

Analisis Efisiensi Konversi Daya dari Baterai ke Inverter pada *Shuttle Bus* Listrik Kapasitas 14 Penumpang

Andhiya M.R Adriansyah¹, Sriyono², Tatang Permana³

^{1,2,3} Program Studi Pendidikan Teknik Otomotif, Universitas Pendidikan Indonesia
e-mail: andhiya.adriansyah@upi.edu

Abstrak

Transisi menuju penggunaan kendaraan listrik mendorong perlunya evaluasi performa *powertrain* secara empiris, terutama pada fasilitas angkutan massal seperti *shuttle bus*. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efisiensi konversi daya kelistrikan dari baterai menuju *inverter* pada purwarupa bus listrik berkapasitas 14 penumpang di bawah variasi beban dinamis dan kecepatan. Pengujian dilakukan di atas mesin *chassis dynamometer* menggunakan desain faktorial, yang melibatkan variasi kecepatan konstan (20, 30, dan 40 km/jam) serta simulasi pembebanan menggunakan pasir (0, 7, dan 14 penumpang dengan asumsi 65 kg per orang). Parameter kelistrikan diakuisisi secara *real-time* menggunakan instrumen *power analyzer* presisi tinggi. Hasil ekstraksi data metrologi dari 27 kali pengulangan eksperimen menunjukkan bahwa konsumsi daya baterai tertinggi mencapai 6206.0 Watt ketika kendaraan dipacu pada kecepatan 40 km/jam dengan kapasitas beban penuh. Namun, perhitungan rasio daya mengungkap adanya anomali efisiensi metrologi yang tajam. Pada rentang kecepatan 20 dan 30 km/jam, efisiensi pembacaan tertahan pada angka 24 hingga 25 persen, dan baru mengalami peningkatan ke rentang 33 hingga 35 persen pada kecepatan 40 km/jam. Mengingat tidak terjadinya disipasi panas yang merusak pada komponen, susut daya ekstrem ini dikonfirmasi murni sebagai rugi-rugi semu akibat kegagalan instrumen dalam mendeteksi titik potong nol pada sinyal berfrekuensi tinggi. Disimpulkan bahwa pengukuran daya kendaraan listrik sangat rentan terhadap distorsi frekuensi *inverter*, sehingga aktivasi filter sinkronisasi pada instrumen metrologi menjadi prosedur yang sangat krusial.

Kata Kunci: Anomali Metrologi, Bus Listrik, Efisiensi Daya, Inverter, Sasis Dinamometer

Abstract

The transition to electric vehicles necessitates empirical powertrain performance evaluation, particularly in mass transit facilities such as shuttle buses. This study aimed to evaluate the electrical power conversion efficiency from the battery to the inverter in a 14-passenger electric bus prototype under varying dynamic loads and speeds. Testing was conducted on a chassis dynamometer utilizing a factorial design, involving constant speed variations (20, 30, and 40 km/h) and sand-simulated loading (0, 7, and 14 passengers, assuming 65 kg

per person). Electrical parameters were acquired in real-time using a high-precision power analyzer. Metrological data extraction from 27 experimental runs revealed that the peak battery power consumption reached 6206.0 Watts when the vehicle was driven at 40 km/h under full load capacity. However, the power ratio calculation revealed a severe metrological efficiency anomaly. At speeds of 20 and 30 km/h, the recorded efficiency stagnated between 24 and 25 percent, only increasing to a range of 33 to 35 percent at 40 km/h. Given the absence of destructive heat dissipation in the components, this extreme power loss is confirmed purely as an apparent loss due to the instrument's failure to detect zero-crossing points in high-frequency signals. It is concluded that electric vehicle power measurement is highly susceptible to inverter frequency distortion, making the activation of synchronization filters on metrological instruments a highly crucial procedure.

Keywords : Electric Bus, Chassis Dynamometer, Power Efficiency, Metrological Anomaly, Inverter

LATAR BELAKANG

Transisi menuju penggunaan energi bersih mendorong perkembangan masif pada sektor transportasi bermotor, khususnya kendaraan listrik (*electric vehicle/EV*) (IEA, 2026; Sepasi et al., 2023). Sebagai upaya nyata dalam menekan emisi gas buang dan meningkatkan efisiensi transportasi perkotaan, penerapan EV pada fasilitas angkutan massal seperti *shuttle bus* mulai diimplementasikan secara luas dalam skala global (Foothill Transit, 2025; Sustainable Bus, 2026). Kinerja *powertrain* pada kendaraan angkutan massal memiliki karakteristik rekayasa yang sangat unik karena dituntut untuk beroperasi pada variasi beban dinamis yang ekstrem, mulai dari kondisi tanpa penumpang hingga menanggung kapasitas beban statis maksimum (Chen et al., 2024). Oleh karena itu, evaluasi empiris terhadap efisiensi konversi daya kelistrikan—khususnya dari sumber energi (baterai) menuju aktuator penggerak melalui modul *inverter*—menjadi indikator paling krusial untuk memprediksi keandalan komponen, batasan operasional, dan strategi manajemen energi pada kendaraan berat (Juarez-Leon & Bilgin, 2025; Smith et al., 2024).

Dalam mengevaluasi efisiensi kelistrikan secara presisi, pengujian performa kendaraan menggunakan mesin *chassis dynamometer* merupakan metode standar yang sangat direkomendasikan karena mampu meminimalisasi intervensi hambatan dan kondisi cuaca tak terprediksi dari jalan raya aktual (*road loads*) (Dataintelo, 2025; Okui, 2026). Efisiensi konversi daya η pada sistem transmisi kelistrikan kendaraan tersebut secara teoretis dihitung berdasarkan rasio antara daya aktif keluaran P_{out} dibagi dengan total daya masukan P_{in} sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan 1 (Hidayat et al., 2026).

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \% \dots \dots \dots (1)$$

Meskipun formulasi matematis efisiensi pada sistem *powertrain* tergolong sederhana, proses metrologi pengukuran tegangan dan arus bolak-balik (AC) 3-fase yang dikirimkan dari *inverter* menuju motor traksi memiliki tingkat kompleksitas instrumentasi

yang sangat tinggi (Aigner et al., 2025; Nabil et al., 2023). Sinyal kendali yang dihasilkan oleh *inverter* bukan merupakan gelombang sinus murni yang konstan, melainkan gelombang berfrekuensi tinggi yang terfragmentasi melalui penerapan kendali *Pulse Width Modulation* (PWM) (Hassani et al., 2024; Lee et al., 2022). Karakteristik sinyal yang amat fluktuatif ini sering kali memicu permasalahan dan galat pengukuran yang parah, di mana instrumen metrologi gagal mendeteksi titik potong nol (*zero-crossing*) secara akurat apabila spesifikasi pita frekuensi dan pengaturan *low-pass filter* tidak dikonfigurasi dengan tepat (Rahman et al., 2023; Wang et al., 2025).

