

Perbandingan Material Superkapasitor Berbasis Karbon dan Oksida Logam untuk Optimalisasi Penyimpanan Energi dalam Aplikasi Sistem Energi Terbarukan: *Systematic Literature Review*

Nurul Aziz Eka Putra¹, Syahrul Aldi Ferdiyanto¹, Fuat Qunefi¹, Jihan Adelyadi¹

¹Departemen Teknik Elektro; Universitas Negeri Semarang; Sekaran; Gunungpati 50229; Indonesia

Email : nurulaziz2004@students.unnes.ac.id (N.A.E.P), syahrulaldi@students.unnes.ac.id (S.A.F),
fuatqunefi@students.unnes.ac.id (F.Q), adelyadjihan@students.ac.id (J.A)

Abstrak : Kebutuhan akan solusi penyimpanan energi yang efisien dan berkelanjutan semakin meningkat seiring dengan perkembangan sistem energi terbarukan. Superkapasitor, yang dikenal karena kepadatan daya dan stabilitas siklusnya, menjadi komponen penting dalam teknologi ini. Kajian literatur ini bertujuan membandingkan material berbasis karbon dan oksida logam pada superkapasitor, dengan fokus pada optimalisasi performa penyimpanan energi. Melalui pendekatan sistematis, kajian ini menelaah karakteristik utama dari kedua jenis material, termasuk densitas energi, daya tahan siklus, kestabilan termal, dan potensi biaya. Hasil review menunjukkan bahwa material berbasis karbon cenderung memiliki keunggulan pada kepadatan daya dan siklus hidup, sementara oksida logam menawarkan kapasitas penyimpanan yang lebih tinggi tetapi rentan terhadap degradasi. Analisis ini memberikan wawasan mengenai kelebihan dan batasan tiap material, yang dapat menjadi panduan dalam pemilihan material superkapasitor untuk aplikasi pada energi terbarukan. Kajian ini diharapkan dapat mendukung pengembangan superkapasitor yang lebih efisien dan berkelanjutan.

Kata Kunci : Superkapasitor, material berbasis karbon, oksida logam, penyimpanan energi, energi terbarukan

Abstract : The demand for efficient and sustainable energy storage solutions continues to rise alongside the advancement of renewable energy systems. Supercapacitors, known for their power density and cycle stability, have become crucial components in this technology. This systematic literature review aims to compare carbon-based and metal oxide materials in supercapacitors, focusing on optimizing energy storage performance. Through a systematic approach, this review examines the primary characteristics of these materials, including energy density, cycle durability, thermal stability, and cost potential. The review results indicate that carbon-based materials tend to

Jurnal Energi Baru & Terbarukan, 2024, Vol. 5, No. 3, pp 60 – 74

Received : 29 Oktober 2024

Accepted : 29 Oktober 2024

Published : 30 Oktober 2024



Copyright: © 2022 by the authors. [Jurnal Energi Baru dan Terbarukan](#) (p-ISSN: [2809-5456](#) and e-ISSN: [2722-6719](#)) published by Master Program of Energy, School of Postgraduate Studies. This article is an open access article distributed under the terms and condition of the [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](#) (CC BY-SA 4.0).

excel in power density and cycle life, while metal oxides offer higher storage capacity but are more prone to degradation. This analysis provides insights into the advantages and limitations of each material, serving as a guide for selecting supercapacitor materials suitable for renewable energy applications. The findings are expected to support the development of more efficient and sustainable supercapacitors.

Keywords : Supercapacitors, carbon based materials, metal oxides, energy storage, renewable energy

1. Pendahuluan

Kebutuhan akan solusi penyimpanan energi yang efisien semakin meningkat seiring dengan meningkatnya penggunaan energi terbarukan di seluruh dunia. Sistem energi terbarukan, seperti tenaga surya dan angin, secara alami bersifat intermiten, sehingga menimbulkan tantangan dalam memastikan pasokan daya yang stabil dan andal[1][2]. Untuk menangani tantangan ini, teknologi penyimpanan energi menjadi elemen penting yang mendukung stabilitas jaringan listrik, dan superkapasitor telah diidentifikasi sebagai salah satu solusi yang sangat potensial[3][4]. Superkapasitor mampu menyediakan densitas daya tinggi dan memiliki keunggulan dalam kecepatan pengisian dan pengosongan, menjadikannya pilihan yang ideal dibandingkan dengan baterai konvensional untuk mendukung kebutuhan energi yang terus meningkat pada aplikasi energi terbarukan[5][6][7][8].

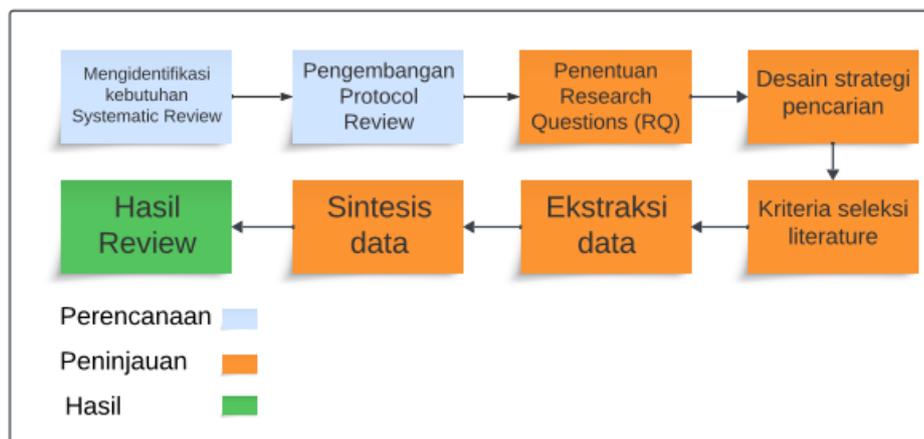
Material yang digunakan dalam superkapasitor memiliki pengaruh besar terhadap performa dan umur panjang perangkat, dengan dua kelas material yang dominan: material berbasis karbon dan oksida logam[9]. Material berbasis karbon, seperti karbon aktif dan graphene, dikenal dengan siklus hidup yang panjang, stabilitas termal, dan biaya yang relatif rendah[10][11][12]. Namun, material ini memiliki keterbatasan dalam hal densitas energi yang dapat disimpan[13][14]. Di sisi lain, oksida logam seperti MnO_2 dan RuO_2 menawarkan kapasitas penyimpanan energi yang lebih tinggi, tetapi cenderung lebih mahal dan rentan terhadap degradasi seiring waktu[15][16][17]. Studi literatur yang ada menunjukkan bahwa kedua material ini memiliki kelebihan dan kekurangan yang berbeda, tergantung pada aplikasi dan kebutuhan daya spesifik[18].

