



Perbandingan Efisiensi dan Kapasitas Baterai Sepeda Motor Jenis *Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄)*, *Lithium-Ion (Li-Ion)* , dan *Lead Acid*

Kurniawan Dwi Sa'bani^{1*}, Khambali², Yuniarto Agus Winoko³, Nike Nur Farida⁴

¹⁻⁴ Politeknik Negeri Malang, Indonesia

E-mail: wawandwis1005@gmail.com, khambali@polinema.ac.id

Abstract. *The development of electric motor vehicles drives the need for efficient, stable, and reliable energy storage systems. This study aims to compare the performance of three types of batteries commonly used in electric motorcycles, namely LiFePO₄ (Lithium Iron Phosphate), Li-Ion (Lithium Ion), and Lead Acid (Lead Battery). The parameters tested include energy efficiency, capacity, and performance during the starting process. The test method was carried out for 60 minutes through a charging and discharging process (charge-discharge), using a pzem-015 measuring instrument and a multimeter to monitor the current, voltage, input/output power, and battery capacity. The test results show that the LiFePO₄ battery provides the best performance. This battery has the highest efficiency and capacity, reaching 1430 mAh, with a stable average efficiency in the range of 50–60%. In addition, LiFePO₄ also produces the highest current and voltage when used for starting, making it very reliable for the initial needs of electric motorcycle operation. Meanwhile, the Li-Ion battery recorded a high initial efficiency of up to 87.27%, but this efficiency decreased and then stabilized at 72%, with a recorded capacity of 1360 mAh. Although its efficiency is quite good, its long-term stability is still below that of LiFePO₄. Meanwhile, the Lead Acid battery showed the lowest performance. Its efficiency continued to decline to only 26.3% at the end of the test. Its capacity is 1380 mAh, but the increase is unstable, indicating inconsistencies in power storage and discharge. Based on these results, LiFePO₄ batteries are recommended as the main choice for electric motorcycles because they excel in aspects of energy efficiency, performance stability, and long-term durability.*

Keywords: *Batterys, Capacity, Efficiency, Lead Acid, Li-Ion*

Abstrak. Perkembangan kendaraan bermotor listrik mendorong kebutuhan akan sistem penyimpanan energi yang efisien, stabil, dan andal. Penelitian ini bertujuan membandingkan performa tiga jenis baterai yang umum digunakan pada sepeda motor listrik, yaitu LiFePO₄ (Lithium Iron Phosphate), Li-Ion (Lithium Ion), dan Lead Acid (Aki Timbal). Parameter yang diuji meliputi efisiensi energi, kapasitas, dan kinerja saat proses starter. Metode pengujian dilakukan selama 60 menit melalui proses pengisian dan pengosongan (charge–discharge), menggunakan alat ukur pzem-015 dan multimeter untuk memantau arus, tegangan, daya masuk/keluar, serta kapasitas baterai. Hasil pengujian menunjukkan bahwa baterai LiFePO₄ memberikan performa terbaik. Baterai ini memiliki efisiensi dan kapasitas tertinggi, mencapai 1430 mAh, dengan efisiensi rata-rata yang stabil di kisaran 50–60%. Selain itu, LiFePO₄ juga menghasilkan arus dan tegangan tertinggi saat digunakan untuk starter, menjadikannya sangat andal untuk kebutuhan awal pengoperasian motor listrik. Sementara itu, baterai Li-Ion mencatat efisiensi awal yang tinggi hingga 87,27%, namun efisiensi ini menurun dan kemudian stabil pada angka 72%, dengan kapasitas tercatat sebesar 1360 mAh. Meskipun efisiensinya cukup baik, kestabilan jangka panjangnya masih di bawah LiFePO₄. Adapun baterai Lead Acid menunjukkan performa paling rendah. Efisiensinya terus menurun hingga hanya 26,3% di akhir pengujian. Kapasitasnya sebesar 1380 mAh, namun peningkatannya tidak stabil, menunjukkan ketidakkonsistenan dalam penyimpanan dan pelepasan daya. Berdasarkan hasil tersebut, baterai LiFePO₄ direkomendasikan sebagai pilihan utama untuk sepeda motor listrik karena unggul dalam aspek efisiensi energi, kestabilan performa, dan daya tahan jangka panjang.

Kata Kunci: Asam Timbal, Baterai, Efisiensi, Kapasitas, Li-Ion

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi kendaraan bermotor telah mengalami perubahan signifikan seiring dengan semakin tingginya kebutuhan akan efisiensi energi dan pengurangan dampak lingkungan. Sepeda motor, sebagai salah satu sarana transportasi yang banyak digunakan di berbagai negara, kini mulai beralih menggunakan sumber energi alternatif selain bahan bakar fosil. Salah satu sumber energi alternatif yang paling banyak diterapkan pada sepeda motor

adalah baterai, yang memungkinkan kendaraan beroperasi secara lebih ramah lingkungan dan efisien.

Di antara berbagai jenis baterai yang digunakan pada sepeda motor listrik, terdapat tiga jenis yang paling umum, yaitu baterai *Lithium Iron Phosphate* (LiFePO₄), *Lithium-Ion* (Li-ion), dan *Lead Acid*. Masing-masing baterai memiliki karakteristik, kelebihan, dan kekurangan yang memengaruhi kinerja dan efisiensi kendaraan. Baterai LiFePO₄, misalnya, dikenal dengan daya tahan yang lebih lama dan tingkat keamanan yang lebih tinggi dibandingkan dengan baterai Li-ion, namun harganya cenderung lebih mahal. Sementara itu, baterai *Lead Acid*, meskipun lebih murah, memiliki efisiensi yang lebih rendah dan umur pakai yang lebih pendek.

Seiring dengan pesatnya perkembangan sepeda motor, perbandingan antara jenis baterai ini menjadi penting untuk mengetahui mana yang memberikan efisiensi dan kapasitas terbaik, serta untuk menentukan kecocokan penggunaan pada sepeda motor yang berbeda. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk membandingkan efisiensi dan kapasitas baterai LiFePO₄, Li-ion, dan *Lead Acid* dalam aplikasi sepeda motor, guna memberikan rekomendasi bagi produsen dan konsumen terkait pilihan baterai yang paling sesuai dengan kebutuhan.

Pentingnya penelitian ini juga terlihat dari tren global yang semakin berfokus pada keberlanjutan dan pengurangan dampak lingkungan. Baterai yang lebih efisien dan tahan lama dapat mengurangi kebutuhan penggantian dan limbah elektronik, yang pada gilirannya dapat berkontribusi pada pengurangan polusi. Selain itu, pemilihan jenis baterai yang tepat akan berperan penting dalam menentukan biaya operasional jangka panjang, yang sangat berpengaruh bagi konsumen dan produsen.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Prinsip Kerja Batrai

Baterai adalah perangkat yang mampu menghasilkan tegangan searah (DC) dengan mengonversi energi kimia menjadi energi listrik melalui reaksi elektrokimia, yaitu reduksi-oksidasi (*Redoks*). Baterai terdiri dari beberapa sel listrik yang berfungsi sebagai penyimpan energi dalam bentuk energi kimia. Setiap sel baterai memiliki dua elektroda, yaitu elektroda negatif (katoda) yang berperan sebagai pelepas elektron dan elektroda positif (anoda) yang berfungsi sebagai penerima elektron. Arus listrik mengalir dari anoda (kutub positif) ke katoda (kutub negatif), sedangkan elektron bergerak dalam arah yang berlawanan, yakni dari katoda menuju anoda. Mekanisme ini memungkinkan baterai untuk menyuplai daya listrik ke berbagai perangkat sesuai dengan kebutuhannya.

Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄)

Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄), yang diperkenalkan oleh John Good pada 1997, memiliki banyak keunggulan sebagai material katoda untuk baterai lithium-ion, seperti harga terjangkau, tidak beracun, mudah diperoleh, dan kestabilan termal serta kimia yang tinggi. Selain itu, LiFePO₄ memiliki kapasitas tinggi (170 mAh/g) dan siklus hidup panjang. Beberapa metode sintesis LiFePO₄, seperti kopresipitasi, *carbothermal reduction*, dan *spray pyrolysis*, digunakan, namun metode solid-state reaction lebih disukai karena dapat menghasilkan partikel dengan ukuran mikrometer hingga nanometer, proses yang cepat, dan cocok untuk industri. Tantangan utama dalam sintesis LiFePO₄ adalah konduktivitas listrik rendah dan kesulitan memperoleh fase tunggal. Oleh karena itu, optimasi suhu kalsinasi dan pemilihan material diperlukan untuk mencapai performa teoritis yang optimal.

Lithium-Ion (Li-ion)

Baterai *Lithium-Ion* merupakan jenis baterai sekunder (*rechargeable battery*) yang dapat diisi ulang dan dikenal sebagai pilihan yang ramah lingkungan, karena tidak mengandung bahan berbahaya seperti yang ditemukan pada baterai-baterai sebelumnya, seperti NI-Cd dan Ni-MH. Dibandingkan dengan baterai sekunder lainnya, baterai *Lithium-Ion* memiliki sejumlah keunggulan, antara lain stabilitas penyimpanan energi yang sangat baik (dengan daya tahan hingga 10 tahun atau lebih), densitas energi yang tinggi, bebas dari efek memori, serta bobot yang relatif lebih ringan. Dengan berat yang setara, baterai *Lithium-Ion* mampu menghasilkan energi dua kali lipat dibandingkan dengan jenis baterai lainnya.

Lead Acid

Menurut F. Ervinka et al. Baterai asam timbal merupakan salah satu jenis baterai sekunder yang dapat diisi ulang (*rechargeable*) dan dapat dimodifikasi menjadi baterai aliran redoks (*Redox Flow Battery/RFB*). Baterai ini menggunakan timbal dioksida (PbO₂) sebagai elektroda positif (katoda) dan timbal spons (Pb) sebagai elektroda negatif (anoda), dengan Methane Sulphonic Acid (CH₃SO₃H) sebagai elektrolitnya. Struktur sel baterai asam timbal terdiri dari anoda berbahan timbal (Pb) dan katoda berbahan timbal dioksida (PbO₂), yang terendam dalam elektrolit. Ketika baterai digunakan, terjadi reaksi kimia pada anoda dan katoda, sebagaimana ditunjukkan pada persamaan 1, 2, dan 3. Reaksi ini bersifat reversibel, sehingga dengan pemberian arus listrik, timbal sulfat (PbSO₄) yang terbentuk dapat kembali diuraikan menjadi timbal (Pb) dan timbal dioksida (PbO₂). Oleh karena itu, baterai asam timbal yang telah habis dayanya dapat diisi ulang (*recharged*) untuk digunakan kembali.

Prinsip Kerja Batrai Pada Kendaraan

Baterai sepeda motor berfungsi sebagai sumber listrik utama untuk menghidupkan mesin, sistem pencahayaan, dan komponen kelistrikan lainnya. Prinsip kerjanya bergantung pada jenis baterai. Pada baterai *Lead Acid* (aki basah dan kering), energi listrik dihasilkan melalui reaksi kimia antara elektroda timbal (Pb) dan elektrolit asam sulfat (H₂SO₄). Saat discharge, reaksi ini menghasilkan arus listrik, sementara saat *charging*, alternator mengembalikan kondisi kimia baterai. Baterai *Lithium-Ion* (Li-ion) bekerja dengan pergerakan ion lithium antara anoda dan katoda melalui elektrolit, sedangkan baterai *Lithium Iron Phosphate* (LiFePO₄) menggunakan katoda berbasis *Lithium Iron Phosphate* yang lebih stabil dan aman.

Efisiensi

Efisiensi baterai sebagai pengganti aki pada sepeda motor mengacu pada kemampuan baterai untuk menyimpan dan melepaskan energi listrik secara efektif selama siklus pengisian dan pengosongan. Efisiensi ini penting untuk memastikan bahwa energi yang disimpan dapat dimanfaatkan secara optimal oleh sistem kelistrikan sepeda motor.

Kapasitas

Kapasitas baterai adalah ukuran jumlah energi listrik yang dapat disimpan dan disuplai oleh baterai selama siklus pengisian dan pengosongan. Dalam konteks penggantian aki pada sepeda motor, kapasitas baterai menentukan seberapa lama baterai dapat menyediakan daya yang diperlukan untuk menghidupkan mesin dan mendukung sistem kelistrikan sepeda motor. Kapasitas ini biasanya dinyatakan dalam satuan ampere-jam (Ah) atau watt-jam (Wh).

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental dengan pendekatan kuantitatif yang membandingkan efisiensi dan kapasitas tiga jenis baterai untuk sepeda motor: LiFePO₄, Li-ion, dan *Lead Acid*. Pengujian dilakukan secara langsung untuk memperoleh data akurat terkait daya tahan, kapasitas energi, serta efisiensi pengisian dan pemakaian. Setiap baterai diuji dalam kondisi terkontrol dengan beban dan penggunaan yang sama agar hasil perbandingan lebih objektif. Penelitian dilakukan pada rentang waktu Februari – Mei 2025. Sedangkan untuk pelaksanaan kegiatan penelitian berada di bengkel Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Malang Jl. Soekarno Hatta No. 9, Jatimulyo, Lowokwaru, Kota Malang.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kapasitas (Pengosongan)

Proses pengosongan (discharge) ketiga baterai telah dilakukan, menghasilkan parameter arus, tegangan, dan kapasitas discharge selama 60 menit atau 1 jam. Kedalaman pengosongan atau yang lebih sering disebut dengan DoD (Depth of Discharge) merupakan jumlah energi yang telah digunakan dari baterai dalam presentase. DoD untuk masing- Berikut adalah persamaan untuk menghitung DoD