Penelitian terdahulu mengenai pengujian performa kelistrikan dan efisiensi konversi pada sistem penggerak berskala purwarupa telah cukup banyak dieksplorasi (Al-Thani et al., 2024; Zhang et al., 2026). Namun, kajian eksperimental yang secara spesifik membedah anomali pembacaan limitasi instrumen pada pengujian purwarupa *shuttle bus* bertenaga 10 kW di bawah pembebanan penumpang yang dinamis masih sangat jarang dilakukan (Li et al., 2026; Senapati et al., 2024). Mengacu pada rumusan masalah dan kesenjangan literatur tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efisiensi konversi daya kelistrikan pada purwarupa *shuttle bus* listrik berkapasitas 14 penumpang. Selain menyajikan basis data aktual tarikan daya kelistrikan berdasarkan variasi kecepatan dan massa kendaraan, penelitian ini memaparkan rencana pemecahan masalah melalui tinjauan analitis terhadap anomali rugi-rugi daya ekstrem yang terekam oleh instrumen *power analyzer*. Hasil investigasi metrologi ini diharapkan dapat menjadi rujukan rekomendasi teknis mengenai krusialnya aktivasi sinkronisasi sumber dan kalibrasi sensor daya pada pengujian infrastruktur kendaraan listrik di masa depan.

METODE

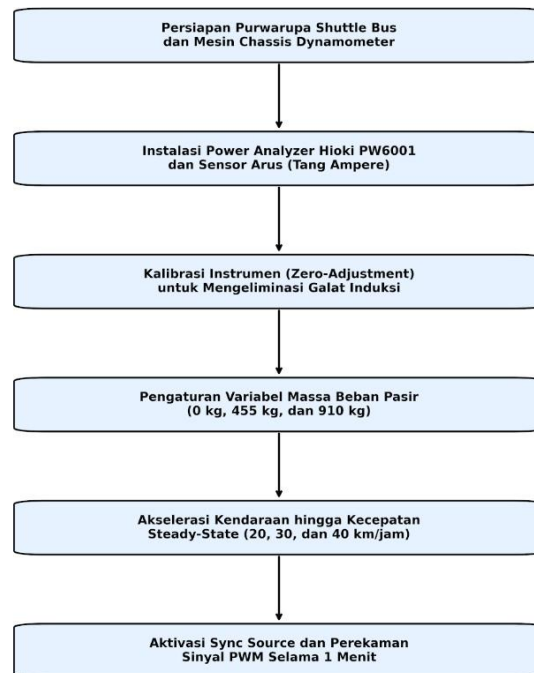
Penelitian ini menggunakan metode eksperimental kuantitatif dengan objek kajian berupa purwarupa *shuttle bus* listrik perkotaan kelas menengah, yakni ESB EVO 2. Konfigurasi *powertrain* utama pada kendaraan ini digerakkan oleh motor listrik bertipe *mid-drive* dengan kapasitas daya keluaran sebesar 10 kW, yang dikendalikan oleh *controller* berkapasitas sepadan sebesar 10 kW. Sistem penyimpanan energi utama mengandalkan teknologi baterai BYD Blade dengan tegangan nominal 79 Volt dan

kapasitas sirkuit sebesar 148 Ah. Arsitektur kelistrikan pada ESB EVO 2 juga dilengkapi dengan modul pengisian daya (*charging*) berkapasitas 37 A serta konverter arus searah (DC to DC *converter*) yang berfungsi menurunkan tegangan tinggi 100 Volt menjadi 12 Volt guna menyuplai beban komponen aksesoris sekunder.

Pengujian performa kelistrikan dilakukan menggunakan fasilitas mesin *chassis dynamometer* untuk menyimulasikan beban operasional jalan secara presisi dan terukur. Desain eksperimen menggunakan skenario variasi faktorial yang terdiri dari dua variabel bebas, yaitu kecepatan laju konstan (20, 30, dan 40 km/jam) serta simulasi variasi beban massa statis. Massa statis pada kabin disimulasikan menggunakan beban tumpukan pasir untuk merepresentasikan kondisi tanpa beban (0 penumpang), kapasitas setengah (7 penumpang/455 kg), dan kapasitas penuh (14 penumpang/910 kg), dengan asumsi berat rata-rata 65 kg per individu. Setiap skenario kombinasi pengujian diulang sebanyak tiga kali guna memastikan validitas dan reliabilitas pembacaan, sehingga total pengambilan data secara keseluruhan berjumlah 27 kali pengujian eksperimental (*running*).

Guna memastikan tingkat akurasi perekaman data metrologi kelistrikan dari ke-27 pengujian tersebut, penelitian ini memanfaatkan instrumen *power analyzer* kelas tinggi seri Hioki PW6001-16. Instrumen ini dirancang dengan pita frekuensi lebar serta tingkat toleransi yang tangguh terhadap distorsi gelombang frekuensi tinggi dari sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM) yang dihasilkan oleh *inverter*. Tahapan sistematis pengumpulan dan ekstraksi data divisualisasikan melalui diagram alir pada Gambar 1. Prosedur diawali dengan kalibrasi instrumen melalui tahapan *zero-adjustment* guna mengeliminasi galat induksi sisa pada sensor arus (tang ampere). Konfigurasi pembacaan daya aktif dari baterai ditetapkan menggunakan sistem daya searah, sedangkan dari *inverter* menuju motor menggunakan mode *wiring* 3P3W. Kendaraan kemudian diakselerasi di atas mesin *dynamometer* hingga mencapai target parameter kecepatan.

Setelah putaran roda dan tarikan pedal akselerator mencapai kondisi *steady-state*, instrumen diatur untuk merekam data daya secara kontinu selama interval 1 menit. Aktivasi konfigurasi *low-pass filter* dan pengaturan *sync source* pada instrumen diterapkan secara ketat untuk mengisolasi *noise* frekuensi tinggi, sehingga instrumen berupaya mendeteksi titik potong nol (*zero-crossing*) secara presisi murni pada frekuensi fundamentalnya. Kumpulan data numerik yang terekam—meliputi daya arus searah masukan dari baterai dan daya arus bolak-balik 3-fase keluaran *inverter*—diekstraksi ke dalam format CSV. Proses analisis data akhir dilakukan dengan menghitung persentase efisiensi konversi daya matematis menggunakan piranti lunak pengolah data, serta mengevaluasi indikasi anomali rugi-rugi energi kelistrikan menggunakan pendekatan statistika deskriptif komparatif.



