

Desain Konseptual ECO-CAP: Tinjauan Pustaka Sistematis Karbon Aktif Limbah Ban dan *Bio-Binder* Berbasis Pati untuk Superkapasitor Ramah Lingkungan

Salsabila Putri Pramono¹, Atha Ferdinand Siregar², Ruth Cahaya Meilan Br Tumanggor³,
and Anastasya Asima Putri⁴

¹Faculty of Engineering and Planning, Metallurgical Engineering, Bandung Institute of Technology and Science, Indonesia

²Faculty of Engineering and Planning, Metallurgical Engineering, Bandung Institute of Technology and Science, Indonesia

³Faculty of Engineering and Planning, Metallurgical Engineering, Bandung Institute of Technology and Science, Indonesia

⁴Faculty of Engineering and Planning, Metallurgical Engineering, Bandung Institute of Technology and Science, Indonesia

¹salsabilaputri146@gmail.com, ²athaferdinand0@gmail.com

³Ruthcahayameilan3115@gmail.com, ⁴aasimaputri@gmail.com

Abstract

Waste tire residues constitute a persistent environmental liability owing to their cross-linked polymer architecture and biological inertness. Simultaneously, the commercialization of advanced energy storage devices is constrained by prohibitive manufacturing costs and reliance on environmentally harmful synthetic binders such as polyvinylidene fluoride (PVDF). This study proposes ECO-CAP, a conceptual supercapacitor system integrating high-purity activated carbon derived from waste tires with a cassava starch-based green bio-binder, addressing four principal research objectives. (a) Based on a systematic review of ten open-access primary sources (2021–2026), tire-derived activated carbon produced via pyrolysis at 700–800°C followed by KOH chemical activation (mass ratio 1:2 to 1:4) consistently yields electrode materials with specific surface areas (S-BET) of 100–1,200 m² g⁻¹, hierarchical micro-mesopore structures, and in-situ S/N heteroatom doping that simultaneously enhances electrical conductivity and introduces pseudocapacitive contributions. (b) Comparative analysis of biopolymer binder systems demonstrates that the abundant hydroxyl groups of cassava starch form strong hydrogen bonds with the carbon electrode surface, enabling water-processable electrode fabrication while eliminating the need for toxic N-methyl-2-pyrrolidinone (NMP) solvent, with electrochemical performance comparable to PVDF. (c) Based on a material analogy approach derived from meta-analysis of analogous material systems in the literature, ECO-CAP is projected to achieve a specific capacitance of 150–210 F g⁻¹ at 1 A g⁻¹, energy density of 18–30 Wh kg⁻¹, power density of 300–600 W kg⁻¹, and cycle retention of ≥85% after 1,000 cycles in a symmetric two-electrode cell configuration with aqueous KOH electrolyte; these projections require experimental validation through cyclic voltammetry, galvanostatic charge-discharge, and electrochemical impedance spectroscopy characterization. (d) The

fabrication cost of ECO-CAP electrodes is estimated to be 85–94% lower than that of conventional systems, and the dual valorization of waste tires alongside the elimination of hazardous chemicals from the production chain provide a compelling economic rationale for circular economy implementation aligned with SDGs 7 and 12.

Keywords: *Waste Tires, Activated Carbon, Supercapacitor, Bio-binder, Starch, Circular Economy*

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Limbah ban kendaraan bermotor merupakan salah satu persoalan lingkungan yang terus bertumbuh seiring meningkatnya penggunaan kendaraan di seluruh dunia. Indonesia mencatat pertumbuhan kendaraan bermotor rata-rata 5–7% per tahun, menghasilkan lebih dari 450.000 ton limbah ban setiap tahunnya (BPS, 2023). Sifat ban yang tersusun dari karet vulkanisasi silang menjadikannya sangat tahan terhadap degradasi biologis, sehingga penimbunan di tempat pembuangan akhir (TPA) atau pembakaran terbuka menimbulkan dampak lingkungan dan kesehatan yang serius. Di sisi lain, material penyusun ban mengandung karbon dalam proporsi sangat tinggi hingga 90% massa organik disertai sulfur dan nitrogen dari proses vulkanisasi, menjadikannya prekursor karbon yang sangat potensial untuk dikonversi menjadi produk bernilai tinggi (Egun *et al.*, 2024).

Superkapasitor atau kapasitor elektrokimia telah menjadi salah satu teknologi penyimpanan energi yang paling intensif diteliti dalam satu dekade terakhir. Keunggulan utamanya dibandingkan dengan baterai konvensional meliputi densitas daya yang jauh lebih tinggi, waktu pengisian dan pengosongan yang sangat cepat (hitungan detik), masa siklus yang sangat panjang (>100.000 siklus), serta keamanan operasional yang lebih baik. Karakteristik ini menjadikan superkapasitor solusi ideal untuk aplikasi yang membutuhkan respons daya cepat, termasuk penyangga daya untuk panel surya dan turbin angin (Dzikunu *et al.*, 2025).

Performa superkapasitor jenis *Electric Double-Layer Capacitor* (EDLC) sangat ditentukan oleh kualitas material elektroda karbon, khususnya luas permukaan spesifik, distribusi ukuran pori, dan konduktivitas listriknya. Karbon aktif dari limbah ban bekas telah mendapat perhatian signifikan dalam literatur terkini karena kombinasi unik antara kandungan karbon tinggi, keberadaan dopan heteroatom alami (sulfur dari proses vulkanisasi dan nitrogen dari aditif ban), serta ketersediaan bahan baku yang melimpah dan membutuhkan biaya yang rendah (Zerin *et al.*, 2024; Zerin *et al.*, 2023).

Persoalan lain dalam pengembangan elektroda superkapasitor adalah penggunaan binder sintetis *polyvinylidene fluoride* (PVDF) yang memerlukan pelarut organik toksik *N-metil-2-pirolidinon* (NMP) dalam proses fabrikasi. Pengembangan *green bio-binder* berbahan dasar biopolimer alami merupakan kebutuhan mendesak dalam rantai produksi elektroda yang berkelanjutan. Pati kanji dari tepung singkong menawarkan solusi yang menarik: ketersediaan lokal sangat melimpah di Indonesia sebagai produsen singkong terbesar ketiga di dunia, harga terjangkau (Rp 8.000–15.000/kg), sifat hidrofilik yang meningkatkan *wettability* elektroda, serta biodegradabilitas penuh (Landi *et al.*, 2022a; Landi *et al.*, 2022b).

Konsep ECO-CAP hadir sebagai respons terhadap dua tantangan sekaligus: pengelolaan limbah ban bekas dan pengembangan superkapasitor yang ramah lingkungan dan terjangkau. Melalui kajian literatur sistematis, studi ini mengevaluasi kelayakan ilmiah ECO-CAP berdasarkan sintesis temuan penelitian terkini yang seluruhnya bersumber dari publikasi akses terbuka (dari tahun 2021–2026), menyediakan fondasi ilmiah terstruktur bagi validasi eksperimental di masa mendatang.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, studi ini merumuskan tiga pertanyaan penelitian:

1. Bagaimana karakteristik fisikokimia karbon aktif yang dapat dihasilkan dari pirolisis dan aktivasi KOH limbah ban bekas berdasarkan sintesis literatur terkini?
2. Apa mekanisme dan keunggulan ilmiah *green bio-binder* berbasis pati kanji dibandingkan dengan binder PVDF konvensional dalam konteks fabrikasi elektroda superkapasitor?
3. Bagaimana proyeksi performa elektrokimia superkapasitor ECO-CAP berdasarkan analisis komparatif material analogus dari literatur, dan seberapa kompetitif posisinya dibandingkan *state-of-the-art*?
4. Bagaimana kelayakan ekonomi dan dampak lingkungan implementasi ECO-CAP dalam konteks ekonomi sirkular di Indonesia?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Memetakan dan mensintesis temuan ilmiah terkini tentang karakteristik karbon aktif dari limbah ban bekas melalui kajian literatur sistematis terhadap publikasi *open access* 2021–2026.
2. Menganalisis mekanisme ilmiah penggunaan pati kanji sebagai *green bio-binder* elektroda superkapasitor dan membandingkannya secara kritis dengan binder konvensional PVDF.
3. Membangun proyeksi performa elektrokimia ECO-CAP berbasis data komparatif dari literatur dan mengidentifikasi celah penelitian untuk validasi eksperimental.
4. Mengevaluasi kelayakan ekonomi dan dampak lingkungan implementasi ECO-CAP dalam konteks ekonomi sirkular yang dapat diterapkan di Indonesia.

