

Review: Studi Komparasi Material Komposit Berbasis Polimer untuk Aplikasi Penyimpanan Energi Berkelanjutan

M Hanif Giastin Ginting^{1*}, Gilang Saputra Pinuji¹, Avlia Asturiana¹, Lutfi Wahyudi¹, Novia Azzahra¹, Vera Pangni Fahriani¹

¹Program Studi Teknik Kimia, Universitas Singaperbangsa Karawang

*Corresponding author, email: 2310631230059@student.unsika.ac.id

Abstrak. Komposit berbasis polimer merupakan material potensial untuk penyimpanan energi berkelanjutan karena sifatnya yang ringan, fleksibel, dan dapat direkayasa. Penelitian ini bertujuan membandingkan kinerja komposit polimer berdasarkan klasifikasi material, mekanisme penyimpanan energi, dan sifat elektrokimia melalui studi literatur secara komparatif. Data dikumpulkan dari artikel ilmiah dalam 10 tahun hingga 12 tahun terakhir dan dianalisis berdasarkan parameter kerapatan energi, kerapatan daya, dan stabilitas siklus. Hasil menunjukkan bahwa komposit berbasis karbon unggul dalam kerapatan daya dan stabilitas siklus akibat konduktivitas tinggi dan luas permukaan besar, tetapi memiliki kerapatan energi relatif rendah. Sebaliknya, komposit berbasis oksida logam menawarkan kerapatan energi lebih tinggi melalui mekanisme redoks, tetapi mengalami keterbatasan pada stabilitas siklus. Komposit polimer konduktif dan hibrida menunjukkan performa yang lebih seimbang akibat kombinasi mekanisme EDLC dan pseudokapasitansi. Temuan ini menunjukkan bahwa pendekatan multi-mekanisme dan desain komposit hibrida menjadi strategi efektif untuk meningkatkan performa penyimpanan energi secara simultan, sehingga berpotensi mendukung pengembangan sistem energi berkelanjutan di masa depan.

Kata Kunci: *kerapatan daya; kerapatan energi; komposit polimer; material hibrida; penyimpanan energi; sifat elektrokimia*

Pendahuluan

Sistem penyimpanan energi berperan penting dalam menjaga kestabilan suplai akibat sifat sumber energi yang fluktuatif. Dalam hal ini, material penyimpanan energi menjadi faktor kunci dalam menentukan kinerja sistem secara keseluruhan. Komposit berbasis polimer menjadi salah satu kandidat yang menjanjikan karena memiliki keunggulan yang beragam seperti ringan, fleksibel, serta dapat direkayasa sifat konduktivitas dan strukturnya sesuai kebutuhan aplikasi (Ramesh et al., 2024). Berbagai penelitian telah mengkaji penggunaan komposit polimer dalam penyimpanan energi, terutama pada baterai dan superkapasitor. Pengembangan material umumnya difokuskan pada klasifikasi komposit seperti berbasis karbon, logam oksida, dan polimer konduktif, serta pada peningkatan mekanisme penyimpanan energi melalui optimalisasi transfer muatan dan interaksi ion dalam material (Ramesh et al., 2024). Selain itu, peningkatan sifat elektrokimia seperti kerapatan energi, kerapatan daya, dan stabilitas siklus dilakukan melalui penambahan filler seperti graphene, carbon nanotube, dan material nanostruktur lainnya (Mei et al., 2024). Studi oleh (You et al., 2023a) menunjukkan bahwa komposit polimer berbasis dielektrik mampu meningkatkan performa penyimpanan energi melalui peningkatan sifat listrik material. (Gopal et al., 2023) juga melaporkan bahwa integrasi graphene dan fullerene dalam matriks polimer dapat meningkatkan konduktivitas serta efisiensi transfer muatan. Sementara itu, (Adedjoja et al., 2023a) menegaskan bahwa material komposit berperan penting dalam meningkatkan kinerja superkapasitor melalui peningkatan luas permukaan aktif dan stabilitas siklus. Komposit polimer juga telah banyak diaplikasikan pada berbagai

sektor energi seperti kendaraan listrik, sistem penyimpanan energi terbarukan, dan perangkat elektronik portabel (Ramesh et al., 2024). Namun demikian, penelitian sebelumnya masih memiliki beberapa keterbatasan, seperti rendahnya kerapatan energi, stabilitas jangka panjang yang belum optimal, serta keterbatasan dalam membandingkan performa berbagai jenis komposit polimer dalam satu kajian yang terintegrasi (Mei et al., 2024). Selain itu, tantangan terkait kondisi operasional ekstrem dan skalabilitas produksi juga masih menjadi kendala dalam pengembangan material ini (Oladele et al., 2025). Hal ini menunjukkan bahwa diperlukan kajian komparatif yang lebih sistematis untuk mengidentifikasi material yang paling efektif dalam mendukung penyimpanan energi berkelanjutan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk melakukan studi komparasi material komposit berbasis polimer dalam penyimpanan energi berkelanjutan dengan menganalisis klasifikasi material, mekanisme penyimpanan energi, sifat elektrokimia, serta aplikasinya di sektor energi, sekaligus mengidentifikasi tantangan dan prospek pengembangannya di masa depan.

Metode

Penelitian ini merupakan studi komparatif berbasis kajian literatur terhadap material komposit berbasis polimer untuk aplikasi penyimpanan energi berkelanjutan. Literatur yang digunakan diperoleh dari artikel ilmiah bereputasi yang dipublikasikan dalam sepuluh sampai dua belas tahun terakhir dan diakses melalui basis data ilmiah seperti Scopus, ScienceDirect, dan Web of Science. Pemilihan rentang waktu tersebut bertujuan untuk memastikan relevansi perkembangan teknologi dan inovasi material terbaru.