Melalui tinjauan kajian literatur ini bertujuan untuk mengevaluasi dan membandingkan secara komprehensif dua kelas material utama pada superkapasitor, yaitu material berbasis karbon dan oksida logam. Fokus kajian meliputi analisis mendalam terhadap karakteristik kunci yang mempengaruhi performa penyimpanan energi pada aplikasi energi terbarukan, seperti densitas energi, densitas daya, siklus hidup, stabilitas termal, serta aspek biaya[20][21]. Pendekatan sistematis ini mencakup identifikasi dan penilaian penelitian-penelitian sebelumnya yaitu Sarr et al. (2022) yang mengevaluasi ketahanan usia superkapasitor dalam kondisi energi yang berubah-ubah, khususnya pada energi angin dan pasang surut, serta memeriksa performa dari berbagai material elektroda termasuk karbon dan oksida logam di bawah variasi suhu. Kajian ini juga akan mengungkap keunggulan dan keterbatasan dari tiap material secara lebih detail tentang aplikasi optimal di mana masing-masing jenis material dapat digunakan secara efektif. Dari hasil tinjauan ini dapat berfungsi sebagai langkah teknis dalam pemilihan material superkapasitor yang optimal. Literatur yang diperoleh diharapkan dapat mendukung pengembangan solusi penyimpanan energi yang lebih

efisien, tahan lama, dan ekonomis, sejalan dengan tuntutan sistem energi terbarukan yang semakin kompleks dan membutuhkan dukungan teknologi penyimpanan yang andal[21].

Untuk mengidentifikasi keunggulan dan keterbatasan dari tiap material superkapasitor, penulis mengusulkan framework yang mengintegrasikan analisis kinerja material karbon dan oksida logam pada berbagai kondisi aplikasi sistem energi terbarukan. Framework ini berfokus pada optimalisasi penyimpanan energi dengan mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi kapasitas, stabilitas siklus, dan daya tahan material dalam penggunaan jangka panjang. Selain itu, framework ini memanfaatkan pendekatan komparatif berbasis parameter kritis, seperti kapasitas spesifik, konduktivitas, dan ketahanan termal, yang telah terbukti menentukan efisiensi penyimpanan energi.

Framework ini juga mengeksplorasi potensi model hibrid yang menggabungkan material karbon dan oksida logam untuk mengatasi keterbatasan material tunggal dan memaksimalkan performa superkapasitor. Dengan pendekatan ini, diharapkan framework ini mampu mengarahkan pada solusi optimal dalam penggunaan material superkapasitor yang lebih efisien dan andal untuk mendukung kebutuhan energi pada aplikasi sistem energi terbarukan, terutama dalam konteks keberlanjutan dan efisiensi energi.



Gambar 1. Framework Pelaksanaan SLR

Dari kajian ini disusun menjadi beberapa bagian yaitu : Bagian 2 menjelaskan metode yang digunakan dalam kajian. Bagian 3 membahas hasil komparasi dan evaluasi dari dua material superkapasitor yaitu karbon dan oksida logam. Bagian 4 menguraikan keterbatasan dari kajian , dan Bagian 5 memberikan kesimpulan.

Tabel 1. Research Questions

RQ#	Research Questions	Motivation
RQ1	Bagaimana pengaruh karakteristik material berbasis karbon dan oksida logam terhadap kapasitas penyimpanan energi superkapasitor ?	Memahami karakteristik material penting untuk menentukan kapasitas optimal dalam penyimpanan energi, sehingga mendukung efisiensi sistem energi terbarukan.
RQ2	Bagaimana perbedaan efisiensi antara superkapasitor berbasis karbon dan oksida logam dalam aplikasi sistem energi terbarukan ?	Mengetahui efisiensi dari masing-masing material dapat membantu memilih material yang tepat untuk meningkatkan kinerja dan stabilitas sistem energi.

RQ3	Apa dampak penggunaan material karbon dan oksida logam terhadap daya tahan dan siklus hidup superkapasitor dalam aplikasi energi terbarukan ?	Memahami daya tahan dan siklus hidup penting untuk merancang sistem penyimpanan energi yang lebih andal dan berumur panjang dalam aplikasi energi terbarukan.
-----	---	---

2. Metode

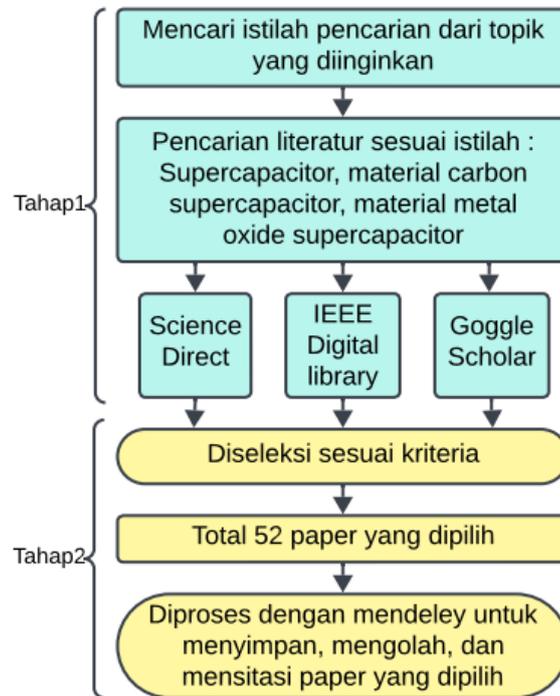
Perencanaan tinjauan literatur sistematis ini mengacu pada kerangka PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses)[22]. Tahap pertama dalam **perencanaan** adalah mengidentifikasi kebutuhan untuk melakukan Systematic Literature Review (SLR). Setelah itu, protokol tinjauan dikembangkan untuk mendefinisikan langkah-langkah terperinci selama proses review, termasuk perumusan pertanyaan penelitian atau Research Questions (RQ) yang menjadi dasar proses selanjutnya. Dengan pertanyaan penelitian yang sudah ditetapkan, tahap berikutnya adalah merancang strategi pencarian yang mencakup pemilihan kata kunci serta sumber literatur yang akan digunakan untuk mengidentifikasi studi yang relevan. Proses **peninjauan** dimulai dengan penerapan kriteria seleksi literatur, termasuk kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditentukan. Kemudian, data yang relevan dari literatur terpilih diekstraksi melalui formulir yang disusun khusus untuk mengumpulkan informasi sesuai pertanyaan penelitian. Data yang diekstraksi kemudian disintesis menggunakan metodologi yang sesuai berdasarkan jenis data dan pertanyaan penelitian. Tahap terakhir melibatkan pelaporan **hasil review**, yang menyajikan rangkuman temuan dan memberikan jawaban terhadap pertanyaan penelitian yang telah diajukan. Protokol tinjauan disusun dengan teliti melalui diskusi kelompok untuk memastikan ketelitian, mengurangi bias, serta memastikan hasil yang diperoleh dapat diandalkan dan direplikasi. Validitas protokol juga telah diuji untuk memastikan bahwa setiap langkah proses ini dilakukan secara konsisten dan transparan, sehingga hasil tinjauan dapat dipercaya dan bermanfaat bagi peneliti lainnya.