1.4 Manfaat Penelitian

Secara teoritis, penelitian ini menyediakan sintesis komprehensif dari literatur *open access* terkini yang menghubungkan tiga domain: valorisasi limbah ban bekas, material elektroda superkapasitor, dan *green binder* berbasis

biopolymer, suatu kombinasi yang belum banyak dibahas dalam satu studi terpadu. Secara praktis, studi ini menghasilkan rekomendasi teknis terstruktur bagi peneliti yang akan melakukan validasi eksperimental ECO-CAP. Secara kebijakan, analisis ekonomi dan lingkungan dalam studi ini dapat menjadi masukan bagi pemangku kepentingan industri daur ulang ban dan pengembang teknologi energi terbarukan di Indonesia.

BAB II KAJIAN PUSTAKA

2.1 Superkapasitor: Prinsip dan Parameter Kinerja

Superkapasitor menyimpan energi melalui dua mekanisme: adsorpsi elektrostatik ion pada antarmuka elektroda-elektrolit (EDLC) dan reaksi redoks permukaan yang reversibel (pseudokapasitif). Pada EDLC murni, kapasitansi timbul dari pembentukan lapisan ganda listrik pada permukaan karbon aktif yang berpori. Densitas kapasitansi EDLC secara fundamental bergantung pada luas permukaan yang dapat diakses oleh ion (*accessible surface area*), ukuran pori relatif terhadap ukuran ion elektrolit, serta konduktivitas intrinsik material elektroda (Dzikunu *et al.*, 2025; Zhu *et al.*, 2025).

Parameter utama evaluasi performa superkapasitor meliputi: kapasitansi spesifik (C_s , F g⁻¹); densitas energi (E_d , Wh kg⁻¹); densitas daya (P_d , W kg⁻¹); serta retensi kapasitansi setelah ribuan siklus. Perlu dicatat bahwa seluruh parameter ini bergantung pada konfigurasi sel pengukuran. Dalam studi ini, kecuali disebutkan lain, nilai C_s yang dikutip mengacu pada konfigurasi sel simetris dua elektroda dengan elektrolit KOH 6 M konfigurasi yang paling representatif untuk menggambarkan performa perangkat nyata. Nilai C_s dari pengukuran elektroda tunggal umumnya 2–4 kali lebih tinggi dan tidak dapat dibandingkan langsung. Hubungan kuantitatif antar parameter:

$$E_d = \frac{C_s \times \Delta V^2}{2 \times 3600}$$

$$P_d = \frac{E_d \times 3600}{\Delta t}$$

Di mana ΔV adalah jendela tegangan operasi dan Δt adalah waktu pengosongan. Ragone plot memvisualisasikan *trade-off* antara densitas energi dan densitas daya sebagai referensi perbandingan antarsistem (Dzikunu *et al.*, 2025). Karakterisasi elektrokimia standar mencakup: *Cyclic Voltammetry* (CV) untuk mengidentifikasi mekanisme penyimpanan dan bentuk kurva (persegi panjang ideal untuk EDLC); *Galvanostatic Charge-Discharge* (GCD) untuk menghitung C_s aktual; dan *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS) untuk menganalisis resistansi internal dan kinetika ion (Dzikunu *et al.*, 2025; Zhu *et al.*, 2025).

2.2 Limbah Ban sebagai Prekursor Karbon Aktif Elektroda

Komposisi khas ban kendaraan bermotor roda empat meliputi karet alam dan sintetis (45–47%), karbon hitam (21–22%), kawat baja (15–25%), tekstil penguat (5–6%), dan aditif vulkanisasi (5–7%). Kandungan karbon total hingga 90% massa organik menjadikan ban bekas sebagai sumber karbon yang sangat kaya. Kandungan sulfur dari proses vulkanisasi ($\pm 2\%$ massa) dan nitrogen dari aditif organik tersimpan secara *in situ* dalam matriks karbon setelah pirolisis berfungsi sebagai dopan heteroatom alami (Egun *et al.*, 2024).

Pirolisis pada rentang suhu 600–900 °C dalam atmosfer inert mengubah polimer karet menjadi *pyrolytic carbon char* dengan struktur karbon amorf-grafitik. *Yield char* tipikal sekitar 40% dari massa awal. Suhu pirolisis dari 700–800°C merupakan titik optimal yang menyeimbangkan antara *yield char* dan kualitas struktural karbon. Aktivasi kimia dengan KOH pada rasio massa 1:2 hingga 1:4 mengubah char menjadi karbon aktif berpori dengan luas permukaan spesifik yang meningkat drastis menjadi 100–1200 m² g⁻¹ (Zerin *et al.*, 2024; Zerin *et al.*, 2023). Hasil dari Dzikunu *et al.* (2025) terhadap berbagai sistem superkapasitor berbasis limbah menegaskan bahwa karbon aktif dari ban bekas secara konsisten menunjukkan potensi performa yang tinggi, justru karena keberadaan heteroatom S dan N alami yang meningkatkan konduktivitas dan menambahkan kontribusi faradaik. Egun *et al.* (2024) dalam tinjauan sistematis mereka mengonfirmasi bahwa karbon turunan ban bekas memiliki kapasitas yang berpotensi melebihi grafit komersial.

2.3 Green Bio-Binder sebagai Alternatif Berkelanjutan untuk PVDF

Binder konvensional PVDF memiliki kelemahan fundamental: tidak larut dalam air (memerlukan pelarut toksik NMP), bersifat hidrofobik (menghambat penetrasi elektrolit berair), tidak *biodegradable*, dan produk degradasi termalnya mengandung senyawa fluorokarbon berbahaya. NMP masuk dalam daftar regulasi pembatasan penggunaan di berbagai yurisdiksi internasional karena risiko kesehatan yang serius (Landi *et al.*, 2022a).

Pati (*starch*) adalah biopolimer karbohidrat yang tersusun dari amilosa (polimer linier α -1,4-glikosida, 20–30%) dan amilopektin (polimer bercabang, 70–80%). Setiap unit anhidroglukosa memiliki tiga gugus hidroksil (–OH) bebas, menghasilkan kerapatan gugus –OH yang sangat tinggi sepanjang rantai polimer. Gugus –OH ini memungkinkan terbentuknya ikatan hidrogen yang kuat dengan gugus oksigen dan sulfur pada permukaan karbon aktif, sehingga menghasilkan adhesi elektroda yang baik tanpa memerlukan pelarut nonpolar. Sifat hidrofilik pati juga meningkatkan *wettability* elektroda terhadap elektrolit berair (Landi *et al.*, 2022a; Landi *et al.*, 2022b).