Artikel yang dipilih memenuhi kriteria inklusi sebagai berikut: (1) membahas komposit berbasis polimer untuk aplikasi baterai, superkapasitor, kapasitor hibrida, atau kapasitor dielektrik; (2) menyajikan parameter kinerja elektrokimia yang terukur, seperti kerapatan energi, kerapatan daya, dan stabilitas siklus; serta (3) menjelaskan mekanisme penyimpanan energi yang terjadi pada sistem material tersebut.

Tahapan kajian dilakukan secara terstruktur melalui tiga langkah utama. Pertama, identifikasi dan klasifikasi komposit polimer berdasarkan jenis matriks (misalnya polimer konduktif) dan jenis filler (karbon, oksida logam, atau material dua dimensi seperti graphene dan MXene). Kedua, analisis mekanisme penyimpanan energi yang mendasari, meliputi mekanisme electric double layer capacitance (EDLC), pseudokapasitansi, interkalasi/deinterkalasi ion, serta sistem hibrida. Ketiga, dilakukan komparasi terhadap parameter performa utama untuk mengidentifikasi hubungan antara struktur material, mekanisme penyimpanan muatan, dan kinerja elektrokimia.

Data yang terkumpul dianalisis menggunakan pendekatan deskriptif-komparatif dan semi kuantitatif dengan menekankan keterkaitan antara struktur mikro, karakteristik antarmuka filler–matriks, jalur transport elektron dan ion, serta stabilitas struktural terhadap performa perangkat. Melalui pendekatan ini, diperoleh sintesis yang terintegrasi mengenai kecenderungan desain komposit polimer yang paling potensial untuk mendukung sistem penyimpanan energi berkelanjutan.

Hasil dan Pembahasan

Klasifikasi Komposit Polimer

Klasifikasi komposit berbasis polimer dalam sistem penyimpanan energi umumnya didasarkan pada jenis filler yang digunakan serta fungsi elektrokimianya. Berdasarkan kajian literatur, komposit polimer dapat dikelompokkan menjadi tiga kategori utama, yaitu komposit berbasis karbon, berbasis oksida logam, dan komposit polimer konduktif atau hibrida. Klasifikasi ini berkorelasi langsung dengan

mekanisme penyimpanan energi yang telah dibahas sebelumnya, khususnya mekanisme EDLC, pseudokapasitansi, dan interkalasi ion.

Komposit Berbasis Karbon

Komposit ini menggunakan filler karbon seperti graphene, carbon nanotubes (CNT), dan reduced graphene oxide (rGO) dalam matriks polimer. Material ini memiliki luas permukaan spesifik tinggi serta konduktivitas listrik yang sangat baik, sehingga mendukung mekanisme penyimpanan energi berbasis EDLC. Keberadaan jaringan perkolasi karbon memungkinkan transport elektron yang efisien dan mempercepat kinetika pengisian–pengosongan (Barzegar et al., 2021). Selain itu, struktur pori yang berkembang meningkatkan aksesibilitas ion terhadap permukaan aktif, yang berkontribusi terhadap peningkatan kerapatan daya. Namun demikian, keterbatasan utama komposit berbasis karbon adalah rendahnya kerapatan energi karena mekanisme penyimpanan muatan hanya bersifat elektrostatik. Oleh karena itu, modifikasi dengan material lain sering dilakukan untuk meningkatkan performa elektrokimia secara keseluruhan (Ramesh et al., 2024b).

Komposit Berbasis Oksida Logam

Komposit ini menggabungkan matriks polimer dengan oksida logam transisi seperti MnO_2 , Fe_2O_3 , NiO , atau TiO_2 . Berbeda dengan komposit karbon, material ini bekerja melalui mekanisme faradaik berupa reaksi redoks reversibel yang memungkinkan peningkatan kerapatan energi secara signifikan (Chen et al., 2023). Keunggulan utama komposit ini terletak pada kapasitas penyimpanan muatan yang tinggi tetapi sering kali diikuti oleh keterbatasan berupa stabilitas siklus akibat perubahan volume selama proses pengisian–pengosongan. Dalam konteks ini, matriks polimer berfungsi sebagai penyangga mekanik (*mechanical buffer*) yang mampu meredam tegangan struktural dan meningkatkan stabilitas material (Pham et al., 2021).

Komposit Polimer Konduktif dan Hibrida

Kategori ini mencakup komposit yang menggunakan polimer konduktif seperti polyaniline (PANI), polypyrrole (PPy), atau polythiophene yang dikombinasikan dengan filler karbon atau oksida logam. Komposit jenis ini umumnya bekerja melalui mekanisme pseudokapasitansi yang menggabungkan karakteristik EDLC dan reaksi faradaik, sehingga menghasilkan performa yang lebih seimbang antara kerapatan energi dan daya (Wei et al., 2025). Selain itu, komposit hibrida yang mengintegrasikan lebih dari satu jenis filler (misalnya graphene + oksida logam + polimer konduktif) menunjukkan sinergi multi-mekanisme yang mampu meningkatkan efisiensi penyimpanan energi secara signifikan. Hal ini sejalan dengan pembahasan sebelumnya bahwa pendekatan multi-mekanisme merupakan strategi paling efektif untuk mengatasi *trade-off* antara energi dan daya dalam sistem penyimpanan energi modern.

Mekanisme Penyimpanan Energi

Mekanisme penyimpanan energi pada komposit berbasis polimer seperti superkapasitor, baterai, maupun sistem hibrida sangat bergantung pada jenis material aktif dan struktur komposisinya (Ramesh et al., 2024b). Secara fundamental, mekanisme tersebut dapat diklasifikasikan ke dalam dua kategori utama, yaitu mekanisme non-faradaik yang berbasis pada pembentukan lapisan ganda listrik (*electric double layer capacitance*, EDLC) dan mekanisme faradaik yang melibatkan reaksi redoks reversibel. Dalam banyak sistem komposit modern, kedua mekanisme ini sering diintegrasikan secara sinergis untuk mengoptimalkan keseimbangan antara kerapatan energi (*energy density*) dan kerapatan daya (*power density*) (Patel et al., 2025).

