

Analisis Perbandingan Pengukuran Konsumsi Daya Motor BLDC 350W Melalui Pengukuran *Dynamometer* dan Pengujian *On-road*

¹Satryo Budi Utomo, ²Triwahju Hardianto, dan ³Achmad Zainul Arifin

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember^{1,2,3}

satryo@unej.ac.id¹, triwahju@unej.ac.id², achmadzainul2101@gmail.com³

Abstrak

Menguji performa kendaraan listrik secara menyeluruh diperlukan banyak pengujian langsung di jalan dengan kondisi yang bervariasi. Mempertimbangkan banyaknya waktu dan tenaga yang dibutuhkan untuk pengujian langsung di jalan, maka menggunakan dynamometer sebagai alat pengujian dapat menjadi alternatif. Pada penelitian ini dynamometer dimodelkan sehingga beban yang dipakai ekuivalen dengan beban yang ada pada mobil urban Universitas Jember. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis dan memvalidasi dynamometer sesuai dengan kondisi pengujian di jalan sebenarnya. Penelitian dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran konsumsi daya melalui pengujian langsung di jalan dengan pengujian menggunakan dynamometer. Pada setiap pengujian juga dilakukan variasi strategi penggunaan PWM untuk mengetahui bagaimana variasi PWM yang menghasilkan konsumsi daya paling efisien. Dari penelitian ini menunjukkan bahwa perbedaan hasil pengukuran daya melalui metode pengujian langsung dengan metode dynamometer memiliki perbedaan terbesar 7,58%. Selisih yang didapat termasuk kecil sehingga dapat disimpulkan bahwa pengujian dengan metode dynamometer dapat mewakili pengujian langsung. Hasil lain yang didapat adalah variasi penggunaan PWM konstan memperoleh hasil konsumsi energi yang paling efisien.

Kata Kunci — Motor BLDC, *Dynamometer*, Mobil Listrik.

Abstract

Testing the overall performance of electric vehicles requires extensive on-road testing with varied conditions. Considering the amount of time and effort required for on-road testing, using a dynamometer as a testing tool can be an alternative. In this research, a dynamometer is modeled so that the load used is equivalent to the load on the urban car of the University of Jember. The purpose of this study is to analyze and validate the dynamometer in accordance with actual road testing conditions. The research was conducted by comparing power consumption measurements obtained from on-road testing with those obtained using a dynamometer. In each test, variations in PWM usage strategies were also applied to determine which PWM variations result in the most efficient power consumption. The study shows that the difference in power measurement results between the on-road testing method and the dynamometer method has a maximum difference of 7.58%. The resulting discrepancy is relatively small, leading to the conclusion that testing with the dynamometer method can represent direct testing. Another result

obtained is that the variation of using constant PWM achieves the most efficient energy consumption.

Keywords — BLDC motor, *dynamometer*, electric vehicle.

I. PENDAHULUAN

Peningkatan emisi gas rumah kaca telah menarik perhatian pada sumber energi alternatif, terutama dalam industri transportasi, yang menyumbang sekitar 28% dari total konsumsi bahan bakar. Untuk itu, dorongan untuk beralih menuju kendaraan berbahan bakar listrik dianggap menjadi salah satu solusi untuk menghindari konsentrasi polutan udara, CO₂, serta gas rumah kaca lainnya. (Sanguesa et al., 2021) Fokus penelitian kendaraan listrik saat ini adalah efisiensi yang tinggi, ekosistem pengisian baterai, dan jarak tempuh yang lebih lama. Banyak penelitian dilakukan pada kendaraan listrik untuk menemukan alternatif dan ide-ide inovatif yang dapat digunakan untuk meningkatkan efisiensi, biaya, dan konsumsi bahan bakar pada kendaraan. Untuk menguji performa kendaraan secara menyeluruh diperlukan banyak pengujian langsung di jalan dengan kondisi yang bervariasi. Mempertimbangkan banyaknya waktu dan tenaga yang dibutuhkan untuk pengujian langsung di jalan, maka menggunakan dynamometer sebagai alat pengujian dapat menjadi alternatif.

Pada penelitian ini dynamometer dimodelkan sehingga beban yang dipakai ekuivalen dengan beban yang ada pada mobil urban Universitas Jember. Penelitian akan berfokus dengan pengukuran konsumsi daya pada mobil listrik urban Universitas Jember menggunakan dynamometer. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis dan memvalidasi dynamometer sesuai dengan kondisi pengujian di jalan sebenarnya. Meskipun metode ini mudah dan ekonomis, hasil yang diperoleh bergantung pada seberapa akurat dynamometer dapat memodelkan sistem yang sebenarnya. Dengan demikian, penelitian ini akan membantu memberikan informasi yang berguna bagi pengembangan teknologi mobil listrik untuk meningkatkan efisiensi penggunaan daya pada kendaraan listrik.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Motor BLDC

Motor Brushless DC (BLDC) adalah motor yang mempertahankan karakteristik motor DC tetapi menghilangkan komutator dan brush. Motor Brushless DC (BLDC) sering digunakan untuk menggantikan penggunaan motor DC konvensional. Motor Brushless DC (BLDC) menggunakan sumber energi tegangan DC tetapi komutasi arus dilakukan oleh solid state switches, yaitu komutasi yang dilakukan secara elektronik [1]. Motor BLDC tersedia dalam berbagai daya, mulai dari motor kecil yang digunakan dalam hard disk hingga motor besar dalam kendaraan listrik. Motor Brushless DC umumnya menggunakan tiga fase, namun juga dapat ditemukan jenis dua fase dalam banyak aplikasi [2].