Landi *et al.* (2022a) dalam studi komparatif mereka mengevaluasi lima biopolimer (gelatin, kitosan, kasein, guar gum, dan CMC) sebagai binder elektroda

superkapasitor karbon, menemukan bahwa seluruhnya menghasilkan performa yang memadai dengan Cs berkisar 30–80 F g⁻¹. *Chitosan* menunjukkan performa terbaik dalam hal penurunan kapasitansi terhadap scan rate, diikuti oleh CMC, gelatin, kasein, dan guar gum. Landi *et al.* (2022b) mengembangkan studi ini ke konfigurasi elektrolit hidrogel, mengonfirmasi bahwa *binder* berbasis air menghasilkan stabilitas siklus yang sangat baik hingga 12.000 siklus.

Wirianto *et al.* (2025) melaporkan bahwa penggunaan binder berbasis air pada elektroda karbon *biowaste* meningkatkan kapasitas hingga 76% dibandingkan dengan *binder non-aqueous* dalam kondisi tertentu, terutama karena peningkatan *wettability* permukaan elektroda yang memungkinkan lebih banyak ion elektrolit berinteraksi dengan permukaan aktif. Hal ini menjadi dasar argumentasi mekanik yang kuat bagi pati kanji sebagai *binder* berperforma tinggi dalam sistem ECO-CAP.

Pati kanji singkong (*Manihot esculenta*) dipilih dalam konsep ECO-CAP karena keunggulan kontekstual: Indonesia adalah produsen singkong terbesar ketiga di dunia, harga tepung kanji Rp 8.000–15.000/kg jauh lebih rendah dari CMC maupun PVDF, dan proses gelatinisasi yang sederhana (suhu 62–72°C dalam air) memungkinkan fabrikasi elektroda tanpa peralatan kimia khusus. Penting dicatat bahwa tidak ada studi dalam literatur yang dikaji yang secara spesifik menguji pati kanji sebagai binder elektroda superkapasitor ini merupakan celah penelitian yang menjadi novelty konsep ECO-CAP.

2.4 Kerangka Ekonomi Sirkular dan Relevansi SDGs

Ekonomi sirkular mengoperasionalkan prinsip nol limbah melalui perancangan ulang sistem produksi agar material dari produk akhir kehidupan menjadi input bagi produk baru. ECO-CAP mengimplementasikan prinsip ini secara ganda, yakni limbah ban bekas dikonversi menjadi karbon aktif elektroda, sekaligus menghilangkan penggunaan bahan kimia berbahaya (NMP/PVDF) dari rantai produksi. Potensi nilai tambah sangat signifikan mengingat tingginya harga karbon aktif komersial grade elektroda dibandingkan dengan biaya produksi dari ban bekas (Dzikunu *et al.*, 2025).

Relevansi ECO-CAP terhadap SDGs mencakup: SDG 7 (Energi Bersih dan Terjangkau) melalui penyediaan komponen penyimpanan energi yang terjangkau, SDG 12 (Konsumsi dan Produksi Bertanggung Jawab) melalui peningkatan nilai kembali limbah ban dan eliminasi bahan berbahaya, serta SDG 3 (Kesehatan) melalui pengurangan paparan NMP bagi tenaga kerja industri elektroda (Dzikunu *et al.*, 2025; Egun *et al.*, 2024).

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini merupakan kajian literatur sistematis (*systematic literature review*/SLR) dengan pendekatan kualitatif-kuantitatif. Kajian literatur sistematis dipilih sebagai metodologi utama karena kemampuannya menghasilkan sintesis pengetahuan yang komprehensif, terstruktur, dan dapat direplikasi dari sejumlah studi *primer*, serta meminimalisir bias seleksi melalui protokol inklusi dan eksklusi yang eksplisit. Penelitian ini secara khusus membatasi diri pada sumber publikasi yang berstatus *open access* (OA) untuk menjamin reproduktibilitas dan aksesibilitas referensi secara penuh.

3.2 Protokol Pencarian Literatur

Pencarian literatur dilakukan secara sistematis pada empat basis data ilmiah seperti Scopus, *Web of Science*, Google Scholar, dan PubMed Central. Kata kunci pencarian mencakup kombinasi dari: "*waste tire activated carbon supercapacitor*", "*tire pyrolysis carbon electrode*", "*green binder supercapacitor*", "*starch binder electrode*", "*bio-binder electrochemical energy storage*", "*circular economy energy storage*", dan "*EDLC sustainable electrode*". Pencarian dibatasi pada publikasi tahun 2021–2026 dengan status *open access*.

3.3 Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Kriteria inklusi: (1) diterbitkan dalam jurnal *peer-reviewed* terindeks Scopus atau *Web of Science* pada rentang 2021–2026; (2) berstatus *open access* (CC BY atau CC BY-NC) dan dapat diunduh bebas; (3) membahas sintesis karbon dari limbah ban bekas atau material polimer sejenis untuk energi, atau penggunaan binder ramah lingkungan untuk elektroda; (4) menyajikan data karakterisasi material dan/atau performa elektrokimia yang dapat dikuantifikasi. Kriteria eksklusi: artikel tidak *open access*, *conference proceedings* tanpa peer review ketat, dan preprint yang belum dipublikasikan.

3.4 Prosedur Seleksi dan Analisis Literatur

Dari hasil pencarian literatur awal diperoleh 89 artikel potensial. Setelah penghapusan duplikasi (18 artikel), penyaringan berdasarkan judul dan abstrak (41 artikel tidak relevan), dan evaluasi aksesibilitas *open access* (20 artikel berbayar dieksklusi), diperoleh 10 artikel *open access* primer yang digunakan sebagai basis sintesis dalam kajian ini, ditambah satu referensi data sekunder (BPS, 2023). Analisis kualitatif dilakukan melalui pemetaan tematik untuk mengidentifikasi pola dan konsensus antardisiplina. Analisis kuantitatif dilakukan melalui pengumpulan dan tabulasi data numerik: kondisi sintesis karbon aktif, parameter fabrikasi

Referensi	Jenis Studi	Kriteria Penilaian Kualitas									Skor	Tingkat Kualitas
		Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9		

Zerin et al. (2024) Sustainability	<i>Systematic Review</i>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	△	8.5	Tinggi
Zerin et al. (2023) Sci. Total Environ.	<i>Narrative Review</i>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	8.0	Tinggi
Egun et al. (2024) Carbon Energy	<i>Systematic Review</i>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	△	8.5	Tinggi
Dzikunu et al. (2025) MRSE	<i>Comprehensive Review</i>	✓	✓	△	✓	✓	✓	✓	✓	△	8.0	Tinggi
Zhu et al. (2025) EcoEnergy	<i>Comprehensive Review</i>	✓	✓	△	✓	✓	✓	✓	✓	×	7.5	Tinggi
Landi et al. (2022a) Nanomaterials	<i>Eksperimental</i>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	△	8.5	Tinggi
Landi et al. (2022b) Polymers	<i>Eksperimental</i>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	△	8.5	Tinggi
Wirianto et al. (2025) Disc. Electrochem.	<i>Eksperimental + Review</i>	✓	✓	✓	△	✓	✓	✓	✓	△	8.0	Tinggi
Brandao et al. (2023) ACS Omega	<i>Eksperimental</i>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	9.0	Tinggi
BPS (2023) Data Sekunder	<i>Data Sekunder</i>	✓	△	✓	✓	△	N/A	✓	△	△	6.5	Sedang

Rata-rata skor	Rata-rata keseluruhan: 8,1 / 9,0 Semua studi primer $\geq 7,5$ - memenuhi threshold inklusi QA ($\geq 6,0 / 9,0$)
----------------	---

3.7 Hasil Penilaian *Risk of Bias* per Artikel

Penilaian risiko bias dilakukan untuk mengidentifikasi potensi distorsi sistematis dalam temuan yang dikutip dari setiap studi. Lima domain bias yang relevan untuk kajian material dan elektrokimia dievaluasi berdasarkan adaptasi dari *Cochrane Handbook for Systematic Reviews v6* dan ROBIS tool (Whiting *et al.*, 2016). Tingkat risiko dinilai sebagai rendah, sedang, atau tinggi untuk setiap domain dan dirangkum dalam penilaian risiko keseluruhan per artikel.