Mekanisme Non-Faradaik: Electric Double Layer Capacitance (EDLC)

Pada komposit berbasis karbon, seperti graphene atau carbon nanotubes (CNT) yang terdispersi dalam matriks polimer, mekanisme dominan yang terjadi adalah EDLC. Energi disimpan melalui akumulasi muatan elektrostatik pada antarmuka elektroda–elektrolit tanpa melibatkan perubahan kimia atau transformasi struktur kristalin material aktif (Barzegar et al., 2021). Ketika tegangan diterapkan, ion dalam elektrolit akan teradsorpsi pada permukaan elektroda bermuatan berlawanan dan membentuk lapisan ganda listrik. Besarnya kapasitansi sangat dipengaruhi oleh luas permukaan spesifik, distribusi ukuran pori (mikropori dan mesopori), serta aksesibilitas ion terhadap permukaan aktif (Barzegar et al., 2021; Jäckel et al., 2017). Dalam komposit polimer, keberadaan filler karbon konduktif membentuk jaringan perkolasi (*percolation network*) yang menyediakan jalur konduksi elektron kontinu, sementara matriks polimer menjaga integritas struktural dan fleksibilitas mekanik (Barzegar et al., 2021). Keunggulan utama mekanisme EDLC adalah kerapatan daya tinggi, kinetika pengisian–pengosongan yang cepat, serta stabilitas siklus yang sangat baik karena tidak terjadi degradasi kimia signifikan, namun demikian kerapatan energi yang dihasilkan relatif lebih rendah dibandingkan sistem berbasis reaksi redoks (Ji et al., 2014).

Mekanisme Faradaik: Pseudokapasitansi dan Reaksi Redoks Permukaan

Berbeda dengan EDLC, mekanisme faradaik melibatkan transfer elektron yang disertai reaksi oksidasi–reduksi (redoks) reversibel. Pada komposit berbasis oksida logam (misalnya MnO_2 , Fe_2O_3 , TiO_2) maupun polimer konduktif seperti polyaniline (PANI) dan polypyrrole (PPy), penyimpanan energi terjadi melalui perubahan valensi ion logam atau proses doping–dedoping pada rantai polimer konduktif (Chen et al., 2023; Wei et al., 2025).

Dalam mekanisme pseudokapasitansi, reaksi redoks berlangsung cepat dan umumnya terbatas pada permukaan atau dekat permukaan material aktif. Karakteristik ini memungkinkan peningkatan kerapatan energi dibandingkan EDLC, tetapi tetap mempertahankan respons kinetika yang relatif cepat. Kinerja sistem sangat dipengaruhi oleh jumlah situs aktif redoks, resistansi transfer muatan (*charge transfer resistance*), serta kinetika difusi ion (Wei et al., 2025). Namun demikian, mekanisme ini memiliki tantangan dalam penggunaannya, terjadi ekspansi dan kontraksi volume selama siklus pengisian–pengosongan yang dapat menyebabkan degradasi struktural, sehingga dalam hal ini, matriks polimer berperan sebagai *mechanical buffering matrix* yang mampu meredam tegangan mekanik, meningkatkan adhesi antarmuka, dan mengurangi pulverisasi partikel aktif, sehingga memperbaiki stabilitas siklus jangka panjang (Pham et al., 2021).

Mekanisme Interkalasi dan Reaksi Konversi pada Sistem Baterai

Pada sistem baterai, khususnya lithium-ion dan sodium-ion, mekanisme utama penyimpanan energi adalah interkalasi dan deinterkalasi ion ke dalam struktur kristalin material aktif. Selama proses pengisian, ion Li^+ atau Na^+ berdifusi dari elektrolit dan masuk ke dalam kisi kristal elektroda, proses sebaliknya terjadi saat pengosongan (Santos et al., 2023). Jika dikaitkan dengan komposit berbasis polimer, integrasi filler konduktif seperti graphene atau CNT meningkatkan konduktivitas elektronik dan menurunkan resistansi internal. Matriks polimer juga berfungsi menjaga stabilitas struktural elektroda selama proses interkalasi berulang, terutama dalam mengakomodasi perubahan volume (Santos et al., 2023).

Selain interkalasi, beberapa material dalam aplikasi penyimpanan energi mengalami mekanisme reaksi konversi (*conversion reaction*) seperti material oksida logam, di mana struktur kristal berubah secara kimia selama proses elektrokimia. Mekanisme ini menawarkan kapasitas teoritis tinggi, tetapi sering kali disertai perubahan volume besar yang menyebabkan degradasi cepat. Integrasi dengan matriks polimer membantu mempertahankan integritas struktural dan memperpanjang umur siklus (Abrun, 2017).

Mekanisme pada Sistem Hibrida

Untuk mengatasi *trade-off* klasik antara kerapatan energi dan kerapatan daya, dikembangkan sistem hibrida yang mengombinasikan karakteristik superkapasitor dan baterai dalam satu perangkat. Dalam konfigurasi ini, satu elektroda dapat bekerja melalui mekanisme EDLC, sedangkan elektroda lainnya melalui mekanisme faradaik (Rudra et al., 2024).

Komposit polimer memiliki peran strategis dalam sistem hibrida karena kemampuannya untuk:

1. Mengintegrasikan berbagai material aktif dalam satu struktur terkontrol,
2. Menyediakan jalur konduksi elektron dan difusi ion secara simultan,
3. Meningkatkan fleksibilitas mekanik untuk aplikasi perangkat portabel dan wearable.

Dengan rekayasa struktur mikro, kontrol porositas, serta optimasi antarmuka filler–matriks, sistem hibrida berbasis komposit polimer berpotensi menghasilkan kinerja yang lebih seimbang antara energi tinggi, daya tinggi, dan stabilitas siklus yang baik (Sharma et al., 2025).