B. Dynamometer

Dynamometer adalah perangkat penyerap energi yang digunakan untuk mensimulasikan skenario pembebanan motor dengan nilai pembebanan yang terkontrol [3]. Dengan melakukan pengukuran terhadap energi yang diserap dynamometer, maka nilai daya dari komponen penggerak bisa didapatkan menggunakan model matematis. Hal ini memungkinkan desainer kendaraan dan peneliti untuk memahami kinerja dan konsumsi energi motor ditahap awal. Dengan demikian, ada peluang untuk menerapkan strategi desain dan kontrol baru untuk meningkatkan kinerja motor lebih lanjut. Dynamometer dapat digunakan untuk menemukan daya bersih maksimum motor listrik.

C. Gaya Traksi

Gaya traksi digambarkan sebagai gaya yang memiliki vektor arah yang berlawanan dari arah gerak mobil. Gaya traksi sendiri merupakan resultan dari gaya yang dihasilkan pada kondisi-kondisi traktif. Diantaranya adalah gaya yang diperlukan untuk akselerasi, gaya akibat hambatan gelinding (rolling Resistance), gaya akibat hambatan aerodinamis (drag force), dan gaya yang diperlukan untuk mempertahankan kecepatan pada jalan menanjak (hill climbing) (Wei et al., 2019).

Hambatan akselerasi merupakan gaya yang dibutuhkan saat melakukan akselerasi.

$$F_a = m \cdot a$$

Dimana m adalah massa(kg) dan a adalah akselerasi (m/s^2).

Hambatan rolling resistance didefinisikan sebagai kerugian energi per satuan jarak yang ditempuh (Wiratkasem & Pattana, 2021). Hambatan rolling resistance gaya yang disebabkan oleh gesekan, sifat non-elastis material, atau interaksi benda yang menggelinding terhadap fluida disekitarnya.

$$F_{rr} = C_{rr} \cdot m \cdot g$$

Dimana C_{rr} adalah koefisien rolling resistance, m adalah massa(kg). dan g adalah gravitasi (m/s^2).

Hambatan tanjakan adalah gaya yang diperlukan saat melalui lintasan yang menanjak. Gaya tanjakan sebanding dengan massa dan kemiringan tanjakan.

$$F_{hc} = W \sin \theta$$

Dimana W adalah gaya berat (N) dan $\sin \theta$ adalah sudut tanjakan($^\circ$).

Sehingga gaya traksi dapat dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$F_{tr} = F_a + F_{rr} + F_d + F_{hc}$$

D. Rotasi Benda Tegar

Terdapat macam-macam gerakan rotasi di alam semesta, seperti gerak elektron terhadap atom dan gerak bulan terhadap bumi yang merupakan contoh gerak rotasi. Objek tidak dapat diperlakukan sebagai partikel ketika menunjukkan gerakan rotasi karena bagian objek yang berbeda bergerak dengan kecepatan dan percepatan yang berbeda. Oleh karena itu, perlu memperlakukan objek sebagai sistem partikel. Namun, analisis gerakan objek yang diperluas dengan memodelkannya sebagai kumpulan partikel, yang masing-masing memiliki kecepatan linier dan percepatan liniernya sendiri.

• Kecepatan Sudut

Kecepatan sudut orbit didefinisikan sebagai waktu yang diperlukan oleh suatu titik yang berputar untuk mengelilingi porosnya. Sedangkan kecepatan sudut didefinisikan sebagai waktu yang diperlukan oleh suatu titik yang berputar dengan jari-jari tetapi terhadap porosnya untuk berpindah sebesar 1 rad. Dalam satuan internasional nilai kecepatan sudut diukur dalam radian per detik (rad/s) dan disimbolkan dengan omega (ω).

$$\omega = \frac{\Delta \theta}{\Delta t}$$

• Percepatan Sudut

Percepatan sudut merupakan laju perubahan kecepatan sudut terhadap waktu. Di dalam Sistem Satuan Internasional, percepatan sudut diukur dalam radian per detik kuadrat (rad/s^2). Sama halnya dengan percepatan tangensial, percepatan angular pada gerak melingkar juga hanya terjadi pada gerak melingkar berubah beraturan (GMBB) karena pada gerak melingkar beraturan (GMB) besar percepatan sudutnya adalah nol.

$$\alpha = \frac{\Delta \omega}{\Delta t}$$

Dimana α adalah percepatan sudut(angular) dengan satuan (rad/s^2). $\Delta \omega$ adalah perubahan kecepatan sudut(rad/s), dan Δt adalah perubahan selang waktu (t).

