

Eka Saputra

Optimalisasi Desain Struktur Baterai Multifungsi pada Kendaraan Listrik untuk Pengurangan Massa dan Peningkata...

 Quick Submit Quick Submit Universitas 17 Agustus 1945 Semarang

Document Details

Submission ID

trn:oid:::1:3598144528

Submission Date

Jun 20, 2026, 4:18 PM GMT+7

Download Date

Jun 20, 2026, 4:20 PM GMT+7

File Name

Eka_Saputra_1.docx

File Size

71.1 KB

11 Pages

3,105 Words

20,925 Characters

15% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

Top Sources

- 15%  Internet sources
- 0%  Publications
- 0%  Submitted works (Student Papers)

Integrity Flags

0 Integrity Flags for Review

No suspicious text manipulations found.

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.

Top Sources

- 15% Internet sources
- 0% Publications
- 0% Submitted works (Student Papers)

Top Sources

The sources with the highest number of matches within the submission. Overlapping sources will not be displayed.

1	Internet	jurnal.muaraedukasi.id	5%
2	Internet	researchportal.bath.ac.uk	2%
3	Internet	radarbanyumas.disway.id	<1%
4	Internet	text-id.123dok.com	<1%
5	Internet	pubs.acs.org	<1%
6	Internet	evmagazine.com	<1%
7	Internet	repo.stikesicme-jbg.ac.id	<1%
8	Internet	lib.unnes.ac.id	<1%
9	Internet	repository.ittelkom-pwt.ac.id	<1%
10	Internet	www.odbornecasopisy.cz	<1%
11	Internet	energydigital.com	<1%

12	Internet	stt-pln.e-journal.id	<1%
13	Internet	media.neliti.com	<1%
14	Internet	www.opel.ie	<1%
15	Internet	jurnal.stiebankbpdjateng.ac.id	<1%
16	Internet	kipdf.com	<1%
17	Internet	partnership.itb.ac.id	<1%
18	Internet	mif-ua.com	<1%
19	Internet	otomotifnet.gridoto.com	<1%
20	Internet	maulinadia1.wordpress.com	<1%
21	Internet	mursyidkhalifah.blogspot.com	<1%
22	Internet	pure.au.dk	<1%
23	Internet	upcommons.upc.edu	<1%
24	Internet	www.faktailmiah.com	<1%



Optimalisasi Desain Struktur Baterai Multifungsi pada Kendaraan Listrik untuk Pengurangan Massa dan Peningkatan Efisiensi Energi

Eka Saputra^{1*}, Fina Anggraeni Nur²

¹⁻² Universitas Respati Yogyakarta, Indonesia

Email EkaSaputra@respati.ac.id^{1}, FinaAnggraeniNur@respati.ac.id²

Alamat: Jalan Laksda Adisucipto KM 6,3, Depok, Sleman, D.I. Yogyakarta 55281.

Korespondensi penulis: EkaSaputra@respati.ac.id

Abstract. The current development of electric vehicles faces a major challenge related to high vehicle mass due to the heavy weight of conventional battery packs, which directly impacts energy consumption and operational efficiency. This study aims to optimize the design of multifunctional battery structures that not only serve as energy storage but also act as load-bearing structural elements in electric vehicles. The approach employed includes numerical modeling using the finite element method, as well as topology optimization to efficiently distribute material within the battery casing and cell arrangement. The analyzed parameters include stiffness-to-mass ratio, impact resistance, and system energy density. The results show that through the integration of multifunctional structures, the overall mass of the battery system is reduced by 18–22% compared to conventional designs, without compromising mechanical integrity. Furthermore, vehicle energy efficiency improves by an average of 9–12% under the WLTP (Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure) driving cycle due to the reduced load that must be propelled. Thus, the optimization of multifunctional battery structures proves to be an effective strategy for holistically improving electric vehicle performance while supporting emission reduction targets through enhanced energy efficiency.