Tabel 1 Komparatif Mekanisme Penyimpanan Energi

Mekanisme	Material Komposit Umum	Kerapatan Energi	Kerapatan Daya	Stabilitas Siklus	Faktor Penentu Utama	Peran Matriks Polimer	Keterbatasan
EDLC	Polimer + graphene/CNT	Rendah–Sedang	Sangat tinggi	Sangat tinggi	Luas permukaan, porositas, percolation network	Menjaga integritas struktur & fleksibilitas	Energi tersimpan terbatas
Pseudokapasitansi	PANI/PPy + MnO ₂ /NiO	Sedang–Tinggi	Tinggi	Sedang	Situs redoks aktif, Rct rendah, difusi ion	Buffer ekspansi volume & stabilisasi antarmuka	Degradasi siklus jangka panjang
Interkalasi Ion	Polimer + oksida logam berlapis	Tinggi	Sedang	Bergantung desain	Koefisien difusi ion, stabilitas struktur kristal	Menahan perubahan volume & meningkatkan konduktivitas	Volume expansion & resistansi internal
Reaksi Konversi	Polimer + oksida logam transisi	Sangat tinggi (teoretis)	Sedang	Rendah–Sedang	Transformasi fasa & kinetika reaksi	Mencegah pulverisasi partikel	Degradasi struktur signifikan
Sistem Hibrida	Kombinasi karbon + oksida + polimer	Tinggi	Tinggi	Tinggi	Sinergi multi-mekanisme & desain mikrostruktur	Integrasi jalur elektron & ion simultan	Kompleksitas desain & fabrikasi

Berdasarkan tabel komparatif, terlihat bahwa setiap mekanisme penyimpanan energi menunjukkan karakteristik performa yang berbeda secara fundamental, sehingga menghasilkan *trade-off* yang tidak dapat dihindari antara kerapatan energi, kerapatan daya, dan stabilitas siklus. Mekanisme EDLC unggul dalam hal kerapatan daya dan umur siklus karena proses penyimpanan muatan bersifat non-faradaik dan tidak melibatkan perubahan struktur material. Namun, keterbatasan kapasitas penyimpanan muatan secara elektrostatik menyebabkan kerapatan energi yang dihasilkan relatif lebih rendah (Barzegar et al., 2021).

Sebaliknya, mekanisme faradaik seperti pseudokapasitansi dan interkalasi ion mampu memberikan kerapatan energi yang lebih tinggi melalui keterlibatan reaksi redoks atau difusi ion ke dalam struktur kristalin. Pseudokapasitansi menawarkan kompromi antara energi dan daya, dengan kinetika yang masih relatif cepat dibandingkan sistem baterai konvensional. Akan tetapi, stabilitas jangka panjangnya sangat bergantung pada kemampuan material dalam mengakomodasi perubahan volume selama siklus elektrokimia (Pham et al., 2021).

Pada mekanisme interkalasi dan reaksi konversi, kerapatan energi yang dicapai umumnya lebih tinggi karena penyimpanan muatan terjadi melalui transformasi kimia atau difusi ion dalam jumlah besar. Namun, proses ini sering disertai ekspansi volume signifikan yang berpotensi menyebabkan retakan mikro, degradasi struktur, dan peningkatan resistansi internal (Santos et al., 2023). Dalam konteks ini, matriks polimer memainkan peran krusial sebagai penyangga mekanik yang menjaga integritas struktural serta meningkatkan adhesi antarmuka antara fase aktif dan jaringan konduktif (Abrun, 2017).

Sementara itu, sistem hibrida menunjukkan potensi paling menjanjikan dalam mencapai keseimbangan performa yang lebih optimal. Dengan mengombinasikan mekanisme EDLC dan faradaik dalam satu konfigurasi, sistem ini mampu meningkatkan kerapatan energi tanpa mengorbankan kerapatan daya secara signifikan (Rudra et al., 2024). Efektivitas pendekatan ini sangat ditentukan oleh rekayasa struktur mikro, distribusi fase aktif yang homogen, serta optimasi jalur transport elektron dan ion (Sharma et al., 2025).

Sifat Elektrokimia Komposit Polimer

Kombinasi polimer dengan agen penguat telah menyebabkan perubahan paradigma di berbagai industri, menyediakan bahan dengan kinerja luar biasa yang dirancang khusus untuk aplikasi yang menuntut, salah satunya penyimpanan energi berkelanjutan. Bagian ini merangkum kemajuan terbaru dalam komposit polimer, menekankan peran penting mereka di dalam aplikasi penyimpanan energi.

Kerapatan Energi

Kerapatan energi merupakan ukuran jumlah energi yang disimpan per unit volume atau massa bahan (Ramesh et al., 2024b). Bahan komposit polimer memiliki potensi untuk mencapai kerapatan energi tinggi dalam perangkat penyimpanan energi karena sifat uniknya. Komposit polimer berbasis karbon, memiliki luas permukaan dan konduktivitas listrik yang tinggi sehingga dapat meningkatkan kapasitas penyimpanan energi (Ramesh et al., 2024b). Sebuah studi yang berfokus pada komposit polimer berbasis karbon dilakukan untuk mengevaluasi kinerjanya dalam aplikasi penyimpanan energi yang praktis. Komposit polimer dengan campuran karbon, yaitu Carbon nanotubes – manganese dioxide slash reduced graphene oxide – polyvinylidene fluoride (CNTs-MnO₂/rGO-PVDF) menampilkan kinerja kerapatan energi mencapai 49,1 Wh/kg (Bai et al., 2015). Komposit polimer berbasis oksida logam juga memiliki kerapatan energi tinggi karena kapasitas teoretis mereka yang tinggi untuk penyimpanan energi. Komposit *metal oxide* seperti karbon polianilin dan *iron oxide* (PAni/Fe₂O₃) menunjukkan kerapatan energi yang tinggi mencapai 14,4 Wh/kg (Gupta et al., 2020). Komposit polimer dengan campuran pengisi konduktif hibrida, yaitu Ti₃C₂/PANI-NTs-1 menampilkan kinerja kerapatan energi

mencapai 25,6 Wh/kg dengan perbandingan (Wu et al., 2020). Hal ini juga menunjukkan kerapatan energi yang tinggi karena konduktivitas listrik dan sifat transportasi ionnya yang tinggi.

