

Studi Analisis Kinerja *Regenerative Brake-by-Wire System* pada Sepeda Motor *Hybrid* dengan Konfigurasi Seri

Fajri Al Furqan, dan I Nyoman Sutantra

Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

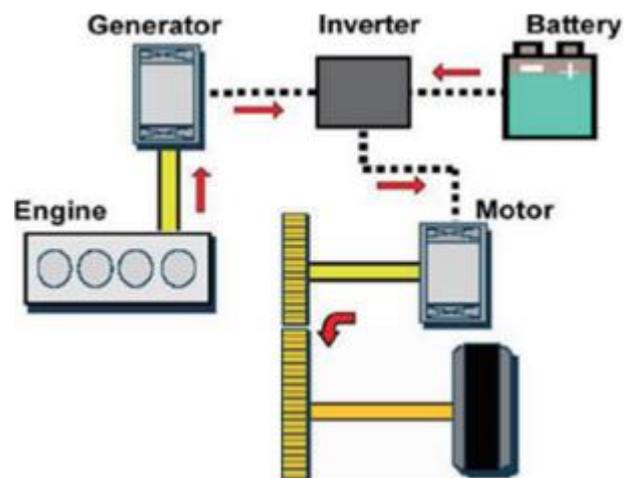
e-mail: tantra@me.its.ac.id

Abstrak—Kendaraan listrik *hybrid* (*hybrid electric vehicle*) adalah jenis kendaraan *hybrid* yang menggabungkan sistem mesin pembakaran internal konvensional dengan sistem propulsi listrik. Kehadiran *powertrain* listrik bertujuan untuk mencapai efisiensi bahan bakar yang lebih baik daripada kendaraan konvensional. Pada sistem *hybrid*, energi kinetik yang keluar dari kendaraan ditangkap dan disimpan guna mengurangi kebutuhan energi kendaraan untuk bergerak dan meningkatkan efisiensi. Energi tersebut mengurangi kerugian energi yang diakibatkan oleh gaya-gaya yang bekerja saat kendaraan bergerak. Untuk mendapatkan kinerja pengereman yang lebih optimal, pengereman regeneratif dan *brake-by-wire* digunakan dengan menggantikan sistem pengereman konvensional. Meskipun penelitian *regenerative brake-by-wire system* sudah mulai banyak dilakukan pada kendaraan, pengembangan teknologi tersebut masih belum banyak diaplikasikan pada sepeda motor *hybrid*. Oleh karena itu, penelitian dilakukan pada sepeda motor. Penelitian *regenerative brake-by-wire system* terbagi dalam dua tahapan utama, yaitu tahap perhitungan dan tahap analisis terhadap besar gaya dan porsi, kontribusi dan efisiensi sistem rem *regenerative brake-by-wire system*. Dalam tahap perhitungan, dilakukan perhitungan gaya hambat yang bekerja pada kendaraan saat bergerak, perhitungan daya, dan besar energi pengereman yang bisa ditangkap berdasarkan *driving cycle* WMTC kelas 1 dan WMTC kelas 2. Selanjutnya untuk tahap analisis akan dilakukan analisis terhadap hasil yang didapatkan pada tahap perhitungan sebelumnya. Dari penelitian ini didapatkan porsi dan gaya pengereman *regenerative brake-by-wire* bekerja secara penuh tanpa adanya bantuan dari rem mekanis pada variasi j/g 0 sampai 0,5 dengan nilai gaya pengereman aktual terbesar adalah sebesar 1002,71N. Besar kontribusi sistem rem *regenerative brake-by-wire* terhadap kebutuhan daya kendaraan pada *driving cycle* WMTC kelas 1 dan 2 adalah 38,48% dan 33,55%. Besar efisiensi sistem rem *regenerative brake-by-wire* pada sepeda motor *hybrid* dengan *driving cycle* WMTC kelas 1 dan 2 adalah 54,89% dan 54,31%.

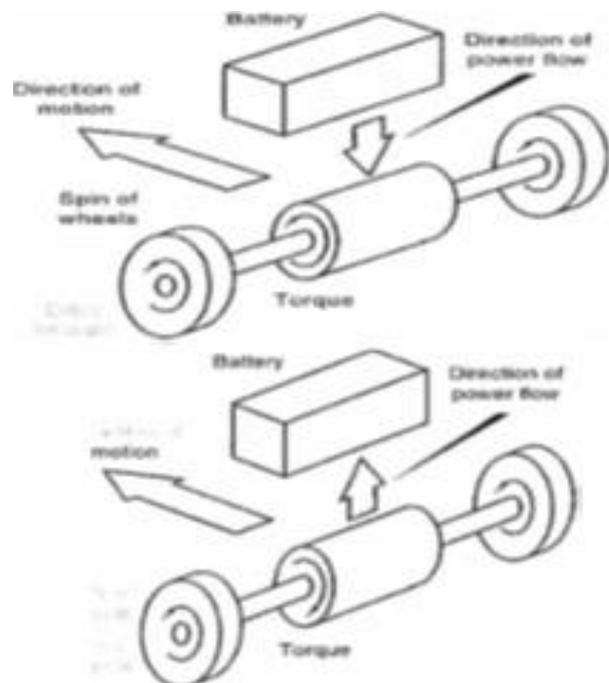
Kata Kunci—*Brake-By-Wire*, Energi Pengereman, *Regenerative Brake*, Sepeda Motor *Hybrid*.

