

Pengembangan Elektroda Superkapasitor Berbasis Mangan Oksida dengan Bantuan Ekstrak Alga Coklat (

1st Nur Hidayah Agustina
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

hidaaagustina@student.telkomuniversit
y.ac.id

2nd Indra Wahyudhin Fathona
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

indrafathonah@telkomuniversity.ac.id

3rd Abrar Ismadi
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

abarselah@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Penyimpanan energi berbasis superkapasitor menjadi alternatif yang menjanjikan dibandingkan kapasitor konvensional, namun pengembangan elektroda ramah lingkungan masih menjadi tantangan. Penelitian ini bertujuan untuk menyintesis elektroda superkapasitor berbasis mangan oksida (MnOx) dengan memanfaatkan ekstrak bioaktif alami sebagai agen pengkelat dan pereduksi. Bahan alami yang digunakan meliputi alga coklat (*Sargassum sp.*), belimbing wuluh (*Averrhoa bilimbi*), jahe putih (*Zingiber officinale*), kulit jeruk (*Citrus aurantifolia*), kulit manggis (*Garcinia mangostana*), kulit pisang (*Musa paradisiaca*), dengan prekursor utama MnCl₂ serta tambahan TETA (*triethylenetetramine*) untuk membantu proses kompleksasi ion Mn²⁺. Sintesis dilakukan melalui metode inkubasi, kemudian sampel dikarakterisasi menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM), *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (EDS), dan *Particle Size Analyzer* (PSA), serta diuji performa elektrokimianya melalui *Cyclic Voltammetry* (CV). Hasil analisis menunjukkan bahwa alga coklat, belimbing wuluh, dan kulit pisang mampu mengikat mangan lebih dari 20% dari berat, sedangkan jahe putih, kulit manggis, dan kulit jeruk menunjukkan pengikatan di bawah 2% dari berat. Uji elektrokimia menunjukkan nilai kapasitansi spesifik sebesar 113,32 F/g untuk alga coklat, 11,58 F/g untuk belimbing wuluh, dan 8,97 F/g untuk kulit pisang. Temuan ini membuktikan bahwa pemanfaatan bioaktif berpotensi meningkatkan kinerja elektroda MnOx melalui mekanisme psidokapasitansi, sehingga dapat dikembangkan sebagai material aktif yang ramah lingkungan untuk aplikasi superkapasitor.

Kata kunci— Superkapasitor, Kapasitansi Spesifik, MnOx, Bahan Alami, TETA

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi yang terus meningkat menuntut pengembangan teknologi penyimpanan energi yang lebih efisien, ramah lingkungan, dan berkelanjutan. Superkapasitor menjadi salah satu perangkat penyimpanan energi yang menjanjikan karena memiliki keunggulan berupa daya yang tinggi, waktu pengisian cepat, serta siklus hidup yang lebih panjang dibandingkan baterai konvensional. Namun demikian, kapasitansi spesifik superkapasitor masih terbatas, terutama pada material elektroda berbasis karbon yang hanya

mengandalkan mekanisme *electric double layer capacitance* (EDLC). Oleh karena itu, pengembangan material elektroda dengan kinerja lebih tinggi melalui mekanisme *pseudocapacitance* menjadi fokus penelitian terkini.

Berbagai penelitian telah menunjukkan pemanfaatan bahan alam sebagai prekursor elektroda superkapasitor. Putri (2022) melaporkan elektroda berbasis kulit manggis dengan kapasitansi spesifik 41,6 F/g, sementara Dhelipan et al. (2016) melaporkan kapasitansi 275 F/g dari kulit jeruk. Penelitian oleh Sasongko (2023) menunjukkan bahwa alga coklat menghasilkan kapasitansi sebesar 20,86 F/g, sedangkan Utami (2020) melaporkan nilai 43,1 F/g untuk kulit pisang. Selain itu, Ajeng et al. (2020) melaporkan kapasitansi 37,842 F/g pada elektroda jahe putih. Studi-studi tersebut menunjukkan bahwa bioaktif alami memiliki potensi untuk meningkatkan performa elektroda melalui keberadaan gugus fungsi yang dapat berinteraksi dengan ion logam.