3. Pertanyaan Penelitian

Tujuan dari tinjauan sistematis ini adalah untuk merangkum dan menganalisis bukti empiris dari penelitian mengenai material superkapasitor berbasis karbon dan oksida logam dalam konteks penyimpanan energi di sistem energi terbarukan. Untuk mencapai tujuan tersebut, tiga pertanyaan penelitian (RQ) telah dirumuskan, sebagaimana disajikan dalam Tabel 1. Dari studi yang terpilih, kami mengidentifikasi pengaruh karakteristik material berbasis karbon dan oksida logam terhadap kapasitas penyimpanan energi pada superkapasitor (RQ1). Pertanyaan ini bertujuan untuk memahami sejauh mana perbedaan karakteristik material dapat memengaruhi kapasitas penyimpanan energi. Selanjutnya, kami menganalisis perbedaan efisiensi antara superkapasitor berbasis karbon dan oksida logam dalam aplikasi sistem energi terbarukan (RQ2). Fokus dari pertanyaan ini adalah untuk membandingkan efisiensi dari kedua material dalam konteks penggunaannya di sistem energi terbarukan. Selain itu, kami juga mengeksplorasi dampak penggunaan material karbon dan oksida logam terhadap daya tahan dan siklus hidup superkapasitor dalam aplikasi energi terbarukan (RQ3). Pertanyaan ini bertujuan untuk menentukan bagaimana sifat material memengaruhi umur pakai dan keandalan superkapasitor dalam berbagai kondisi aplikasi energi terbarukan.

4. Strategi Pencarian

Detail mengenai strategi dalam pencarian yang digunakan dalam kajian ini terdiri dari tahap 1 dan 2 dengan rincian penjelasan di bawah ini :



Gambar 2. Proses Pencarian dan Seleksi

4.1 Istilah Pencarian

Proses awal dalam merumuskan istilah pencarian dimulai dengan:

- Menentukan istilah utama yang terkait dengan pertanyaan penelitian.
- Mengidentifikasi ejaan alternatif serta sinonim dari istilah utama.
- Memilih kata kunci yang relevan dari artikel dan jurnal terkait.

Istilah pencarian yang digunakan meliputi: Supercapacitor, material carbon supercapacitor, dan material metal oxide supercapacitor.

4.2 Sumber Pustaka

Istilah pencarian ini diterapkan untuk menemukan makalah ilmiah pada beberapa basis data utama, yaitu:

- ScienceDirect
- IEEE Digital Library
- Google Scholar

Pencarian dilakukan pada judul, abstrak, dan kata kunci di basis data ini. Untuk Google Scholar, pencarian dibatasi pada judul agar hasilnya lebih relevan. Batas waktu pencarian ditetapkan dari tahun 2017 hingga 2024, untuk memastikan bahwa literatur yang diperoleh relevan dan terbaru.

4.3 Proses Pencarian

Proses SLR ini terdiri dari dua tahapan :

- Tahap 1 : Dilakukan pencarian literatur di ScienceDirect, IEEE Digital Library, dan Google Scholar menggunakan istilah yang telah ditentukan. Hasil pencarian yang relevan dikumpulkan sebagai calon literatur.

- b. Tahap 2 : Seleksi literatur sesuai kriteria ditetapkan. Dari literatur yang diperoleh, 52 makalah terpilih sesuai topik yang ditinjau.

Literatur yang telah terseleksi kemudian disimpan dan dikelola menggunakan perangkat lunak Mendeley untuk memudahkan penyimpanan, pengolahan, dan sitasi.

5. Pemilihan Studi

Pada tahap awal pencarian, teridentifikasi 628 studi prospektif yang terkait dengan perbandingan material superkapasitor berbasis karbon dan oksida logam untuk optimalisasi penyimpanan energi dalam sistem energi terbarukan. Namun, banyak dari makalah kandidat ini tidak memberikan informasi yang relevan untuk menjawab pertanyaan penelitian dalam tinjauan ini. Oleh karena itu, penyaringan lebih lanjut diperlukan untuk menentukan studi-studi yang sesuai dengan menggunakan kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditetapkan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Kriteria inklusi dan eksklusi yang digunakan untuk seleksi makalah telah disempurnakan dalam pemilihan awal dan dijelaskan sebagai berikut. Proses seleksi dilakukan dengan membaca judul, abstrak, atau teks lengkap makalah.

Kriteria Inklusi :

- 1) Studi empiris yang membahas material superkapasitor berbasis karbon dan oksida logam.
- 2) Studi yang mengevaluasi dua jenis material superkapasitor yaitu karbon dan oksida logam dalam konteks penyimpanan energi.
- 3) Studi yang membandingkan karakteristik material karbon dan oksida logam dalam aplikasi energi terbarukan.
- 4) Untuk publikasi duplikat, hanya publikasi yang paling lengkap dan terbaru yang akan disertakan.
- 5) Jika terdapat versi konferensi dan versi jurnal dari studi yang sama, hanya versi jurnal yang akan disertakan.

Kriteria Eksklusi :

- 1) Studi yang tidak mencakup analisis empiris atau hasil yang berfokus pada penggunaan material superkapasitor.
- 2) Studi yang menggunakan superkapasitor dalam konteks lain yang tidak relevan dengan penyimpanan energi terbarukan.
- 3) Studi berupa tinjauan literatur tanpa data empiris.