Kerapatan Daya

Kerapatan energi merupakan ukuran seberapa cepat energi dapat disalurkan dari perangkat tersebut (Ramesh et al., 2024b). Kerapatan daya yang tinggi sangat penting untuk aplikasi yang memerlukan pengisian dan pengosongan cepat, seperti kendaraan listrik atau pemrosesan data berkecepatan tinggi. Bahan komposit polimer berpotensi mencapai kerapatan daya tinggi dalam perangkat penyimpanan energi karena sifat uniknya. Komposit polimer berbasis karbon, memiliki luas permukaan dan konduktivitas listrik yang tinggi sehingga dapat menyebabkan siklus pengisian dan pengosongan cepat (Ramesh et al., 2024b). Sebuah studi yang berfokus pada komposit polimer konduktif dilakukan untuk mengevaluasi kinerjanya dalam aplikasi penyimpanan energi yang praktis. Komposit polimer dengan campuran pengisi konduktif, yaitu Ti3C2/PANI-NTs-1 menampilkan kinerja kerapatan daya mencapai 1,61 kW/kg (Wu et al., 2020). Komposit polimer berbasis karbon juga memiliki kerapatan daya tinggi karena tingkat transfer muatan yang tinggi dan difusi ion yang cepat. Seperti CNTs-MnO₂/rGO-PVDF menunjukkan kerapatan energi yang tinggi karena konduktivitas listrik dan luas area yang tinggi. Bahan-bahan ini dapat mencapai kerapatan daya hingga 4,83 kW/kg (Bai et al., 2015). Komposit polimer *metal oxide*, yaitu karbon polianilin dan *iron oxide* (PAni/Fe2O3) menunjukkan kerapatan daya yang tinggi mencapai 0,058 kW/kg (Gupta et al., 2020).

Daya Tahan

Parameter ini menunjukkan kemampuan material untuk mempertahankan performa elektrokimia setelah melalui proses pengisian–pengosongan berulang dalam jumlah siklus tertentu. Komposit polimer berbasis oksida logam menunjukkan daya tahan tinggi karena stabilitasnya yang tinggi di lingkungan yang keras dan kemampuannya untuk mempertahankan kinerjanya seiring waktu (Ramesh et al., 2024b). Sebuah studi yang berfokus pada komposit polimer konduktif dilakukan dengan campuran pengisi konduktif, yaitu Ti3C2/PANI-NTs-1, juga menunjukkan daya tahan tinggi karena kemampuan mereka mempertahankan sifat mekanik dan listriknya seiring waktu, menampilkan kinerja mencapai 81,1% setelah 4000 siklus (Wu et al., 2020). Komposit polimer berbasis oksida logam juga menunjukkan daya tahan tinggi karena stabilitasnya yang tinggi di lingkungan yang keras dan kemampuannya untuk mempertahankan kinerjanya dari waktu ke waktu. Misalnya, PAni/Fe2O3 menunjukkan stabilitas siklus sebesar 82% dengan 10000 siklus *charging – discharging* (Gupta et al., 2020). Komposit polimer berbasis karbon CNTs-MnO₂/rGO-PVDF menunjukkan melalui stabilitas siklus yang relative tinggi, yaitu 83% dengan 1000 siklus (Bai et al., 2015). Keberadaan material karbon seperti reduced graphene oxide (rGO) atau carbon nanotubes berperan penting dalam meningkatkan stabilitas struktural serta konduktivitas listrik, sehingga dapat mengurangi degradasi selama siklus berlangsung.

Tabel 2 Variasi Material dan Sifat Elektrokimianya

Klasifikasi Material Komposit Polimer	Substansi	Kerapatan Energi (Wh/kg)	Kerapatan Daya (kW/kg)	Daya Tahan	Referensi
Berbasis Karbon	CNTs-MnO ₂ /rGO-PVDF	49,1	4,83	83% - 1000 siklus	(Bai et al., 2015)
Berbasis Oksida Logam	PAni/Fe2O3	14,4	0,058	82% - 10000 siklus	(Gupta et al., 2020)
Komposit Polimer Konduktif	Ti3C2/PANI-NTs-1	25,6	1,61	81,1% - 2000 siklus	(Wu et al., 2020)

Tabel ringkasan menunjukkan perbandingan kinerja elektrokimia dari tiga klasifikasi utama komposit polimer, yaitu komposit berbasis karbon, berbasis oksida logam, dan komposit polimer konduktif, berdasarkan parameter kerapatan energi, kerapatan daya, dan daya tahan. Secara umum, terlihat bahwa setiap klasifikasi memiliki keunggulan dan keterbatasan masing-masing yang berkaitan dengan struktur dan mekanisme penyimpanan energinya.

Komposit berbasis karbon, seperti CNTs-MnO₂/rGO-PVDF, menunjukkan kerapatan energi yang relatif tinggi yaitu sebesar 49,1 Wh/kg serta kerapatan daya mencapai 4,83 kW/kg. Nilai ini menunjukkan bahwa material berbasis karbon memiliki kemampuan yang baik dalam menyimpan sekaligus melepaskan energi dengan cepat. Hal ini disebabkan oleh konduktivitas listrik yang tinggi serta luas permukaan besar dari material karbon seperti carbon nanotubes dan graphene, yang mendukung transport elektron dan difusi ion secara efisien. Selain itu, stabilitas siklus sebesar 83% setelah 1000 siklus menunjukkan performa yang cukup baik, meskipun masih terjadi degradasi akibat interaksi antarfasa selama proses charge-discharge berulang.

Sementara itu, komposit berbasis oksida logam seperti PANI/Fe₂O₃ menunjukkan kerapatan energi yang lebih rendah, yaitu sebesar 14,4 Wh/kg, serta kerapatan daya yang relatif kecil sebesar 0,058 kW/kg. Meskipun demikian, material ini memiliki keunggulan dalam aspek daya tahan, dengan stabilitas mencapai 82% hingga 10000 siklus. Hal ini menunjukkan bahwa oksida logam berperan penting dalam meningkatkan stabilitas struktural dan ketahanan terhadap degradasi, meskipun keterbatasan konduktivitas listrik menjadi faktor pembatas dalam peningkatan kinerja daya dan energi.