I. PENDAHULUAN

DARI berbagai jenis alat transportasi yang ada di Indonesia, sepeda motor merupakan salah satu yang paling banyak digunakan masyarakat. Berdasarkan data dari Asosiasi Industri Sepeda Motor Indonesia (AISI), penjualan total sepeda motor tahun 2020 per September di Indonesia mencapai 2.876.514 unit di mana kelas scooter menghasilkan 88,4% dari hasil penjualan. Produksi sepeda motor yang semakin meningkat mengakibatkan peningkatan konsumsi bahan bakar minyak (BBM). Berdasarkan *BP Statistical Review of World Energy 2020*, konsumsi BBM harian negara Indonesia pada tahun 2019 mencapai 1.863 barel per hari,

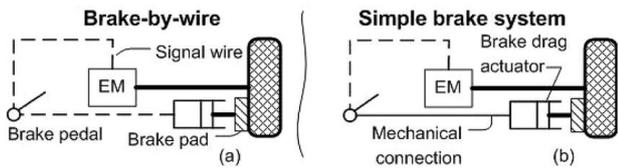


Gambar 1. Skema *powertrain* dan *drivetrain* kendaraan *hybrid* seri.

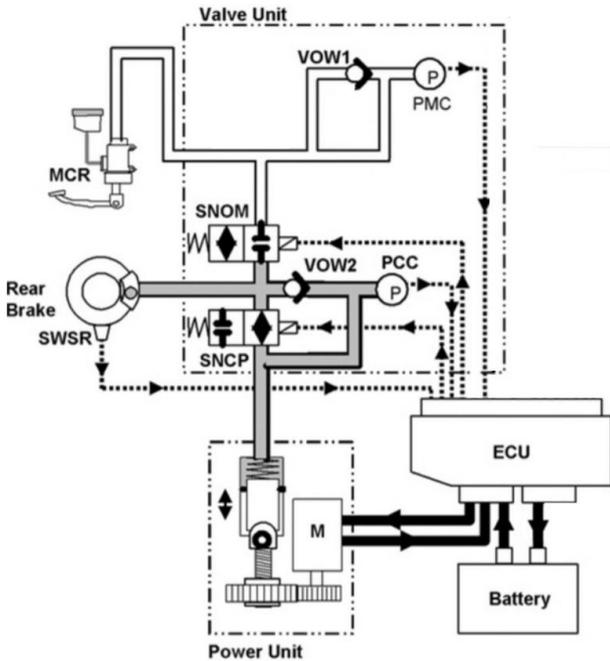


Gambar 2. Sistem *regenerative braking* saat berkendara normal dan saat berkerja.

naik 4,1% dari tahun sebelumnya [1]. BBM sendiri merupakan salah satu sumber daya yang tidak dapat diperbarui sehingga dapat habis sewaktu-waktu. Seiring perkembangan ilmu dan teknologi, kendaraan dengan energi alternatif dikembangkan untuk mengurangi ketergantungan terhadap BBM. Salah satu metode alternatif yang diterapkan pada kendaraan adalah menggunakan kendaraan listrik *hybrid*.



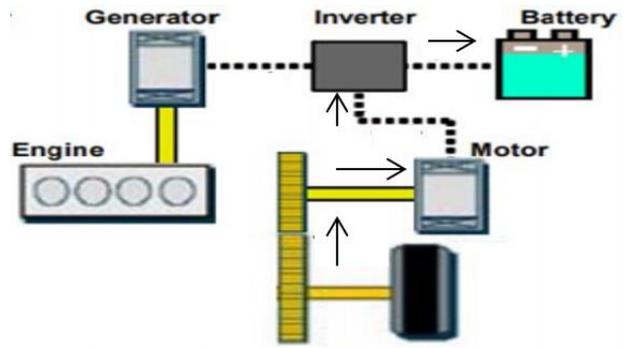
Gambar 3. Diagram sistem pengereman konvensional dan *brake-by-wire system* dengan *electronic motor*.



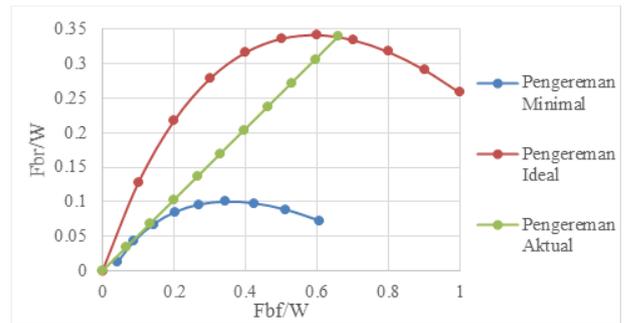
Gambar 4. Skema sistem pengereman *brake-by-wire* pada rem belakang.