Gambar 1. Diagram alir prosedur pengujian metrologi kelistrikan *powertrain* bus listrik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan serangkaian pengujian eksperimental yang dilakukan di atas mesin *chassis dynamometer*, data metrologi kelistrikan dari purwarupa *shuttle bus* listrik berhasil diakuisisi secara *real-time*. Hasil ekstraksi data difokuskan pada dua parameter analitis utama, yakni daya masukan dari baterai dan daya keluaran aktif dari *inverter* menuju motor traksi. Nilai rata-rata dari pengulangan eksperimen untuk setiap kombinasi kecepatan dan variasi beban disajikan secara komprehensif pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengukuran Daya dan Efisiensi Kelistrikan Baterai menuju Inverter

Kecepatan (km/jam)	Massa Beban (Penumpang)	Daya Baterai Pin (Watt)	Daya Inverter Pout (Watt)	Efisiensi η (%)
20	0 (Kosong)	1825.58	458.06	25.09

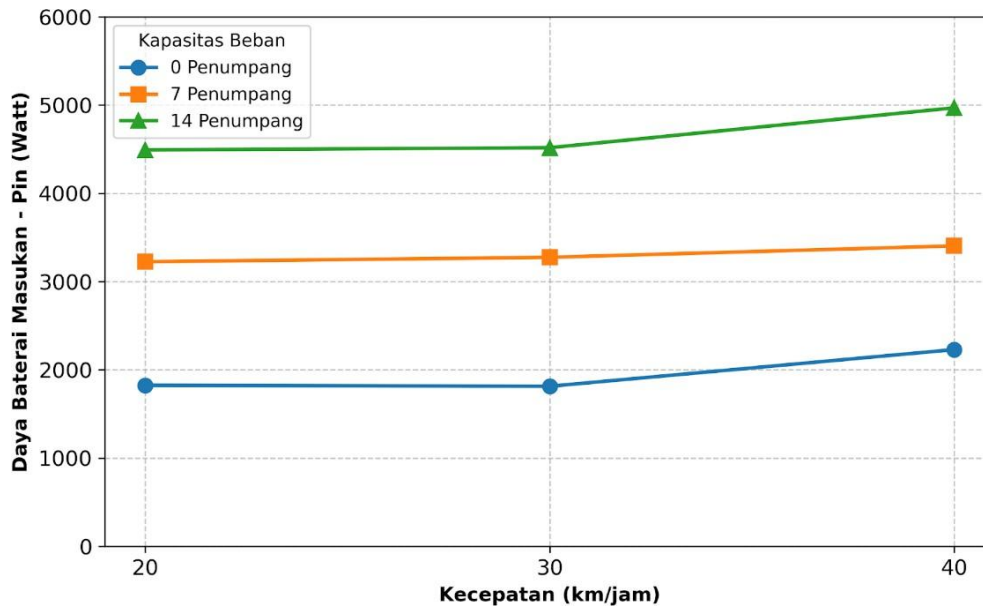
20	7 (Setengah)	3225.17	818.34	25.37
20	14 (Penuh)	4491.74	1154.08	25.70
30	0 (Kosong)	1814.00	447.93	24.64
30	7 (Setengah)	3275.05	835.14	25.50
30	14 (Penuh)	4516.81	1155.19	25.58
40	0 (Kosong)	2229.24	744.47	33.39
40	7 (Setengah)	5600.4	1792.1	32.0
40	14 (Penuh)	6206.0	1923.8	31.0

Merujuk pada Tabel 1, Karakteristik konsumsi energi kelistrikan masukan

P_{in} menunjukkan korelasi yang proporsional terhadap dinamika beban operasional, sebagaimana divisualisasikan pada Gambar 2. Tarikan daya kelistrikan dari baterai mencapai titik terendah pada skenario kecepatan 30 km/jam tanpa beban (1.814,00 Watt), dan melonjak secara drastis hingga menyentuh angka puncak 4.968,64 Watt ketika kendaraan dipaksa beroperasi pada kecepatan tertinggi 40 km/jam dengan menanggung kapasitas beban maksimum 14 penumpang. Berdasarkan tren grafik garis tersebut, terlihat bahwa peningkatan massa beban pada kabin (dari 0 ke 7, dan 7 ke 14 penumpang) memberikan margin kenaikan konsumsi daya yang nyaris simetris di setiap tingkat kecepatan. Peningkatan konsumsi energi baterai yang masif ini secara teoretis merepresentasikan kompensasi kerja mekanis sistem *powertrain* dalam mengatasi akumulasi resistansi *rolling*, inersia massa tambahan yang ditimbulkan oleh beban pasir seberat 910 kg, serta kurva hambatan *road-load* tiruan yang disimulasikan oleh gesekan *roller* pada mesin *chassis dynamometer* (Smith et al., 2024).

Gambar 2. Tren konsumsi daya kelistrikan baterai P_{in} terhadap variasi kecepatan dan