Penulis melakukan evaluasi independen terhadap kriteria inklusi dan eksklusi ini. Diskusi intensif dilakukan untuk mencapai kesepakatan bersama. Jika terdapat keraguan, studi tersebut diperiksa secara lengkap untuk menentukan inklusi atau eksklusi. Duplikasi studi oleh penulis yang sama dengan hasil identik juga dihapus. Setelah seleksi, terpilih 52 studi sesuai dengan kriteria yang ditetapkan.

6. Ekstraksi data dan sintesis data

Dalam setiap studi yang terpilih terkait perbandingan material superkapasitor berbasis karbon dan oksida logam untuk optimalisasi penyimpanan energi dalam aplikasi sistem energi terbarukan, dilakukan pengisian formulir untuk mengekstraksi informasi yang relevan. Formulir ekstraksi data ini dirancang untuk mengidentifikasi fokus utama penelitian dari setiap studi. Data yang diekstraksi

meliputi nama penulis, judul, informasi publikasi, serta variabel-variabel yang berhubungan dengan karakteristik dan efisiensi material superkapasitor berbasis karbon dan oksida logam.

Melalui analisis data yang dikumpulkan dari formulir ini, pertanyaan penelitian spesifik yang ingin dijawab dalam setiap studi dapat diidentifikasi. Formulir ekstraksi ini berfungsi sebagai alat utama untuk mengumpulkan informasi yang relevan dari setiap studi yang telah dipilih dengan cermat. Setelah proses ekstraksi selesai, hasil yang diperoleh dibandingkan untuk memastikan konsistensi. Jika ada perbedaan dalam hasil analisis, seorang peneliti tambahan dilibatkan untuk menyelesaikan perbedaan tersebut. Data yang telah disepakati kemudian disimpan dalam file Excel untuk menjaga akurasi dan konsistensi informasi yang akan digunakan dalam proses sintesis data selanjutnya. Proses ini bertujuan untuk memastikan bahwa informasi yang dikumpulkan bersifat objektif dan dapat diandalkan untuk analisis yang lebih mendalam.

Tabel 2. Sumber publikasi dan distribusi studi yang dipilih

Publication Name	Type	Number	Percent
IEEE 2022 2nd International Conference on Energy Transition in the Mediterranean Area (SyNERGY MED)	Conference	1	2
International Conference for Advancement in Technology, ICONAT 2022	Conference	1	2
2023 6th International Conference on Renewable Energy and Power Engineering (REPE)	Conference	1	2
Carbon	Journal	1	2
Chemical Engineering Journal	Journal	3	6
Diamond and Related Materials	Journal	1	2
Electrochimica Acta	Journal	3	2
Energy	Journal	1	2
Energy Conversion and Management	Journal	2	4
Energy Storage Materials	Journal	2	4
Fuel	Journal	1	2
IEEE Access	Journal	1	2
Industrial Crops and Products	Journal	1	2
International Journal of Hydrogen Energy	Journal	1	2
Journal of Energy Storage	Journal	16	32
Journal of Power Sources	Journal	4	8
Materials and Design	Journal	1	2
Materials Science and Engineering: B	Journal	2	4
Materials Today Sustainability	Journal	1	2
Nano Energy	Journal	1	2
Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C	Journal	1	2
Renewable and Sustainable Energy Reviews	Journal	1	2
Results in Chemistry	Journal	1	2
Smart Agricultural Technology	Journal	1	2
Solid State Sciences	Journal	1	2
Sustainable Energy Technologies and Assessments	Journal	1	2

Synthetic Metals	Journal	1	2
Total		52	100

Tujuan utama dari proses sintesis data dalam tinjauan ini adalah untuk menggabungkan dan mengkonsolidasikan temuan dari studi-studi yang terpilih guna merumuskan jawaban atas pertanyaan penelitian terkait dengan perbandingan material superkapasitor berbasis karbon dan oksida logam dalam upaya optimalisasi penyimpanan energi pada aplikasi sistem energi terbarukan. Dengan mengagregasi studi yang memberikan pandangan serupa atau hasil yang dapat dibandingkan, kami dapat memperoleh bukti yang kuat yang mendukung jawaban yang konklusif untuk setiap pertanyaan penelitian.

Selama proses sintesis, kami secara cermat meninjau dan mengevaluasi data kuantitatif serta kualitatif yang relevan dengan kinerja superkapasitor. Data kuantitatif meliputi berbagai metrik kinerja, seperti kapasitas penyimpanan energi, efisiensi siklus, dan stabilitas daya tahan material, sementara data kualitatif mencakup kekuatan dan kelemahan dari material berbasis karbon dan oksida logam serta kategorisasi karakteristik penyimpanan energi masing-masing material. Selain itu, tabel digunakan untuk merangkum dan menyajikan hasil dengan cara yang jelas dan sistematis, sehingga memudahkan pemahaman komprehensif tentang konfigurasi material superkapasitor yang optimal untuk aplikasi energi terbarukan.

7. Hasil dan Pembahasan

Sebelum melanjutkan ke pembahasan mendalam mengenai studi-studi yang terpilih, kami terlebih dahulu melaksanakan proses identifikasi dan ekstraksi data dari 52 referensi yang relevan dengan topik penelitian kami, yaitu perbandingan material superkapasitor berbasis karbon dan oksida logam untuk optimalisasi penyimpanan energi dalam aplikasi sistem energi terbarukan. Langkah ini dilakukan untuk mengumpulkan wawasan komprehensif terkait metode, temuan, serta kontribusi dari setiap studi yang dilibatkan. Setiap referensi yang dipilih dianalisis secara teliti untuk memastikan bahwa elemen-elemen penting, seperti judul, penulis, metode penelitian, serta hasil utamanya, terdokumentasi secara sistematis.

Dengan melakukan langkah ini, kami memastikan bahwa data yang diperoleh dapat mendukung proses sintesis penelitian pada tahap selanjutnya, serta menjawab pertanyaan-pertanyaan kunci dalam framework yang telah dirancang. Melalui pendekatan ini, kami mengeksplorasi lebih dalam bagaimana karakteristik material karbon dan oksida logam memengaruhi kapasitas penyimpanan energi superkapasitor, serta bagaimana efisiensi kedua material ini berperan dalam meningkatkan daya tahan dan siklus hidup perangkat penyimpanan energi. Selain itu, perhatian khusus diberikan pada bagaimana setiap material berkontribusi terhadap stabilitas dan keandalan penyimpanan energi dalam aplikasi sistem energi terbarukan. Keseluruhan data yang terkumpul diharapkan dapat memberikan dasar yang kuat untuk pengembangan strategi penyimpanan energi yang lebih efisien dan berkelanjutan sesuai dengan kebutuhan sistem energi terbarukan. Dan untuk menjawab pertanyaan RQ dilampirkan di bawah ini antara lain.