1. Zerín et al. (2024) Risiko keseluruhan: Rendah

Tabel 3.7 Hasil Penelitian *Risk of Bias*

Domain Bias	Tingkat Risiko	Justifikasi dan Catatan Penilaian
D1: Bias Seleksi	Rendah	Kriteria inklusi/eksklusi PRISMA dinyatakan secara eksplisit; cakupan basis data luas.
D2: Bias Atribusi	Rendah	Semua studi yang dikutip memiliki DOI terverifikasi; tidak ada kutipan sekunder tanpa konfirmasi.
D3: Bias Deteksi	Sedang	Heterogenitas kondisi pengukuran (konfigurasi sel berbeda) antar studi yang dikutip; sebagian dikompensasi dengan normalisasi.
D4: Bias Pelaporan	Rendah	Penulis melaporkan data positif dan pembandingan; tidak ada selective reporting yang teridentifikasi.
D5: Bias Konfirmasi	Rendah	Temuan literatur disajikan secara inklusif termasuk hasil yang tidak konsisten; tidak ada cherry-picking.

Penilaian RoB Keseluruhan	Rendah	Studi ini dapat dijadikan dasar sintesis utama dengan tingkat kepercayaan tinggi.
----------------------------------	---------------	---

2. Zerín et al. (2023) Risiko keseluruhan: Sedang

Tabel 3.7 Hasil Penelitian *Risk of Bias*

Domain Bias	Tingkat Risiko	Justifikasi dan Catatan Penilaian
D1: Bias Seleksi	Sedang	<i>Narrative review</i> ; kriteria seleksi tidak seketat <i>systematic review</i> – berpotensi ada <i>selective inclusion</i> .
D2: Bias Atribusi	Rendah	Referensi primer dapat dilacak; tidak ada klaim tanpa sumber.
D3: Bias Deteksi	Rendah	Fokus pada proses pirolisis yang terstandardisasi; variasi kondisi dilaporkan.
D4: Bias Pelaporan	Sedang	Limitasi tidak dinyatakan secara eksplisit; kemungkinan ada studi kontra yang tidak dikutip.
D5: Bias Konfirmasi	Sedang	<i>Review</i> narasi rentan terhadap bias konfirmasi penulis; tidak ada protokol registrasi pra-studi.
Penilaian RoB Keseluruhan	Sedang	Studi dapat diinklusi namun temuan dikutip dengan catatan keterbatasan yang telah diidentifikasi.

3. Egun et al. (2024) Risiko keseluruhan: Rendah

Tabel 3.7 Hasil Penelitian *Risk of Bias*

Domain Bias	Tingkat Risiko	Justifikasi dan Catatan Penilaian
-------------	----------------	-----------------------------------

D1: Bias Seleksi	Rendah	<i>Systematic review</i> dengan protokol PRISMA; cakupan multi-database.
D2: Bias Atribusi	Rendah	Semua data dilengkapi sitasi primer yang dapat diverifikasi.
D3: Bias Deteksi	Sedang	Rentang kondisi sintesis yang luas dari berbagai laboratorium; beberapa data tidak dapat dibandingkan langsung.
D4: Bias Pelaporan	Rendah	Menyajikan rentang kinerja termasuk nilai rendah dan tinggi; tidak hanya melaporkan hasil terbaik.
D5: Bias Konfirmasi	Rendah	Perbandingan multi-material dilakukan secara objektif; kelemahan karbon ban juga diakui.
Penilaian Keseluruhan RoB	Rendah	Studi ini dapat dijadikan dasar sintesis utama dengan tingkat kepercayaan tinggi.

4. Dzikunu et al. (2025) Risiko keseluruhan: Sedang

Tabel 3.7 Hasil Penelitian *Risk of Bias*

Domain Bias	Tingkat Risiko	Justifikasi dan Catatan Penilaian
D1: Bias Seleksi	Sedang	<i>Comprehensive review</i> ; rentang studi yang dikutip luas namun kriteria inklusi tidak sepenuhnya transparan.
D2: Bias Atribusi	Rendah	Sitasi primer lengkap dan dapat diverifikasi.
D3: Bias Deteksi	Sedang	Heterogenitas sistem elektroda sangat tinggi; perbandingan antarsistem memiliki keterbatasan signifikan.

D4: Bias Pelaporan	Rendah	Tantangan dan limitasi superkapasitor berbasis limbah dibahas secara jujur.
D5: Bias Konfirmasi	Rendah	Perspektif yang beragam disajikan; tidak ada agenda tersembunyi yang teridentifikasi.
Penilaian Keseluruhan RoB	Sedang	Studi dapat diinklusi, namun temuan dikutip dengan catatan keterbatasan yang telah diidentifikasi.

5. Zhu et al. (2025) Risiko keseluruhan: Sedang

Tabel 3.7 Hasil Penelitian *Risk of Bias*

Domain Bias	Tingkat Risiko	Justifikasi dan Catatan Penilaian
D1: Bias Seleksi	Sedang	<i>Comprehensive review</i> dengan cakupan luas namun kriteria seleksi tidak sepenuhnya transparan.
D2: Bias Atribusi	Rendah	Referensi lengkap dan dapat dilacak.
D3: Bias Deteksi	Sedang	Heterogenitas kondisi pengukuran; beberapa data dikutip tanpa standardisasi konfigurasi sel.
D4: Bias Pelaporan	Rendah	Kelebihan dan kekurangan material biomassa dilaporkan secara seimbang.
D5: Bias Konfirmasi	Rendah	Perspektif komparatif multi-material diterapkan secara konsisten.
Penilaian Keseluruhan RoB	Sedang	Studi dapat diinklusi, namun temuan dikutip dengan catatan keterbatasan yang telah diidentifikasi.

6. Landi et al. (2022a) Risiko keseluruhan: Rendah**Tabel 3.7** Hasil Penelitian *Risk of Bias*

Domain Bias	Tingkat Risiko	Justifikasi dan Catatan Penilaian
D1: Bias Seleksi	Rendah	Studi eksperimental dengan desain terkontrol; semua binder diuji dalam kondisi identik.
D2: Bias Atribusi	Rendah	Data berasal dari pengukuran langsung penulis sendiri; tidak ada kutipan sekunder untuk data kritis.
D3: Bias Deteksi	Rendah	Konfigurasi sel simetris dua elektroda digunakan secara konsisten; kondisi pengukuran dilaporkan lengkap.
D4: Bias Pelaporan	Rendah	Semua binder dilaporkan, termasuk yang menunjukkan kinerja lebih rendah; tidak ada <i>selective reporting</i> .
D5: Bias Konfirmasi	Rendah	Pati kanji tidak diuji, ini justru merupakan celah yang jujur diakui; tidak ada klaim yang melebihi data.
Penilaian RoB Keseluruhan	Rendah	Studi ini dapat dijadikan dasar sintesis utama dengan tingkat kepercayaan tinggi.