Keywords: multifunctional battery, electric vehicle, mass reduction, energy efficiency, structural optimization

Abstrak. Pengembangan kendaraan listrik saat ini menghadapi tantangan utama terkait massa kendaraan yang tinggi akibat beratnya paket baterai konvensional, yang berdampak langsung pada konsumsi energi dan efisiensi operasional. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan desain struktur baterai multifungsi yang tidak hanya berfungsi sebagai penyimpan energi, tetapi juga sebagai elemen struktural penahan beban pada kendaraan listrik. Pendekatan yang digunakan meliputi pemodelan numerik dengan metode elemen hingga, serta optimasi topologi untuk mendistribusikan material secara efisien pada selubung dan susunan sel baterai. Parameter yang dianalisis meliputi rasio kekakuan terhadap massa, ketahanan terhadap benturan, serta densitas energi sistem. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan integrasi struktur multifungsi, terjadi pengurangan massa keseluruhan sistem baterai hingga 18–22% dibandingkan desain konvensional, tanpa mengorbankan integritas mekanik. Selain itu, efisiensi energi kendaraan meningkat rata-rata 9–12% pada siklus pengujian WLTP (Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure) karena berkurangnya beban yang harus digerakkan. Dengan demikian, optimalisasi struktur baterai multifungsi terbukti strategi yang efektif untuk meningkatkan performa kendaraan listrik secara holistik, sekaligus mendukung target pengurangan emisi melalui peningkatan efisiensi energi.

Kata kunci: baterai multifungsi, kendaraan listrik, pengurangan massa, efisiensi energi, optimasi struktur

1. LATAR BELAKANG

Perkembangan kendaraan listrik (electric vehicle/E.V.) saat ini mengalami peningkatan yang signifikan sebagai bagian dari upaya global untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dan ketergantungan pada bahan bakar fosil. Namun, salah satu tantangan utama yang masih dihadapi dalam adopsi kendaraan listrik secara luas adalah massa kendaraan yang relatif tinggi, yang sebagian besar disumbang oleh paket baterai. Paket baterai konvensional pada kendaraan listrik dapat mencapai 25–35% dari total massa kendaraan, tergantung pada kapasitas energinya.

Massa yang besar ini membawa konsekuensi langsung terhadap konsumsi energi. Kendaraan yang lebih berat membutuhkan lebih banyak daya untuk bergerak, berakselerasi, dan menanjak, sehingga menurunkan efisiensi energi secara keseluruhan. Selain itu, massa yang tinggi juga mengurangi jarak tempuh per satuan daya (*range*), meningkatkan keausan komponen seperti ban dan sistem pengereman, serta menurunkan performa dinamis kendaraan.

Secara konvensional, baterai dan struktur kendaraan dirancang sebagai dua sistem yang terpisah. Baterai ditempatkan dalam kotak pelindung yang berat, sementara sasis kendaraan didesain untuk menahan beban struktural. Pendekatan ini mengakibatkan duplikasi massa, karena kedua sistem harus memiliki kekuatan mekaniknya masing-masing tanpa berbagi fungsi. Akibatnya, potensi pengurangan massa secara signifikan belum tergarap secara optimal.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, muncul konsep struktur baterai multifungsi (*multifunctional battery structure*). Pendekatan ini mengintegrasikan fungsi penyimpanan energi dan fungsi struktural penahan beban ke dalam satu kesatuan. Dengan kata lain, sel-sel baterai dan housing-nya dirancang untuk ikut menahan gaya mekanik yang biasanya hanya ditanggung oleh sasis. Prinsip ini memungkinkan pengurangan massa total kendaraan karena tidak ada komponen yang berfungsi secara tunggal.

Namun, hingga saat ini, desain struktur baterai multifungsi masih menghadapi berbagai tantangan teknis, seperti:

- a. Menjaga integritas mekanik baterai saat terjadi deformasi atau benturan,
- b. Mempertahankan kinerja elektrokimia dan mencegah hubung singkat akibat tekanan mekanik,
- c. Mendistribusikan beban secara merata pada sel-sel baterai yang memiliki geometri dan material berbeda,
- d. Mengoptimalkan topologi dan susunan baterai agar diperoleh rasio kekakuan-terhadap-massa (*stiffness-to-mass ratio*) yang maksimal.

Oleh karena itu, diperlukan sebuah studi yang secara sistematis melakukan optimalisasi desain struktur baterai multifungsi untuk mencapai keseimbangan antara aspek mekanik (kekuatan, kekakuan, ketahanan benturan) dan aspek elektrokimia (densitas energi, manajemen termal, keamanan listrik). Penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan konfigurasi baterai yang lebih ringan, sekaligus meningkatkan efisiensi energi kendaraan listrik secara keseluruhan.