• Torsi

Kecenderungan suatu gaya untuk memutar suatu benda terhadap suatu sumbu diukur dengan besaran yang disebut torsi. Secara umum torsi (torque) merupakan gaya yang digunakan untuk memutar sesuatu dengan jarak dan arah tertentu. Torsi maksimum adalah torsi terbesar yang harus dihasilkan oleh motor listrik.

$$\tau = I \times \alpha$$

Dimana τ menyatakan torsi (Nm), I adalah momen inersia ($kg \cdot m^2$), dan α adalah perubahan kecepatan sudut(rad/s^2). Dalam bentuk lain juga dapat dinyatakan dalam bentuk.

$$\tau = F \times r$$

Dimana F adalah gaya yang diterapkannya(N), dan r adalah jarak antara sumbu rotasi dan titik dimana gaya diterapkan



E. Konsumsi Energi

Konsumsi energi dalam mobil listrik adalah ukuran efisiensi penggunaan energi listrik oleh kendaraan dalam jarak dan waktu tertentu, diukur dengan Kilometer per Kilowatt-hour (km/kWh). Konsumsi energi diperoleh dengan menghitung jarak yang dapat ditempuh oleh mobil listrik menggunakan satu kilowatt-hour energi listrik. Perhitungan konsumsi energi menggunakan persamaan berikut:

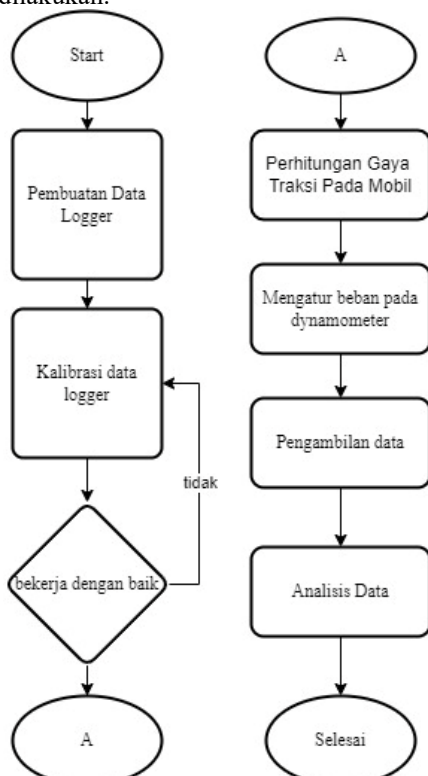
$$\text{Penggunaan Energi} = \frac{\text{Jarak (km)}}{\text{Konsumsi Energi(Wh)}} \times 1000$$

Semakin tinggi nilai Km/KWh menunjukkan semakin efisien mobil dalam menggunakan energi listrik.

III. METODELOGI

A. Flowchart Penelitian

Gambar 1 menunjukan *flowchart* penelitian. Penelitian dimulai dengan pembuatan data logger, kemudian dilanjutkan dengan pengkalibrasian data logger, jika data logger tidak bekerja dengan baik maka akan dilakukan kalibrasi kembali. Apabila kalibrasi sudah sesuai maka dilanjutkan dengan perhitungan gaya traksi pada mobil ketika pengujian *on-road*. Dilanjutkan dengan mengatur beban pada *dynamometer*. Jika semua sudah dilakukan maka pengambilan konsumsi daya motor dapat dilakukan.

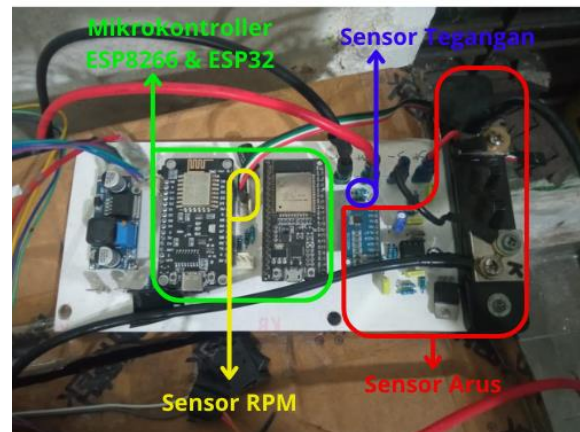


Gambar 1 Flowchart Penelitian

B. Perancangan Data Logger

Data Logger menggunakan dua buah mikrokontroler yaitu ESP8266 dan ESP32. ESP8266 bertindak sebagai PWM generator dimana ESP8266 akan membaca nilai dari throttle kemudian diteruskan ke kontroler motor BLDC dalam bentuk PWM. Selain itu, ESP8266 bertindak sebagai data logger dimana ESP8266 akan membaca nilai RPM melalui sensor hall yang terpasang didalam motor BLDC. Kemudian ESP8266 akan mengirimkan data RPM dan PWM kepada ESP32 melalui koneksi serial.

Sensor tegangan pada penelitian kali ini menggunakan rangkaian voltage divider dimana rangkaian tersebut akan menurunkan tegangan dari nilai maksimal baterai yaitu 54 V ke 3.3 V agar dapat dibaca oleh ESP32. Sementara untuk sensor arus menggunakan shunt resistor yang nilai pembacaannya dikuatkan ke nilai 3.3 V melalui rangkaian differential amplifier. Sebelum masuk ke mikrokontroler ESP32 nilai pembacaan kedua sensor ditingkatkan resolusi pembacaannya menggunakan modul ADC AD115 agar pembacaannya lebih akurat. Sebagai langkah kerja terakhir sistem data logger, ESP32 akan mengirimkan data arus, tegangan, PWM, dan RPM ke web server.