RQ1# : Bagaimana pengaruh karakteristik material berbasis karbon dan oksida logam terhadap kapasitas penyimpanan energi superkapasitor ?

Material karbon dan oksida logam memengaruhi kapasitas penyimpanan energi superkapasitor melalui perbedaan mekanisme penyimpanan muatan dan karakteristik elektroda yang unik. Material

berbasis karbon seperti graphene dan carbon nanotubes (CNT) memiliki struktur berpori dan luas permukaan yang tinggi, yang mendukung mekanisme electric double-layer capacitance (EDLC) dan memungkinkan peningkatan kapasitansi[23][24][25]. Struktur ini mendukung penyimpanan muatan secara efisien dan respons pengisian daya yang cepat karena luas permukaan yang besar menyediakan lebih banyak ruang bagi ion untuk diserap pada antarmuka elektroda[26]. Selain itu, variasi dalam struktur pori dari karbon aktif memungkinkan akses ion yang lebih cepat, yang mendukung siklus pengisian-pengosongan yang berulang tanpa penurunan signifikan dalam kapasitansi.

Sebaliknya, material oksida logam seperti MnO_2 dan RuO_2 meningkatkan kapasitas penyimpanan energi superkapasitor melalui mekanisme redoks yang terjadi pada permukaan elektroda. Oksida logam, seperti MnO_2 yang dikenal dengan biaya rendah dan stabilitas siklus tinggi, serta RuO_2 yang memiliki konduktivitas dan kapasitansi tinggi, memungkinkan densitas energi yang lebih besar dibandingkan dengan material karbon[27]. MnO_2 umumnya perlu dikombinasikan dengan bahan konduktif lainnya, seperti karbon, untuk mengatasi konduktivitas yang lebih rendah. Kombinasi dari reaksi redoks pada permukaan elektroda ini dapat meningkatkan kapasitas penyimpanan energi dan densitas energi secara signifikan meskipun siklus hidupnya cenderung lebih pendek dibandingkan material karbon akibat degradasi selama siklus redoks.

RQ2#: Bagaimana perbedaan efisiensi antara superkapasitor berbasis karbon dan oksida logam dalam aplikasi sistem energi terbarukan ?

Efisiensi antara superkapasitor berbasis karbon dan oksida logam dalam aplikasi sistem energi terbarukan bergantung pada sifat-sifat elektroda yang unik dari kedua material ini. Superkapasitor berbasis karbon, seperti yang menggunakan activated carbon dan graphene, umumnya lebih efisien dalam mendukung siklus pengisian dan pengosongan cepat[28]. Hal ini dikarenakan mekanisme electric double-layer capacitance (EDLC) yang memungkinkan ion terserap pada permukaan elektroda tanpa melalui reaksi kimia mendalam, sehingga menghasilkan stabilitas siklus yang baik dan tingkat konduktivitas tinggi[29]. Dengan luas permukaan yang besar dan struktur pori yang optimal, material berbasis karbon ini sering menunjukkan efisiensi daya yang sangat baik dalam aplikasi energi terbarukan meskipun densitas energinya masih terbatas.

Sebaliknya, superkapasitor berbasis oksida logam, seperti manganese dioxide (MnO_2) dan ruthenium oxide (RuO_2), bekerja dengan mekanisme pseudocapacitance yang melibatkan reaksi redoks pada permukaan elektroda. Meskipun mekanisme ini memungkinkan penyimpanan energi yang lebih tinggi dan memberikan densitas energi yang lebih besar, efisiensi siklus jangka panjangnya bisa menurun karena reaksi kimia yang terjadi menyebabkan degradasi material seiring waktu. RuO_2 , misalnya, meskipun memiliki kapasitansi dan konduktivitas yang sangat tinggi, sering menghadapi kendala biaya dan penurunan siklus stabilitas dalam penggunaan jangka panjang. Namun, dalam aplikasi tertentu yang membutuhkan daya besar dalam siklus terbatas, oksida logam sering kali menawarkan solusi yang lebih unggul dibandingkan karbon, meskipun dengan tantangan pada stabilitas dan siklus hidup yang lebih rendah dibandingkan karbon[30][31].

Dalam konteks aplikasi energi terbarukan, superkapasitor karbon sering kali menjadi pilihan untuk aplikasi yang membutuhkan efisiensi tinggi dan siklus pengisian-pengosongan yang berulang. Sedangkan, oksida logam lebih cocok untuk aplikasi yang memerlukan densitas energi lebih tinggi dalam jangka pendek, terutama ketika stabilitas jangka panjang tidak menjadi prioritas utama[32][33][34].

RQ3#: Apa dampak penggunaan material karbon dan oksida logam terhadap daya tahan dan siklus hidup superkapasitor dalam aplikasi energi terbarukan ?

Superkapasitor merupakan komponen yang sangat penting dalam sistem penyimpanan energi modern, terutama dalam aplikasi energi terbarukan seperti pembangkit listrik tenaga surya dan angin, di mana kebutuhan untuk menyimpan dan mengelola energi menjadi sangat krusial. Pemilihan material yang digunakan dalam pembuatan superkapasitor memiliki dampak yang signifikan terhadap daya tahan, siklus hidup, dan kinerja keseluruhan perangkat ini[35]. Di antara material yang paling banyak diteliti dan digunakan adalah material berbasis karbon dan oksida logam, masing-masing dengan karakteristik yang unik yang mempengaruhi performa dan aplikasinya dalam konteks penyimpanan energi[36].

Material berbasis karbon, seperti graphene dan karbon berpori, telah menarik perhatian luas dalam penelitian superkapasitor karena stabilitas siklus dan daya tahan yang tinggi yang ditawarkannya. Keunggulan utama dari material ini terletak pada mekanisme electric double-layer capacitance (EDLC), di mana muatan disimpan secara fisik di permukaan elektroda, membentuk lapisan ganda antara elektroda dan elektrolit tanpa melibatkan reaksi kimia yang mendalam. Proses ini memungkinkan struktur elektroda tetap utuh dan tidak mengalami degradasi signifikan, bahkan setelah ribuan siklus pengisian dan pengosongan, sehingga meningkatkan keandalan superkapasitor dalam aplikasi jangka panjang[37]. Karbon berpori dan nanotube karbon memiliki luas permukaan yang sangat tinggi, yang berkontribusi pada kapasitas penyimpanan muatan yang lebih besar serta meningkatkan efisiensi transportasi ion dalam elektrolit[38][39][40]. Penelitian menunjukkan bahwa superkapasitor berbasis karbon dapat mempertahankan kapasitansi yang baik, bahkan dalam penggunaan intensif, karena kemampuan mereka untuk mempertahankan struktur mikro dan makro yang mendukung jalur transportasi ion yang efisien[41][42]. Ini menjadikan superkapasitor berbasis karbon sebagai pilihan ideal untuk berbagai aplikasi, termasuk kendaraan listrik yang memerlukan pengisian cepat dan penyimpanan energi untuk sistem energi terbarukan yang terintegrasi dengan jaringan listrik.