Kendaraan listrik *hybrid* (*hybrid electric vehicle*) adalah jenis kendaraan *hybrid* yang menggabungkan sistem mesin pembakaran internal konvensional dengan sistem propulsi listrik. Kehadiran *powertrain* listrik bertujuan untuk mencapai efisiensi bahan bakar yang lebih baik daripada kendaraan konvensional. Jenis HEV ini ada bermacam-macam dan sejauh mana fungsinya masing-masing sebagai kendaraan listrik (EV) juga berbeda-beda. Kendaraan listrik *hybrid* menggabungkan mesin pembakaran internal dan motor listrik. Pada sistem *hybrid*, energi kinetik yang keluar dari kendaraan ditangkap dan disimpan dengan menggunakan sistem rem regeneratif. Energi yang telah tersimpan digunakan untuk mengurangi kebutuhan energi kendaraan untuk bergerak dan meningkatkan efisiensi. Energi tersebut mengurangi kerugian energi yang diakibatkan oleh gaya-gaya yang bekerja saat kendaraan bergerak. Untuk mendapatkan kinerja pengereman yang lebih optimal, pengereman *brake-by-wire* digunakan dengan menggantikan sistem pengereman konvensional.

Brake-by-wire adalah salah satu jenis mekanisme pengereman menggunakan alat listrik. Sistem *brake-by-wire* dapat dirancang untuk melengkapi rem servis biasa atau dapat berupa sistem rem mandiri (*standalone*). *Brake-by-wire* umumnya digunakan pada kendaraan listrik *hybrid*. Teknologi *brake-by-wire* menggantikan komponen tradisional seperti pompa, selang, cairan, sabuk, dan vacuum servo serta silinder master dengan sensor dan aktuator elektronik. Dalam pengaplikasian pada sepeda motor *hybrid*, sistem *brake-by-wire* dikombinasikan dengan *regenerative brake* dengan tujuan untuk mengurangi beban kerja pada aki kendaraan.



Gambar 5. Skema *regenerative braking* pada roda depan.



Gambar 6. Kurva Distribusi Pengereman.

Penelitian sistem *brake-by-wire* pada sepeda motor mulai banyak dilakukan. Salah satunya, penelitian sistem *brake-by-wire* pada sepeda motor meliputi modelling dan sistem kontrol pada aktuator pada komponen *brake-by-wire*. Penelitian ini bertujuan untuk mencari pengaruh penggunaan sistem *brake-by-wire* terhadap gaya pengereman *combined brake system* (CBS) pada sepeda motor [2].

II. DASAR TEORI

A. Kendaraan Hybrid

Kendaraan yang memiliki dua tenaga penggerak kendaraan (*powertrain*) atau lebih disebut kendaraan *hybrid*. Kendaraan *hybrid* dengan *powertrain* listrik disebut *hybrid electrical vehicle*. *Drivetrain* kendaraan didefinisikan sebagai muara dari semua *powertrain*. Sebuah *drivetrain* kendaraan *hybrid* biasanya terdiri dari tidak lebih dari dua *powertrain*. Lebih dari dua *powertrain* membuat *drivetrain* menjadi sangat rumit. Untuk mendapatkan kembali energi pengereman yang hilang dalam bentuk panas pada kendaraan mesin pembakaran internal konvensional, *drivetrain hybrid* biasanya memiliki *powertrain* yang memungkinkan energi mengalir dua arah atau searah seperti skema yang ditunjukkan Gambar 1 [3].

B. Regenerative Braking

Regenerative braking adalah metode pengereman yang memanfaatkan energi mekanik dari motor dengan mengubah energi kinetik menjadi energi listrik dan dialirkan kembali ke sumber baterai. Secara teoretis, sistem pengereman regeneratif dapat mengubah sebagian kecil dari energi kinetiknya untuk mengisi baterai, menggunakan prinsip yang sama seperti alternator.

Dengan menggunakan pengereman regeneratif, kendaraan bermotor dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar, meningkatkan penghematan bahan bakar dan menurunkan emisi. Jenis rem ini bekerja secara efektif dalam

Tabel 1.

Nilai porsi pengereman aktual pada roda depan (*Fbf/W*)

j/g	Fbf/W AKTUAL	Fbf/W Mekanis	Fbf/W Regenerative Brake-By-Wire System
0	0	0	0
0,1	0.066	0	0.066
0,2	0.132	0	0.132
0,3	0.198	0	0.198
0,4	0.264	0	0.264
0,5	0.330	0	0.330
0,6	0.396	0.024	0.371
0,7	0.462	0.090	0.371
0,8	0.528	0.156	0.371
0,9	0.594	0.222	0.371
1	0.660	0.288	0.371

Tabel 2.