Di sisi lain, komposit polimer konduktif seperti Ti₃C₂/PANI-NTs-1 menunjukkan performa yang cukup seimbang, dengan kerapatan energi sebesar 25,6 Wh/kg dan kerapatan daya sebesar 1,61 kW/kg. Nilai ini berada di antara komposit berbasis karbon dan oksida logam, yang menunjukkan adanya efek sinergis antara konduktivitas tinggi dari material anorganik (MXene) dan aktivitas pseudokapasitansi dari polimer konduktif. Dari segi daya tahan, komposit ini menunjukkan stabilitas sebesar 81,1% setelah 2000 siklus, yang mengindikasikan bahwa meskipun performanya cukup baik, degradasi struktur polimer masih menjadi tantangan utama.

Aplikasi di Sektor Energi

Pengembangan komposit berbasis polimer telah membuka peluang luas dalam berbagai aplikasi sektor energi, terutama yang berkaitan dengan sistem penyimpanan energi berkelanjutan. Aplikasi ini secara langsung berkaitan dengan karakteristik material yang telah dibahas sebelumnya, khususnya dalam hal mekanisme penyimpanan dan sifat elektrokimia.

Baterai (Lithium-ion dan Sodium-ion Batteries)

Komposit polimer banyak digunakan sebagai material elektroda dalam baterai karena kemampuannya meningkatkan konduktivitas listrik serta stabilitas struktural. Integrasi filler seperti graphene atau CNT dalam matriks polimer mampu menurunkan resistansi internal dan meningkatkan difusi ion selama proses interkalasi (Santos et al., 2023). Selain itu, penggunaan komposit berbasis oksida logam dalam baterai memungkinkan peningkatan kapasitas penyimpanan energi melalui mekanisme reaksi redoks dan konversi. Hal ini menjadikan komposit polimer sebagai kandidat material penting dalam pengembangan baterai generasi berikutnya untuk kendaraan listrik.

Superkapasitor

Dalam aplikasi superkapasitor, komposit polimer berperan sebagai material elektroda yang mendukung mekanisme EDLC dan pseudokapasitansi. Komposit berbasis karbon memberikan

kerapatan daya tinggi dan umur siklus panjang, sedangkan kombinasi dengan polimer konduktif atau oksida logam meningkatkan kerapatan energi (Adedoja et al., 2023b). Penggunaan komposit hibrida memungkinkan tercapainya performa yang lebih optimal dengan mengombinasikan kecepatan pengisian superkapasitor dan kapasitas penyimpanan baterai. Oleh karena itu, material ini sangat potensial untuk aplikasi perangkat elektronik portabel dan sistem energi berdaya tinggi.

Kapasitor Dielektrik dan Penyimpanan Energi Listrik

Komposit polimer berbasis dielektrik banyak digunakan dalam kapasitor karena memiliki kekuatan dielektrik tinggi dan fleksibilitas mekanik. Penambahan filler dua dimensi seperti graphene atau MXene terbukti mampu meningkatkan konstanta dielektrik serta efisiensi penyimpanan energi listrik (You et al., 2023b). Aplikasi ini sangat penting dalam sistem elektronik modern yang membutuhkan respons cepat dan stabilitas tinggi, seperti inverter dan sistem distribusi energi.

Energi Terbarukan (Solar dan Wind Energy Storage)

Dalam sistem energi terbarukan, komposit polimer digunakan sebagai media penyimpanan energi untuk mengatasi fluktuasi suplai energi dari sumber seperti matahari dan angin. Material ini memungkinkan penyimpanan energi yang efisien serta pelepasan energi secara stabil sesuai kebutuhan sistem (Ramesh et al., 2024b). Integrasi komposit polimer dengan sistem energi terbarukan menjadi kunci dalam pengembangan smart grid dan sistem energi berkelanjutan.

Kendaraan Listrik (Electric Vehicles)

Komposit polimer memainkan peran penting dalam pengembangan baterai dan superkapasitor untuk kendaraan listrik. Material ini tidak hanya meningkatkan performa elektrokimia, tetapi juga memberikan keuntungan tambahan berupa bobot ringan dan fleksibilitas desain (Tadesse et al., 2024). Dengan meningkatnya kebutuhan kendaraan ramah lingkungan, penggunaan komposit polimer diperkirakan akan terus berkembang sebagai material utama dalam teknologi penyimpanan energi kendaraan.

Tantangan dan Prospek

Meskipun material komposit berbasis polimer menunjukkan potensi yang besar dalam sistem penyimpanan energi, sejumlah kendala teknis yang fundamental masih harus diselesaikan sebelum teknologi ini dapat diterapkan secara luas di skala industri. Tantangan paling mendasar adalah rendahnya konduktivitas listrik pada sejumlah jenis komposit polimer, yang secara langsung membatasi laju perpindahan muatan dan kapasitas penyimpanan energi perangkat secara keseluruhan (Ramesh et al., 2024b). Kondisi ini mendorong berbagai kelompok peneliti untuk mengeksplorasi penambahan aditif yang memiliki konduktivitas tinggi, seperti carbon nanotube, graphene, dan nanopartikel logam ke dalam matriks polimer sebagai strategi yang terbukti efektif meningkatkan performa elektrokimia (Tadesse et al., 2024). Di sisi lain, stabilitas jangka panjang material di bawah kondisi elektrokimia yang keras juga menjadi isu krusial, di mana degradasi elektroda akibat siklus pengisian dan pengosongan yang berulang mengakibatkan penurunan kapasitas perangkat secara bertahap (Ramesh et al., 2024b).