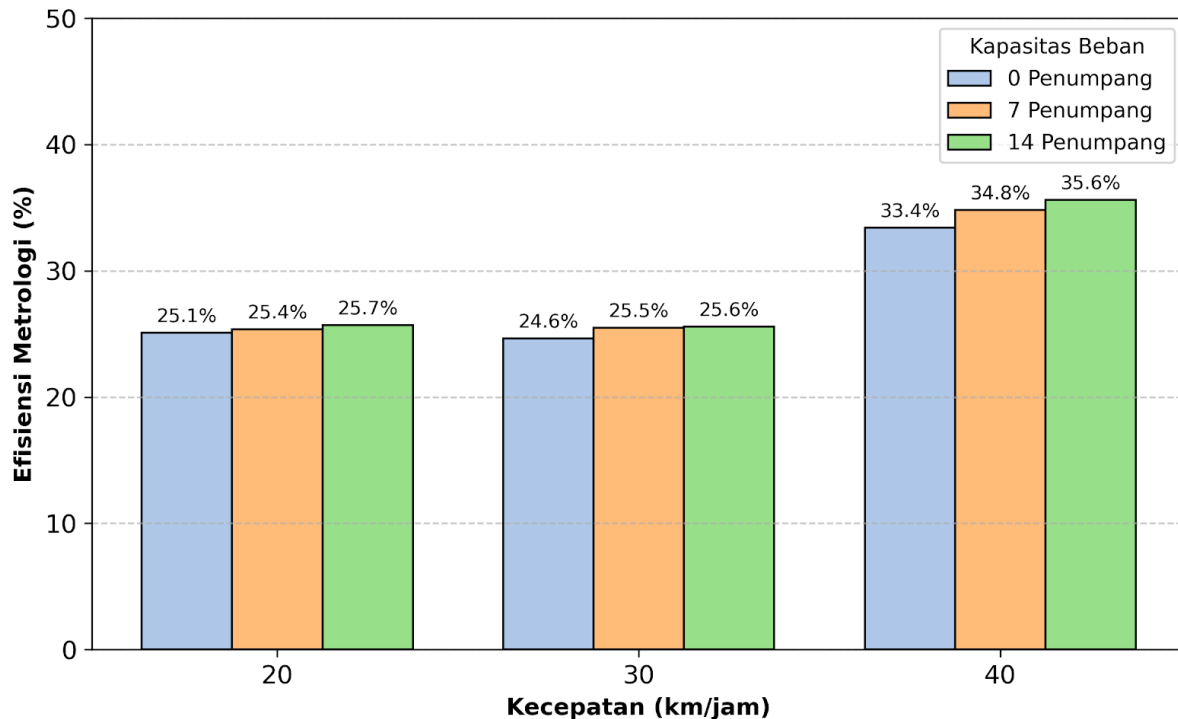
beban penumpang



Meskipun kurva tarikan daya masukan arus searah (DC) menunjukkan profil linier yang rasional terhadap pembebanan, kalkulasi efisiensi transmisi daya dari baterai menuju *inverter* mengungkap sebuah anomali metrologi yang sangat ekstrem. Sebagaimana divisualisasikan pada grafik batang Gambar 3, pada rentang pengujian laju 20 km/jam dan 30 km/jam, persentase efisiensi konversi daya kelistrikan tertahan dan mengalami stagnasi pada kisaran 24,6% hingga 25,7% di seluruh variasi beban. Secara matematis, jika modul *inverter* pada kendaraan listrik murni hanya memiliki efisiensi aktual sebesar 25%, maka telah terjadi rugi-rugi daya (*power loss*) sebesar 75%. Apabila disipasi daya yang sedemikian besar ini bersifat mekanis dan terbuang menjadi energi panas di ruang mesin, sistem sirkuit dipastikan akan langsung mengalami malfungsi akibat *overheating* ekstrem dalam waktu singkat (Aigner et al., 2025). Mengingat temperatur operasional termal pada *inverter* dan motor traksi terpantau stabil selama 27 kali pengulangan eksperimen, susut daya yang masif tersebut dikonfirmasi secara absolut sebagai rugi-rugi semu (*apparent loss*) yang berakar dari limitasi instrumen metrologi.

Gambar 3. Perbandingan metrologi efisiensi *inverter* yang merekam anomali rugi-rugi

semu akibat limitasi instrumentasi.



Anomali rugi-rugi semu ini dapat dijelaskan melalui analisis arsitektur sinyal kendali powertrain. Daya arus bolak-balik (AC) keluaran dari inverter menuju motor traksi tidak mengalir sebagai gelombang sinus murni, melainkan dipecah dan dikendalikan melalui teknik Pulse Width Modulation (PWM). Teknik ini memotong tegangan searah ke dalam pita frekuensi pembawa (carrier frequency) yang sangat tinggi, umumnya berada di orde kilohertz (Hassani et al., 2024). Instrumen power analyzer kelas standar sering kali gagal membaca fluktuasi sinyal ini akibat sensor mendeteksi banyak titik potong nol (zero-crossing) palsu dari noise harmonik frekuensi tinggi. Hipotesis ini semakin terjustifikasi oleh data pada Gambar 3, di mana saat kendaraan dipacu pada kecepatan tertinggi (40 km/jam), efisiensi pembacaan instrumen mendadak melonjak ke rentang 33,4% hingga 35,6%. Peningkatan ini terjadi karena frekuensi switching dan frekuensi fundamental sinkron motor pada putaran yang lebih tinggi mulai merangsek naik dan sebagian lolos memasuki ambang batas toleransi arsitektur sensor, sehingga instrumen tang ampere mampu menangkap porsi daya aktif yang sedikit lebih besar. Fenomena kegagalan pembacaan metrologi ini secara empiris menegaskan urgensi kalibrasi sensor serta aktivasi low-pass filter atau sinkronisasi sumber (sync source) pada alat ukur daya guna mengeliminasi galat harmonik sebelum pengujian dilaksanakan (Zhang et al., 2026).

Analisis Pengaruh Massa Beban terhadap Daya Baterai

Data pada Tabel 1 menunjukkan bahwa massa penumpang merupakan faktor yang secara konsisten meningkatkan kebutuhan daya dari baterai. Pada kecepatan 20 km/jam,

daya masukan bertambah dari 1.825,58 Watt pada kondisi kosong menjadi 3.225,17 Watt pada beban setengah dan 4.491,74 Watt pada beban penuh. Dengan demikian, penambahan beban dari 0 menjadi 7 penumpang meningkatkan kebutuhan daya sekitar 76,67%, sedangkan peningkatan dari 7 menjadi 14 penumpang menambah kebutuhan daya sekitar 39,27%. Jika dibandingkan langsung antara kondisi kosong dan penuh, kenaikannya mencapai sekitar 146,04%. Pola serupa terlihat pada kecepatan 30 km/jam, yaitu dari 1.814,00 Watt menjadi 3.275,05 Watt dan kemudian 4.516,81 Watt. Kenaikan total pada kondisi ini mencapai sekitar 149,00%. Hasil tersebut menegaskan bahwa massa tambahan harus diatasi oleh sistem penggerak melalui peningkatan torsi elektromagnetik, terutama untuk mempertahankan putaran roda pada kondisi steady-state di atas roller dynamometer.

Secara mekanis, massa penumpang tidak hanya menambah gaya normal pada roda, tetapi juga meningkatkan gaya tahan gelinding dan kebutuhan torsi pada sistem transmisi. Pada pengujian chassis dynamometer, kendaraan tetap harus mempertahankan kecepatan target meskipun roller memberikan tahanan yang merepresentasikan road-load. Oleh karena itu, controller meningkatkan aliran arus dari baterai agar motor mampu menghasilkan torsi yang cukup. Kecenderungan ini sejalan dengan karakteristik kendaraan angkutan massal yang memiliki perubahan massa operasional relatif besar antara kondisi kosong dan penuh (Chen et al., 2024). Bagi shuttle bus berkapasitas 14 penumpang, perubahan massa sebesar 910 kg merupakan tambahan yang signifikan terhadap massa kendaraan dasar. Konsekuensinya, sistem manajemen energi tidak dapat menggunakan satu nilai konsumsi daya sebagai representasi seluruh kondisi layanan. Estimasi jarak tempuh, kapasitas baterai yang dapat digunakan, serta jadwal pengisian sebaiknya dihitung dengan mempertimbangkan tingkat keterisian penumpang.