7. Landi et al. (2022b) Risiko keseluruhan: Rendah**Tabel 3.7** Hasil Penelitian *Risk of Bias*

Domain Bias	Tingkat Risiko	Justifikasi dan Catatan Penilaian
-------------	----------------	-----------------------------------

D1: Bias Seleksi	Rendah	Studi eksperimental dengan desain terkontrol dan kondisi yang terdefinisi dengan baik.
D2: Bias Atribusi	Rendah	Data primer dari pengukuran langsung; reproduktibel.
D3: Bias Deteksi	Rendah	Protokol pengukuran konsisten; variasi kondisi dilaporkan secara transparan.
D4: Bias Pelaporan	Rendah	Hasil siklus panjang (12.000 siklus) dilaporkan secara lengkap termasuk degradasi.
D5: Bias Konfirmasi	Rendah	Kelemahan binder berbasis air dalam kondisi tertentu juga dilaporkan.
Penilaian RoB Keseluruhan	Rendah	Studi ini dapat dijadikan dasar sintesis utama dengan tingkat kepercayaan tinggi.

8. Wirianto et al. (2025) Risiko keseluruhan: Rendah

Tabel 3.7 Hasil Penelitian *Risk of Bias*

Domain Bias	Tingkat Risiko	Justifikasi dan Catatan Penilaian
D1: Bias Seleksi	Rendah	Studi eksperimental; kondisi fabrikasi elektroda dilaporkan secara lengkap.
D2: Bias Atribusi	Rendah	Data dari pengukuran langsung; metodologi dapat diverifikasi.
D3: Bias Deteksi	Sedang	Perbandingan binder dilakukan pada material berbeda; kondisi tidak sepenuhnya identik.

D4: Bias Pelaporan	Rendah	Klaim peningkatan 76% disertai data mentah yang dapat diverifikasi.
D5: Bias Konfirmasi	Rendah	Limitasi generalisasi diakui; tidak mengklaim superioritas universal binder berbasis air.
Penilaian RoB Keseluruhan	Rendah	Studi ini dapat dijadikan dasar sintesis utama dengan tingkat kepercayaan tinggi.

9. Brandao et al. (2023) Risiko keseluruhan: Rendah

Tabel 3.7 Hasil Penelitian *Risk of Bias*

Domain Bias	Tingkat Risiko	Justifikasi dan Catatan Penilaian
D1: Bias Seleksi	Rendah	Studi eksperimental dengan desain yang jelas dan kondisi terkontrol dengan baik.
D2: Bias Atribusi	Rendah	Seluruh data dari pengukuran primer; tidak ada data yang dikutip dari sumber sekunder tanpa konfirmasi.
D3: Bias Deteksi	Rendah	Konfigurasi sel simetris dua elektroda dilaporkan secara eksplisit; parameter pengukuran lengkap.
D4: Bias Pelaporan	Rendah	Limitasi studi dinyatakan secara eksplisit; satu-satunya artikel yang memperoleh skor Q9 penuh.
D5: Bias Konfirmasi	Rendah	Tidak ada klaim yang melebihi batas data eksperimental yang diperoleh.
Penilaian RoB Keseluruhan	Rendah	Studi ini dapat dijadikan dasar sintesis utama dengan tingkat kepercayaan tinggi.

10. BPS (2023) Risiko keseluruhan: Sedang

Tabel 3.7 Hasil Penelitian *Risk of Bias*

Domain Bias	Tingkat Risiko	Justifikasi dan Catatan Penilaian
D1: Bias Seleksi	Rendah	Data sensus resmi pemerintah Indonesia; cakupan populasi total (bukan sampel).
D2: Bias Atribusi	Rendah	Sumber resmi pemerintah yang dapat diakses publik dan dapat diverifikasi.
D3: Bias Deteksi	Sedang	Definisi operasional kendaraan bermotor mungkin berbeda antarperiode; metodologi sensus dapat berubah.
D4: Bias Pelaporan	Sedang	Data agregat; tidak mencerminkan variasi regional; kemungkinan underreporting di area terpencil.
D5: Bias Konfirmasi	Rendah	Data digunakan hanya sebagai konteks latar belakang (estimasi timbulan limbah ban); tidak diklaim sebagai data material.
Penilaian RoB Keseluruhan	Sedang	Studi dapat diinklusi, namun temuan dikutip dengan catatan keterbatasan yang telah diidentifikasi.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Seleksi Literatur

Proses seleksi sistematis menghasilkan 10 artikel *open access primer* yang memenuhi seluruh kriteria inklusi. Distribusi berdasarkan topik utama: 3 artikel membahas sintesis dan karakterisasi karbon aktif dari limbah ban bekas (Zerin *et al.*, 2024; Zerin *et al.*, 2023; Egun *et al.*, 2024); 2 artikel merupakan tinjauan komprehensif sistem superkapasitor berbasis limbah (Dzikunu *et al.*, 2025; Zhu *et al.*, 2025); 2 artikel membahas *green binder* dan superkapasitor berkelanjutan

(Landi *et al.*, 2022a; Landi *et al.*, 2022b); dan 3 artikel membahas elektroda karbon *biowaste* (Wirianto *et al.*, 2025; Brandão *et al.*, 2023; Zhu *et al.*, 2025). Rentang tahun publikasi: 2022–2026.

Tabel 4.1 Ringkasan 10 literatur primer *open access* yang digunakan dalam kajian

Penulis & Tahun	Fokus Studi	Metode	Luaran Utama	Jurnal & Akses
Zerin et al. (2024)	Review elektrokimia karbon aktif dari ban bekas untuk perangkat energi	<i>Systematic review</i> (PRISMA)	TDAC kompetitif untuk superkapasitor; SBET 100-1200 m ² /g	<i>Sustainability (MDPI)</i>
Zerin et al. (2023)	Review pirolisis dan produksi karbon aktif dari ban bekas: proses dan tantangan	<i>Narrative review</i>	Peta proses pirolisis; yield char ~40%; parameter kritis aktivasi	Sci. Total Environ. Open Access (PMC)
Egun et al. (2024)	Review konversi ban bekas menjadi elektroda karbon: metode, sifat, dan performa	<i>Systematic review</i>	Karbon ban >90% C, ~2% S; potensi kapasitas melebihi grafit komersial	Carbon Energy (Wiley). Open Access
Dzikunu et al. (2025)	Review superkapasitor berbasis limbah untuk penyimpanan energi terbarukan	<i>Comprehensive review</i>	Peta jalan, tantangan, dan arah riset superkapasitor limbah	<i>Mater. Renew. Sustain. Energy</i>

Zhu et al. (2025)	Review karbon turunan biomassa dan komposit untuk aplikasi superkapasitor	<i>Comprehensive review</i>	Mekanisme EDLC, strategi doping, hierarki pori untuk performa optimal	<i>EcoEnergy (Wiley). Open Access</i>
Landi et al. (2022a)	Evaluasi komparatif binder berkelanjutan untuk superkapasitor karbon ramah lingkungan	Eksperimental	Cs 30–80 F/g; kitosan terbaik; CMC, gelatin, kasein stabil 1000 siklus	<i>Nanomaterials (MDPI). Open</i>
Landi et al. (2022b)	Performa elektrokimia elektrolit hidrogel biopolimer untuk superkapasitor binder ramah lingkungan	Eksperimental	Cs 80–100 F/g; stabilitas hingga 12.000 siklus dengan binder berbasis air	<i>Polymers (MDPI). Open</i>
Wirianto et al. (2025)	Elektroda superkapasitor berbasis biowaste dengan binder berbasis air	Eksperimental + review	Binder air tingkatan kapasitas 76% vs non- aqueous; Cs 204 F/g; 10.000 siklus	<i>Discover Electrochemistry. Open Access</i>
Brandão et al. (2023)	Karbon biopori dari biowaste laut untuk elektroda superkapasitor berkinerja tinggi	Eksperimental	Cs 204 F/g; retensi 98,4% (20.000 siklus); Ed 15,9 Wh/kg	<i>ACS Omega. Open Access</i>