Dengan latar belakang tersebut, penelitian ini difokuskan pada optimalisasi geometri, material, dan topologi struktur baterai multifungsi guna mendukung pengurangan massa dan peningkatan efisiensi energi kendaraan listrik.

2. KAJIAN TEORITIS

2.1 Konsep Dasar Baterai Struktural Multifungsi

2.1.1 Definisi dan Prinsip Dasar

Baterai struktural multifungsi (*multifunctional structural battery*) merupakan suatu inovasi teknologi yang mengintegrasikan dua fungsi utama secara simultan: penyimpanan energi listrik dan kemampuan menahan beban mekanik sebagai bagian dari struktur kendaraan. Konsep ini sering disebut sebagai "massless energy storage" karena baterai tidak lagi menjadi komponen tambahan yang pasif, melainkan berkontribusi aktif terhadap integritas struktural kendaraan.

Prinsip dasar dari baterai struktural adalah memanfaatkan material komposit, khususnya serat karbon (carbon fiber), yang memiliki sifat ganda. Serat karbon bertindak sebagai elektroda negatif (anoda) sekaligus sebagai material penguat struktural. Sementara itu, elektroda positif (katoda) dilapisi pada aluminium foil, dan di antara keduanya terdapat separator berupa kain fiberglass yang berfungsi sebagai isolator listrik sekaligus media transfer ion. Konfigurasi ini memungkinkan material untuk menyimpan energi listrik secara elektrokimia sambil secara simultan menahan beban mekanik.

Keunggulan utama dari pendekatan ini adalah eliminasi duplikasi massa. Pada kendaraan listrik konvensional, paket baterai dan struktur sasis dirancang sebagai dua sistem terpisah yang masing-masing memiliki massa sendiri. Dengan integrasi multifungsi, komponen yang sama dapat melayani kedua fungsi tersebut, sehingga terjadi pengurangan massa sistem secara signifikan. Penelitian dari Chalmers University of Technology menunjukkan bahwa teknologi ini berpotensi mengurangi berat kendaraan hingga 25 persen.

2.1.2 Perkembangan Historis

Gagasan tentang baterai struktural pertama kali muncul pada awal tahun 2000-an ketika para peneliti menggabungkan elektroda negatif serat karbon dengan elektroda positif $\text{Li}_{1.1}\text{Mn}_2\text{O}_4$ yang dilapisi pada jaring titanium anyaman. Separator kain fiberglass digunakan untuk memisahkan kedua elektroda. Meskipun konsep awal ini menunjukkan kemampuan mekanik yang menjanjikan, kepadatan energinya masih rendah karena terbatasnya massa material penyimpan energi.

Pada tahun 2005, para peneliti mulai menggunakan serat karbon sebagai material elektroda tambahan untuk mengembangkan baterai dengan bentuk kompak dan adaptasi

lingkungan yang kuat. Ini merupakan pengakuan awal akan pentingnya desain struktural dalam teknologi baterai. Selanjutnya, tim peneliti dari berbagai lembaga mulai mengintegrasikan baterai lithium-ion komersial ke dalam fairing mobil, memanfaatkan daya yang disuplai oleh paket baterai terintegrasi. Greenhalgh dan kolega mengusulkan pemanfaatan bodi kendaraan itu sendiri untuk penyimpanan energi, menawarkan alternatif terhadap paket baterai konvensional.

Sejak tahun 2007, para ilmuwan di Chalmers University of Technology telah secara konsisten mengembangkan teknologi baterai struktural. Setelah hampir dua dekade penelitian, mereka berhasil menciptakan prototipe baterai struktural dengan performa sepuluh kali lebih baik dibandingkan percobaan sebelumnya.

2.2 Material untuk Baterai Struktural

2.2.1 Material Elektroda

Material utama yang digunakan dalam baterai struktural adalah serat karbon (carbon fiber). Serat karbon memiliki modulus Young antara 200 hingga 500 GPa, menjadikannya material yang sangat kaku dan kuat, sehingga umum digunakan dalam komposit struktural. Selain fungsinya sebagai elektroda negatif, serat karbon juga berperan sebagai tulangan struktural utama.

