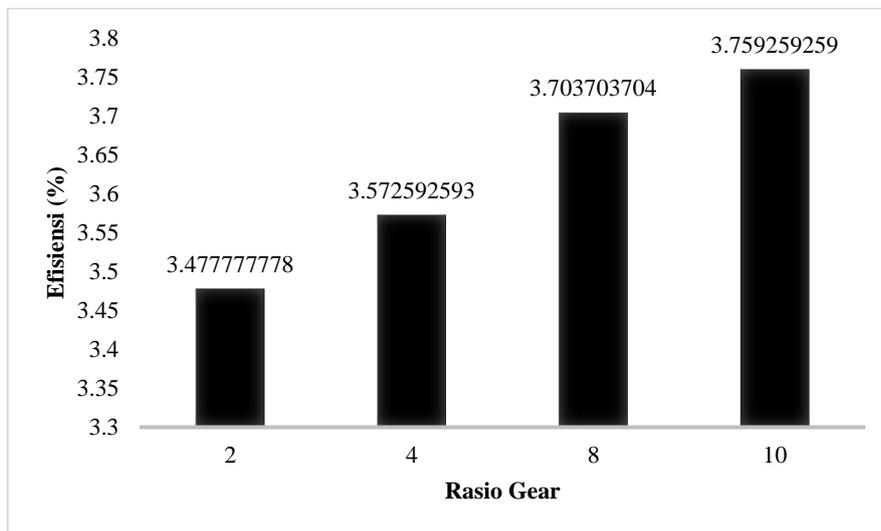
**Gambar 5.** Hubungan total rugi torka dan kecepatan awal pengereman



Gambar 6. Hubungan efisiensi konversi regeneratif dengan kecepatan awal pengereman

### 3.2. Efek rasio spur gear terhadap efisiensi pengereman

Rugi torka terdiri dari rugi friksi yang dihasilkan oleh spur gear dan bearing. Nilai rugi-rugi tersebut dapat dirubah dengan mengatur parameter statis dan dinamis dari masing-masing komponen. Parameter statis yakni parameter terkait geometri komponen tersebut dimana untuk bearing sendiri, perubahan parameter akan membuat sulitnya mencari komponen dengan parameter yang dikehendaki di pasaran. Lain halnya dengan spur gear yang mana ukurannya bisa divariasikan, dalam gambar di bawah ini ditampilkan bagaimana pengaruh besar rasio spur gear terhadap efisiensi pengereman :



Gambar 7. Efek rasio spur gear terhadap efisiensi pengereman

Dari hasil simulasi yang ditunjukkan diatas, untuk memvalidasi model matematis yang telah dibangun dapat ditinjau secara kualitatif gambar 1 yang menunjukkan lama waktu pengereman dengan kecepatan awal pengereman. Pada gambar tersebut terlihat jelas bahwa terjadi perlambatan pada sepeda dengan waktu berhenti yang bervariasi sebanding dengan kecepatan awal pengereman. Hal ini tentunya sesuai dengan pengamatan yang terlihat secara nyata jika menggunakan pengereman

mekanis biasa. Pengereman regenerative yang tujuannya memperlambat pergerakan sepeda tentunya memberikan efek yang sama.

Pada gambar 2 diperlihatkan efek total rugi torka yang merupakan rugi-rugi dominan terhadap kecepatan awal pengereman. Semakin besar, kecepatan awal pengereman maka semakin besar pula rugi-rugi pengereman yang terjadi. Kemudian pada gambar 3 ditampilkan bagaimana pembebanan generator DC yakni dengan beban resistif mempengaruhi efisiensi dari sistem pengereman itu sendiri. Persamaan (9) menunjukkan hubungan torka dan percepatan sudut dari putaran roda sepeda, dari persamaan tersebut kita dapat mencari percepatan sudut generator DC, sementara persamaan (12) memberikan energi yang bisa dikonversi selama proses pengereman. Torka elektromagnetik yang berasal dari generator berbeban akan menjadi torka pengereman tambahan sehingga semakin besar arus yang mengalir pada output generator ( $R$  semakin kecil) semakin besar pula torka lawan yang membuat konversi energi berjalan singkat dengan nilai yang kecil pula.