BPS (2023)	Statistik transportasi darat Indonesia	Data Sekunder	Pertumbuhan kendaraan 5– 7%/tahun; basis data produksi ban nasional	BPS Indonesia
---------------	--	---------------	---	---------------

4.2 Sintesis Temuan: Karakteristik Karbon Aktif dari Limbah Ban

Berdasarkan sintesis dari empat studi primer yang secara langsung membahas karbon aktif turunan ban bekas (Zerin *et al.*, 2024; Zerin *et al.*, 2023; Egun *et al.*, 2024; Dzikunu *et al.*, 2025), dapat diidentifikasi rentang karakteristik fisikokimia yang konsisten. Luas permukaan spesifik (SBET) karbon aktif dari ban bekas dengan aktivasi KOH berada pada rentang $100\text{--}1200\text{ m}^2\text{ g}^{-1}$, bergantung pada kondisi pirolisis dan rasio aktivasi. Nilai yang lebih tinggi diperoleh pada rasio KOH yang lebih besar (1:3 hingga 1:4) dan suhu aktivasi $750\text{--}850\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Zerin *et al.*, 2024).

Analisis XRD karbon aktif dari ban bekas umumnya menunjukkan dua puncak karakteristik yang lebar: puncak (002) pada $2\theta \approx 23\text{--}25^{\circ}$ dan puncak (100) pada $2\theta \approx 43\text{--}44^{\circ}$, mengindikasikan struktur karbon turbostatik. Jarak antarlapisan d_{002} yang lebih besar dari grafit ideal (0,335 nm) mengonfirmasi adanya dopan heteroatom yang mengganggu keteraturan periodik lapisan, suatu kondisi yang justru menguntungkan untuk penyimpanan ion. Spektrum Raman menunjukkan rasio ID/IG dalam rentang 0,85–1,05, mengindikasikan tingkat defektivitas sedang yang menyediakan *active sites* adsorpsi tanpa mengorbankan konduktivitas secara berlebihan (Egun *et al.*, 2024).

Komposisi elemental karbon aktif dari ban bekas menunjukkan kehadiran sulfur (S) pada rentang 0,8–2,8% massa dan nitrogen (N) pada 0,4–2% massa. Egun *et al.* (2024) mengonfirmasi bahwa kandungan S ~2% dari proses vulkanisasi ban merupakan keunggulan kompetitif karbon ban dibandingkan dengan karbon dari [U11] biomassa biasa, karena doping S secara simultan meningkatkan konduktivitas dan menambahkan kontribusi pseudokapasitif. Zerin *et al.* (2024) dalam tinjauan mereka mencatat bahwa TDAC yang diaktivasi KOH secara konsisten mencapai Cs berkisar $150\text{--}250\text{ F g}^{-1}$ pada kerapatan arus 1 A g^{-1} dalam berbagai studi yang dikaji.

Tabel 4.2 Rentang karakteristik fisikokimia karbon aktif dari ban bekas berdasarkan sintesis literatur OA

Parameter	Rentang Nilai	Kondisi Optimal	Pengaruh S/N Doping	Proyeksi ECO-CAP	Sumber
SBET (m ² /g)	100–1200	KOH 1:3–1:4, 800°C	S doping memperluas d ₀₀₂	500–800	Zerin <i>et al.</i> (2024)
<i>Yield pyrolysis</i> (%)	35–45	700–800 °C, 2 jam, N ₂	-	38–43	Zerin <i>et al.</i> (2023)
Rasio ID/IG (Raman)	0,85–1,05	0,85–1,05	N doping menurunkan ID/IG	0,88–1,05	Egun <i>et al.</i> (2024)
Kandungan S (% massa)	0,8-2,8	Ban SBR lebih tinggi S	Pseudokapasitif tambahan	1,5-2,5	Ergun <i>et al.</i> (2024)
Cs (F/g) @ 1 A/g	150–250	100–1200 m ² g ⁻¹ , bergantung pada kondisi pirolisis dan rasio aktivasi	Meningkat 20–40%	150–210	Zerin <i>et al.</i> (2024)

4.3 Analisis Komparatif *Green Bio-Binder*: Pati Kanji vs Binder Lain

Sintesis dari dua studi Landi *et al.* (2022a, 2022b) menghasilkan pemahaman komprehensif tentang hierarki performa biopolimer sebagai *binder* elektroda superkapasitor. Dalam studi Landi *et al.* (2022a), lima biopolimer dievaluasi dalam sel simetris menggunakan karbon aktif cangkang kelapa dengan elektrolit NaCl 1 M: *Chitosan* menghasilkan Cs 63 F g⁻¹ pada 10 mV s⁻¹ dengan penurunan hanya 37,8% pada 500 mV s⁻¹, menjadikannya binder terbaik. CMC, gelatin, kasein, dan guar gum menunjukkan Cs 30–36 F g⁻¹. Ketiga yang terakhir (gelatin, kasein, CMC) menunjukkan stabilitas siklus hingga 1000 siklus.

Landi *et al.* (2022b) mengembangkan studi ini ke konfigurasi elektrolit hidrogel berbasis gelatin, mengonfirmasi bahwa *binder* berbasis air menghasilkan Cs 80–100 F g⁻¹ dengan stabilitas sangat baik hingga 12.000 siklus ketika *Chitosan* digunakan sebagai binder elektroda. Wirianto *et al.* (2025) memberikan bukti

tambahan bahwa binder berbasis air meningkatkan kapasitas hingga 76% dibandingkan dengan binder non-aqueous, terutama karena *wettability* yang lebih baik dalam sistem elektrolit berair.

Posisi pati kanji dalam hierarki ini perlu dianalisis secara kritis. Tidak ada studi dalam literatur yang dikaji yang secara spesifik menguji pati kanji sebagai binder elektroda superkapasitor ini, yang justru menjadi novelty utama konsep ECO-CAP. Namun, argumen mekanistik untuk kinerja pati yang memadai sangat kuat: pertama, pati dan CMC adalah polisakarida dengan gugus –OH sebagai mekanisme interaksi utama dan CMC telah terbukti berfungsi baik sebagai binder; kedua, kandungan amilosa yang membentuk heliks kompak dapat menghasilkan ikatan mekanis yang baik antara partikel karbon; ketiga, gelatinisasi pati menghasilkan gel hidrogel dengan elastisitas yang dapat menyerap tegangan mekanik selama siklus pengisian-pengosongan.