Meskipun demikian, pemanfaatan berbagai sumber bioaktif masih menghadapi tantangan. Tidak semua bahan mampu mengikat ion logam secara efektif, dan kestabilan material elektroda sering kali masih rendah. Dengan demikian, permasalahan utama dalam penelitian ini adalah bagaimana memanfaatkan bioaktif alami untuk meningkatkan kapasitansi spesifik elektroda berbasis mangan oksida (MnOx), serta menentukan bahan yang paling potensial dalam meningkatkan performa melalui mekanisme *pseudocapacitance*.

Penelitian ini bertujuan untuk menyintesis elektroda superkapasitor berbasis MnOx dengan bantuan ekstrak bioaktif dari alga coklat, belimbing wuluh, jahe putih, kulit jeruk, kulit manggis, dan kulit pisang. Proses sintesis dilakukan menggunakan metode inkubasi dengan MnCl₂ sebagai sumber ion logam dan ekstrak bahan alami sebagai agen pengkelat dan pereduksi. Elektroda yang dihasilkan dikarakterisasi menggunakan SEM, EDS, dan PSA, serta diuji performa elektrokimianya melalui uji *Cyclic Voltammetry* (CV) untuk mengevaluasi pengaruh masing-masing bioaktif terhadap distribusi unsur dan kapasitansi spesifik elektroda.

II. KAJIAN TEORI

A. Superkapasitor

Superkapasitor merupakan perangkat penyimpanan energi dengan mekanisme kerja berbeda dengan kapasitor konvensional. Energi disimpan melalui mekanisme utama, yaitu *electric double layer capacitance* (EDLC) yang melibatkan akumulasi ion pada permukaan elektroda dan *pseudocapacitance* yang melibatkan reaksi redoks permukaan. Mangan oksida (MnO_x) merupakan salah satu material elektroda superkapasitor yang menjanjikan karena memiliki mekanisme pseudokapasitansi melalui reaksi redoks reversibel. Conway [1] melaporkan bahwa MnO_2 dengan struktur dan morfologi terkontrol mampu mencapai kapasitansi spesifik 220–260 F/g pada elektrolit KOH 0,5–1 M, bahkan dapat melampaui nilai tersebut. Temuan ini menjadi acuan penting dalam penelitian pengembangan elektroda berbasis MnO_x dengan target kapasitansi ≥ 200 F/g. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa pemanfaatan senyawa bioaktif alami, seperti polifenol dan flavonoid, dapat menghasilkan struktur nano MnO_x dengan luas permukaan besar sehingga kapasitansinya meningkat signifikan, bahkan dilaporkan mencapai 300–500 F/g [2][3]. Dengan demikian, penggunaan bioaktif dalam sintesis MnO_x dinilai relevan untuk mendukung pencapaian target performa elektroda ramah lingkungan.

B. MnCl_2 dan NaOH sebagai prekursor Ion Logam

MnCl_2 merupakan garam mangan yang umum digunakan sebagai prekursor dalam sintesis material mangan oksida. Pada kondisi basa dengan adanya NaOH, ion Mn^{2+} mengalami reaksi presipitasi dan oksidasi membentuk senyawa MnO_x [4]. Reaksi ini dapat dipengaruhi oleh pH, konsentrasi prekursor, dan keberadaan senyawa pengkelat, sehingga memengaruhi ukuran, morfologi, dan kristalinitas partikel yang terbentuk [5].