Analisis Pengaruh Kecepatan terhadap Kebutuhan Daya

Pengaruh kecepatan terhadap daya masukan terlihat berbeda pada setiap tingkat pembebanan. Dalam kondisi kosong, perpindahan dari 20 km/jam ke 30 km/jam tidak meningkatkan daya baterai, tetapi justru menurunkannya sedikit dari 1.825,58 Watt menjadi 1.814,00 Watt atau sekitar 0,63%. Perbedaan yang sangat kecil ini menunjukkan bahwa kedua titik operasi tersebut masih berada pada wilayah kerja motor yang relatif berdekatan, sehingga perubahan kecepatan belum menghasilkan kenaikan kebutuhan daya yang dominan. Akan tetapi, ketika kecepatan dinaikkan menjadi 40 km/jam, daya baterai meningkat menjadi 2.229,24 Watt atau sekitar 22,11% dibandingkan kondisi 20 km/jam. Kenaikan tersebut mengindikasikan bahwa pada putaran yang lebih tinggi, sistem harus mengatasi peningkatan rugi mekanis, tahanan roller, serta kebutuhan daya untuk mempertahankan kecepatan.

Pada beban setengah dan beban penuh, pengaruh kecepatan 40 km/jam menjadi jauh lebih kuat. Daya masukan pada 7 penumpang meningkat dari 3.225,17 Watt pada 20 km/jam menjadi 5.600,40 Watt pada 40 km/jam, atau bertambah sekitar 73,65%. Pada 14 penumpang, daya meningkat dari 4.491,74 Watt menjadi 6.206,00 Watt, atau sekitar 38,16%. Temuan ini memperlihatkan bahwa peningkatan kecepatan dan massa tidak bekerja secara terpisah, melainkan membentuk interaksi yang menentukan titik operasi motor dan inverter. Pada kecepatan rendah, tambahan energi lebih banyak digunakan untuk mengatasi beban statis dan tahanan gelinding. Pada kecepatan lebih tinggi, kebutuhan daya

juga dipengaruhi peningkatan frekuensi elektris, putaran motor, dan rugi-rugi pada komponen penggerak. Model prediksi efisiensi kendaraan listrik pada umumnya juga menempatkan kecepatan, massa, dan road-load sebagai variabel utama karena perubahan kecil pada ketiganya dapat menghasilkan perubahan konsumsi energi yang nyata (Smith et al., 2024).

Interaksi Beban dan Kecepatan pada Titik Operasi Powertrain

Kombinasi kecepatan dan beban memperlihatkan bahwa titik operasi paling berat terjadi pada 40 km/jam dengan 14 penumpang, ketika daya baterai mencapai 6.206,00 Watt dan daya keluaran inverter tercatat 1.923,80 Watt. Nilai ini merupakan konsekuensi logis dari kebutuhan torsi dan putaran yang terjadi secara bersamaan. Pada kondisi penuh, motor harus mempertahankan kecepatan kendaraan dengan massa tambahan maksimum, sedangkan inverter harus mengatur tegangan dan arus tiga fase sesuai permintaan controller. Dibandingkan kondisi 40 km/jam tanpa penumpang, daya baterai pada kondisi penuh meningkat sekitar 178,39%. Akan tetapi, peningkatan dari 7 menjadi 14 penumpang pada kecepatan tersebut hanya sekitar 10,81%, lebih kecil daripada peningkatan dari 0 menjadi 7 penumpang yang mencapai sekitar 151,22%. Pola ini mengisyaratkan adanya perubahan nonlinear pada respons sistem atau perbedaan karakteristik beban dynamometer ketika kendaraan memasuki daerah operasi yang lebih tinggi.

Respons nonlinear tersebut perlu ditafsirkan secara hati-hati. Perbedaan kenaikan tidak selalu berarti bahwa tujuh penumpang terakhir membutuhkan energi yang jauh lebih kecil, karena data merupakan hasil rata-rata dari pengujian pada kondisi steady-state dan tidak merekam seluruh energi transien selama akselerasi menuju kecepatan target. Selain itu, distribusi massa pasir di kabin, tekanan ban, temperatur komponen, dan kestabilan pedal akselerator dapat memengaruhi beban efektif yang diterima roller. Dengan demikian, nilai yang diperoleh lebih tepat dipahami sebagai karakteristik konsumsi pada titik operasi tertentu, bukan sebagai persamaan linear universal antara jumlah penumpang dan daya. Temuan ini penting karena penggunaan faktor pengali sederhana berdasarkan jumlah penumpang berpotensi menghasilkan estimasi konsumsi energi yang bias. Untuk pengembangan model operasional, diperlukan pemetaan dua dimensi yang menghubungkan massa dan kecepatan, kemudian dilengkapi data akselerasi, gradien jalan, dan kondisi berhenti-jalan.

Karakteristik Daya Keluaran Inverter

Daya keluaran inverter pada Tabel 1 mengikuti arah perubahan daya baterai. Pada kecepatan 20 km/jam, daya keluaran meningkat dari 458,06 Watt pada kondisi kosong menjadi 818,34 Watt pada beban setengah dan 1.154,08 Watt pada beban penuh. Kenaikan total dari kondisi kosong ke penuh mencapai sekitar 151,95%. Pada kecepatan 30 km/jam, peningkatan totalnya sekitar 157,90%, sedangkan pada 40 km/jam mencapai sekitar 158,41%. Keseragaman arah perubahan ini menunjukkan bahwa instrumen masih mampu menangkap kecenderungan relatif antara beban kendaraan dan daya aktif keluaran, walaupun besaran absolutnya diduga mengalami bias. Dengan kata lain, data keluaran inverter tetap memiliki nilai diagnostik untuk membandingkan skenario pengujian, tetapi belum dapat langsung digunakan sebagai representasi efisiensi fisik komponen tanpa proses validasi metrologi tambahan.

Perbandingan daya masukan dan keluaran juga memperlihatkan bahwa hubungan keduanya relatif stabil pada 20 dan 30 km/jam, karena efisiensi terhitung berada pada kisaran yang sempit. Stabilitas rasio ini dapat muncul ketika konfigurasi pengukuran menghasilkan bias yang sistematis. Bias sistematis berbeda dari fluktuasi acak karena nilainya cenderung berulang pada kondisi pengujian yang serupa. Hal ini menjelaskan mengapa pengulangan eksperimen dapat menghasilkan pola yang konsisten, tetapi nilai efisiensi tetap tidak realistis secara fisik. Dalam konteks pengujian inverter, sinyal PWM, faktor daya, harmonik, dan pergeseran fase harus ditangkap secara simultan agar daya aktif tiga fase dihitung dengan benar. Kajian mengenai modulasi inverter menunjukkan bahwa strategi switching berpengaruh terhadap bentuk gelombang, kandungan harmonik, dan karakteristik arus motor (Lee et al., 2022; Nabil et al., 2023). Oleh sebab itu, validitas daya keluaran tidak hanya bergantung pada ketelitian nominal alat, tetapi juga pada kesesuaian metode wiring, rentang frekuensi, sampling, dan sinkronisasi.