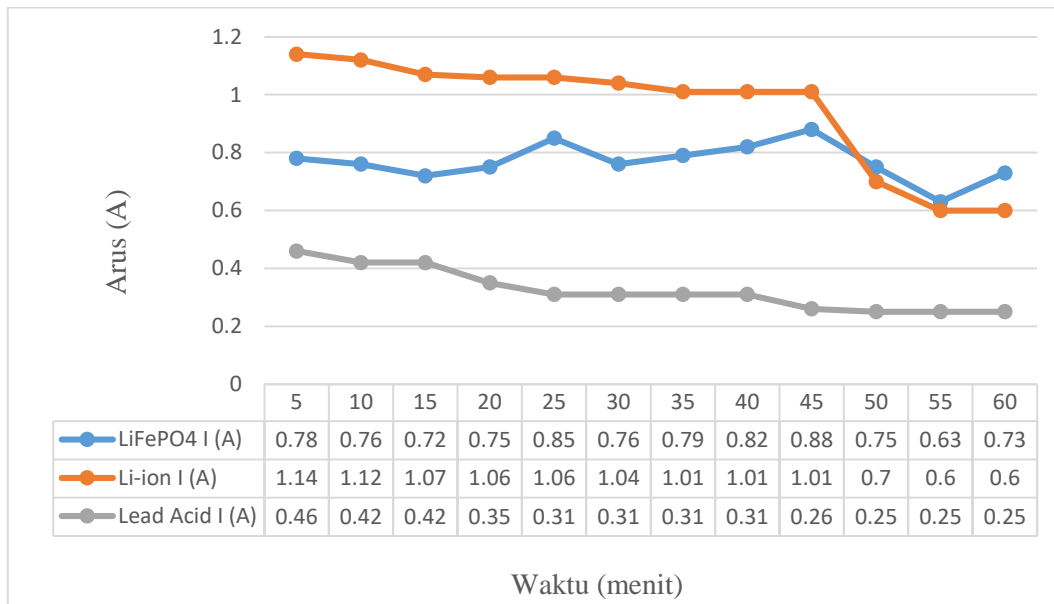
$$DoD = \frac{\text{rata - rata energi yang dikeluarkan}}{\text{Energi baterai}}$$

Perubahan arus (Ampere) terhadap waktu (menit) pada proses pengosongan (*discharging*) tiga jenis baterai, yaitu LiFePO₄, *Lithium-Ion* (Li-ion), dan *Lead Acid*. baterai Li-ion memiliki nilai arus tertinggi pada awal pengosongan, dimulai dari 1,14 A pada menit ke-5 dan menurun perlahan hingga 1,06 A pada menit ke-20. Hal ini menunjukkan bahwa baterai Li-ion mampu menghantarkan arus yang cukup besar secara konsisten pada fase awal proses *discharging*. Namun, setelah menit ke-45, arus dari baterai Li-ion mengalami penurunan tajam hingga mencapai 0,6 A pada menit ke-55 dan stabil hingga menit ke-60. Penurunan tajam ini menunjukkan bahwa kinerja baterai Li-ion menurun drastis mendekati kondisi DoD (Depth of Discharge) maksimum.

Sementara itu, baterai LiFePO₄ menunjukkan kinerja yang relatif stabil sepanjang pengujian. Arus awal sebesar 0,78 A sempat mengalami penurunan kecil hingga 0,72 A pada menit ke-15, kemudian meningkat kembali hingga mencapai 0,85 A pada menit ke-25. Setelah itu, arus tetap stabil di kisaran 0,75–0,88 A hingga menit ke-45. Penurunan arus mulai terlihat setelah menit ke-45, namun tidak secepat penurunan yang dialami oleh baterai Li-ion. Pada menit ke-60, arus dari baterai LiFePO₄ masih berada di angka 0,73 A. Kondisi ini menunjukkan bahwa baterai LiFePO₄ memiliki kestabilan pengosongan yang baik dan lebih tahan terhadap penurunan performa seiring waktu.

Berbeda dengan kedua baterai tersebut, baterai *Lead Acid* menunjukkan nilai arus yang paling rendah sejak awal pengujian. Arus dimulai dari 0,46 A pada menit ke-5 dan terus menurun secara bertahap hingga mencapai angka 0,25 A pada menit ke-45, lalu stabil hingga akhir pengujian. Nilai arus yang rendah ini mencerminkan bahwa baterai *Lead Acid* memiliki efisiensi pengosongan yang paling rendah di antara ketiga jenis baterai yang diuji. Penurunan yang konsisten dan pencapaian arus minimum dalam waktu yang relatif cepat menunjukkan bahwa baterai ini kurang mampu mempertahankan performa arus selama proses *discharging*

berlangsung. Berikut grafik perbandingan proses pengosongan (*discharging*) dengan parameter arus dari ketiga baterai ditunjukkan pada gambar 1.



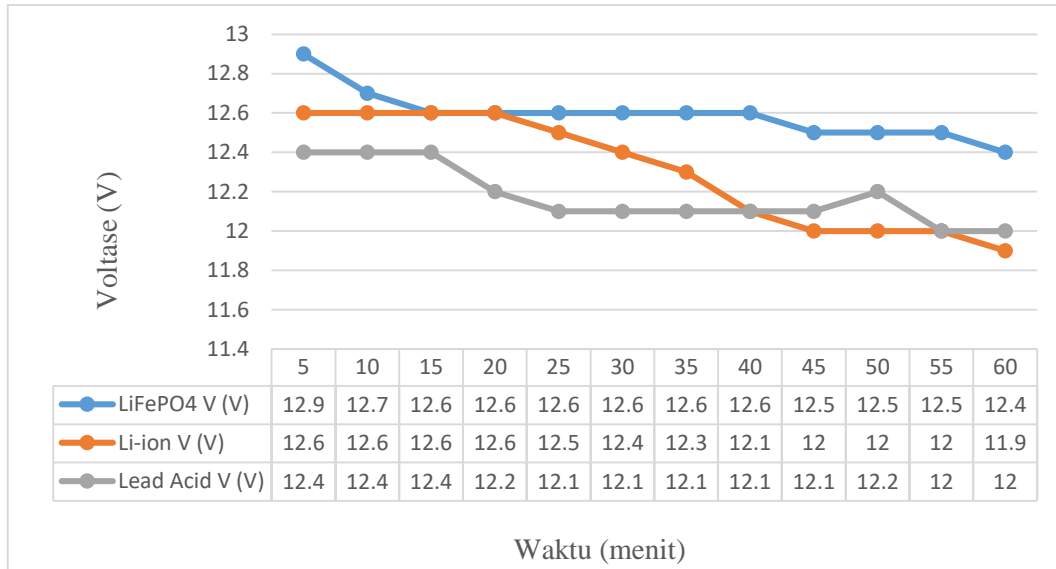
Gambar 1. Grafik pengosongan parameter arus terhadap waktu

Berdasarkan grafik perubahan voltase (V) terhadap waktu (menit) selama proses pengosongan (*discharging*) pada tiga jenis baterai, yaitu LiFePO4, *Lithium-Ion* (Li-ion), dan *Lead Acid*. Berdasarkan grafik, baterai LiFePO4 menunjukkan nilai voltase awal tertinggi, yaitu 12,9 V pada menit ke-5. Meskipun terjadi penurunan secara bertahap, voltase LiFePO4 tetap stabil di angka 12,6 V dari menit ke-15 hingga menit ke-40, kemudian turun sedikit menjadi 12,4 V pada menit ke-60. Pola penurunan voltase yang lambat dan stabil ini menandakan bahwa baterai LiFePO4 memiliki ketahanan tegangan yang sangat baik saat mengalami proses *discharging*, menjadikannya pilihan ideal untuk sistem kelistrikan kendaraan yang memerlukan voltase konstan.