Gambar 2 Data Logger

C. Spesifikasi Dynamometer

Gambar 3 menunjukan *dynamometer* yang digunakan. *Dynamometer* menggunakan bahan besi ST37 berukuran lebar 3,5 cm dan tinggi 5cm. Besi disusun dan disambung sedemikian rupa menggunakan las SMAW (Shield Metal Arc Welding). Geometri flywheel yang digunakan mempunyai diameter 40cm dengan lebar permukaan sebesar 24cm, berat total dari flywheel adalah sebesar 25kg. dengan nilai momen inersia sebesar 0,469964 kg.m².



Gambar 3 Dynamometer

D. Konfigurasi Gaya Hambatan pada Dynamometer

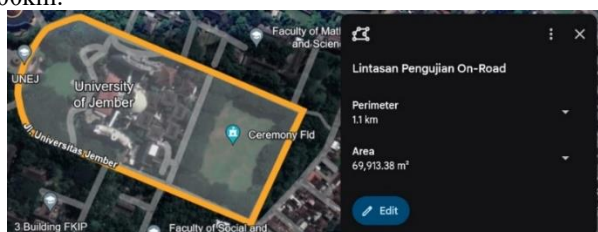
Perhitungan gaya hambat pada saat pengujian *on-road* menggunakan persamaan gaya traksi. sementara gaya hambat yang diterapkan pada pengujian dynamometer menggunakan persamaan gaya torsi. besar gaya hambat pada 2 metode haruslah ekuivalen agar hasil pengukuran dapat sebanding. Sehingga persamaan yang digunakan menjadi:

$$F_a + F_{rr} + F_d + F_{hc} = \frac{\tau}{r}$$

Sebelum dilakukan pengukuran daya menggunakan dynamometer besar gaya hambatnya akan diatur dahulu melalui pneumatic dan knop gesek

E. Pengambilan Data Konsumsi Daya

Pengambilan data dilakukan masing-masing 3 kali untuk tiap metode. Dimana di tiap percobaan pengambilan data akan menggunakan varisai PWM yang berbeda-beda. Pengukuran konsumsi daya menggunakan metode *on-road* dilakukan di lintasan double way universitas jember dengan jarak total 4400km.



Gambar 4 Lintasan Pengujian *On-road*

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pemodelan Dynamometer

Setiap benda tidak akan bergerak atau berhenti apabila tidak ada gaya yang mengenainya. Begitupun pada mobil urban, ketika mobil bergerak akan ada dua jenis gaya yang bekerja, gaya dari motor listrik yang mendorong mobil agar terus bergerak dan gaya yang akan menghambat pergerakan mobil. Pada pengujian *On-road* beban yang menghambat mobil dinyatakan dalam gaya traksi (F_{tr}). Gaya traksi adalah total jumlah gaya yang menghambat mobil seperti gaya rolling resistance (F_{rr}), gaya aerodinamis (F_d), gaya untuk menanjak (F_{hc}), dan gaya untuk melakukan percepatan (F_a). sehingga gaya traksi dinyatakan dengan persamaan:

$$F_{tr} = ma + C_{rr}mg + \frac{1}{2}\rho v^2 C_d A + mgsin\theta$$

Gaya traksi dapat dihitung jika mengetahui massa mobil (m), koefisien rolling resistance (C_{rr}), kecepatan (v), koefisien drag (C_d), dan luas permukaan yang bersentuhan dengan fluida (A). Mobil listrik urban universitas jember memiliki spesifikasi sebagai berikut:

Tabel 1 Spesifikasi Mobil Urban

Jenis Data	Nilai
A	0.9620 m ²
Cd	0.2329864
Crr	0.015

m	150 kg
---	--------

Data spesifikasi mobil listrik urban universitas jember diperoleh dari data riset tim TITEN. Dimana untuk luas area yang bersentuhan dengan fluida (A) sebesar 0.9620 m², koefisien drag (C_d) sebesar 0.2329864, koefisien rolling resistance (C_{rr}) sebesar 0.015, dan massa mobil dan driver sebesar 150 kg. selama pengujian, mobil listrik urban akan berjalan dengan kecepatan rata-rata 6 m/s dengan percepatan rata-rata 0,005 m/s². Lintasan pengujian di lintasan double way universitas jember memiliki kemiringan yang kecil sehingga pada penelitian kali ini kemiringan akan diabaikan. Maka gaya traksi untuk pengujian *On-road* menjadi:

$$F_{tr} = 27.78 \text{ N}$$

Gaya traksi saat pengujian *on-road* nantinya akan menjadi nilai acuan untuk menentukan beban pada pengujian dynamometer kedua nilai beban harus sama agar hasil pengujian yang didapat dapat ekuivalen. Pada pengujian dynamometer beban atau gaya hambatan dinyatakan dengan persamaan:

$$\text{Gaya Hambatan} = \frac{I \times \alpha}{\text{jari} - \text{jari flywheel}}$$