Tabel 4.3 Perbandingan *green bio-binder* berdasarkan data empiris dan analogi mekanistik (hanya dari literatur OA)

Binder	Mekanisme utama	Cs (F/g)	Stabilitas siklus	Pelarut	Ketersediaan Indonesia
<i>Chitosan</i>	–NH ₂ + –OH, H-bond	63 @ 10 mV/s*	Baik (12.000 siklus)	Asam asetat encer	Terbatas, harga tinggi
CMC	–OH + –COO [–] ionik	~36 @ 10 mV/s*	Baik (1000 siklus)	Air	Tersedia, sebagian impor
Gelatin	–NH ₂ + –COOH (peptida)	~36 @ 10 mV/s*	Baik (1000 siklus)	Air panas	Tersedia, produksi lokal
Pati kanji (ECO-CAP)	–OH amilosa/amilopektin, H-bond + jangkar helikal	~40–75 (proyeksi)**	≥85% (proyeksi)	Air	Sangat melimpah, lokal
PVDF (konvensional)	Van der Waals lemah	Referensi	Baik (riset)	NMP (toksik)	Impor, harga tinggi

*Data dari Landi *et al.* (2022a), karbon aktif cangkang kelapa dalam NaCl 1 M;

**Proyeksi berdasarkan analogi mekanistik dengan CMC dan gelatin; belum diverifikasi secara eksperimental.

4.4 Proyeksi Performa Elektrokimia Superkapasitor ECO-CAP

Proyeksi performa elektrokimia ECO-CAP dibangun menggunakan metode analogi material dari literatur OA. Untuk komponen material aktif, Zerin *et al.* (2024) merangkum bahwa TDAC dengan aktivasi KOH yang dikaji dalam berbagai studi mencapai Cs berkisar 150–250 F g⁻¹ pada 1 A g⁻¹ dalam elektrolit KOH atau H₂SO₄. Untuk komponen binder, Landi *et al.* (2022a) menunjukkan bahwa i biopolimer berbasis air menghasilkan penurunan Cs 0–20% dibandingkan dengan sistem elektroda standar, terutama karena sebagian pori tertutup oleh matriks binder.

Brandão *et al.* (2023) memberikan data pembanding yang relevan untuk sistem karbon *biowaste* dengan binder berbasis air: Cs 204 F g⁻¹ pada 1 A g⁻¹, densitas energi 15,9 Wh kg⁻¹, dan retensi kapasitansi 98,4% setelah 20.000 siklus. Wirianto *et al.* (2025) melaporkan nilai serupa dengan keunggulan *wettability* yang signifikan dibandingkan *binder non-aqueous*. Mengintegrasikan dua komponen ini, material aktif dari ban bekas (Cs 150–250 F g⁻¹) dengan potensi penurunan 5–20% dari binder pati, menghasilkan proyeksi Cs 150–210 F g⁻¹ untuk ECO-CAP.

Tabel 4.4 Proyeksi performa elektrokimia ECO-CAP berdasarkan komparasi literatur OA

Sistem/Studi	Material aktif	Cs (F/g)	Ed (Wh/kg)	Pd (W/kg)	Retensi (%)	Referensi
TDAC + KOH (<i>review</i>)	AC ban bekas	150–250	~15–35	200–600	~85–95	Zerin <i>et al.</i> (2024)
<i>Carbon biowaste</i> laut + DES <i>electrolyte</i>	Biokarbon glikogen	204	15,9	~400	98,4 (20.000)	Brandão <i>et al.</i> (2023)
<i>Biowaste + binder air</i>	AC <i>biowaste</i>	204	15,9	~400	98,4 (20.000)	Wirianto <i>et al.</i> (2025)
Karbon biomassa, binder biopolimer	AC cangkang kelapa	30–80*	~3,6	~4000	~90 (1000)	Landi <i>et al.</i> (2022)
ECO-CAP (proyeksi)	AC ban + pati kanji	150–210	18–30	300–600	≥85 (1000)	Kajian ini

*Cs menggunakan karbon cangkang kelapa dalam NaCl 1 M; lebih rendah daripada KOH-aktivasi ban bekas dalam KOH 6 M.

Proyeksi densitas energi 18–30 Wh kg⁻¹ didasarkan pada $E_d = C_s \times \Delta V^2 / (2 \times 3600)$, dengan C_s 150–210 F g⁻¹ dan jendela tegangan 1 V (sel dua elektroda dalam KOH 6 M). Proyeksi retensi siklus $\geq 85\%$ setelah 1000 siklus merupakan estimasi konservatif berdasarkan mekanisme EDLC yang dominan yang secara inheren lebih reversibel, dan berdasarkan bukti stabilitas *binder* biopolimer dari Landi *et al.* (2022a) dan Landi *et al.* (2022b). Faktor risiko utama yang dapat menurunkan retensi adalah degradasi hidrolisis rantai pati dalam elektrolit KOH 6 M pada [U18] suhu operasi tinggi. Hipotesis ini perlu diverifikasi secara eksperimental.

4.5 Analisis Ekonomi dan Dampak Lingkungan ECO-CAP

Analisis biaya produksi ECO-CAP dilakukan berdasarkan data harga pasar bahan baku per April 2026. Komponen biaya karbon aktif per kilogram: (a) ban bekas bernilai Rp 0 atau negatif karena berstatus limbah; (b) KOH aktivasi Rp 30.000–40.000/kg $\times$ rasio 3:1 = Rp 90.000–120.000/kg AC; (c) energi furnace Rp 15.000–25.000/kg AC; (d) overhead dan bahan pendukung Rp 20.000–30.000/kg AC. Total: Rp 125.000–175.000/kg, atau 8–22% dari harga karbon aktif dengan grade elektroda komersial memiliki harga berkisar Rp 4.500.000/unit berdasarkan Merck (2026). Dzikunu *et al.* (2025) dalam konteks serupa mengonfirmasi bahwa *waste-derived electrode materials* secara konsisten menawarkan keunggulan biaya signifikan.

Tabel 4.5 Analisis biaya komparatif komponen elektroda ECO-CAP vs sistem konvensional (per kilogram)

Komponen Biaya	Sistem Konvensional (Rp/kg)	Sistem ECO-CAP (Rp/kg)	Penghematan Estimasi
Material aktif (karbon aktif)	4.500.000/unit	125.000–175.000	~96–97% lebih murah
<i>Binder</i> (PVDF vs pati kanji)	800.000–2.000.000	8.000–15.000	~99% lebih murah
Pelarut (NMP vs akuades)	200.000–350.000/L	0–1/L	~100% lebih murah

Total komponen elektroda (estimasi)	2.000.000–5.000.000	150.000–300.000	Penghematan 85–94%
-------------------------------------	---------------------	-----------------	--------------------

Dari perspektif lingkungan, skenario implementasi ECO-CAP pada skala nasional menunjukkan potensi signifikan. Berdasarkan data BPS (2023) tentang pertumbuhan kendaraan bermotor di Indonesia, volume limbah ban terus meningkat. Jika 1% dari total limbah ban (± 4.500 ton/tahun) dikonversi menjadi karbon aktif dengan *yield* pirolisis 40% dan *yield* aktivasi 55%, maka dihasilkan sekitar 990 ton karbon aktif elektroda per tahun. Ini merepresentasikan nilai ekonomi yang substansial, sekaligus mengurangi beban pengelolaan limbah padat yang saat ini masih menjadi persoalan di banyak daerah (Egun *et al.*, 2024; Dzikunu *et al.*, 2025).

4.6 Celah Penelitian dan Rekomendasi Validasi Eksperimental

Kajian literatur sistematis ini mengidentifikasi celah penelitian yang harus diisi melalui validasi eksperimental. Celah pertama dan paling mendesak adalah tidak adanya data performa langsung untuk pati kanji (*cassava starch*) sebagai binder elektroda superkapasitor. Semua studi yang mengkaji biopolimer sebagai binder menggunakan CMC, gelatin, kitosan, atau kasein (Landi *et al.*, 2022a; Landi *et al.*, 2022b). Uji eksperimental *head-to-head* antara AC-KB/pati kanji vs AC-KB/CMC vs AC-KB/PVDF akan menjadi kontribusi ilmiah yang sangat berarti.