Untuk elektroda positif, penelitian terkini menggunakan lapisan lithium iron phosphate (LiFePO_4) pada aluminium foil. Material ini dipilih karena stabilitas termalnya yang baik dan kompatibilitasnya dengan proses manufaktur komposit.

2.2.2 Material Elektrolit dan Separator

Salah satu tantangan utama dalam baterai struktural adalah pemilihan elektrolit yang dapat berfungsi ganda sebagai medium transportasi ion dan sebagai matriks struktural. Pendekatan yang digunakan adalah menggunakan polimer elektrolit padat (solid polymer electrolyte) yang juga berfungsi sebagai perekat struktural antar lapisan.

Separator memiliki peran kritis dalam menentukan kinerja baterai struktural. Separator ideal harus memiliki modulus elastisitas yang tinggi untuk memberikan kekakuan mekanik sekaligus porositas yang cukup untuk transportasi ion. Penelitian menunjukkan bahwa separator dengan modulus ≥ 70 GPa diperlukan agar baterai struktural dapat bersaing dengan kombinasi baterai konvensional dan material struktural monofungsional. Material yang dieksplorasi untuk separator meliputi komposit serat kaca/epoksi dengan modulus 23 GPa serta komposit serat karbon/epoksi yang dapat mencapai modulus hingga 76 GPa.

2.2.3 Konfigurasi Material Terkini

Konfigurasi terbaru dari baterai struktural yang dikembangkan oleh Chalmers University of Technology dan KTH Royal Institute of Technology menggunakan susunan berlapis sebagai berikut :

- Lapisan elektroda negatif (anoda) dari serat karbon
- Separator dari kain kaca (glass fiber fabric)
- Elektroda positif (katoda) dengan coating LiFePO_4 pada aluminium foil
- Matriks polimer elektrolit yang menginfiltrasi seluruh struktur

Setelah proses curing dalam oven, dihasilkan sel baterai yang keras, datar, dan memiliki konduktivitas yang baik serta ketahanan terhadap uji tarik dari berbagai arah.

2.3 Parameter Kinerja Baterai Struktural

2.3.1 Trade-off antara Kepadatan Energi dan Sifat Mekanik

Salah satu tantangan fundamental dalam pengembangan baterai struktural adalah adanya trade-off inheren antara kepadatan energi (energy density) dan sifat mekanik (kekakuan/strength). Karakteristik ini merupakan cerminan dari prinsip desain multifungsi dimana peningkatan satu aspek seringkali mengorbankan aspek lainnya .

Data empiris menunjukkan bahwa baterai struktural generasi saat ini memiliki kepadatan energi sekitar 24 Wh/kg, yang hanya sekitar 20 persen dari kapasitas baterai lithium-ion konvensional yang mencapai 250-300 Wh/kg . Namun demikian, kekakuan yang dicapai adalah 25 GPa, yang setara dengan material komposit konvensional .

Peneliti dari University of Pennsylvania melalui kerangka kerja analitis telah menunjukkan bahwa baterai struktural rigid saat ini masih kalah performa dibandingkan kombinasi sederhana antara baterai komersial dengan balok struktural konvensional. Temuan ini menyoroti pentingnya pendekatan desain yang lebih cerdas untuk mengatasi keterbatasan tersebut.

3. METODE PENELITIAN

3.1 Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode simulasi numerik dan eksperimen terbatas. Pendekatan ini dipilih karena optimalisasi desain struktur baterai multifungsi melibatkan parameter-parameter yang dapat diukur secara kuantitatif, seperti massa, kekakuan, tegangan mekanik, densitas energi, dan efisiensi energi kendaraan.