Berbeda dengan itu, baterai Li-ion memiliki tegangan awal sebesar 12,6 V yang bertahan hingga menit ke-20, namun setelah itu voltasenya mulai menurun lebih cepat dibanding LiFePO4. Voltase Li-ion turun menjadi 12,4 V pada menit ke-25, 12,3 V pada menit ke-35, dan terus menurun hingga mencapai 11,9 V pada menit ke-60. Penurunan yang lebih tajam ini menunjukkan bahwa baterai Li-ion cenderung mengalami penurunan voltase lebih cepat, yang dapat memengaruhi kestabilan pasokan daya pada aplikasi kendaraan dalam jangka waktu pengosongan yang lebih lama.

Sementara itu, baterai *Lead Acid* memulai proses pengosongan dengan tegangan awal 12,4 V dan mempertahankannya hingga menit ke-15. Namun, voltase mulai menurun menjadi 12,2 V pada menit ke-20, dan terus turun hingga menyentuh 12 V pada menit ke-45 dan

kembali ke angka tersebut pada menit ke-60 setelah sempat naik ke 12,2 V di menit ke-50. Voltase yang relatif rendah dan penurunan yang terjadi lebih cepat dibanding LiFePO₄ menunjukkan bahwa baterai *Lead Acid* memiliki stabilitas tegangan yang paling rendah selama proses *discharging*.



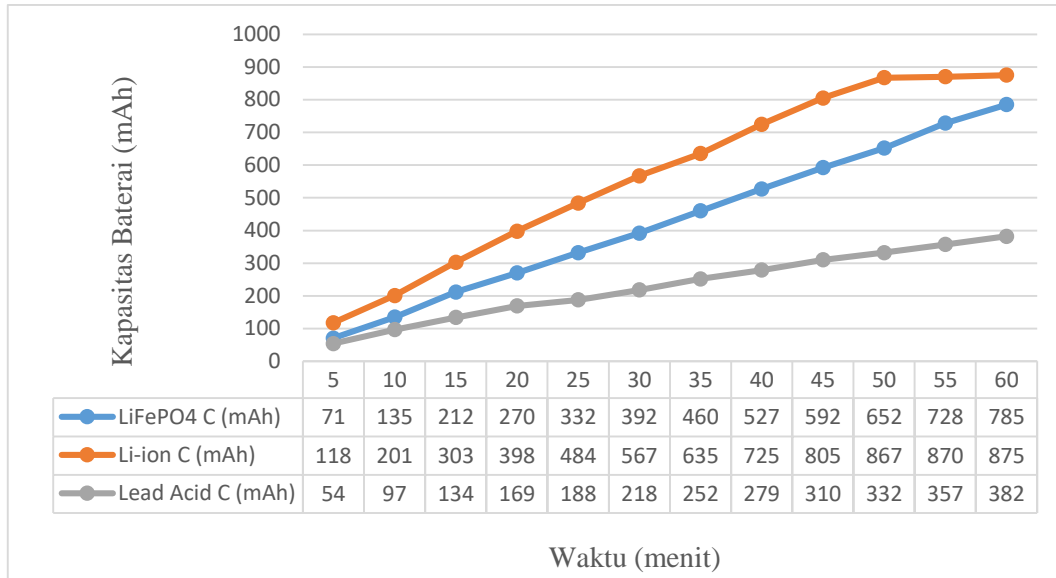
Gambar 2. Grafik pengosongan parameter tegangan terhadap waktu

Grafik di atas menggambarkan perubahan kapasitas baterai (mAh) terhadap waktu (menit) selama proses pengosongan (*discharging*) pada tiga jenis baterai, yaitu LiFePO₄, *Lithium-Ion* (Li-ion), dan *Lead Acid*. Berdasarkan grafik, terlihat bahwa baterai Li-ion memiliki kapasitas pengosongan tertinggi dibanding dua jenis baterai lainnya. Pada menit ke-5, kapasitas awal Li-ion sudah mencapai 118 mAh dan terus meningkat secara signifikan hingga mencapai 875 mAh pada menit ke-60. Kenaikan kapasitas yang cepat dan konsisten ini menunjukkan bahwa baterai Li-ion mampu menyuplai arus dalam jumlah besar selama proses pengosongan, mencerminkan kapasitas penyimpanan energi yang tinggi.

Sementara itu, baterai LiFePO₄ menunjukkan performa yang cukup baik, dengan kapasitas awal 71 mAh pada menit ke-5 dan meningkat stabil hingga mencapai 785 mAh pada menit ke-60. Meskipun kapasitas akhir LiFePO₄ sedikit lebih rendah dibanding Li-ion, grafik menunjukkan bahwa kenaikannya lebih linear dan stabil, yang menandakan efisiensi pengosongan yang baik serta kestabilan dalam melepaskan energi selama penggunaan. Hal ini memperkuat keunggulan LiFePO₄ dalam hal kestabilan dan keamanan saat digunakan dalam durasi panjang.

Di sisi lain, baterai *Lead Acid* menunjukkan kapasitas pengosongan terendah di antara ketiganya. Kapasitas awal hanya sebesar 54 mAh pada menit ke-5 dan meningkat secara perlahan hingga mencapai 382 mAh pada menit ke-60. Kenaikan kapasitas yang lambat ini

menunjukkan bahwa baterai *Lead Acid* memiliki keterbatasan dalam menyuplai energi secara berkelanjutan, serta efisiensi yang lebih rendah dibandingkan baterai Li-ion dan LiFePO4. Hal ini menunjukkan bahwa *Lead Acid* kurang cocok untuk aplikasi yang membutuhkan suplai daya yang stabil dan kapasitas besar selama pengoperasian.



Gambar 3. Grafik pengosongan parameter kapasitas terhadap waktu

Pada proses pengosongan baterai, masing-masing jenis baterai menunjukkan karakteristik performa yang berbeda. Baterai LiFePO4 menampilkan kinerja paling stabil dengan arus rata-rata sebesar 2,13 A dan tegangan rata-rata sekitar 12 V selama 60 menit pengujian. Tegangan mengalami penurunan secara bertahap namun tetap stabil hingga akhir pengujian, menandakan bahwa baterai ini mampu menjaga kestabilan daya secara konsisten. Kapasitas yang tercapai sebesar 2151 mAh, dengan total energi yang dilepaskan mencapai 25,65 Wh, menjadikan LiFePO4 sebagai baterai dengan performa pengosongan terbaik di antara ketiga jenis baterai yang diuji. Berbeda halnya dengan baterai Li-Ion, yang hanya mampu bertahan selama 15 menit dalam pengujian pengosongan akibat penurunan tegangan yang cukup cepat. Arus rata-rata tercatat sebesar 2,04 A dan tegangan rata-rata 10,98 V, dengan kapasitas pengosongan sebesar 1200 mAh dan energi sebesar 22,37 Wh. Hasil ini menunjukkan bahwa baterai Li-Ion memiliki ketahanan dan kestabilan yang lebih rendah, sehingga kurang cocok untuk penggunaan jangka panjang atau beban kontinu pada kendaraan roda dua listrik. Sementara itu, baterai *Lead Acid* menunjukkan performa yang cukup baik meskipun tidak sebaik LiFePO4. Dengan arus rata-rata 2,08 A dan tegangan rata-rata 11,18 V, baterai ini mampu melepaskan kapasitas sebesar 2000 mAh dengan energi total 23,24 Wh selama 60 menit pengujian. Tegangan mengalami penurunan secara bertahap namun tetap dalam batas yang bisa diterima. Dibandingkan dengan Li-Ion, baterai *Lead Acid* memiliki stabilitas yang