Di sisi lain, superkapasitor berbasis oksida logam, seperti manganese dioxide (MnO_2) dan ruthenium oxide (RuO_2), menawarkan kapasitas penyimpanan energi yang lebih tinggi dibandingkan dengan superkapasitor berbasis karbon, berkat mekanisme pseudocapacitance[43]. Dalam mekanisme ini, reaksi redoks terjadi di permukaan elektroda, yang memungkinkan superkapasitor untuk menyimpan lebih banyak energi. Meskipun mekanisme ini meningkatkan kapasitas spesifik, ia juga membawa tantangan dalam hal daya tahan dan stabilitas siklus. Reaksi redoks yang terjadi selama siklus pengisian dan pengosongan dapat menyebabkan perubahan struktural yang signifikan pada oksida logam, mengakibatkan degradasi yang lebih cepat daripada yang terjadi pada material berbasis karbon. Penelitian menunjukkan bahwa setelah sejumlah siklus tertentu, kinerja superkapasitor berbasis oksida logam dapat berkurang drastis, menjadikannya kurang ideal untuk aplikasi yang memerlukan siklus hidup panjang. Meskipun demikian, superkapasitor berbasis oksida logam tetap dapat diandalkan dalam aplikasi yang memerlukan kapasitas energi tinggi, terutama dalam situasi di mana kebutuhan untuk memberikan daya instan dalam waktu singkat sangat penting, seperti dalam sistem pengisian cepat untuk kendaraan listrik.

Dalam konteks pemilihan antara superkapasitor berbasis karbon dan oksida logam, pertimbangan aplikasi menjadi sangat penting[44][45]. Untuk aplikasi yang memerlukan siklus hidup panjang dan stabilitas yang baik, seperti dalam sistem penyimpanan energi terbarukan yang

beroperasi terus-menerus, superkapasitor berbasis karbon sering kali menjadi pilihan utama. Keunggulan material ini dalam hal stabilitas siklus dan kemampuan untuk mempertahankan kapasitansi di bawah kondisi pengoperasian yang berat menjadikannya lebih cocok untuk penggunaan jangka panjang[46][47][48]. Sebaliknya, dalam aplikasi yang lebih mendesak dan menuntut kapasitas penyimpanan tinggi dalam waktu singkat, seperti pada sistem pengisian cepat atau perangkat yang membutuhkan daya instan, superkapasitor berbasis oksida logam mungkin lebih sesuai[49][50][51].

Kedua jenis material ini memiliki kelebihan dan kekurangan yang membuatnya lebih cocok untuk kondisi operasi tertentu. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut sangat diperlukan untuk mengembangkan material baru yang dapat menggabungkan keunggulan dari kedua jenis superkapasitor ini. Penelitian ini mencakup pengembangan teknik baru dalam sintesis material, modifikasi struktural, dan pengoptimalan performa elektroda untuk meningkatkan efisiensi dan daya tahan superkapasitor. Inovasi dalam teknik material dan rekayasa elektroda diharapkan dapat membuka jalan bagi superkapasitor yang lebih efisien dan berkelanjutan, menjawab tantangan penyimpanan energi di era energi terbarukan yang terus berkembang. Dengan kemajuan teknologi dan pemahaman yang lebih baik tentang interaksi antara material dan elektrolit, masa depan superkapasitor tampak menjanjikan untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan sistem energi secara keseluruhan, memungkinkan transisi yang lebih mulus menuju penggunaan energi yang lebih bersih dan efisien[52].

8. Kesimpulan

Hasil yang diperoleh dari kajian Literatur Review ini bertujuan untuk mengevaluasi dan membandingkan dua kelas utama material yang digunakan dalam superkapasitor—yaitu material berbasis karbon dan oksida logam—dalam konteks penyimpanan energi untuk mendukung aplikasi energi terbarukan. Material berbasis karbon menonjolkan keunggulan seperti siklus hidup yang panjang, stabilitas termal yang baik, serta biaya yang relatif rendah, sehingga menarik untuk digunakan dalam aplikasi jangka panjang. Namun, material ini memiliki kelemahan dalam hal densitas energi yang terbatas, yang membatasi kemampuannya dalam menyimpan energi dalam jumlah besar. Di sisi lain, material oksida logam menawarkan kapasitas penyimpanan energi yang lebih tinggi, menjadikannya sangat cocok untuk aplikasi yang membutuhkan daya simpan energi besar. Meski demikian, harga yang lebih mahal serta kecenderungan untuk mengalami degradasi seiring waktu menjadi tantangan yang perlu diatasi.

Sebagai langkah lanjutan, dikembangkan suatu framework analisis yang dapat mengintegrasikan kinerja kedua jenis material ini di bawah berbagai kondisi aplikasi. Framework ini dirancang untuk mengidentifikasi faktor-faktor penting yang berpengaruh terhadap kapasitas penyimpanan, stabilitas siklus, serta daya tahan masing-masing material, sehingga memungkinkan optimalisasi pada material karbon maupun oksida logam untuk aplikasi tertentu. Dengan demikian, melalui tinjauan ini diharapkan dapat diperoleh panduan bagi pengembangan solusi penyimpanan energi yang lebih efisien, tahan lama, dan ekonomis, guna mendukung sistem energi terbarukan yang semakin kompleks dan memerlukan sistem penyimpanan energi yang andal dan berkinerja tinggi.