Berdasarkan spesifikasi dynamometer, nilai inertia (I) dynamometer sebesar 0,469964 Kgm². Dan jari-jari flywheel sebesar 0.2 m. karena besar gaya hambat yang diinginkan sebesar 27.77613316 N. Gaya hambat pada dynamometer diatur dengan cara mencari nilai deselerasi (α) yang sesuai. Karena semua komponen sudah diketahui sehingga nilai deselerasi yang diperlukan dapat dicari melalui persamaan berikut:

$$\alpha = \frac{\text{Gaya Hambatan} \times \text{jari} - \text{jari flywheel}}{I}$$

$$\alpha = \frac{27.78 \times 0.2}{0.469964}$$

$$\alpha = 11.82 \text{ rad/s}^2$$

Sebelum dilakukan pengujian dynamometer nilai beban pada dynamometer harus disesuaikan terlebih dahulu hingga deselerasinya sebesar 11.82 rad/s². Beban gaya *dynamometer* diubah dengan mengatur tekanan pada pneumatik dan juga hambatan beban gesek.

Tabel 2 Data Pengukuran Gaya Hambatan *Dynamometer*

no	ΔRPM	$\Delta \omega$ (rad/s)	Δt (s)	α (rad/s ²)	Gaya Hambat (N)
1	342.70	35.89	3.04	11.81	27.74
2	343.00	35.92	3.08	11.66	27.40
3	342.50	35.87	2.98	12.04	28.28
rata-rata				11.83	27.81

Nilai deselerasi angular dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$\alpha = \frac{\Delta \omega}{\Delta t}$$

$$\alpha = \frac{35.89}{3.04}$$

$$\alpha = 11.81 \text{ rad/s}^2$$

Sehingga nilai gaya hambatan yang diperoleh sebesar:

$$Gaya\ Hambatan = \frac{I \times \alpha}{jari - jari\ flywheel}$$

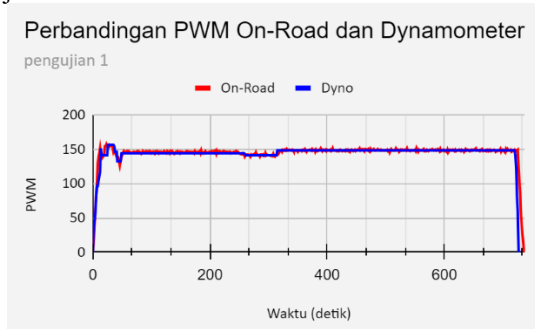
$$Gaya\ Hambatan = \frac{0.469964 \times 11.81}{0.2}$$

$$Gaya\ Hambatan = 27.74\ N$$

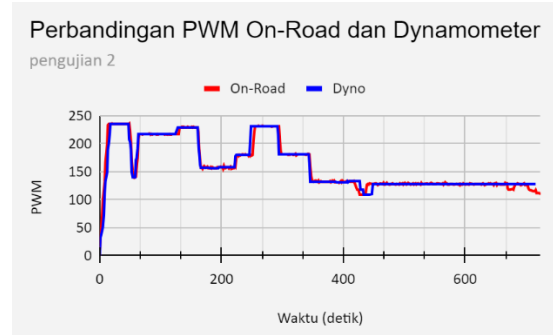
Pengambilan data beban gaya *dynamometer* dilakukan dengan cara memutar motor dengan nilai *throttle* penuh kemudian motor akan dimatikan hingga berhenti. Lama waktu motor berhenti dari kecepatan penuh akan dicatat sebagai nilai Δt . pengambilan data nilai gaya hambatan *dynamometer* dapat dilihat pada tabel 4.5. Pengambilan data dilakukan sebanyak tiga kali untuk memastikan tidak ada error yang terjadi sehingga nilai yang diperoleh sesuai. Nilai rata-rata gaya hambatan *dynamometer* yang diperoleh sebesar 27,81 N yang mana sudah mendekati nilai yang diinginkan yaitu 27,78 N. Nilai ini akan dijaga selama melakukan pengujian konsumsi daya dengan menggunakan *dynamometer* agar beban yang ditanggung motor tetap ekuivalen.

B. Hasil Pengukuran Konsumsi Daya

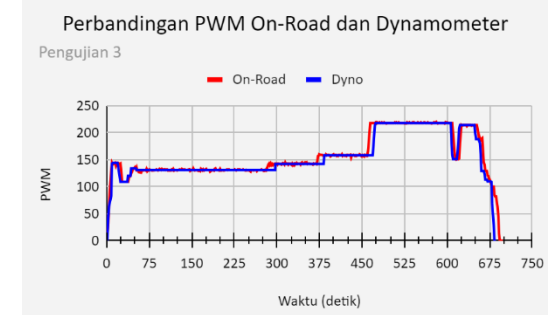
Pengujian dengan metode on-road dilaksanakan di lintasan double way universitas jember dengan jarak total sepanjang 4400 meter. Pengujian pertama dilakukan dengan variasi PWM konstan dimana driver mobil mengatur PWM agar mobil berjalan dengan kecepatan 6 m/s. Pengujian kedua menggunakan variasi PWM tinggi di waktu awal kemudian PWM rendah di waktu akhir. Pengujian ketiga menggunakan variasi PWM rendah ketika awal pengujian kemudian PWM tinggi hingga akhir pengujian. Pengujian dynamometer dilakukan setelah mendapatkan data nilai PWM pengujian On-road. Pengujian dilakukan dengan membuat program dimana nilai PWM yang akan digunakan didasarkan pada nilai PWM pengujian On-road.