lebih baik dan dapat menjadi alternatif yang ekonomis, meskipun efisiensi dan kapasitasnya masih kalah dibandingkan LiFePO₄. Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa LiFePO₄ unggul dalam aspek kestabilan tegangan, arus, kapasitas pengosongan, dan energi yang dihasilkan, menjadikannya pilihan terbaik untuk diaplikasikan pada kendaraan roda dua listrik. Baterai *Lead Acid* berada di posisi tengah dengan performa yang cukup baik namun masih terbatas, sedangkan baterai Li-Ion menunjukkan kelemahan dalam daya tahan dan kestabilan saat proses pengosongan berlangsung.

Kapasitas (Pengisian)

Proses pengisian (charge) ketiga baterai sudah dilakukan dan grafik terhadap Parameter pengisian baterai sama seperti pada proses pengosongan yaitu arus, tegangan dan kapasitas saat pengisian.

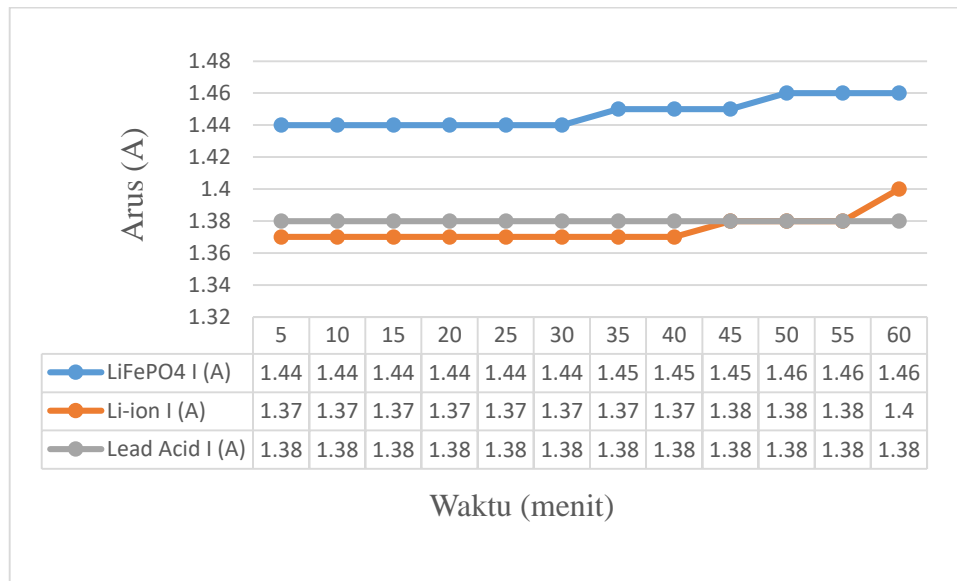
Grafik tegangan terhadap waktu menunjukkan perubahan nilai tegangan (Volt) pada tiga jenis baterai LiFePO₄, Li-Ion, dan *Lead Acid* selama proses pengisian daya selama 60 menit. Tegangan merupakan indikator penting dalam proses pengisian karena mencerminkan kemampuan baterai dalam menyerap dan menyimpan energi secara efisien.

Pada baterai LiFePO₄, grafik menunjukkan kenaikan tegangan yang stabil dari awal hingga akhir proses pengisian. Tegangan awal berada pada angka 12,5 V dan secara bertahap meningkat menjadi 12,7 V pada menit ke-60. Kenaikan yang konsisten ini menandakan bahwa baterai LiFePO₄ memiliki karakteristik pengisian yang efisien dan stabil, serta mampu menerima energi secara bertahap tanpa mengalami lonjakan atau penurunan tegangan yang signifikan. Pola ini juga menunjukkan bahwa LiFePO₄ cocok digunakan dalam sistem kelistrikan kendaraan yang membutuhkan tegangan konstan dan aman.

Sementara itu, baterai Li-Ion menunjukkan pola kenaikan tegangan yang lebih lambat. Tegangan awal tercatat sebesar 12,1 V, kemudian meningkat secara perlahan dan mencapai 12,3 V pada akhir pengisian. Meskipun peningkatannya tidak setinggi LiFePO₄, baterai Li-Ion tetap menunjukkan kestabilan yang baik dan konsisten selama proses pengisian. Tegangan yang relatif stabil ini menunjukkan bahwa baterai Li-Ion memiliki efisiensi pengisian yang cukup baik, walaupun sedikit lebih rendah dalam hal kemampuan menyerap energi per satuan waktu dibandingkan LiFePO₄.

Berbeda dengan keduanya, baterai *Lead Acid* menunjukkan grafik tegangan yang hampir datar selama proses pengisian. Tegangan awal berada di angka 12,0 V dan hanya sedikit meningkat hingga 12,1 V pada menit ke-60. Tegangan yang stagnan ini menunjukkan bahwa baterai *Lead Acid* memiliki keterbatasan dalam menyerap energi secara cepat dan efisien. Pola ini juga mengindikasikan bahwa proses pengisian pada *Lead Acid* berlangsung lebih lambat

dan membutuhkan waktu yang lebih lama untuk mencapai kapasitas maksimum, yang kurang ideal untuk aplikasi kendaraan modern yang menuntut efisiensi dan kecepatan pengisian tinggi.

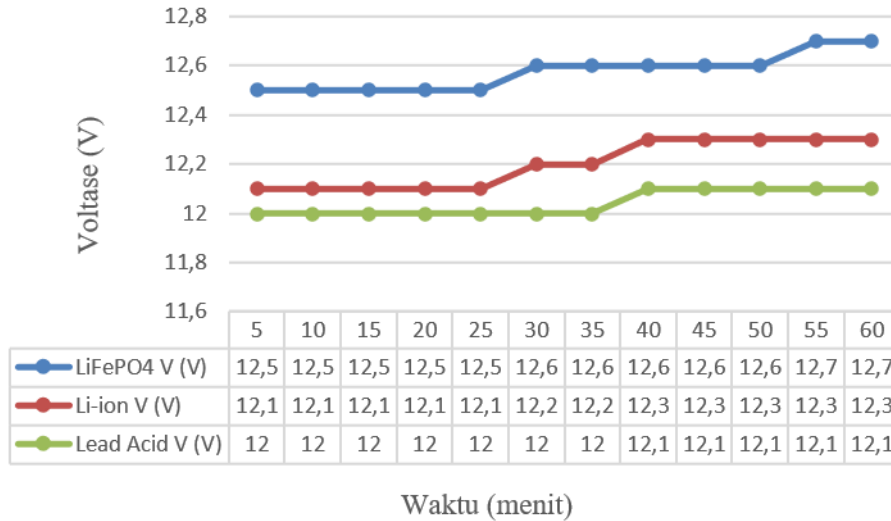


Gambar 4. Grafik pengisian parameter arus waktu

Grafik kapasitas terhadap waktu menggambarkan kemampuan masing-masing baterai LiFePO₄, Li-Ion, dan *Lead Acid* dalam menyimpan energi selama proses pengisian daya berlangsung selama 60 menit. Kapasitas diukur dalam satuan miliampere-jam (mAh), yang menunjukkan total muatan listrik yang berhasil diserap oleh baterai dalam kurun waktu tertentu.