Nilai gaya pengereman aktual pada roda depan (*Fbf*)

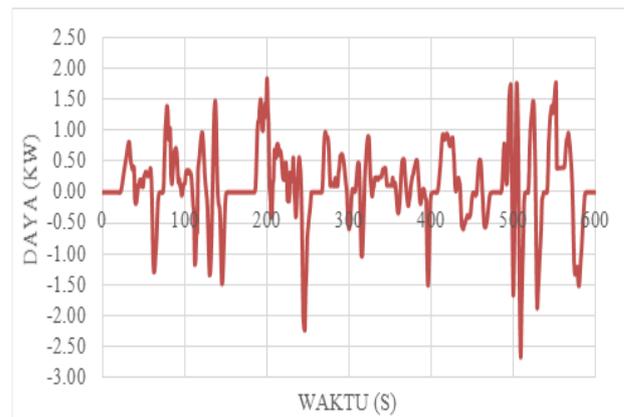
j/g	Fbf AKTUAL	Fbf mekanis	Fbf regenerative brake-by-wire system
0	0	0	0
0,1	177.99	0.00	177.99
0,2	355.98	0.00	355.98
0,3	533.97	0.00	533.97
0,4	711.96	0.00	711.96
0,5	889.95	0.00	889.95
0,6	1067.94	65.24	1002.71
0,7	1245.93	243.23	1002.71
0,8	1423.93	421.22	1002.71
0,9	1601.92	599.21	1002.71
1	1779.91	777.20	1002.71

lingkungan berkendara seperti situasi mengemudi berhenti-dan-pergi terutama di perkotaan. Sistem pengereman regeneratif menyediakan sebagian besar gaya pengereman total selama kecepatan rendah dan lalu lintas *stop-and-go* di mana sebagian besar perlambatan diperlukan [4].

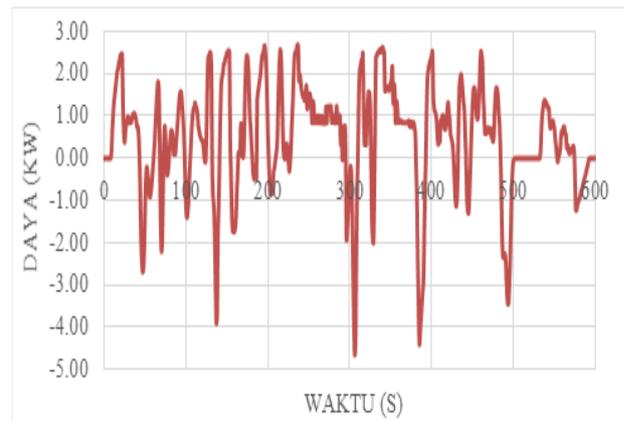
Sistem rem regeneratif pada kendaraan *hybrid* pada umumnya memiliki kesamaan dengan sistem pengereman pada kendaraan konvensional biasa, namun pada kendaraan *hybrid* sistem pengeremannya terbagi menjadi sistem pengereman mekanis dan sistem pengereman elektrik, di mana sistem pengereman elektrik diletakkan langsung pada roda penggerak. Sama seperti pada kendaraan konvensional, sistem pengereman mekanis pada kendaraan *hybrid* juga menggunakan *master cylinder* dan *booster*, memiliki *brake caliper* dan *brake disc*, pada sebagian tipe kendaraan *hybrid* juga ada yang dilengkapi dengan pengendali ABS dan aktuator, dan besar gaya pengereman dihasilkan dan dikontrol oleh pengemudi kendaraan tersebut seperti yang ditunjukkan Gambar 2.

C. *Brake-by-wire System*

Brake-by-wire dideskripsikan sebagai sistem yang memiliki kemampuan untuk menggerakkan rem roda kendaraan melalui sinyal listrik yang dihasilkan oleh prosesor atau pengontrol dalam kendaraan. Memuktahirkan sistem pengereman konvensional menjadi sistem yang dapat dioperasikan dengan mode *brake-by-wire* umumnya dapat dicapai dengan dua cara. Pertama, sistem pengereman berbasis fluida hidraulik tetap utuh secara substansial dan rakitan modulator hidraulik umumnya dikerjakan ulang untuk menyediakan sumber tekanan fluida yang dihasilkan secara otonom untuk fungsi pengereman yang dikontrol secara elektronik. Alternatif kedua dapat berupa sistem *brake-by-wire* murni di mana sistem pengereman servis berbasis cairan hidraulik digantikan oleh sistem dasar listrik untuk fungsi pengereman dasar. Sistem *brake-by-wire* dapat dioperasikan



Gambar 7. Grafik Rhp terhadap waktu *driving cycle* WMTC kelas 1.



Gambar 8. Grafik Rhp terhadap waktu *driving cycle* WMTC kelas 2.

dalam pengaturan dengan atau tanpa kemampuan *anti-lock braking system* (ABS), *traction control*, dan peningkatan stabilitas seperti skema yang ditunjukkan Gambar 3.

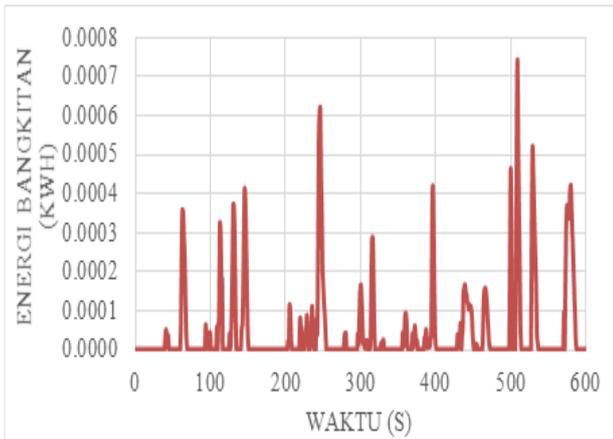
Faktor keamanan dan reliabilitas menjadi poin penting yang mengharuskan adanya toleransi kegagalan dan rangkaian sistem yang aman. Untuk meningkatkan keamanan, sistem *brake-by-wire* secara alamiah membutuhkan *power supply*, sensor, aktuator, dan pengiriman dan pemrosesan informasi yang baik. Sistem *brake-by-wire* wajib memiliki tetapan atau standar untuk pendeteksi error dan toleransi kegagalan [5].