Daftar Pustaka

- [1] A. G. Olabi, Q. Abbas, A. Al Makky, and M. A. Abdelkareem, "Supercapacitors as next generation energy storage devices: Properties and applications," *Energy*, vol. 248, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.123617.
- [2] S. Satpathy, A. Padthe, M. Prakash, M. Chandra Trivedi, V. Goyal, and B. K. Bhattacharyya, "Method for measuring supercapacitor's fundamental inherent parameters using its own self-discharge behavior: A new steps towards sustainable energy," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 53, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.seta.2022.102760.
- [3] P. G. Papageorgiou, A. M. Tsakiri, and G. C. Christoforidis, "Performance assessment of supercapacitor energy storage integration into a renewable DC microgrid," in *2022 2nd International Conference on Energy Transition in the Mediterranean Area (SyNERGY MED)*, IEEE, Oct. 2022, pp. 1–6. doi: 10.1109/SyNERGYMED55767.2022.9941460.
- [4] Q. He *et al.*, "Supercapacitor-isolated water electrolysis for renewable energy storage," *Chemical Engineering Journal*, vol. 495, p. 153461, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.cej.2024.153461.
- [5] M. F. Elmorshedy, M. R. Elkadeem, K. M. Kotb, I. B. M. Taha, and D. Mazzeo, "Optimal design and energy management of an isolated fully renewable energy system integrating batteries and supercapacitors," *Energy Convers Manag*, vol. 245, p. 114584, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2021.114584.
- [6] K. M. Moloelang, P. F. Le Roux, B. T. Abe, A. F. Nnachi, and T. P. Ratau, "Modeling and Analysis of a Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System (HESS) for Renewable Energy Applications," in *2023 6th International Conference on Renewable Energy and Power Engineering (REPE)*, IEEE, Sep. 2023, pp. 293–299. doi: 10.1109/REPE59476.2023.10511902.
- [7] A. Fatih Guven, A. Y. Abdelaziz, M. Mahmoud Samy, and S. Barakat, "Optimizing energy Dynamics: A comprehensive analysis of hybrid energy storage systems integrating battery banks and supercapacitors," *Energy Convers Manag*, vol. 312, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.enconman.2024.118560.
- [8] S. M. Benoy, M. Pandey, D. Bhattacharjya, and B. K. Saikia, "Recent trends in supercapacitor-battery hybrid energy storage devices based on carbon materials," *J Energy Storage*, vol. 52, p. 104938, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.104938.
- [9] K. Dissanayake and D. Kularatna-Abeywardana, "A review of supercapacitors: Materials, technology, challenges, and renewable energy applications," *J Energy Storage*, vol. 96, p. 112563, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.est.2024.112563.
- [10] S. Mei, J. Zheng, and W. Chu, "Designing porous carbon-based multicomponent electrode material for high performance supercapacitor," *J Energy Storage*, vol. 40, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.102698.
- [11] P. C. Himadri Reddy, J. Amalraj, S. Ranganatha, S. S. Patil, and S. Chandrasekaran, "A review on effect of conducting polymers on carbon-based electrode materials for electrochemical supercapacitors," *Synth Met*, vol. 298, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.synthmet.2023.117447.
- [12] B. Liu, M. Yang, H. Chen, Y. Liu, D. Yang, and H. Li, "Graphene-like porous carbon nanosheets derived from salvia splendens for high-rate performance supercapacitors," *J Power Sources*, vol. 397, pp. 1–10, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.jpowsour.2018.06.100.
- [13] Z. Zhai *et al.*, "A review of carbon materials for supercapacitors," Sep. 01, 2022, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.matdes.2022.111017.

- [14] T. Yue, B. Shen, and P. Gao, "Carbon material/MnO₂ as conductive skeleton for supercapacitor electrode material: A review," Apr. 01, 2022, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2022.112131.
- [15] N. P. D. Ngidi, A. F. Koekemoer, and S. S. Ndlela, "Application of metal oxide/porous carbon nanocomposites in electrochemical capacitors: A review," *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, vol. 135, p. 103698, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.pce.2024.103698.
- [16] M. G. Joysi *et al.*, "Exploring ternary metal oxides MnO₂/CuO/ZrO₂ composites for supercapacitor applications," *Results Chem*, vol. 10, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.rechem.2024.101682.
- [17] P. Sinha and K. K. Kar, "A flexible and high energy density -hydrous RuO₂ and keratin-derived renewable carbon composite-based asymmetric supercapacitor in redox-mediated electrolytes," *Electrochim Acta*, vol. 435, p. 141368, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.electacta.2022.141368.
- [18] C. T. Sarr, M. B. Camara, and B. Dakyo, "Supercapacitors aging assessment in wind/tidal intermittent energies application with variable temperature," *J Energy Storage*, vol. 46, p. 103790, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.est.2021.103790.
- [19] Lichchhavi, A. Kanwade, and P. M. Shirage, "A review on synergy of transition metal oxide nanostructured materials: Effective and coherent choice for supercapacitor electrodes," Nov. 25, 2022, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.est.2022.105692.
- [20] A. Cano, P. Arévalo, D. Benavides, and F. Jurado, "Comparative analysis of HESS (battery/supercapacitor) for power smoothing of PV/HKT, simulation and experimental analysis," *J Power Sources*, vol. 549, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.jpowsour.2022.232137.
- [21] B. K. Saikia, S. M. Benoy, M. Bora, J. Tamuly, M. Pandey, and D. Bhattacharya, "A brief review on supercapacitor energy storage devices and utilization of natural carbon resources as their electrode materials," *Fuel*, vol. 282, p. 118796, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.118796.
- [22] A. Younes, Z. E. A. Ellassad, O. El Meslouhi, D. E. A. Ellassad, and E. Abdel Majid, "The application of machine learning techniques for smart irrigation systems: A systematic literature review," *Smart Agricultural Technology*, vol. 7, p. 100425, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.atech.2024.100425.
- [23] W. Yang *et al.*, "Carbon nitride template-directed fabrication of nitrogen-rich porous graphene-like carbon for high performance supercapacitors," *Carbon N Y*, vol. 130, pp. 325–332, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.carbon.2018.01.032.
- [24] S. Palsaniya and A. K. Dasmahapatra, "Graphene Supercapacitor Electrode of Liquid Hydrocarbons using CVD Process," in *2022 International Conference for Advancement in Technology, ICONAT 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. doi: 10.1109/ICONAT53423.2022.9725983.
- [25] T. Méndez-Morales, N. Ganfoud, Z. Li, M. Haefele, B. Rotenberg, and M. Salanne, "Performance of microporous carbon electrodes for supercapacitors: Comparing graphene with disordered materials," *Energy Storage Mater*, vol. 17, pp. 88–92, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.ensm.2018.11.022.
- [26] H. Lin *et al.*, "Highly porous carbon material from polyclodextrin for high-performance supercapacitor electrode," *J Energy Storage*, vol. 53, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.105036.