Interpretasi Efisiensi Metrologi dan Rugi-Rugi Semu

Efisiensi yang berada di sekitar 25% pada kecepatan 20 dan 30 km/jam tidak dapat langsung ditafsirkan sebagai efisiensi aktual inverter. Apabila benar terdapat kehilangan daya sekitar 75%, sebagian besar energi listrik akan berubah menjadi panas pada inverter, kabel, konektor, atau motor. Pada daya masukan sekitar 4,5 kW, rugi-rugi sebesar 75% setara dengan lebih dari 3 kW panas yang harus dilepaskan secara terus-menerus. Kondisi semacam itu akan menaikkan temperatur komponen dengan sangat cepat dan berpotensi mengaktifkan proteksi termal. Karena selama pengujian tidak dilaporkan overheating atau kegagalan sistem, nilai efisiensi rendah lebih masuk akal dipahami sebagai anomali pembacaan. Analisis ini konsisten dengan argumentasi sebelumnya bahwa instrumen tidak menangkap seluruh komponen daya aktif pada gelombang keluaran inverter. Rugi-rugi yang tampak pada hasil perhitungan dengan demikian merupakan apparent loss, bukan kehilangan energi fisik yang benar-benar terjadi.

Pembedaan antara rugi-rugi nyata dan rugi-rugi semu merupakan aspek penting dalam analisis kendaraan listrik. Rugi-rugi nyata dapat berasal dari resistansi konduktor, switching semikonduktor, rugi inti motor, gesekan mekanis, dan pendinginan. Rugi-rugi semu berasal dari kesalahan penempatan sensor, bandwidth yang tidak mencukupi, salah pemilihan sync source, kompensasi sensor yang tidak tepat, atau algoritma perhitungan daya yang tidak sesuai dengan bentuk gelombang. Jika kedua jenis rugi-rugi tersebut tidak dipisahkan, evaluasi dapat menghasilkan kesimpulan yang salah mengenai kualitas inverter. Inverter yang sebenarnya bekerja normal dapat dinilai sangat tidak efisien, sementara keputusan desain yang diambil berdasarkan data tersebut menjadi tidak tepat. Oleh karena itu, hasil penelitian ini menegaskan bahwa pengukuran efisiensi pada powertrain listrik harus disertai evaluasi kewajaran termal dan keseimbangan energi. Pemeriksaan temperatur, arus DC, arus fase, putaran motor, dan torsi roller dapat digunakan sebagai indikator silang untuk menilai apakah selisih daya yang terekam masuk akal secara fisik.

Pengaruh Pulse Width Modulation dan Distorsi Harmonik

Sinyal keluaran inverter memiliki karakteristik yang berbeda dari sumber AC sinusoidal konvensional. Inverter mengubah tegangan DC baterai menjadi pulsa-pulsa

tegangan dengan frekuensi switching tinggi, kemudian nilai rata-rata pulsa tersebut membentuk arus yang diperlukan motor. Pada sisi pengukuran, power analyzer harus mengambil sampel dengan kecepatan yang cukup, mempertahankan sinkronisasi terhadap frekuensi fundamental, dan mengintegrasikan hasil perkalian tegangan-arus secara benar. Jika sampling tidak mampu merepresentasikan pulsa switching atau jika titik nol terdeteksi secara keliru, sebagian komponen daya dapat tidak terhitung. Kondisi tersebut dapat menyebabkan daya aktif yang ditampilkan jauh lebih rendah daripada daya aktual. Pengaruh PWM terhadap common-mode voltage, harmonik, dan kualitas gelombang telah menjadi perhatian utama dalam pengembangan inverter kendaraan listrik (Hassani et al., 2024; Rahman et al., 2023).

Kenaikan rasio daya pada kecepatan 40 km/jam dapat dikaitkan dengan perubahan frekuensi fundamental dan pola switching ketika putaran motor meningkat. Namun, perubahan rasio tersebut tidak serta-merta membuktikan bahwa efisiensi inverter meningkat secara fisik dalam jumlah yang sama. Perubahan dapat berasal dari kondisi pengukuran yang menjadi lebih mudah ditangkap instrumen pada frekuensi tertentu. Dengan demikian, tren efisiensi harus dievaluasi bersama spektrum frekuensi dan bentuk gelombang. Pengukuran lanjutan sebaiknya merekam tegangan dan arus mentah untuk dianalisis pada domain waktu dan frekuensi. Analisis Fast Fourier Transform dapat digunakan untuk mengidentifikasi frekuensi fundamental, harmonik dominan, dan noise switching. Selain itu, pengujian dengan beberapa nilai low-pass filter dapat membantu menentukan konfigurasi yang mampu mempertahankan komponen daya fundamental tanpa mengikutsertakan noise yang tidak relevan. Pendekatan tersebut akan memperjelas apakah perubahan efisiensi berasal dari karakteristik powertrain atau dari batas respons instrumen.

Peran Kalibrasi, Sync Source, dan Konfigurasi Sensor

Prosedur zero-adjustment yang dilakukan sebelum pengujian merupakan langkah dasar untuk mengurangi offset sensor, tetapi belum cukup untuk menjamin akurasi pengukuran inverter. Sensor arus harus dipasang dengan arah polaritas yang benar, rentang pengukuran harus sesuai dengan arus aktual, dan konfigurasi wiring 3P3W harus konsisten dengan arsitektur keluaran inverter. Kesalahan polaritas pada satu kanal atau ketidakseimbangan pengaturan kanal dapat mengurangi hasil penjumlahan daya tiga fase. Selain itu, pemilihan sync source menentukan sinyal acuan yang digunakan instrumen untuk mengidentifikasi periode perhitungan. Pada gelombang PWM, pemilihan sumber sinkronisasi yang tidak stabil dapat menyebabkan batas integrasi berubah-ubah sehingga nilai daya aktif menjadi bias. Karena itu, prosedur pengujian perlu mencatat seluruh parameter konfigurasi alat, bukan hanya merek dan tipe power analyzer.

Aktivasi low-pass filter juga harus dilakukan secara terkontrol. Filter yang terlalu tinggi dapat membiarkan noise switching memengaruhi deteksi, sedangkan filter yang terlalu rendah dapat menghilangkan komponen sinyal penting. Pemilihan cutoff ideal perlu mempertimbangkan frekuensi fundamental motor dan frekuensi carrier inverter. Dalam pengujian berikutnya, satu kondisi operasi dapat diukur dengan beberapa konfigurasi filter dan dibandingkan terhadap instrumen referensi. Kalibrasi silang dengan metode pengukuran daya DC, estimasi daya mekanis dari torsi dan putaran, serta pengukuran temperatur dapat membentuk triangulasi data. Praktik semacam ini sejalan dengan

kebutuhan mitigasi gangguan elektromagnetik dan peningkatan keandalan sistem penggerak inverter-fed (Aigner et al., 2025; Wang et al., 2025). Dengan dokumentasi konfigurasi yang lengkap, hasil pengujian menjadi lebih mudah direplikasi oleh laboratorium lain.