III. METODOLOGI PENELITIAN

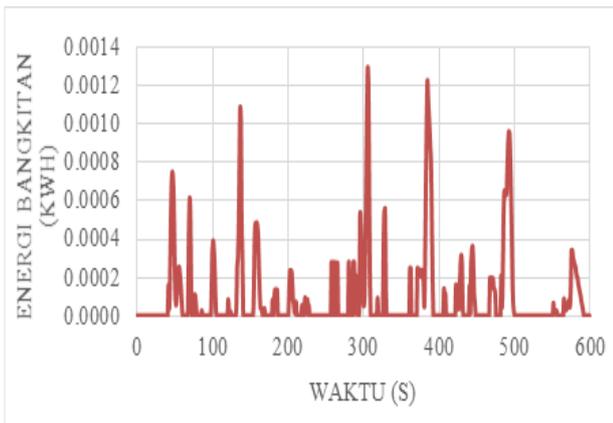
A. *Skema Sistem Regenerative Brake-by-wire*

Proses pengereman *brake-by-wire* pada Gambar 4 diawali dengan tuas rem yang ditarik. Tuas rem yang ditarik menghasilkan gaya pengereman yang akan dibaca oleh *pressure switch* yang dipasang pada tuas rem. *Electrical Control Unit* (ECU) membaca input pada *pressure switch* yang kemudian dialirkan ke motor elektrik. Motor elektrik kemudian menggerakkan gir transmisi yang kemudian menekan *master cylinder* sehingga *brake fluid* pada *pipeline* bergerak menuju *brake pads* dan menekan *brake disc* [6].

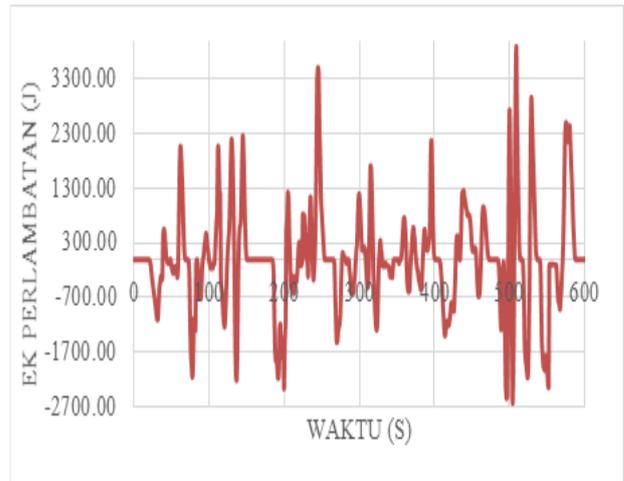
Proses *regenerative brake* menggunakan motor untuk memperlambat kendaraan saat pengemudi memberikan gaya pada pedal atau tuas rem, kemudian motor listrik bekerja dengan arah sebaliknya sehingga memperlambat kendaraan. Saat berputar ke arah berlawanan, motor bertindak sebagai generator dan mengisi ulang baterai. Pada kondisi berjalan normal, motor berputar ke depan dan mengambil energi dari baterai seperti skema yang ditunjukkan Gambar 5.



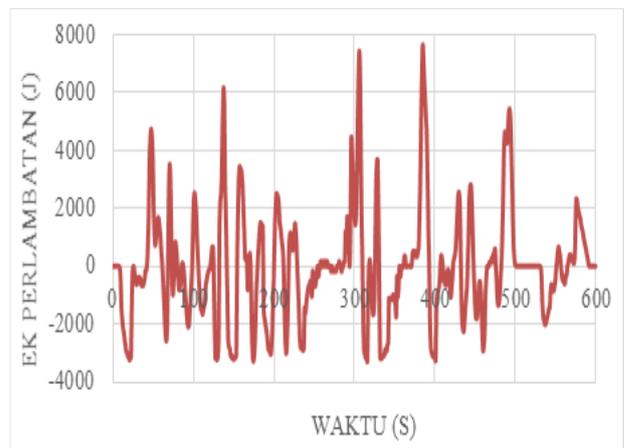
Gambar 9. Grafik Energi Bangkitan terhadap waktu *driving cycle* WMTC kelas 1.



Gambar 10. Grafik Energi Bangkitan terhadap waktu *driving cycle* WMTC kelas 2.



Gambar 11. Grafik energi kinetik perlambatan terhadap waktu *driving cycle* WMTC kelas 1.



Gambar 12. Grafik energi kinetik perlambatan terhadap waktu *driving cycle* WMTC kelas 2.