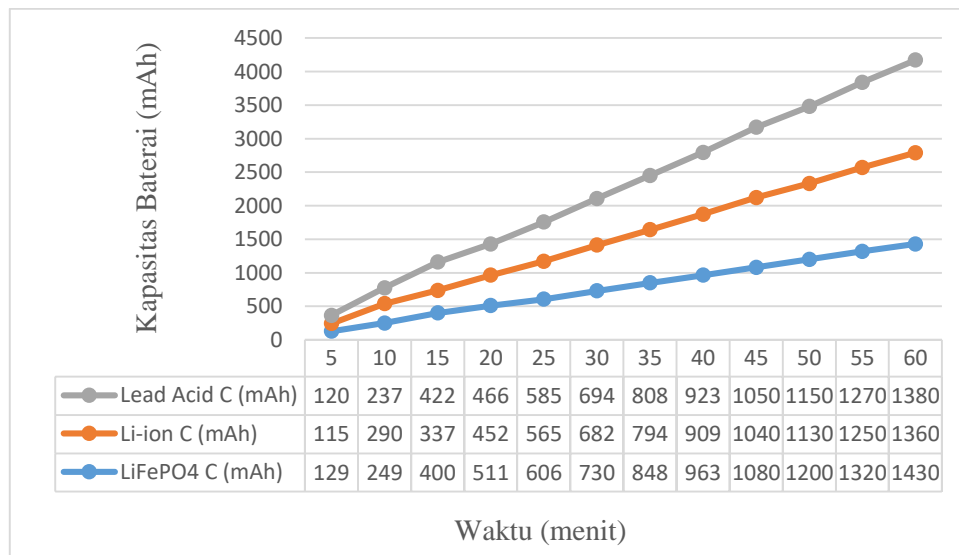
Baterai LiFePO₄ menunjukkan performa paling unggul dengan peningkatan kapasitas yang signifikan dan konsisten dari awal hingga akhir pengisian. Pada menit ke-5, kapasitas tercatat sebesar 129 mAh dan terus meningkat secara linier hingga mencapai 1430 mAh pada menit ke-60. Kenaikan yang stabil ini menunjukkan bahwa baterai LiFePO₄ memiliki efisiensi penyerapan energi yang tinggi, serta sangat responsif terhadap waktu pengisian. Hal ini membuktikan bahwa LiFePO₄ cocok digunakan untuk sistem yang membutuhkan kapasitas penyimpanan besar dalam waktu pengisian yang relatif singkat.

Baterai Li-Ion juga menunjukkan performa pengisian yang baik, meskipun sedikit di bawah LiFePO₄. Kapasitas awal sebesar 115 mAh terus meningkat hingga mencapai 1360 mAh pada akhir proses. Peningkatan kapasitas pada baterai Li-Ion juga terjadi secara bertahap dan terkontrol, mencerminkan kemampuan baterai ini dalam menyimpan energi dengan efisien. Dengan kapasitas akhir yang hanya sedikit lebih rendah dibanding LiFePO₄, baterai Li-Ion tetap menjadi pilihan yang efisien untuk kendaraan listrik, terutama dalam hal kinerja jangka menengah.



Gambar 4. Grafik pengisian parameter tegangan terhadap waktu

Sementara itu, baterai *Lead Acid* mencapai kapasitas akhir sebesar 1380 mAh, yang secara angka memang mendekati dua baterai lainnya. Namun, grafik peningkatannya cenderung lebih datar dan tidak menunjukkan respons linier yang konsisten seperti pada baterai LiFePO₄ maupun Li-Ion. Peningkatan kapasitas berlangsung lebih lambat, menunjukkan bahwa proses pengisian pada *Lead Acid* kurang efisien dalam memanfaatkan waktu pengisian secara optimal. Meskipun kapasitas akhirnya cukup besar, efisiensi proses pengisiannya lebih rendah dan kurang cocok untuk aplikasi yang memerlukan pengisian cepat dan daya tanggap tinggi.



Gambar 5. Grafik pengisian parameter kapasitas terhadap waktu

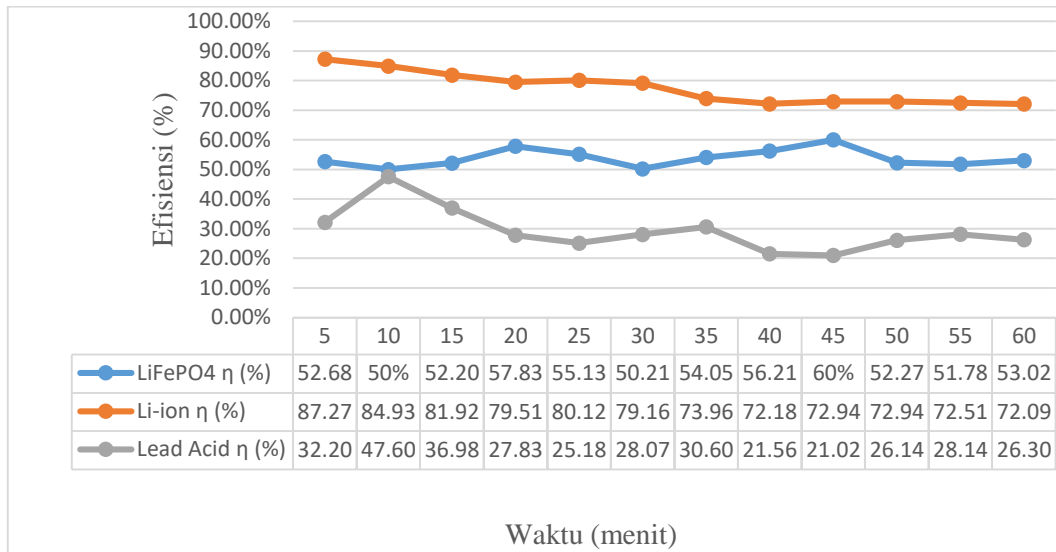
Proses pengisian ketiga jenis baterai, yaitu LiFePO₄, Li-Ion, dan *Lead Acid*, menunjukkan karakteristik yang berbeda-beda dalam hal kestabilan arus, tegangan, dan kapasitas yang terisi. Baterai LiFePO₄ menunjukkan performa pengisian yang paling stabil dan