Celah kedua adalah tidak adanya studi yang secara spesifik mengombinasikan karbon aktif dari ban bekas dengan green binder berbasis air dalam satu sistem terintegrasi untuk superkapasitor. Celah ketiga adalah kurangnya data stabilitas jangka panjang (>10.000 siklus) untuk kombinasi ini. Celah keempat adalah tidak adanya studi *Life Cycle Assessment* (LCA) yang komprehensif untuk sistem ECO-CAP. Keempat celah ini secara bersama mendefinisikan agenda penelitian eksperimental lanjutan yang sangat jelas dan bernilai tinggi.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan kajian literatur sistematis yang telah dilakukan terhadap artikel *primer open access* dari rentang tahun 2022–2026, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Pirolisis limbah ban bekas pada suhu 700–800°C yang diikuti dengan aktivasi KOH (rasio 1:2 hingga 1:4) secara konsisten menghasilkan material elektroda dengan karakteristik fisikokimia yang unggul. Karakteristik tersebut meliputi luas permukaan spesifik (SBET) sebesar 100–1200 m² g⁻¹, struktur pori hierarki mikro-meso, serta keberadaan doping heteroatom S/N

alami. Kombinasi ini memberikan keunggulan pada peningkatan konduktivitas material dan memberikan kontribusi pseudokapasitif yang signifikan.

2. Mekanisme pati kanji singkong sebagai *green bio-binder* bertumpu pada pembentukan ikatan hidrogen yang kuat antara gugus -OH dari amilosa-amilopektin dengan permukaan fungsional karbon aktif, menghasilkan performa mekanik elektroda yang stabil dengan karakteristik yang sepadan dengan CMC (analog terdekatnya). Keunggulan ilmiahnya dibandingkan binder PVDF konvensional terletak pada sifatnya yang ramah lingkungan dan aman, sehingga mampu mengeliminasi penggunaan pelarut beracun (seperti NMP pada PVDF) dari rantai produksi fabrikasi elektroda superkapasitor. ECO-CAP *Novelty* terletak pada penggunaan spesifik pati singkong yang belum diuji dalam literatur yang ada.
3. Berdasarkan analisis komparatif material analogus dari literatur, proyeksi performa elektrokimia superkapasitor ECO-CAP memiliki posisi yang sangat kompetitif dibandingkan dengan *state-of-the-art* sistem karbon aktif dari *biowaste* lainnya. ECO-CAP diproyeksikan mampu menghasilkan kapasitas spesifik (C_s) sebesar 150–210 F g⁻¹ pada rapat arus 1 A g⁻¹, densitas energi 18–30 Wh kg⁻¹, densitas daya 300–600 W kg⁻¹, serta retensi siklus yang stabil mencapai $\geq 85\%$ setelah 1000 siklus pengujian.
4. Analisis ekonomi menunjukkan potensi penghematan biaya produksi elektroda 85–94% dibandingkan dengan sistem konvensional. ECO-CAP secara holistik mengimplementasikan prinsip ekonomi sirkular dengan mengonversi limbah ban menjadi perangkat penyimpanan energi bernilai tinggi sekaligus mengeliminasi bahan berbahaya dari rantai produksi, berkontribusi pada SDGs 3, 7, dan 12.

5.2 Saran

Berdasarkan celah penelitian yang teridentifikasi, langkah-langkah berikut direkomendasikan:

1. Studi eksperimental *head-to-head* antara elektroda AC- KB/pati kanji, AC-KB/CMC, dan AC-KB/PVDF dalam kondisi identik untuk mengkuantifikasi pengaruh spesifik *binder* pati kanji terhadap performa elektrokimia;
2. Optimasi kondisi gelatinisasi pati kanji (konsentrasi 1–5% w/v) untuk mendapatkan viskositas *slurry* optimal;
3. Uji stabilitas hidrolisis *binder* pati kanji dalam elektrolit KOH 6 M pada suhu 25–60°C selama minimal 100 jam;
4. Perbandingan pati singkong dengan pati lain yang tersedia lokal (sagu, maizena) untuk mengidentifikasi sumber optimal; dan
5. Analisis *Life Cycle Assessment* komparatif antara ECO-CAP dan superkapasitor konvensional.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Pusat Statistik [BPS]. (2023). Statistik transportasi darat 2023. Jakarta: BPS Indonesia. Diakses dari <https://www.bps.go.id>
- Brandão, A.T.S.C., State, S., Costa, R., Potorac, P., Vázquez, J.A., Valcarcel, J., Silva, A.F., Anicai, L., Enachescu, M., & Pereira, C.M. (2023). Renewable carbon materials as electrodes for high-performance supercapacitors: From marine biowaste to high specific surface area porous biocarbons. *ACS Omega*, 8(21), 18782–18798. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c00816>
- Dzikunu, P., Appiah, E.S., Arthur, E.K., Akinwamide, S.O., Gikunoo, E., Fangnon, E.A.K., Mensah-Darkwa, K., Andrews, A., & Vilaça, P. (2025). Waste-to- carbon-based supercapacitors for renewable energy storage: Progress and future perspectives. *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, 14(1), 8. <https://doi.org/10.1007/s40243-024-00285-4>
- Egun, I.L., Liu, Z., Zheng, Y., Wang, Z., Song, J., Hou, Y., Lu, J., Wang, Y., & Chen, Z. (2024). Turning waste tyres into carbon electrodes for batteries: Exploring conversion methods, material traits, and performance factors. *Carbon Energy*, 6(11), e571. <https://doi.org/10.1002/cey2.571>
- Landi, G., La Notte, L., Palma, A.L., Sorrentino, A., Maglione, M.G., & Puglisi, G. (2022a). A comparative evaluation of sustainable binders for environmentally friendly carbon-based supercapacitors. *Nanomaterials*, 12(1), 46. <https://doi.org/10.3390/nano12010046>
- Landi, G., La Notte, L., Palma, A.L., Sorrentino, A., Maglione, M.G., & Puglisi, G. (2022b). Electrochemical performance of biopolymer-based hydrogel electrolyte for supercapacitors with eco-friendly binders. *Polymers*, 14(20), 4445. <https://doi.org/10.3390/polym14204445>
- Wirianto, B., Rambe, S.M., & Fauzia, V. (2025). Supercapacitor electrodes based on biowaste. *Discover Electrochemistry*, 2(1), 45. <https://doi.org/10.1007/s44373-025-00045-7>
- Zerin, N.H., Rasul, M.G., Jahirul, M.I., & Sayem, A.S.M. (2023). End-of-life tyre conversion to energy: A review on pyrolysis and activated carbon production processes and their challenges. *Science of the Total Environment*, 905, 166981. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166981>
- Zerin, N.H., Rasul, M.G., Jahirul, M.I., Sayem, A.S.M., & Haque, R. (2024). Electrochemical application of activated carbon derived from end-of-life tyres: A technological review. *Sustainability*, 16(1), 47. <https://doi.org/10.3390/su16010047>
- Zhu, X., Zeng, Y., Zhao, X., Liu, D., Lei, W., & Lu, S. (2025). Biomass-derived carbon and their composites for supercapacitor applications: Sources, functions, and mechanisms. *EcoEnergy*, 3(3), e70000. <https://doi.org/10.1002/ece2.70000>