Selain persoalan konduktivitas dan stabilitas, adhesi antarmuka yang buruk antara komponen konduktif dan matriks polimer turut menghambat efisiensi transfer muatan secara signifikan, sehingga modifikasi kimia permukaan menggunakan agen kopling atau polimer terfungsionalisasi menjadi salah satu solusi yang banyak dikaji (Awan et al., 2024). Persoalan skalabilitas proses sintesis dan fabrikasi juga menambah kompleksitas tantangan yang dihadapi, mengingat metode konvensional seperti sol-gel dan deposisi elektrokimia yang umumnya efektif pada skala laboratorium sulit diadaptasi untuk produksi massal karena keterbatasan efisiensi dan biaya yang tinggi (Ramesh et al., 2024b). Aspek

keberlanjutan lingkungan pun semakin mendapat perhatian serius, sebab polimer sintesis berbasis bahan bakar fosil menghasilkan produk samping yang sulit terurai, sehingga mendorong eksplorasi biopolimer dan serat alami sebagai alternatif yang lebih ramah lingkungan dalam sistem penyimpanan energi berskala besar (Kumar & Alam, 2024).

Terlepas dari berbagai tantangan yang ada, prospek pengembangan komposit polimer untuk aplikasi penyimpanan energi berkelanjutan tetap sangat menjanjikan. Integrasi material komposit polimer dengan sumber energi terbarukan, khususnya energi surya dan angin dipandang sebagai jalur strategis yang semakin vital dalam mendukung infrastruktur energi hijau global (Ramesh et al., 2024b). Pada sektor kendaraan listrik, inovasi dalam desain elektroda hierarkis yang menggabungkan polimer konduktif dengan material karbon multidimensi terbukti menghasilkan kerapatan energi dan daya yang kompetitif, sekaligus membuka ruang eksplorasi yang masih sangat luas bagi pengembangan material berbasis karbon-polimer (Tadesse et al., 2024). Selain itu, komposit berbasis MXene-polimer juga menunjukkan kemampuan penyimpanan muatan yang luar biasa berkat konduktivitas elektrik tinggi dari struktur MXene dua dimensi yang dikombinasikan dengan fleksibilitas mekanik matriks polimer (Awan et al., 2024).

Dari perspektif optimasi proses, pendekatan rekayasa struktur mikro melalui elektrospinning dan fabrikasi 3D printing untuk geometri elektroda yang teroptimasi membuka peluang besar dalam peningkatan performa penyimpanan energi secara holistik (Ramesh et al., 2024b). Kemajuan dalam metode polimerisasi in situ dan teknik dispersi ultrasonikasi pun memungkinkan distribusi komponen konduktif yang lebih homogen dalam matriks polimer, yang berdampak langsung pada peningkatan konsistensi performa perangkat pada skala produksi lebih besar (Kumar & Alam, 2024). Pada akhirnya, kolaborasi lintas disiplin antara ilmu material, dan rekayasa elektrokimia yang disertai komitmen terhadap prinsip kimia hijau dan sirkularitas material merupakan prasyarat mutlak untuk merealisasikan penuh potensi komposit polimer dalam mendukung sistem energi masa depan yang lebih efisien dan berkelanjutan (Ramesh et al., 2024b).

Kesimpulan

Berdasarkan analisis literatur, komposit berbasis polimer terbukti efektif dalam meningkatkan kinerja sistem penyimpanan energi melalui integrasi struktur material, mekanisme penyimpanan, dan sifat elektrokimia. Komposit berbasis karbon unggul dalam kerapatan daya dan stabilitas siklus, sedangkan komposit berbasis oksida logam memberikan kerapatan energi lebih tinggi melalui mekanisme redoks. Sementara itu, komposit polimer konduktif dan hibrida menunjukkan performa yang lebih seimbang melalui kombinasi mekanisme EDLC dan pseudokapasitansi serta peran matriks polimer sebagai *mechanical buffer*. Dengan demikian, tujuan penelitian telah tercapai dan menunjukkan bahwa pendekatan multi-mekanisme serta desain komposit hibrida merupakan strategi paling efektif. Namun, pengembangan lebih lanjut masih diperlukan untuk meningkatkan konduktivitas antarmuka, efisiensi produksi, dan keberlanjutan material.

Referensi

- Abrun, D. (2017). *Understanding Conversion-Type Electrodes for Lithium Rechargeable Batteries*. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.7b00487>
- Adedola, O. S., Sadiku, E. R., & Hamam, Y. (2023a). An Overview of the Emerging Technologies and Composite Materials for Supercapacitors in Energy Storage Applications. In *Polymers* (Vol. 15, Number 10). MDPI. <https://doi.org/10.3390/polym15102272>