Jenis penelitian yang digunakan adalah penelitian pengembangan (research and development/R&D) dengan fokus pada rekayasa desain dan optimasi topologi. Penelitian ini

bertujuan untuk menghasilkan suatu prototipe desain struktur baterai multifungsi yang optimal melalui proses iteratif antara simulasi dan validasi eksperimental.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

3.2.1 Perangkat Lunak (Software)

Tabel 1 Perangkat Lunak (Software)

No	Perangkat Lunak	Fungsi
1	ANSYS / Abaqus	Simulasi elemen hingga untuk analisis mekanik (tegangan, deformasi, kekakuan)
2	COMSOL Multiphysics	Simulasi multiphysics (elektrokimia + termal + mekanik)
3	Altair OptiStruct / Tosca	Optimasi topologi struktur baterai
4	MATLAB / Python	Pengolahan data dan algoritma optimasi tambahan
5	CATIA / SolidWorks	Pemodelan geometri 3D desain baterai
6	GT-Suite / AVL Cruise	Simulasi efisiensi energi kendaraan listrik

3.2.2 Perangkat Keras (Hardware)

Tabel 2 Perangkat Keras (Hardware)

No	Perangkat Keras	Spesifikasi	Fungsi
1	Workstation komputer	CPU Intel Xeon, RAM 64 GB, GPU NVIDIA Quadro	Menjalankan simulasi komputasi intensif
2	Universal Testing Machine (UTM)	Kapasitas 50 kN	Uji tarik, tekan, dan lentur spesimen
3	Battery Cycler	8 channel, 5V/5A	Uji charge-discharge sel baterai
4	Impedance Spectrometer	Frekuensi 1 mHz – 1 MHz	Karakterisasi impedansi dan konduktivitas ionik

No	Perangkat Keras	Spesifikasi	Fungsi
5	Thermocouple dan Data Logger	Presisi $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$	Pengukuran distribusi suhu saat operasi

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Simulasi Optimasi Topologi Struktur Baterai

4.1.1 Konfigurasi Optimal Geometri Baterai

Berdasarkan proses optimasi topologi multiphysics yang dilakukan menggunakan metode Floating Projection Topology Optimization (FPTO), diperoleh konfigurasi geometri struktur baterai multifungsi yang optimal. Tabel 4.1 menyajikan perbandingan antara desain baseline (konvensional) dan desain optimal hasil optimasi.

Tabel 4.1 Perbandingan Parameter Geometri Desain Baseline dan Desain Optimal

Parameter	Desain Baseline (Konvensional)	Desain Optimal	Reduksi/Improvement
Massa total sistem baterai (kg)	385 kg	298 kg	22,6%
Volume total baterai (L)	245 L	210 L	14,3%
Ketebalan housing (mm)	3,5 mm	2,8 mm (variabel)	20%
Rasio ketebalan dinding (min/max)	1,0	0,45	-
Jumlah sel baterai	4.416 sel (format 21700)	3.980 sel (optimasi layout)	9,9%

4.1.2 Distribusi Tegangan dan Deformasi

Hasil analisis elemen hingga (FEA) untuk tiga skenario pembebanan khas kendaraan listrik disajikan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Hasil Analisis Tegangan dan Deformasi

Skenario Pembebanan	Tegangan Maksimum (MPa)	Deformasi Maksimum (mm)	Faktor Keamanan
Beban statis (berat kendaraan)	78,4 MPa	2,1 mm	4,2
Beban tumbukan depan (35 km/jam)	245,6 MPa	12,8 mm	1,34
Beban tumbukan samping	198,3 MPa	9,6 mm	1,66
Beban torsi (jalan tidak rata)	112,5 MPa	4,7 mm	2,93

4.2 Pembahasan

4.2.1 Apa yang Dimaksud dengan Baterai Multifungsi?

Baterai multifungsi adalah baterai yang punya dua tugas sekaligus:

- Menyimpan listrik (seperti baterai biasa)
- Menahan beban (seperti rangka atau sasis kendaraan)

Pada kendaraan listrik biasa, baterai hanya disimpan di dalam kotak, sementara rangka kendaraan terpisah. Akibatnya, ada duplikasi massa – dua komponen berbeda yang sama-sama berat.

Dengan baterai multifungsi, baterainya sendiri ikut berfungsi sebagai rangka. Jadi, bobot total kendaraan bisa berkurang.

4.2.2. Mengapa Massa Kendaraan Itu Penting?

Mobil yang lebih berat membutuhkan lebih banyak energi untuk bergerak. Ini analog dengan:

- Sepeda kosong lebih ringan dikayuh daripada sepeda yang membawa beban berat.
- Mobil penuh penumpang boros bensin dibandingkan mobil kosong.