Gambar 5 Grafik Perbandingan PWM Pengujian Pertama

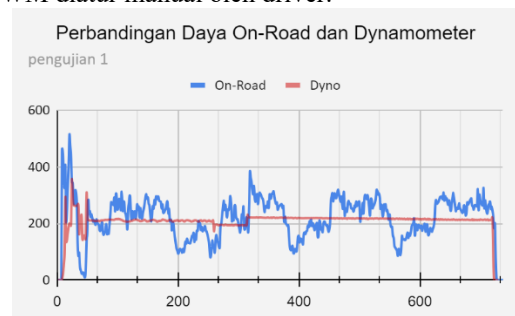


Gambar 6 Grafik Perbandingan PWM pengujian Kedua



Gambar 7 Grafik Perbandingan PWM pengujian Ketiga

Grafik perbandingan variasi penggunaan PWM pada kedua metode pengujian dalam tiga kali percobaan, menunjukkan bahwa nilai-nilainya dapat dikatakan sama. Penggunaan PWM pada kedua metode percobaan harus sama jika ingin mendapat hasil pengukuran yang setara pada kedua metode pengujian karena PWM menunjukkan bagaimana motor dikendalikan. Grafik PWM pada metode pengujian dynamometer nilainya lebih halus karena diatur oleh mikrokontroler. Sementara pada pengujian on-road terjadi sedikit fluktuasi pada nilai PWM karena pada pengujian on-road PWM diatur manual oleh driver.



Gambar 8 Grafik Perbandingan Konsumsi Daya Pengujian Pertama

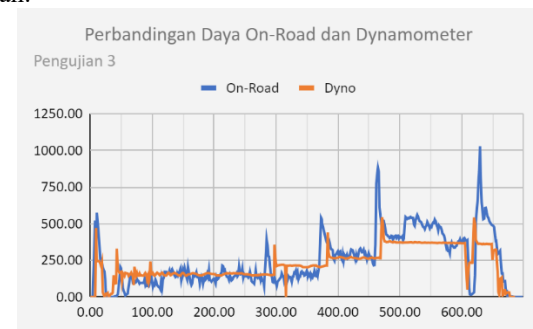
Gambar 8 menunjukkan grafik konsumsi daya pada pengujian pertama. Ketika pengujian On-road dan pengujian dynamometer terdapat kenaikan konsumsi daya yang tinggi ketika awal karena beban untuk menggerakkan motor dari keadaan diam lebih berat sehingga membutuhkan daya yang besar. Pada pengujian On-road meskipun dengan penggunaan PWM yang konstan namun pada data konsumsi daya terdapat fluktuasi konsumsi daya dikarenakan kondisi jalan yang tidak

rata. Selain itu, terdapat perbedaan konsumsi daya ketika jalanan naik dan jalanan turun. Ketika jalanan turun maka konsumsi daya akan turun, sementara saat jalanan naik konsumsi daya akan naik. Kondisi tersebut tidak ditemukan pada data konsumsi daya saat pengujian dynamometer. Pada pengujian dynamometer konsumsi daya konstan sesuai dengan variasi penggunaan PWM.



Gambar 9 Grafik Perbandingan Konsumsi Daya Pengujian Kedua

Pada pengujian kedua yang menggunakan variasi PWM tinggi diawal dan PWM rendah diakhir. Berdasarkan gambar 9 fluktuasi konsumsi daya pada pengujian On-road semakin tinggi ketika PWM yang digunakan juga tinggi tercatat nilai konsumsi daya tertinggi sebesar 830 watt. Kenaikan yang tinggi tersebut dikarenakan perubahan cepat pada permukaan jalan seperti jalan berlubang yang menyebabkan motor harus bekerja lebih keras untuk mempertahankan putarannya. Ketika pengujian dynamometer tidak terdapat kenaikan konsumsi daya yang diakibatkan oleh kondisi jalan. Kenaikan konsumsi daya hanya saat motor melakukan perubahan kecepatan dari pelan ke tinggi. Kenaikan konsumsi daya terjadi karena motor harus melakukan akselerasi untuk menambah kecepatan putaran.



Gambar 10 Grafik Perbandingan Konsumsi Daya Pengujian Ketiga

Grafik konsumsi daya pada pengujian ketiga yang ditunjukkan melalui gambar 10, karakteristiknya hampir sama dengan grafik konsumsi daya pada dua pengujian sebelumnya. Dimana konsumsi daya akan naik pada awal pengujian dikarenakan beban yang tinggi untuk menggerakkan motor dari kondisi diam. Pada pengujian On-road yang ketiga mencatat kenaikan daya tertinggi 1028 watt. Kondisi tersebut terjadi ketika mobil yang menurunkan PWM karena belokan

dilanjutkan dengan penambahan PWM yang tinggi untuk mencapai kecepatan sebelumnya sehingga beban karena akselerasinya sangat besar. Sementara itu pada pengujian dynamometer pada kondisi yang sama juga terjadi kenaikan konsumsi daya yang tinggi diangka 557 watt. Kenaikan pada dynamometer tidak terlalu tinggi karena tidak ada variabel jalan yang tidak rata.