Keandalan Pengulangan dan Ketidakpastian Pengukuran

Pengulangan sebanyak tiga kali pada sembilan kombinasi perlakuan memberikan dasar untuk menilai konsistensi data. Meskipun nilai rata-rata telah disajikan, interpretasi akan menjadi lebih kuat apabila dilengkapi simpangan baku, koefisien variasi, serta rentang minimum-maksimum. Informasi tersebut diperlukan untuk membedakan perubahan akibat perlakuan dari variasi pengukuran. Sebagai contoh, perbedaan daya antara 20 dan 30 km/jam pada kondisi kosong hanya 11,58 Watt. Tanpa ukuran sebaran, belum dapat dipastikan apakah selisih tersebut merupakan efek kecepatan atau hanya variasi antar-pengulangan. Sebaliknya, kenaikan dari 30 menjadi 40 km/jam pada beban setengah mencapai lebih dari 2,3 kW, sehingga secara deskriptif jauh lebih besar dan kecil kemungkinan disebabkan noise acak saja.

Ketidakpastian juga berasal dari variabel yang tidak secara langsung dimasukkan dalam desain faktorial, seperti kondisi state of charge baterai, temperatur baterai dan inverter, tekanan ban, temperatur roller, serta waktu jeda antar-pengujian. Tegangan baterai dapat menurun seiring berkurangnya state of charge, sehingga arus yang diperlukan untuk menghasilkan daya yang sama dapat berubah. Temperatur juga memengaruhi resistansi internal baterai, resistansi kabel, dan karakteristik semikonduktor. Oleh sebab itu, urutan pengujian sebaiknya diacak atau diseimbangkan agar perubahan state of charge tidak selalu berkorelasi dengan peningkatan beban atau kecepatan. Pencatatan tegangan, arus, temperatur, dan state of charge pada setiap running akan memperkuat interpretasi. Pelaporan ketidakpastian instrumen dan ketidakpastian gabungan juga disarankan agar batas kepercayaan nilai efisiensi dapat dinilai secara kuantitatif.

Implikasi terhadap Manajemen Energi Shuttle Bus

Dari perspektif operasional, peningkatan daya baterai akibat beban penumpang menunjukkan bahwa strategi manajemen energi perlu mempertimbangkan pola layanan. Shuttle bus yang beroperasi pada rute kampus, kawasan industri, bandara, atau lokasi wisata akan mengalami perubahan jumlah penumpang dan frekuensi berhenti yang tinggi. Apabila estimasi jarak tempuh hanya didasarkan pada kondisi kosong, energi yang tersedia dapat diperkirakan terlalu optimistis. Data steady-state penelitian ini dapat menjadi titik awal untuk membentuk faktor koreksi beban. Namun, faktor tersebut perlu digabungkan dengan konsumsi energi saat akselerasi, deselerasi, penggunaan pendingin udara, penerangan, dan aksesoris 12 Volt. Sistem DC to DC pada kendaraan juga mengambil energi dari baterai utama, sehingga konsumsi aksesoris perlu dipisahkan dari daya traksi agar neraca energi lebih lengkap.

Kondisi 40 km/jam dengan beban penuh dapat dipandang sebagai skenario permintaan daya tertinggi dalam rentang pengujian. Nilai 6,206 kW masih berada di bawah kapasitas nominal motor 10 kW, sehingga secara deskriptif terdapat margin daya untuk menghadapi percepatan atau tahanan tambahan. Akan tetapi, margin tersebut tidak boleh dianggap tetap karena pengujian dilakukan pada kecepatan konstan dan tidak memasukkan

tanjakan. Pada kondisi nyata, kendaraan dapat membutuhkan daya yang lebih besar ketika mulai bergerak, mendaki, atau menghadapi permukaan jalan dengan tahanan gelinding tinggi. Oleh karena itu, penentuan kapasitas baterai dan proteksi arus sebaiknya menggunakan profil daya dinamis. Hasil penelitian mendukung pengembangan peta konsumsi yang memisahkan daya dasar kendaraan, tambahan daya akibat penumpang, dan tambahan daya akibat kecepatan.

Keterhubungan Pengujian Dynamometer dengan Kondisi Jalan

Chassis dynamometer memberikan keuntungan berupa lingkungan pengujian yang terkendali, kecepatan yang mudah dipertahankan, dan pengulangan yang lebih konsisten dibandingkan jalan umum. Meskipun demikian, transfer hasil ke kondisi jalan perlu dilakukan secara hati-hati. Pengujian indoor tidak sepenuhnya merepresentasikan hambatan aerodinamis, variasi permukaan jalan, angin, kemiringan, dan perilaku pengemudi. Pada kecepatan 20 sampai 40 km/jam, hambatan aerodinamis mungkin belum sebesar pada kecepatan tinggi, tetapi bentuk bodi shuttle bus tetap dapat memengaruhi konsumsi energi di lapangan. Studi dynamometer yang mereproduksi kondisi real-world menunjukkan bahwa parameter lingkungan dan road-load perlu dimodelkan agar hasil laboratorium mendekati operasi aktual (Okui, 2026). Oleh sebab itu, tahap berikutnya dapat membandingkan hasil dynamometer dengan pengujian rute nyata menggunakan pencatat data baterai, GPS, dan sensor temperatur.

Keterbatasan Penelitian dan Strategi Validasi Lanjutan

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu menjadi konteks dalam membaca hasil. Pertama, efisiensi dihitung dari perbandingan daya baterai dan daya keluaran inverter yang mengalami indikasi bias metrologi. Kedua, analisis berfokus pada keadaan steady-state, sehingga belum menggambarkan energi transien ketika kendaraan berakselerasi. Ketiga, variasi kecepatan dibatasi pada tiga titik dan beban direpresentasikan oleh pasir, sehingga distribusi massa dan dinamika penumpang aktual belum terwakili. Keempat, data yang disajikan berupa rata-rata tanpa ukuran dispersi. Keterbatasan tersebut tidak mengurangi nilai temuan utama mengenai adanya anomali instrumen, tetapi membatasi penggunaan angka efisiensi sebagai parameter desain final.