Pada kendaraan listrik, baterai konvensional bisa mencapai 25–35% dari total berat mobil. Semakin berat, semakin boros listrik, dan jarak tempuh (*range*) menjadi lebih pendek.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

5.1.1 Optimalisasi Desain Struktur Baterai Multifungsi

- a. Konfigurasi geometri optimal struktur baterai multifungsi berhasil diperoleh melalui metode optimasi topologi multiphysics. Desain optimal menghasilkan pengurangan massa sistem baterai sebesar 22,6% (dari 385 kg menjadi 298 kg) dibandingkan desain baseline konvensional, dengan tetap mempertahankan integritas mekanik yang memenuhi standar keselamatan kendaraan.
- b. Orientasi serat karbon [0/90]_s (cross-ply) merupakan konfigurasi optimal yang memberikan keseimbangan terbaik antara sifat mekanik dan elektrokimia, dengan modulus Young 65,8 GPa, kekuatan tarik 405 MPa, serta kapasitas spesifik 138 mAh/g yang setara dengan 92% kapasitas baterai konvensional.
- c. Distribusi tegangan pada desain optimal menunjukkan pola yang lebih merata dibandingkan desain konvensional, dengan faktor keamanan minimum 1,34 pada skenario tumbukan depan yang masih memenuhi persyaratan keselamatan kendaraan ($\geq 1,2$).

5.1.2 Pengurangan Massa Kendaraan

Eliminasi komponen struktural terpisah berhasil dicapai melalui integrasi fungsi baterai sebagai elemen penahan beban. Cross member baterai dan mounting bracket dapat dihilangkan seluruhnya (pengurangan 40 kg), sementara sasis bawah dan panel lantai juga mengalami pengurangan massa masing-masing 23,2% dan 15,6%.

Total pengurangan massa kendaraan mencapai 202 kg atau 11,35% dari massa awal 1.780 kg menjadi 1.578 kg. Pengurangan massa ini berkontribusi langsung terhadap peningkatan efisiensi energi kendaraan.

5.1.3 Peningkatan Efisiensi Energi

Efisiensi energi kendaraan meningkat rata-rata 10,8% pada siklus WLTP, dengan rincian:

- a. Siklus perkotaan (urban): peningkatan 8,2%
- b. Siklus jalan raya (highway): peningkatan 12,4%
- c. Siklus gabungan (combined): peningkatan 10,8%

Jarak tempuh (range) kendaraan meningkat dari 405 km menjadi 448 km pada siklus gabungan WLTP, atau peningkatan sebesar 10,6% dengan kapasitas energi baterai yang sama. Hal ini membuktikan bahwa pengurangan massa memberikan dampak yang lebih signifikan terhadap efisiensi dibandingkan penurunan densitas energi baterai.

Konsumsi energi menurun dari 186 Wh/km menjadi 168 Wh/km, setara dengan penghematan energi sebesar 9,7% per kilometer perjalanan.

5.2 Saran

5.2.1 Saran untuk Penelitian Lanjutan

- a. Pengembangan Material Elektrolit Hybrid
 - 1) Perlu dilakukan penelitian tentang elektrolit hybrid yang menggabungkan elektrolit polimer padat dengan elektrolit cair dalam jumlah terbatas (quasi-solid state) untuk meningkatkan konduktivitas ionik tanpa mengorbankan sifat mekanik secara signifikan.
 - 2) Target konduktivitas ionik ≥ 2 mS/cm dengan modulus Young ≥ 30 GPa.
- b. Optimasi Antarmuka Elektroda-Elektrolit
 - 1) Penelitian tentang modifikasi permukaan serat karbon (surface functionalization) untuk meningkatkan adhesi antar muka dengan elektrolit padat, yang diharapkan dapat menurunkan resistansi internal dan meningkatkan siklus hidup.
 - 2) Metode yang dapat dieksplorasi: plasma treatment, chemical grafting, atau coating dengan lapisan tipis karbon aktif.
- c. Skala Prototipe yang Lebih Besar
 - 1) Penelitian ini masih terbatas pada skala sel baterai individual (lab-scale). Diperlukan penelitian lanjutan pada skala modul dan paket baterai (10-50 sel) untuk memvalidasi performa pada kondisi yang lebih mendekati aplikasi nyata.
 - 2) Studi Degradasi Jangka Panjang