- Adedoya, O. S., Sadiku, E. R., & Hamam, Y. (2023b). An Overview of the Emerging Technologies and Composite Materials for Supercapacitors in Energy Storage Applications. *Polymers*, 15(10), 1–32. <https://doi.org/10.3390/polym15102272>
- Awan, H. T. A., Abdah, M. A. A. M., Mehar, M., Walvekar, R., Chaudhary, V., Khalid, M., & Khosla, A. (2024). MXene-polymer hybrid composites for advanced energy storage: Insights into supercapacitors and batteries. *Journal of Energy Storage*, 95(June), 112449. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112449>
- Bai, Z., Li, H., Li, M., Li, C., Wang, X., Qu, C., & Yang, B. (2015). Flexible carbon nanotubes-MnO₂/reduced graphene oxide-polyvinylidene fluoride films for supercapacitor electrodes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(46), 16306–16315. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.09.065>
- Barzegar, F., Pavlenko, V., Zahid, M., Bello, A., Xia, X., Manyala, N., Ozoemena, K. I., & Abbas, Q. (2021). *Tuning the Nanoporous Structure of Carbons Derived from the Composite of Cross-Linked Polymers for Charge Storage Applications*. <https://doi.org/10.1021/acsaem.0c02908>
- Chen, X., Zhao, C., Yang, K., Sun, S., Bi, J., Zhu, N., Cai, Q., Wang, J., & Yan, W. (2023). *Conducting Polymers Meet Lithium – Sulfur Batteries: Progress , Challenges , and Perspectives*. 1–24. <https://doi.org/10.1002/eem2.12483>
- Gopal, J., Muthu, M., & Sivanesan, I. (2023). A Comprehensive Compilation of Graphene/Fullerene Polymer Nanocomposites for Electrochemical Energy Storage. In *Polymers* (Vol. 15, Number 3). MDPI. <https://doi.org/10.3390/polym15030701>
- Gupta, A., Sardana, S., Dalal, J., Lather, S., Maan, A. S., Tripathi, R., Punia, R., Singh, K., & Ohlan, A. (2020). Nanostructured Polyaniline/Graphene/Fe₂O₃Composites Hydrogel as a High-Performance Flexible Supercapacitor Electrode Material. *ACS Applied Energy Materials*, 3(7), 6434–6446. <https://doi.org/10.1021/acsaem.0c00684>
- Jäckel, N., Simon, P., Gogotsi, Y., Presser, V., Jäckel, N., Simon, P., Gogotsi, Y., Presser, V., & Pores, S. (2017). *Increase in Capacitance by Subnanometer Pores in Carbon To cite this version : HAL Id : hal-01528359*. 1(6), 1262–1265. <https://doi.org/10.1021/acsenerylett.6b00516>
- Ji, H., Zhao, X., Qiao, Z., Jung, J., Zhu, Y., Lu, Y., Zhang, L. L., Macdonald, A. H., & Ruoff, R. S. (2014). Capacitance of carbon-based electrical double-layer capacitors. *Nature Communications*, (Cmcm). <https://doi.org/10.1038/ncomms4317>
- Kumar, V., & Alam, M. N. (2024). Polymeric Materials in Energy Conversion and Storage. *Polymers*, 16(22), 4–7. <https://doi.org/10.3390/polym16223132>
- Mei, C., Jing, W., & Wei, S. (2024). *Polymers and Composites for Energy Storage Applications*. 1(4). <https://doi.org/10.70177/scientia.v1i4.1576>
- Oladele, I. O., Oki, V. O., Omotosho, T. F., Adebajo, M. B., Ayanleye, O. T., & Adekola, S. A. (2025). Sustainable polymer and polymer-based composite materials for extreme conditions and demanding applications – A review on pushing boundaries in materials science. In *Next Materials* (Vol. 8). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.nxmte.2025.100775>
- Patel, A., Kumar, S., & Singh, P. R. S. (2025). Review on recent advancements in the role of electrolytes and electrode materials on supercapacitor performances. In *Discover Nano* (Number 2024). Springer US. <https://doi.org/10.1186/s11671-024-04053-1>
- Pham, V., Huy, H., Kim, I. T., & Hur, J. (2021). *The Effects of the Binder and Buffering Matrix on InSb-Based Anodes for High-Performance Rechargeable Li-Ion Batteries*.

- Ramesh, M., Manickam, T. S., Arockiasamy, F. S., Ponnusamy, B., Sivakumar, R., Sivakumar, P., & Kandasamy, P. (2024a). Powering the Future: A Comprehensive Review of Polymer Composite Energy Storage Applications †. *Engineering Proceedings*, 61(1). <https://doi.org/10.3390/engproc2024061024>
- Ramesh, M., Manickam, T. S., Arockiasamy, F. S., Ponnusamy, B., Sivakumar, R., Sivakumar, P., & Kandasamy, P. (2024b). Powering the Future: A Comprehensive Review of Polymer Composite Energy Storage Applications †. *Engineering Proceedings*, 61(1), 1–7. <https://doi.org/10.3390/engproc2024061024>
- Rudra, S., Sarker, S., & Kim, D. M. (2024). *Supercapatteries as Hybrid Electrochemical Energy Storage Devices : Current Status and Future Prospects*.
- Santos, D. A., Rezaei, S., Zhang, D., Luo, Y., Lin, B., Balakrishna, A. R., Xu, B., & Banerjee, S. (2023). *Chemical Science Chemistry – mechanics – geometry coupling in positive electrode materials : a scale-bridging perspective for mitigating degradation in lithium- ion batteries through materials design*. 458–484. <https://doi.org/10.1039/d2sc04157j>
- Sharma, A., Sharma, S., Sharma, M., Sharma, V., & Sharma, S. (2025). *Polymeric Frontiers in Next-Generation Energy Storage : Bridging Molecular Design , Multifunctionality , and Device Applications Across Batteries , Supercapacitors , Solid-State Systems , and Beyond*.
- Tadesse, M. G., Ahmmed, A. S., & Lübben, J. F. (2024). Review on Conductive Polymer Composites for Supercapacitor Applications. *Journal of Composites Science*, 8(2). <https://doi.org/10.3390/jcs8020053>
- Wei, Y., Kumar, K. D., & Zhang, L. (2025). *Pseudocapacitive materials for energy storage : properties , mechanisms , and applications in supercapacitors and batteries*. (June), 1–16. <https://doi.org/10.3389/fchem.2025.1636683>
- Wu, W., Wang, C., Zhao, C., Wei, D., Zhu, J., & Xu, Y. (2020). Facile strategy of hollow polyaniline nanotubes supported on Ti3C2-MXene nanosheets for High-performance symmetric supercapacitors. *Journal of Colloid and Interface Science*, 580, 601–613. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.07.052>
- You, L., Liu, B., Hua, H., Jiang, H., Yin, C., & Wen, F. (2023a). Energy Storage Performance of Polymer-Based Dielectric Composites with Two-Dimensional Fillers. In *Nanomaterials* (Vol. 13, Number 21). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/nano13212842>
- You, L., Liu, B., Hua, H., Jiang, H., Yin, C., & Wen, F. (2023b). Energy Storage Performance of Polymer-Based Dielectric Composites with Two-Dimensional Fillers. *Nanomaterials*, 13(21). <https://doi.org/10.3390/nano13212842>