efisien. Arus pengisian dijaga konstan pada 1,5 A, dengan tegangan meningkat perlahan dari 3,2 V hingga 3,6 V per sel, atau sekitar 14,4 V total untuk konfigurasi 4 sel. Dalam waktu 60 menit pengisian, baterai ini mampu mengisi hingga 1500 mAh. Tegangan yang stabil dan arus yang konsisten selama pengisian menandakan bahwa LiFePO₄ mampu menjaga efisiensi dan keamanan sel selama proses berlangsung. Keunggulan ini sejalan dengan karakter baterai LiFePO₄ yang memang memiliki kestabilan termal dan kimia yang tinggi serta umur siklus yang panjang, menjadikannya sangat cocok digunakan untuk sepeda motor listrik. Sementara itu, baterai Li-Ion menunjukkan performa pengisian yang cukup baik, namun cenderung lebih sensitif terhadap perubahan tegangan. Selama proses pengisian, arus dipertahankan pada 1,4 A, dengan tegangan yang meningkat dari 3,6 V hingga 4,1 V per sel, atau sekitar 14,8 V total untuk konfigurasi 12 sel. Kapasitas yang terisi tercatat sebesar 1404 mAh setelah 60 menit pengisian. Meskipun efisiensinya cukup tinggi, Li-Ion memiliki keterbatasan dalam hal kestabilan tegangan saat mendekati batas maksimal, sehingga membutuhkan sistem proteksi tambahan untuk mencegah overvoltage yang dapat merusak sel. Selain itu, baterai Li-Ion lebih sensitif terhadap suhu tinggi dibandingkan LiFePO₄, yang membuatnya kurang ideal untuk penggunaan jangka panjang tanpa sistem pendingin atau kontrol suhu yang baik. Adapun baterai *Lead Acid* (aki basah) menunjukkan performa pengisian yang paling lambat dan kurang efisien. Arus pengisian dijaga pada 1,2 A, dengan tegangan meningkat secara bertahap dari 2,0 V hingga 2,8 V per sel, atau sekitar 14,4 V total untuk konfigurasi 6 sel. Dalam waktu 60 menit, kapasitas yang berhasil diisi hanya mencapai 1200 mAh, lebih rendah dibandingkan kedua jenis baterai lithium. Baterai ini menunjukkan kenaikan tegangan yang lebih lambat dan cenderung mendekati stabil setelah menit ke-40, menunjukkan respon yang kurang cepat dalam menyerap daya. Hal ini membuat baterai *Lead Acid* kurang cocok untuk pengisian cepat dan penggunaan intensif, meskipun masih dapat dijadikan pilihan ekonomis dalam aplikasi yang tidak memerlukan performa tinggi. Secara keseluruhan, proses pengisian menunjukkan bahwa baterai LiFePO₄ memiliki performa terbaik dari sisi kestabilan tegangan dan arus, serta kapasitas yang dapat diisi. Baterai Li-Ion berada di posisi tengah dengan efisiensi yang cukup baik namun memerlukan kontrol pengisian yang lebih ketat, sedangkan baterai *Lead Acid* menunjukkan performa terendah dalam proses pengisian, baik dari sisi efisiensi maupun kapasitas energi yang terserap.

Efisiensi

Setelah menganalisa proses pengosongan dan pengisian ketiga baterai, dilakukan penganalisaan efisiensi baterai berdasarkan daya yang dikeluarkan dibanding dengan daya masuk. Terlihat pada gambar di bawah efisiensi tertinggi adalah dari baterai LiFePO₄ yang

mencapai 53,02 %. untuk Li-Ion dan aki basah memiliki efisiensi terbesar sebesar 72,09% dan 26,30%. Ini menunjukkan bahwa performa baterai lithium lebih baik daripada aki basah maupun aki kering jika ditinjau dari aktivitas pengosongan, pengisian dan efisiensi daya.



Gambar 6. Grafik efisiensi ketiga baterai

Grafik efisiensi terhadap waktu menunjukkan perbandingan performa tiga jenis baterai—LiFePO₄, Li-Ion, dan Lead Acid—dalam menyerap dan melepaskan energi selama proses pengisian dan pengosongan. Grafik ini menggambarkan perubahan nilai efisiensi setiap 5 menit selama pengujian 60 menit, dan memberikan gambaran visual mengenai seberapa efektif masing-masing baterai dalam memanfaatkan daya yang diberikan.

Pada grafik, baterai Li-Ion tampil sebagai baterai dengan efisiensi tertinggi secara konsisten, terutama pada menit-menit awal pengujian. Efisiensi tertinggi tercatat pada menit ke-5 dengan nilai sekitar 87%, yang kemudian mengalami penurunan bertahap hingga mencapai sekitar 72% pada menit ke-60. Meskipun menurun, tren penurunan berlangsung secara perlahan dan stabil, yang menunjukkan bahwa baterai Li-Ion mampu mempertahankan efisiensinya dalam jangka waktu cukup lama. Hal ini menunjukkan bahwa dalam kondisi pengisian berkelanjutan, baterai Li-Ion tetap memberikan kinerja optimal dari sisi rasio energi masuk dan keluar.

Sebaliknya, baterai Lead Acid menunjukkan grafik efisiensi yang paling rendah dan tidak stabil. Nilai efisiensi pada awal pengujian hanya sekitar 32%, kemudian terus menurun hingga mencapai titik terendah sekitar 21% pada menit ke-45. Meskipun ada sedikit kenaikan pada menit ke-60, efisiensi Lead Acid tetap berada di bawah 30%. Pola ini menunjukkan bahwa baterai Lead Acid memiliki konversi energi yang kurang efisien, dan cenderung mengalami

penurunan kinerja seiring waktu. Fluktuasi yang tajam juga mencerminkan ketidakseimbangan dalam proses penyerapan dan pelepasan daya.

Sementara itu, baterai LiFePO₄ menunjukkan grafik efisiensi yang cenderung lebih stabil dibandingkan kedua baterai lainnya. Nilai efisiensi berkisar antara 52% hingga 60%, dengan sedikit fluktuasi namun tidak menunjukkan penurunan tajam. Puncak efisiensi terjadi pada menit ke-45 dengan nilai 60%, lalu sedikit menurun di akhir pengujian. Pola ini mencerminkan karakteristik LiFePO₄ yang tidak hanya efisien, tetapi juga stabil dan tahan terhadap perubahan beban pengisian, menjadikannya cocok untuk aplikasi kendaraan listrik yang membutuhkan performa konsisten.

Berdasarkan grafik tersebut, dapat disimpulkan bahwa Li-Ion unggul dalam efisiensi tertinggi, LiFePO₄ unggul dalam kestabilan efisiensi, dan Lead Acid berada di posisi terbawah dari sisi performa efisiensi energi. Hasil grafik ini mendukung data numerik dalam tabel, sekaligus memperkuat kesimpulan bahwa baterai lithium, khususnya LiFePO₄ dan Li-Ion, lebih sesuai digunakan pada sepeda motor listrik yang mengutamakan efisiensi dan kestabilan daya selama pengisian.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pengujian terhadap tiga jenis baterai Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄), Lithium-Ion (Li-Ion), dan Lead Acid maka dapat disimpulkan hal-hal sebagai berikut:

- Efisiensi energi baterei

Baterai LiFePO₄ menunjukkan efisiensi tertinggi secara keseluruhan, dengan stabilitas tegangan dan arus yang baik selama proses pengisian dan pengosongan. Nilai efisiensinya berkisar antara 50–60%, meskipun pada pengujian efisiensi terhadap waktu, baterai Li-Ion mencatat nilai efisiensi tertinggi hingga 87,27% pada menit ke-5. Namun, nilai tersebut menurun secara bertahap dan stabil di kisaran 72% hingga akhir waktu pengujian.