C. Senyawa Bioaktif sebagai Agen Pengkelat dan Pereduksi

Ekstrak bahan alami seperti alga coklat, belimbing wuluh, jahe putih, kulit jeruk, kulit manggis, dan kulit pisang diketahui mengandung senyawa bioaktif seperti polifenol, flavonoid, tanin, serta asam organik. Senyawa-senyawa ini berperan sebagai agen pengkelat Mn^{2+} sekaligus pereduksi dalam proses sintesis MnO_x [6]. Kehadiran bioaktif mampu mengontrol pertumbuhan kristal, memperkecil ukuran partikel, serta meningkatkan luas permukaan, sehingga mendukung terbentuknya elektroda dengan kapasitansi spesifik lebih tinggi.

D. Sintesis Nanopartikel MnO_x

MnO_x dapat disintesis melalui berbagai metode seperti hidrotermal, presipitasi, maupun *sol-gel*. Dalam penelitian ini digunakan metode inkubasi sederhana tanpa autoclave, di mana campuran prekursor MnCl_2 , NaOH, dan bioaktif dibiarkan bereaksi semalaman hingga terbentuk endapan MnO_x . Metode ini termasuk ramah lingkungan, tidak membutuhkan energi tinggi, serta memungkinkan pemanfaatan biomassa alami sebagai agen sintesis.

E. *Triethylenetetramine* (TETA) sebagai Agen Stabilisasi

Triethylenetetramine (TETA) adalah senyawa organik poliamina dengan empat gugus amina yang memiliki

kemampuan kuat dalam mengikat ion logam. Dalam sintesis elektroda, TETA digunakan setelah endapan MnO_x terbentuk untuk membantu proses stabilisasi ion Mn^{2+} dan mencegah aglomerasi partikel. TETA juga meningkatkan homogenitas pasta aktif yang dilapiskan pada substrat stainless steel, sehingga menghasilkan elektroda yang lebih stabil dan konduktif [7].

F. Pengujian Elektrokimia berupa *Cyclic Voltammetry*

Uji elektrokimia dilakukan untuk mengevaluasi performa elektroda dalam menyimpan energi. Metode *Cyclic Voltammetry* (CV) digunakan untuk menentukan nilai kapasitansi spesifik, kestabilan, serta mekanisme penyimpanan muatan baik melalui EDLC maupun pseudokapasitansi. Rumus yang diterapkan untuk mengetahui nilai kapasitansi dengan CV yaitu:

$$C = \frac{1}{m\Delta V} \int_{V_i}^{V_f} I dV \quad (1)$$

Dimana:

C	: Kapasitansi Spesifik (F/g)
m	: Massa (g)
ΔV	: Rentang Potensial (V)
v	: Scanrate (mV/s)
I	: Arus (A)
V_i	: Batas awal potensial (V)
V_f	: Batas akhir potensial (V)

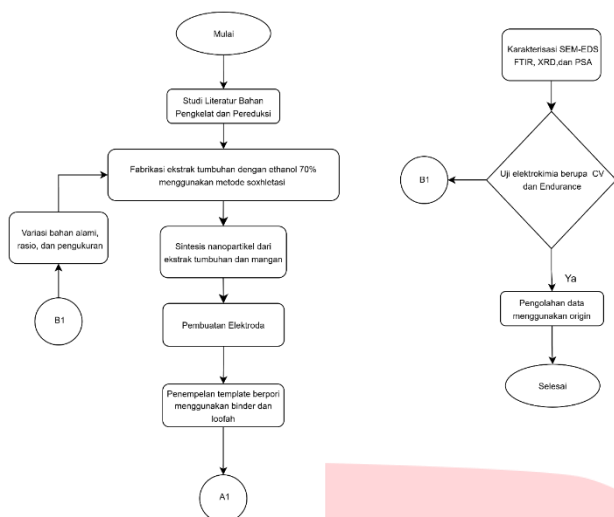
G. Karakterisasi Fisis dan Kimia berupa SEM-EDS dan PSA