Sementara itu pada gambar 4 diperlihatkan efek rasio spur gear terhadap efisiensi pengereman yang dihasilkan. Spur gear digunakan untuk memperbesar torka lawan atau torka perlambatan yang berasal dari generator dan rugi-rugi torka. Hasil simulasi menunjukkan secara teori bahwa rasio spur gear yang lebih besar akan menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi.

#### 4. KESIMPULAN DAN SARAN

Pada penelitian ini telah diusulkan suatu mekanisme pengereman regenerative dengan memanfaatkan torka pengereman dari generator DC yang diperbesar menggunakan spur gear. Model matematis dibuat menggunakan prinsip fundamental kinematika rotasi, kinematika pergerakan sepeda dan persamaan dinamis generator. Model dinamis kemudian dibuat dalam bentuk diagram blok dan disimulasikan menggunakan Simulink. Model dinamis tersebut disimulasikan untuk melihat bagaimana parameter sistem pengereman dan momentum sepeda berpengaruh terhadap rugi-rugi energi atau energi yang dapat dikembalikan, Hasil yang didapatkan adalah model matematis yang disimulasikan tervalidasi secara kualitatif dengan membandingkan hasil penggunaan rem mekanis biasa. Terdapat banyak faktor yang mempengaruhi efisiensi pengereman diantaranya yaitu, pembebanan generator DC, rasio spur gear dan kecepatan awal sepeda ketika hendak dilakukan pengereman. Optimasi parameter-parameter terkait dapat dilakukan dengan mempertimbangkan perilaku pengereman pengguna sepeda. Efisiensi pengereman sangat tergantung dari efisiensi generator DC yang digunakan, dan terlepas dari itu, rugi-rugi pengereman yang berasal dari spur gear dan bearing hanya terpengaruh oleh kecepatan awal pengereman dan parameter geometrinya sendiri.

Untuk memaksimalkan efektifitas pengereman regeneratif, selain mengoptimalkan parameter sistem pengereman regeneratif, peran pengereman mekanik harus diminimalkan. Namun, untuk mencapai pengereman yang efektif dalam hal mengatur perlambatan sepeda kombinasi antara keduanya akan memerlukan mekanisme tambahan seperti pada sistem pengereman ABS (anti-lock braking system). Sistem atau mekanisme dapat dikembangkan lebih lanjut untuk menjadi penelitian selanjutnya.

#### UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Institut Teknologi PLN atas bantuan dananya sehingga penelitian ini dapat berjalan.

**DAFTAR PUSTAKA**

- [1] C. Qiu and G. Wang, "New evaluation methodology of regenerative braking contribution to energy efficiency improvement of electric vehicles," *Energy Convers. Manag.*, 2016.
- [2] A. R. Domingues, P. Marques, R. Garcia, F. Freire, and L. C. Dias, "Applying multi-criteria decision analysis to the life-cycle assessment of vehicles," *J. Clean. Prod.*, 2015.
- [3] L. Li, X. Li, X. Wang, J. Song, K. He, and C. Li, "Analysis of downshift's improvement to energy efficiency of an electric vehicle during regenerative braking," *Appl. Energy*, 2016.
- [4] H. Khayyam and A. Bab-Hadiashar, "Adaptive intelligent energy management system of plug-in hybrid electric vehicle," *Energy*, 2014.
- [5] J. Ko, S. Ko, H. Son, B. Yoo, J. Cheon, and H. Kim, "Development of brake system and regenerative braking cooperative control algorithm for automatic-transmission-based hybrid electric vehicles," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 2015.
- [6] X. Nian, F. Peng, and H. Zhang, "Regenerative braking system of electric vehicle driven by brushless DC motor," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2014.
- [7] C. Fiori, K. Ahn, and H. A. Rakha, "Power-based electric vehicle energy consumption model: Model development and validation," *Appl. Energy*, 2016.
- [8] D. H. Myszka, A. Murray, K. Giaier, V. K. Jayaprakash, and C. Gillum, "A mechanical regenerative brake and launch assist using an open differential and elastic energy storage," *SAE Int. J. Altern. Powertrains*, 2015.
- [9] S. Chouhan, "regenerative Braking System For Bicycle," *Imp. J. Interdiscip. Res.*, vol. 3, no. 7, 2017.
- [10] B. Maheswaran, N. B. Tedori, E. J. Whitmore, B. L. Ritchie, and L. Gross, "Regenerative braking system on a conventional bike," in *ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings*, 2018.