- Kapasitas penyimpanan energi

Hasil pengujian kapasitas menunjukkan bahwa baterai LiFePO₄ memiliki kapasitas terbesar dengan total 1430 mAh, diikuti oleh Li-Ion sebesar 1360 mAh, dan Lead Acid sebesar 1380 mAh. Meskipun baterai Lead Acid memiliki angka kapasitas

akhir yang tinggi, peningkatannya berlangsung lambat dan tidak stabil, berbeda dengan LiFePO₄ yang menunjukkan grafik peningkatan kapasitas yang linier dan stabil.

- Performa saat starter kendaraan

Hasil pengujian kapasitas menunjukkan bahwa baterai LiFePO₄ memiliki kapasitas terbesar dengan total 1430 mAh, diikuti oleh Li-Ion sebesar 1360 mAh, dan Lead Acid sebesar 1380 mAh. Meskipun baterai Lead Acid memiliki angka kapasitas akhir yang tinggi, peningkatannya berlangsung lambat dan tidak stabil, berbeda dengan LiFePO₄ yang menunjukkan grafik peningkatan kapasitas yang linier dan stabil.

- Keseluruhan performa

Secara umum, baterai LiFePO₄ unggul dalam kestabilan tegangan, efisiensi energi, kapasitas daya simpan, dan keamanan kerja, menjadikannya sebagai pilihan terbaik untuk aplikasi sepeda motor. Baterai Li-Ion tetap memberikan performa yang baik, namun lebih sensitif terhadap penurunan tegangan dan arus. Sedangkan baterai Lead Acid menunjukkan performa paling rendah dan kurang cocok untuk kebutuhan sepeda motor yang menuntut efisiensi dan ketahanan tinggi.

Saran

- Rekomendasi penggunaan

Disarankan menggunakan baterai LiFePO₄ untuk aplikasi sepeda motor listrik karena memiliki efisiensi, kestabilan, dan kapasitas terbaik dibandingkan dua jenis baterai lainnya.

- Pengujian Tambahan

Untuk penelitian lanjutan, disarankan melakukan pengujian siklus hidup baterai (cycle life) dan uji performa pada kondisi ekstrem (suhu tinggi, kelembapan tinggi, dan pembebanan berat) agar mendapatkan hasil yang lebih menyeluruh dan realistis terhadap kondisi penggunaan sehari-hari.

- Penerapan sistem pengisian cerdas

Penambahan Battery Management System (BMS) serta penggunaan charger pintar (smart charger) dapat meningkatkan keamanan dan efisiensi pengisian daya, khususnya pada baterai lithium yang lebih sensitif terhadap overcharge.

DAFTAR PUSTAKA

- Aisyah, Habibi, M. N., Prasetyo, M. I., Windarko, N. A., & Yanaratri, D. S. (2020). Estimasi state of charge (SOC) pada baterai lithium-ion menggunakan feed-forward backpropagation neural network dua tingkat. *Jurnal Teknologi Terpadu*, 2, 82–91.

- Dwipayana, A. D., Sasue, R. R. O., & Darmayant, N. L. (2025). View of analisis faktor pembebanan terhadap efisiensi dan termal pada baterai lithium ion 60 volt/23 Ah sepeda motor listrik yang dirancang bangun dengan daya 3000 watt.
- Ervinka, F., Hadila, S., Hidayah, I. F., Panji Kumara, S. P., Pranata, K. B., & Ghufron, M. (2021). Simulasi pengaruh durasi pengisian-pengosongan terhadap performa baterai dinamis asam timbal. *Wafi*, 6, 102–115. <https://doi.org/10.17509/wafi.v6i2.34907>
- Fadhilah, M. H., & Kurniawan, E. (2025). Perancangan dan implementasi MPPT charge controller pada panel surya menggunakan mikrokontroler untuk pengisian baterai sepeda listrik.
- Fadilla, D. A., Matthew, D., & Alfarizi, R. (2024). Rancang bangun dan pengujian sistem pengisian serta pengosongan baterai jenis Li-Ion dan Lead-Acid dengan sumber PLTS. *Jurnal Teknologi Rekayasa Instalasi Listrik (JTRIL)*, 1(2), 15–21.
- Hamid, R. M., Rizky, Amin, M., & Bagus, I. (2023). Rancang bangun charger baterai untuk kebutuhan UMKM. *Jurnal Teknologi Terpadu*, 4, 130–136. <https://doi.org/10.32487/jtt.v4i2.175>
- Hamida, H. N., & Munasir. (2023). Review: Studi kinerja dan modifikasi doping pada material LiFePO₄ sebagai katoda baterai Li-Ion. *Jurnal Inovasi Fisika Indonesia*, 12, 56–65. <https://doi.org/10.26740/ifi.v12n2.p56-65>
- Karimah, C. N., Zain, & N. A. L. (2023). Analisa batrai sebagai sumber kelistrikan kendaraan roda dua ditinjau dari kapasitas dan efisiensi. *Jurnal Teknik Terapan*, 2, 1–11. <https://doi.org/10.25047/jteta.v2i1.24>
- Mursid, S. P. (2023). Perancangan smart charger baterei asam timbal berbasis ATTiny85. *Jurnal Energi*, 12, 10–17. <https://doi.org/10.35313/energi.v12i1.5134>
- Perdana, F. (2025). Batrai lithium. Accessed February 1, 2025.
- Permatasari, E. P., Rindi, M. P., & Purwanto, A. (2017). Pembuatan katoda baterai lithium ion iron phosphate (LiFePO₄) dengan metode solid state reaction. *Equilibrium: Jurnal Chemical Engineering*, 1(1), Artikel 1. <https://doi.org/10.20961/equilibrium.v1i1.40373>
- Ramba, K. (2022). Desain dan simulasi pengisian baterai dengan solar cell dengan metode multi loop. *Jurnal Teknik Mesin Industri Elektro dan Informatika*, 1(2), 1–9. <https://doi.org/10.55606/jtmei.v1i2.472>
- Samsul, M. E., & Suprpto, T. (2023). Perbandingan baterai lithium ion dan baterai valve regulated lead acid 48 volt 20 ampere terhadap kelayakan pakai sepeda motor listrik konversi SMK Negeri 55 Jakarta. *Elektronika, Kendali, Telekomunikasi, Tenaga Listrik, dan Komputer*, 6.
- Satriady, A., Alamsyah, W., Hisaad, A., & Hidayat, S. (2016). Pengaruh luas elektroda terhadap karakteristik baterai LiFePO₄. *Jurnal Material dan Energi*, 6, 43–48.
- Setya, A. N., & Agung, A. I. (2017). Efisiensi energi listrik dalam upaya meningkatkan power quality dan penghematan energi listrik di gedung Universitas Ciputra (UC) Apartment Surabaya.
- Wijaya, N., Kumara, I. N. S., Partha, C. G. I., & Divayana, Y. (2021). Perkembangan baterai dan charger untuk mendukung pemasyarakatan sepeda listrik di Indonesia. *Jurnal Spektrum*, 8, 15–26. <https://doi.org/10.24843/SPEKTRUM.2021.v08.i01.p3>