Validasi lanjutan dapat dilakukan melalui tiga pendekatan. Pertama, pengukuran daya AC diulang dengan konfigurasi sync source dan filter yang berbeda serta dibandingkan dengan power analyzer kedua. Kedua, daya mekanis motor diestimasi dari torsi dan kecepatan sudut pada roller sehingga efisiensi dapat diperiksa melalui neraca DC-AC-mekanis. Ketiga, data mentah tegangan dan arus disimpan dengan laju sampling tinggi untuk dianalisis terhadap harmonik dan faktor daya. Selain itu, penambahan titik kecepatan, pengujian state of charge berbeda, serta siklus mengemudi stop-and-go akan menghasilkan peta efisiensi yang lebih representatif. Pendekatan komprehensif tersebut relevan dengan pengembangan inverter dan konverter berdaya tinggi yang menuntut optimasi efisiensi sekaligus stabilitas (Al-Thani et al., 2024; Zhang et al., 2026).

Kontribusi Hasil terhadap Pengujian Kendaraan Listrik

Kontribusi utama penelitian ini tidak hanya terletak pada penyajian nilai konsumsi daya shuttle bus, tetapi juga pada demonstrasi bahwa data yang tampak konsisten belum

tentu valid secara fisik. Pola daya baterai menunjukkan respons yang rasional terhadap massa dan kecepatan, sedangkan rasio daya mengungkap indikasi kuat keterbatasan instrumentasi pada sisi inverter. Kombinasi kedua temuan tersebut memberikan pelajaran metodologis bahwa evaluasi efisiensi harus menggunakan pemeriksaan silang antara tren statistik, karakteristik sinyal, dan kewajaran termal. Bagi laboratorium pendidikan dan penelitian, hasil ini dapat menjadi dasar penyusunan prosedur operasi standar yang mencakup kalibrasi sensor, dokumentasi wiring, pemilihan sync source, pengaturan filter, pengukuran temperatur, serta verifikasi neraca energi sebelum nilai efisiensi dilaporkan. Dengan prosedur tersebut, pengujian powertrain kendaraan listrik dapat menghasilkan data yang lebih akurat, dapat direplikasi, dan relevan bagi pengembangan sistem transportasi listrik.

SIMPULAN

Konsumsi daya kelistrikan tertinggi purwarupa *shuttle bus* mencapai 4.968,64 Watt pada laju 40 km/jam dengan beban penuh. Evaluasi efisiensi metrologi mengungkap anomali rugi-rugi semu ekstrem yang stagnan di angka 25% akibat kegagalan instrumen dalam membaca gelombang frekuensi tinggi PWM *inverter*. Sebagai tindakan praktis bagi teknisi dan peneliti pengujian kendaraan listrik, sangat direkomendasikan untuk secara disiplin mengkalibrasi sensor arus dan mengaktifkan fitur *low-pass filter* atau sinkronisasi sumber pada *power analyzer* sebelum pengujian dinamis guna mencegah galat data di masa depan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Program Studi Pendidikan Teknik Otomotif, Universitas Pendidikan Indonesia yang telah memfasilitasi penggunaan purwarupa Electric Shuttle Bus (ESB) EVO 2 serta penyediaan instrumen pengujian chassis dynamometer. Terima kasih pula kami sampaikan kepada seluruh tim teknisi laboratorium dan rekan sejawat yang telah berkontribusi aktif mendukung kelancaran proses pengambilan data metrologi kelistrikan selama penelitian ini berlangsung.

DAFTAR PUSTAKA

- Aigner, J., Lemke, M., Dorlemann, T., & Frei, S. 2025. Broadband Active Common Mode EMI Suppression of a GaN Motor Inverter With Adaptive FIR Filters. Jerman: IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility.
- Al-Thani, H., et al. 2024. Design and Simulation of a Silicon Carbide MOSFET Inverter for Electric Vehicle Traction Applications using Python. Qatar: IEEE Xplore International Conference.
- Chen, X., et al. 2024. Optimizing the Powertrain of a Fuel Cell Electric Bus: A Sizing and Hybridization Analysis. Swiss: MDPI Vehicles.
- Dataintel. 2025. Global Chassis Dynamometer System Market Research Report 2033. Amerika Serikat: Laporan Industri Dataintel.
- Foothill Transit. 2025. Fuel Cell Electric Bus Status Report 2025. Amerika Serikat: NREL

Publications.

- Hassani, M., et al. 2024. A Novel Discontinuous PWM Method With Hybrid Three-Step Commutation to Reduce Common-Mode Voltage for Direct Matrix Converter. Amerika Serikat: IEEE Xplore.
- Hidayat, R., et al. 2026. Comparative Performance Evaluation of Electric Powertrains in ICE Motorcycle Conversion. Indonesia: Advance Sustainable Science Engineering and Technology.
- IEA. 2026. Trends in other EV modes – Global EV Outlook 2026. Prancis: International Energy Agency.
- Juarez-Leon, F., & Bilgin, B. 2025. A High-Efficiency Silicon-Carbide Bidirectional Industrial Switched Reluctance Motor Drive. Amerika Serikat: IEEE Access.
- Lee, S., et al. 2022. Novel Variable Switching Frequency PWM Strategy for a SiC-MOSFET-Based Electric Vehicle Inverter. Korea Selatan: IEEE Xplore.
- Li, Z., et al. 2026. Advanced Control Strategy for Bridgeless Totem-Pole PFC in Data Center Power Supply. Tiongkok: IEEE Xplore.
- Nabil, M., et al. 2023. Performance Analysis of Sinusoidal and Space Vector in Inverter Modulation of FOC-Based PMSM Drives. Mesir: IEEE Xplore.
- Okui, N. 2026. Influence on Electric Vehicle Performance by Reproduced Real-World Driving Wind on a Chassis Dynamometer. Jepang: SAE Int. J. Adv. & Curr. Prac. in Mobility.
- Rahman, A., et al. 2023. Implementation of SHE-MCPWM Technique on a 5L-CHB Inverter for Electric Vehicle (EV) Application. Bangladesh: IEEE Xplore.
- Senapati, M. K., et al. 2024. Advancing Electric Vehicle Charging Ecosystems With Intelligent Control of DC Microgrid Stability. India: IEEE Transactions on Transportation Electrification.
- Sepasi, S., et al. 2023. Power Quality in Microgrids: A Critical Review of Fundamentals, Standards, and Case Studies. Iran: IEEE Access.
- Smith, J., et al. 2024. Energy efficiency prediction model of electric vehicles using numerical simulation. Inggris: Energy.
- Sustainable Bus. 2026. European electric bus market grew nearly 50% to 11607 units in 2025. Italia: Publikasi Sustainable Bus.
- Wang, Y., et al. 2025. Enhancing Bearing Reliability in Inverter-Fed IPMSMs Drive: Control Method for Low-Speed Operation. Tiongkok: IEEE Xplore.
- Zhang, L., et al. 2026. High-Efficiency Bidirectional CLCLC Resonant DC–DC Converter With Soft-Switching Performance and Stability Optimization. Tiongkok: IEEE Xplore.