Berdasarkan grafik perbandingan di ketiga pengujian karakteristik konsumsi daya ketika pengujian on-road nilai-nya tidak stabil karena beberapa faktor seperti kontur jalan yang tidak rata kemudian adanya belokan pada lintasan juga membuat konsumsi daya menjadi fluktuatif. Sementara, pada pengujian dynamometer karena pengujian dilakukan statis dan permukaan flywheel yang dapat rata membuat fluktuasi daya tidak terjadi. Konsumsi daya pada pengukuran menggunakan dynamometer nilainya akan berbanding lurus dengan besar nilai PWM yang digunakan.

Tabel 3 Perbandingan Hasil Pengukuran Konsumsi Daya

No	Pengujian		Error %
	On-road	Dynamometer	
1	44.74 Wh	42.75 Wh	4.45%
2	48.72 Wh	45.02 Wh	7.58%
3	47.67 Wh	44.99 Wh	5.62%
Rata-rata			5.88 %

Tabel 3 menunjukkan perbandingan hasil akhir pengukuran konsumsi daya dari kedua metode pengujian. Hasil pengujian metode On-road pada pengujian pertama konsumsi daya sebesar 44,74 Wh, pengujian kedua sebesar 48,72 Wh, dan pada pengujian ketiga sebesar 47,67 Wh. Sementara dengan metode pengujian dynamometer pada pengujian pertama konsumsi daya sebesar 42,75 Wh, pengujian kedua sebesar 45,02 Wh, dan pengujian ketiga sebesar 44,99 Wh. Terdapat selisih hasil pengukuran konsumsi antara kedua metode pengujian dimana hasil pengukuran dengan metode dynamometer hasilnya dibawah pengukuran dengan metode On-road selisih tersebut dikarenakan adanya variabel jalan yang tidak dapat dimodelkan pada dynamometer. Error terbesar terjadi pada pengujian kedua sebesar 7,58% yang menggunakan PWM tinggi disebagian besar waktu pengujian sehingga terjadi banyak kenaikan beban yang ditanggung motor. Namun error yang terjadi nilainya kecil sehingga dapat dikatakan bahwa hasil pengujian dengan metode dynamometer dapat mewakili hasil pengujian dengan metode On-road.

C. Strategi Variasi Penggunaan PWM

Tabel 4 Hasil Efektivitas Penggunaan Daya

Pengujian	Waktu (detik)	Jarak (km)	Wh	Efisiensi Penggunaan Energi (km/kwh)

On-road	1	737.61	4.44	44.74	99.26
	2	724.08	4.49	48.72	92.10
	3	698.42	4.40	47.67	92.41
Dynamometer	1	737.62	4.47	42.75	104.49
	2	727.21	4.44	45.22	98.24
	3	697.80	4.38	44.99	97.35

Sesuai dengan regulasi KMHE 2023 dimana mobil harus menempuh jarak 9300 meter dalam waktu 26 menit atau 1560 detik. Namun dalam pengujian kali ini hanya menggunakan jarak 4400 meter sehingga waktu yang dibutuhkan dicari lewat persamaan berikut:

$$\frac{\text{Jarak KMHE}}{\text{Waktu KMHE}} = \frac{\text{Jarak Pengujian}}{\text{Waktu Pengujian}}$$

$$\text{Waktu Pengujian} = \frac{4400}{9300} \times 1560$$

$$\text{Waktu Pengujian} = 738 \text{ detik}$$

Berdasarkan tabel 4, Pada semua pengujian, waktu yang digunakan kurang dari 738 detik sehingga semua pengujian dikatakan finish. Dimana pada pengujian pertama di kedua metode pengujian memiliki waktu yang paling baik karena kerugian waktunya kurang dari 1 detik. Efektivitas penggunaan energi dihitung menggunakan persamaan:

$$\text{Efektivitas Penggunaan Energi} = \frac{\text{Jarak (KM)}}{\text{Wh}} \times 1000$$

$$\text{Efektivitas Penggunaan Energi} = \frac{44,44}{44,74} \times 1000$$

$$\text{Efektivitas Penggunaan Energi} = 99,26 \text{ km/kWh}$$

Semakin besar nilai km/kWh menandakan bahwa semakin baik penggunaan energinya. Berdasarkan hasil pengukuran efektivitas penggunaan energi pengujian pertama yang menggunakan variasi PWM konstan memiliki nilai terbaik dimana pada metode pengujian *On-road* memperoleh skor 99,26 km/kWh dan pada metode pengujian dynamometer memperoleh skor 104,49 km/kWh. Pada pengujian kedua yang menggunakan variasi PWM tinggi ke rendah memperoleh skor 92,62 km/kWh saat pengujian *On-road* dan 98,24 km/kWh pada pengujian dynamometer. Pada pengujian ketiga yang menggunakan variasi PWM rendah ke tinggi memperoleh skor 92,74 km/kWh saat pengujian *On-road* dan 97,25 km/kWh. Skor yang baik pada variasi penggunaan PWM konstan dikarenakan saat nilai PWM yang digunakan konstan maka motor tidak perlu melakukan akselerasi yang menyebabkan tambahan beban dan juga karena mobil tidak berjalan dengan kecepatan tinggi sehingga ketika jalan berlubang kenaikan konsumsi daya karena tambahan beban pada motor tidak terlalu besar. Berbeda dengan penggunaan PWM yang bervariasi seperti pada strategi penggunaan PWM pada pengujian kedua dan ketiga. Beban yang ditanggung motor akan naik saat melakukan akselerasi ketika penambahan PWM dan juga beban tambahan akibat kondisi jalan yang berlubang semakin besar terutama dalam kondisi kecepatan tinggi.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan diperoleh beberapa kesimpulan, sebagai berikut:

1. Sistem dynamometer dimodelkan dengan cara memberikan gaya hambatan yang sama seperti ketika pengujian on-road. Melalui perhitungan berdasarkan data yang ada pada pengujian on-road gaya yang menghambat gerak mobil nilainya sebesar 27,78 N. Berdasarkan pengujian, rata-rata gaya hambatan pada dynamometer sebesar 27,81 N. sehingga dapat dikatakan bahwa gaya hambat pada dynamometer sudah ekuivalen dengan gaya hambat ketika pengujian on-road.
2. Nilai error rata-rata perbandingan pengukuran konsumsi daya menggunakan dynamometer dengan pengujian on-road nilainya sebesar 5.88%. sehingga disimpulkan bahwa pengukuran konsumsi daya menggunakan metode dynamometer dapat mewakili pengukuran konsumsi daya dengan metode pengujian on-road.
3. Variasi penggunaan PWM konstan memperoleh hasil efektivitas penggunaan energi yang terbaik, Melalui pengujian on-road mendapatkan nilai efektivitas penggunaan energi sebesar 99,26 km/kWh. Sementara melalui pengujian dynamometer memperoleh hasil 104,49 km/kWh. Skor yang baik ketika menggunakan variasi PWM konstan karena tidak adanya tambahan beban ketika motor berakselerasi karena penambahan nilai PWM.

REFERENSI

- [1] J. A. Sanguesa, V. Torres-Sanz, P. Garrido, F. J. Martinez, and J. M. Marquez-Barja, "A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges," *Smart Cities*, vol. 4, no. 1, pp. 372–404, Mar. 2021, doi: 10.3390/smartcities4010022.
- [2] A. Sukmayadi, S. Riyadi, and S. Witaradya, "PEDOMAN KONTES MOBIL HEMAT ENERGI TAHUN 2023." Balai Pengembangan Talenta Indonesia Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi, Aug. 2023.
- [3] D. des Ramadhana, "RANCANG BANGUN DYNAMOMETER SEBAGAI ALAT UKUR EFISIENSI DAYA DAN KARAKTERISTIK KINERJA PADA MOTOR BRUSHLESS DC." Universitas Jember, 2022.
- [4] G. Prasad, N. S. Ramya, P. V. N. Prasad, and G. T. R. Das, "Modelling and Simulation Analysis of the Brushless DC Motor by using MATLAB," vol. 1, no. 5, 2012.
- [5] D. Mohanraj et al., "A Review of BLDC Motor: State of Art, Advanced Control Techniques, and Applications," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 54833–54869, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3175011.
- [6] L. R. Reddy, A. Sharma, P. Magdam, and K. Shah, "Electric Vehicle Motor Tests and Standards in India: A

- Review,” in *Intelligent Infrastructure in Transportation and Management*, J. Shah, S. S. Arkatkar, and P. Jadhav, Eds., Singapore: Springer Singapore, 2022, pp. 227–237.
- [7] Z. Wei et al., “Design and energy efficiency analysis of a pure fuel cell vehicle for Shell eco racer,” *Int J Energy Res*, vol. 43, no. 7, pp. 2963–2973, Jun. 2019, doi: 10.1002/er.4487.
- [8] K. Wiratkasem and S. Pattana, “The effect of motorcycle tyre rolling resistance coefficient on the saving of fuel consumption,” *Energy Reports*, vol. 7, pp. 248–252, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.egy.2021.06.042.
- [9] Harris Fadzillah Zainal Abidin, Md Tasyrif Abdul Rahman, Abdul Hamid Adom, Mohd Ridzuan Mohd Jamir, Sufi Suraya Halim, and Mohd Al Hafiz Mohd Nawawi, “An Analysis of Urban Vehicle Body Aerodynamics Using Computational Fluid Dynamics for the Shell Eco-Marathon Challenge,” *ARASET*, vol. 30, no. 2, pp. 75–91, Apr. 2023, doi: 10.37934/araset.30.2.7591.
- [10] S. Hanapi, A. S. Tijani, A. H. A. Rahim, and W. A. N. W. Mohamed, “Comparison of A Prototype PEM Fuel Cell Powertrain Power Demand and Hydrogen Consumption Based on Inertia Dynamometer and On-Road Tests,” *Energy Procedia*, vol. 79, pp. 73–81, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.480.
- [11] J. Shah, S. S. Arkatkar, and P. Jadhav, Eds., *Intelligent Infrastructure in Transportation and Management: Proceedings of i-TRAM 2021*. in *Studies in Infrastructure and Control*. Singapore: Springer Singapore, 2022. doi: 10.1007/978-981-16-6936-1.