B. Perhitungan Sistem Regenerative Brake-by-wire

1) Porsi Pengereman Ideal

$$\frac{F_{br}}{W} = \frac{\left(L_f - \frac{j}{g} h\right)}{\left(L_r + \frac{j}{g} h\right)} \times \frac{F_{bf}}{W} \tag{1}$$

2) Porsi Pengereman Minimal

$$\frac{F_{bf}}{W} = \frac{\mu}{L} (L_r + (0,1 + 0,85(\mu - 0,2) h)) \tag{2}$$

$$\frac{F_{br}}{W} = (0,1 + 0,85(\mu - 0,2)) - \frac{F_{bf}}{W} \tag{3}$$

3) Porsi Pengereman Aktual

$$\frac{F_{br}}{W} = \beta \cdot \frac{j}{g} \tag{4}$$

$$\frac{F_{bf}}{W} = \frac{j}{g} - \frac{F_{br}}{W} \tag{5}$$

4) Porsi Pengereman Maksimal Regenerative Brake-by-wire System

$$\frac{F_{brbbws}}{W} = \frac{i_t \times i_g \times T_m \times \eta_m}{r_d} \tag{6}$$

$$\frac{F_{mek}}{W} = \frac{F_{aktual}}{W} - \frac{F_{rbbws}}{W} \tag{7}$$

5) Gaya Maksimal Regenerative Brake-by-wire System

$$F_{bf_{rbbws}} = \frac{F_{bf}}{W_{rbbws}} \times W \tag{8}$$

6) Gaya Hambat Angin

$$F_a = \frac{1}{2} \cdot \rho_u \cdot C_D \cdot A_f \cdot V^2 \tag{9}$$

7) Gaya Hambat Rolling

$$F_r = W \cdot \cos \alpha \cdot C_r \tag{10}$$

8) Gaya Hambat Inersia

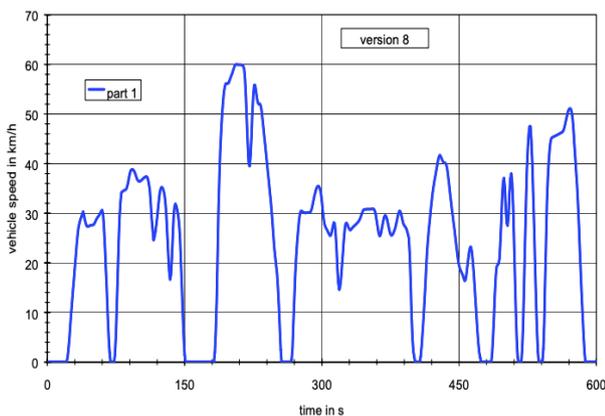
$$F_i = m \cdot a \tag{11}$$

9) Road Horse Power Kendaraan

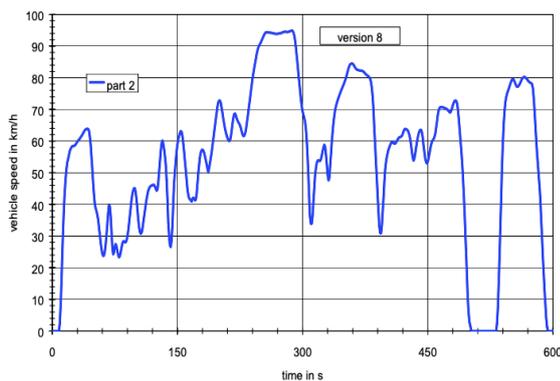
$$R_{hp} = (F_a + F_r + F_i) \cdot V \cdot \eta \tag{12}$$

10) Energi Bangkitan Kendaraan

$$\text{Energi Bangkitan} = \frac{R_{hp} \text{ rbbws (kw)}}{3600 \text{ s}} \tag{13}$$



Gambar 13. *Driving cycle* WMTC kelas 1.



Gambar 14. *Driving cycle* WMTC kelas 2.

11) *Energi Kinetik Perlambatan Kendaraan*

$$E_k = \frac{1}{2} \times m \times (V_2^2 - V_1^2) \tag{14}$$

12) *Kontribusi Regenerative Brake-by-wire System*

$$\text{Kontribusi} = \frac{R_{hp} \text{ rbbws (kw)}}{R_{hp} \text{ total (kw)}} \times 100\% \tag{15}$$

13) *Efisiensi Regenerative Brake-by-wire System*

$$\eta_{RBBWS} = \frac{\text{Energi total (kwh)}}{\text{Energi kinetik perlambatan (kwh)}} \tag{16}$$

Perhitungan *regenerative brake-by-wire system* dimulai dengan menghitung gaya dan porsi pengereman sistem rem mekanis dan *regenerative brake-by-wire*. Perhitungan gaya dan porsi pengereman dilakukan dengan menggunakan software Microsoft Excel 365. Selanjutnya adalah memasukkan data *driving cycle* yang telah dipilih. Data *driving cycle* yang berisikan kecepatan kendaraan dan waktu tempuh. Perhitungan dilakukan dengan cara memasukan setiap data kecepatan kendaraan beserta waktunya pada dua kolom yang berbeda. Data-data tersebut akan digunakan untuk memudahkan setiap proses perhitungan selanjutnya dan mendapatkan hasil yang akurat pada setiap kecepatan dan waktu yang berbeda.