- [27] H. Wang *et al.*, "High-performance, flexible, all-solid-state, asymmetric supercapacitors from recycled resin-based activated carbon, MnO₂, and waste nonwoven materials," *J Energy Storage*, vol. 84, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.est.2024.110960.
- [28] M. Imtiaz *et al.*, "Fabrication of cerium vanadate-embedded on carbon based graphene material (rGO) with significant performance for supercapacitor electrode," *J Energy Storage*, vol. 101, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.est.2024.113987.
- [29] E. Adhamash *et al.*, "High-energy plasma activation of renewable carbon for enhanced capacitive performance of supercapacitor electrode," *Electrochim Acta*, vol. 362, p. 137148, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.electacta.2020.137148.
- [30] A. Nandagudi *et al.*, "Hydrothermal synthesis of transition metal oxides, transition metal oxide/carbonaceous material nanocomposites for supercapacitor applications," Nov. 01, 2022, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.mtsust.2022.100214.
- [31] Y. Liu, X. Xu, Z. Shao, and S. P. Jiang, "Metal-organic frameworks derived porous carbon, metal oxides and metal sulfides-based compounds for supercapacitors application," *Energy Storage Mater*, vol. 26, pp. 1–22, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.ensm.2019.12.019.
- [32] G. Duan *et al.*, "Bamboo-templated MOF-67-derived carbon: A high-performance electrode for supercapacitors," *Ind Crops Prod*, vol. 222, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.indcrop.2024.119616.
- [33] C. Rong, C. Liao, Y. Chen, and X. Zheng, "High-performance supercapacitor electrode materials from composite of bamboo tar pitch activated carbon and tannic acid carbon quantum dots," *J Energy Storage*, vol. 95, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.est.2024.112657.
- [34] P. Liang *et al.*, "Rational fabrication of semi-interpenetrating three-dimensional hierarchical carbon materials for high-performance symmetric supercapacitor," *J Energy Storage*, vol. 97, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.est.2024.112823.
- [35] C. Mevada, J. Tissari, V. S. Parihar, A. Tewari, J. Keskinen, and M. Mäntysalo, "Bio-inspired 3D-Printed supercapacitors for sustainable energy storage," *J Power Sources*, vol. 624, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.jpowsour.2024.235529.
- [36] S. R. Mangishetti, M. Kamaraj, and R. Sundara, "Novel favorably interconnected N-doped porous carbon hybrid electrode materials for high energy density supercapacitors," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 86, pp. 33442–33455, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.05.112.
- [37] M. Mandal *et al.*, "In-situ synthesis of mixed-phase carbon material using simple pyrolysis method for high-performance supercapacitor," *Diam Relat Mater*, vol. 127, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.diamond.2022.109209.
- [38] H. Li, T. Du, Q. Wang, J. Guo, S. Zhang, and Y. Lu, "A new synthesis of O/N-doped porous carbon material for supercapacitors," *J Energy Storage*, vol. 66, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.107397.
- [39] Y. Li *et al.*, "Effect of puffing on electrochemical properties of sorghum seed based porous carbon materials in supercapacitors," *J Energy Storage*, vol. 102, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.est.2024.114065.
- [40] Z. Wu, C. Guo, Z. Lu, C. Yuan, Y. Xu, and L. Dai, "A facile brushing method for constructing all-in-one high performance flexible supercapacitor with ordinary carbon materials," *J Energy Storage*, vol. 67, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.107531.
- [41] S. Goswami *et al.*, "Biowaste-derived carbon black applied to polyaniline-based high-performance supercapacitor microelectrodes: Sustainable materials for renewable energy

- applications," *Electrochim Acta*, vol. 316, pp. 202–218, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.electacta.2019.05.133.
- [42] Y. Zhang *et al.*, "Facile synthesis of honeycomb-like porous carbon materials derived from reed straw and tannic acid towards high-performance supercapacitors," *J Energy Storage*, vol. 98, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.est.2024.113054.
- [43] S. A. Adewinbi *et al.*, "Characterization of two-way fabricated hybrid metal-oxide nanostructured electrode materials for photovoltaic and miniaturized supercapacitor applications," *Solid State Sci*, vol. 119, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.solidstatesciences.2021.106699.
- [44] B. Talluri, M. L. Aparna, N. Sreenivasulu, S. S. Bhattacharya, and T. Thomas, "High entropy spinel metal oxide (CoCrFeMnNi)₃O₄ nanoparticles as a high-performance supercapacitor electrode material," *J Energy Storage*, vol. 42, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.103004.
- [45] M. Mustaqeem *et al.*, "Rational design of metal oxide based electrode materials for high performance supercapacitors – A review," *J Energy Storage*, vol. 55, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.105419.
- [46] P. Bajpai, A. Kumar, N. S. Neeraj, K. Agarwal, and A. Kumar Srivastava, "Effect of variation of metals in quaternary metal oxide based electrodes on carbon fiber for super capacitor application," *Materials Science and Engineering: B*, vol. 290, p. 116350, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.mseb.2023.116350.
- [47] C. Zhao *et al.*, "Recent advances in transition metal oxides as anode materials for high-performance lithium-ion capacitors," *Chemical Engineering Journal*, vol. 497, p. 154535, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.cej.2024.154535.
- [48] R. Liu *et al.*, "Fundamentals, advances and challenges of transition metal compounds-based supercapacitors," *Chemical Engineering Journal*, vol. 412, p. 128611, May 2021, doi: 10.1016/j.cej.2021.128611.
- [49] P. Gaikwad, N. Tiwari, R. Kamat, S. M. Mane, and S. B. Kulkarni, "A comprehensive review on the progress of transition metal oxides materials as a supercapacitor electrode," *Materials Science and Engineering: B*, vol. 307, p. 117544, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.mseb.2024.117544.
- [50] S. Xiao *et al.*, "High-performance aqueous potassium ion asymmetric supercapacitors based on tunable 2D transition metal oxides," *J Power Sources*, vol. 551, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.jpowsour.2022.232201.
- [51] J. Li *et al.*, "Anion and cation substitution in transition-metal oxides nanosheets for high-performance hybrid supercapacitors," *Nano Energy*, vol. 57, pp. 22–33, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.nanoen.2018.12.011.
- [52] A. Morandi *et al.*, "Characterization and Model Parameters of Large Commercial Supercapacitor Cells," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 20376–20390, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3053626.