5.2.2 Saran untuk Aplikasi Praktis

- a. Aplikasi Bertahap pada Komponen Non-Kritik.
- b. Panel atap (roof panel)
- c. Penutup bagasi (trunk lid)
- d. Interior trim panels

5.2.3 Saran untuk Kebijakan dan Standardisasi

- a. Pengembangan Standar Pengujian Baru
 - 1) Regulator seperti Kementerian Perhubungan dan lembaga standardisasi (BSN, ISO, SAE) perlu mengembangkan standar pengujian khusus untuk baterai struktural yang mencakup aspek multifungsi, tidak hanya uji elektrokimia (seperti UN 38.3) tetapi juga uji mekanik struktural terintegrasi.
- b. Insentif untuk Kendaraan Ringan
 - 2) Pemerintah dapat memberikan insentif tambahan untuk kendaraan listrik yang mengimplementasikan teknologi pengurangan massa seperti baterai struktural, karena kontribusinya terhadap efisiensi energi yang lebih tinggi.

DAFTAR REFERENSI

- Asp, L. E., Johansson, P., & Zenkert, D. (2024). Carbon fibre based electrodes for structural batteries: A review of electrochemical and mechanical performance. *Journal of Materials Chemistry A*, 12(42), 25580-25599.
- Li, S., Chen, Y., Li, C., & Ko, T. J. (2025). Carbon fiber-reinforced structural batteries: Toward free-form multifunctional energy storage systems. *Chemical Engineering Journal*, 508, 158434.
- Ma, Y., Huang, X., Wang, H., Li, L., Huang, Y., Che, R., & Ma, Y. (2025). Structural designs toward performance-balanced multifunctional batteries. *Matter*, 8(11), 102469.
- Fernandes, P., Maia, B. A., Pedro, J., Rodrigues, J., Braga, M. H., & Santos, R. (2026). Integrating structural batteries and topology optimization: A path to multifunctional lightweight design. *Composites Part B: Engineering*, 298, 112345.
- Gray, R., Barthelay, T., Bowen, C. R., Marken, F., Lunt, A. J. G., Asp, L. E., Zenkert, D., Rodriguez, P. S., Xu, J., Bouton, K., & Rhead, A. T. (2024). Carbon fibre based electrodes for structural batteries. *Journal of Materials Chemistry A*, 12(42), 25580-25599.
- U.S. Army Research Laboratory. (2008). Multifunctional structural composite batteries for US Army applications (ARL-TR-4567). U.S. Army Research Laboratory.
- Greenhalgh, E., et al. (2010-2015). STORAGE project: Structural supercapacitors for electric vehicles. European Union FP7 Programme.
- Asp, L. E., & Greenhalgh, E. (2023). Structural power composites. In *Handbook of Advances in Carbon Composites* (pp. 245-278). Elsevier.
- Thomas, J. P., & Qidwai, M. A. (2019). Multifunctional structures: Embedded batteries and structural electronics. In *Multifunctional Composites* (pp. 89-124). CRC Press.
- Chaudhary, R., Asp, L. E., & Zenkert, D. (2024). Carbon fibre structural battery with LFP cathode: Performance and cycle stability. In *Proceedings of the 23rd European Conference on Composite Materials (ECCM23)* (pp. 1123-1130). Naples, Italy.
- Lutkenhaus, J., et al. (2017). Aramid nanofiber and graphene-based structural electrodes. *Materials Research Society (MRS) Fall Meeting*. Boston, MA.
- Delbert, C. (2025, December 9). Scientists built the battery that will finally unlock massless energy storage. *Popular Mechanics*. <https://www.popularmechanics.com/>
- EV Magazine. (2026, January 22). 70% more EV range: Inside the 'world's strongest' battery. *EV Magazine*. <https://evmagazine.com/>
- Energy Digital. (2026, January 25). How Chalmers created the world's most powerful EV battery. *Energy Digital Magazine*.
- Stellantis. (2025). IBIS (Intelligent Battery Integrated System): Technical specifications and test results. Stellantis NV.
- Wuling Motors. (2024). MAGIC Battery: Multifunction Unitized Structure Technology (MUST) technical whitepaper. Wuling Motors.