Langkah berikutnya adalah menghitung kontribusi sistem *regenerative brake-by-wire* terhadap kebutuhan daya kendaraan. Langkah ketujuh pada penelitian ini adalah menghitung efisiensi sistem rem *regenerative brake-by-wire*. Perhitungan ini dilakukan dengan menggunakan software Microsoft Excel.

Setelah semua langkah-langkah sebelumnya telah dilakukan, hasil yang akan didapatkan adalah tabel dari gaya dan porsi sistem rem mekanis dan *regenerative brake-by-wire* beserta grafik dari distribusi pengeremannya, persentase kontribusi sistem rem *regenerative brake-by-wire*, dan persentase efisiensi sistem *regenerative brake-by-wire*.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Grafik distribusi pengereman *regenerative brake-by-wire* yang ditampilkan berdasarkan analisis dan perhitungan ditunjukkan pada Gambar 6.

Pada Gambar 6, sumbu x mewakili porsi pengereman roda depan (F_{b_f}/W) dan sumbu y mewakili porsi pengereman pada roda belakang (F_{b_b}/W). Berdasarkan kurva distribusi pengereman yang tertera di atas, nilai porsi pengereman aktual yang dirancang dianggap baik karena garis pengereman aktual berada di atas kurva pengereman minimal, bersinggungan namun tidak melewati kurva pengereman ideal, dan memenuhi syarat porsi pengereman di mana porsi pengereman roda depan harus lebih besar dibanding roda belakang. Nilai porsi pengereman aktual tercantum pada Tabel 1 dan digunakan untuk menentukan besar gaya pengereman mekanis dan *regenerative brake-by-wire* yang diperlukan. Besar gaya pengereman mekanis dan *regenerative brake-by-wire* dapat dilihat pada Tabel 2.

Merujuk pada Tabel 1 dan Tabel 2, porsi dan gaya pengereman *regenerative brake-by-wire* maksimal adalah sebesar 0,371 dan 1002,71 N. Pada variasi $j/g = 0,1$ hingga $j/g = 0,5$, pengereman aktual pada roda depan dapat sepenuhnya menggunakan pengereman *regenerative brake-by-wire*. Sedangkan pada variasi $j/g = 0.6$ hingga $j/g = 1$, pengereman aktual pada roda depan tidak dapat sepenuhnya menggunakan pengereman *regenerative brake-by-wire*. Sisa porsi dan gaya pengereman aktual harus dibantu dengan porsi dan gaya pengereman mekanis untuk menjaga kendaraan tetap stabil.

Plotting grafik R_{hp} terhadap waktu selama *driving cycle* WMTC kelas 1 dan WMTC kelas 2 dilakukan berdasarkan perhitungan R_{hp} kendaraan pada perhitungan. Hasil plotting dapat dilihat pada Gambar 7 dan Gambar 8.

Kedua grafik di Gambar 7 dan Gambar 8 menunjukkan bahwa nilai R_{hp} mengalami naik dan turun di setiap detiknya. Hal ini dipengaruhi oleh nilai kecepatan dan gaya inersia setiap detiknya. Apabila nilai gaya hambat inersia kendaraan negatif, besar R_{hp} kendaraan yang dihasilkan dimanfaatkan kembali menjadi *regenerative Rhp*. Nilai R_{hp} terbesar pada *driving cycle* WMTC kelas 1 didapatkan pada detik 200 sebesar 1,85 kW dan nilai terendah didapatkan pada detik 509 sebesar -2,67 kW. Selanjutnya nilai R_{hp} terbesar pada *driving cycle* WMTC kelas 2 didapatkan pada detik 237 sebesar 2,68 kW dan nilai terendah didapatkan pada detik 306 sebesar -4,65 kW. Jumlah total R_{hp} pada *driving cycle* WMTC kelas 1 dan WMTC kelas 2 adalah 263,97 kW dan 651,81 kW. Perbandingan antara *regenerative Rhp* dan total R_{hp} akan menghasilkan besaran persentase kontribusi *regenerative brake-by-wire system* terhadap kebutuhan daya kendaraan.

Berdasarkan perhitungan kontribusi *regenerative brake-by-wire system* terhadap kebutuhan daya kendaraan pada subbab 3.4.13, nilai kontribusi *regenerative brake-by-wire system* terhadap kebutuhan daya kendaraan pada *driving*

cycle WMTC kelas 1 dan kelas 2 adalah sebesar 38,48% dan 33,55%. Nilai kontribusi *regenerative brake-by-wire system* digunakan untuk menambah daya jelajah (*cruise*) kendaraan. Nilai kontribusi *regenerative brake-by-wire system* di atas tidak mutlak dikarenakan nilai kontribusi tergantung pemilihan *driving cycle* dan kondisi berkendara sesungguhnya.

Plotting energi bangkitan terhadap waktu selama *driving cycle* WMTC kelas 1 dan WMTC kelas 2 dilakukan berdasarkan perhitungan energi bangkitan pada subbab 3.4.11. Grafik besar energi bangkitan terhadap waktu ditunjukkan pada Gambar 9 dan Gambar 10.

Berdasarkan Gambar 9 dan Gambar 10, nilai maksimum dari energi bangkitan pada *driving cycle* WMTC kelas 1 dan WMTC kelas 2 adalah 0,000741 kWh pada detik ke-509 dan 0,001292 kWh pada detik ke-307. Total energi bangkitan pada *driving cycle* WMTC kelas 1 dan WMTC kelas 2 adalah 0,028218 kWh (101,58 kJ) dan 0,060762 kWh (218,74 kJ).

Berdasarkan perhitungan energi kinetik perlambatan pada bab 3, diperoleh plotting energi kinetik perlambatan terhadap waktu selama *driving cycle* WMTC kelas 1 dan 2. Hasil plotting ditampilkan pada Gambar 11 dan Gambar 12.

Berdasarkan Gambar 11 dan Gambar 12, nilai maksimum dari energi kinetik perlambatan pada *driving cycle* WMTC kelas 1 dan kelas 2 adalah 3887,24 J pada detik ke-509 dan 7643,93 J pada detik ke-385. Total energi kinetik perlambatan pada *driving cycle* WMTC kelas 1 dan WMTC kelas 2 adalah 185065,133 J (185,06 kJ) dan 402763,6339 J (402,76 kJ).

Pada penelitian sebelumnya yang diprakarsai oleh Alex William Pangestu, dengan metode perhitungan yang sama, nilai total energi kinetik perlambatan pada *driving cycle* WMTC kelas 1 dan WMTC kelas 2 adalah 191.842,54 J (191,84 kJ) dan 411.623,76 J (411,62 kJ) [7]. Nilai total energi kinetik perlambatan yang dibutuhkan pada penelitian tersebut lebih tinggi dibandingkan penelitian sekarang dikarenakan perbedaan nilai massa dan nilai kecepatan pada *driving cycle* kendaraan yang digunakan. Nilai massa kendaraan berbanding lurus dengan nilai energi kinetik di mana semakin besar massa suatu kendaraan maka semakin besar juga nilai energi kinetik tersebut. Perbandingan antara total energi bangkitan dan total energi kinetik perlambatan akan menghasilkan besaran persentase efisiensi sistem *regenerative brake-by-wire system*.

Efisiensi sistem rem *regenerative brake-by-wire* pada kendaraan diperoleh dengan membandingkan total energi bangkitan dengan total energi kinetik perlambatan kendaraan

selama satu *driving cycle*. Berdasarkan perhitungan efisiensi sistem *regenerative brake-by-wire* pada subbab 3.4.14, nilai efisiensi sistem *regenerative brake-by-wire* pada WMTC kelas 1 dan WMTC kelas 2 adalah 54,89% dan 54,31% seperti yang ditunjukkan Gambar 13 dan Gambar 14.

V. KESIMPULAN

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian sistem rem *regenerative brake-by-wire* pada sepeda motor *hybrid* adalah porsi dan gaya pengereman *regenerative brake-by-wire* bekerja secara penuh tanpa adanya bantuan dari rem mekanis pada variasi j/g 0 sampai 0,5. Nilai porsi dan gaya pengereman aktual terbesar secara berurutan adalah sebesar 0,371 dan 1002,71N, besar kontribusi sistem rem *regenerative brake-by-wire* terhadap kebutuhan daya kendaraan pada *driving cycle* WMTC kelas 1 dan WMTC kelas 2 berturut-turut adalah 38,48% dan 33,55%, dan besar efisiensi sistem rem *regenerative brake-by-wire* pada *driving cycle* WMTC kelas 1 dan WMTC kelas 2 berturut-turut adalah 54,89% dan 54,31%.

Berdasarkan analisis pengaplikasian sistem rem *regenerative brake-by-wire* pada sepeda motor *hybrid* yang telah dilakukan, beberapa saran yang dapat dipertimbangkan untuk penelitian berikutnya adalah penelitian diharapkan meliputi analisis sistem kontrol terutama untuk sistem *brake-by-wire* dan menggunakan motor listrik yang telah dikomersilkan agar dapat dibandingkan dengan hasil yang diperoleh pada penelitian sekarang.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. Looney, "Statistical Review of World Energy, 2020." Bp plc, London, 2020.
- [2] K. Tani, Y. Nishikawa, T. Nanri, K. Takenouchi, and M. Toda, "Control Technology of Brake-by-Wire System for Super-Sport Motorcycles," SAE 2010 World Congress & Exhibition Canada, 2010.
- [3] M. Ehsani, Y. Gao, S. Longo, and K. Ebrahimi, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*. CRC press, 2018.
- [4] M. K. Yoong *et al.*, "Studies of regenerative braking in electric vehicle," in *2010 IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology*, 2010, pp. 40–45.
- [5] W. Xiang, P. C. Richardson, C. Zhao, and S. Mohammad, "Automobile brake-by-wire control system design and analysis," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 57, no. 1, pp. 138–145, 2008.
- [6] A. Dardanelli, G. Alli, and S. M. Savaresi, "Modeling and control of an electro-mechanical brake-by-wire actuator for a sport motorbike," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 43, no. 18, pp. 524–531, 2010.
- [7] A. W. Pangestu and I. N. Sutantra, "Studi analisis kinerja sistem rem regeneratif pada sepeda motor hybrid dengan konfigurasi seri," *J. Tek. ITS*, vol. 9, no. 2, pp. E193–E198, 2021.