Karakterisasi dilakukan untuk mengetahui struktur, morfologi, dan distribusi unsur pada material elektroda. Scanning Electron Microscopy (SEM) digunakan untuk mengamati morfologi, Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) untuk menganalisis komposisi unsur, serta Particle Size Analyzer (PSA) untuk mengetahui distribusi ukuran partikel [56]. Hasil karakterisasi menjadi dasar dalam menjelaskan keterkaitan antara struktur material dengan performa elektrokimia.

$$\text{Weight \%} = \frac{\text{berat unsur}}{\text{berat total elemen dalam sampel}} \times 100\% \quad (2)$$

III. METODE

Dalam Pembuatan elektroda superkapasitor menggunakan bahan utama berupa mangan klorida tetrahidrat ($\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) sebagai sumber ion logam Mn serta ekstrak bioaktif dari alga coklat (*Sargassum sp.*), belimbing wuluh (*Averrhoa bilimbi*), jahe putih (*Zingiber officinale*), kulit jeruk (*Citrus aurantifolia*), kulit manggis (*Garcinia mangostana*), dan kulit pisang (*Musa paradisiaca*). Mekanisme kerja dalam penelitian ini dapat dilihat pada flowchart penelitian di gambar 1(A).



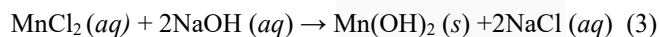
Gambar 1(A) Flowchart Penelitian

A. Ekstraksi Phitochemical Bahan Alami

Bahan alami diekstrak menggunakan metode sokhletasi dengan komposisi bahan alami yang diekstrak seberat 30 gram dan pelarut etanol 70% dengan volume 375 ml. Ekstraksi dilakukan selama kurang lebih 12 jam, hingga larutan pada tabung reaksi berwarna jernih yang menandakan proses ekstraksi telah selesai. Ekstrak kemudian di filtrasi untuk menghilangkan residu hingga menghasilkan filtrat yang digunakan sebagai agen pengkelat dan pereduksi.

B. Sintesis Nanopartikel MnOx

Larutan MnCl_2 dicampur dengan NaOH untuk menghasilkan larutan Mangan yang basa di pH 8,00-9,00. Pencampuran larutan ini menyebabkan terjadinya interaksi senyawa akibat proses pertukaran ion dimana:



Mn(OH)_2 yang terbentuk bersifat tidak stabil dan mudah mengalami oksidasi pada udara yang menghasilkan MnOx . Larutan tersebut kemudian dicampur dengan ekstrak bahan alami dengan perbandingan 1:3 (50 ml untuk $\text{MnCl}_2 + \text{NaOH}$ dan 150 ml untuk filtrat bahan alami). Pencampuran dilakukan dengan metode titrasi dan dikondisikan dengan pengadukan konstan pada stirrer di kecepatan 400-600 rpm. Setelah titrasi selesai, prekursor kemudian di inkubasi selama 24 jam di kondisi tertutup hingga menghasilkan endapan MnOx . Endapan yang terbentuk tersebut dipisahkan dari pelarut dan dicuci sebanyak 3 kali menggunakan akuades untuk menghilangkan sisa-sisa senyawa yang terlarut seperti pada gambar.



Gambar 1(B) Hasil Sentrifugasi

C. Elektroda Superkapasitor

Endapan hasil sintesis MnOx kemudian diambil dan dicampurkan dengan TETA untuk membantu proses stabilisasi ion Mn^{2+} dengan perbandingan 2:1 (40 mikropipet untuk endapan dan 20 mikropipet untuk TETA) hingga membentuk pasta. Pasta tersebut kemudian di lapiskan pada substrat konduktif berupa stainless steel dengan metode coating sederhana. Elektroda kemudian dikeringkan pada suhu 100 derajat Celcius pada hotplate selama 40 menit hingga elektroda menempel sempurna pada plat seperti pada gambar 1(C).

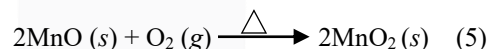


Gambar 1(C) Elektroda hasil pembakaran

Pada tahap ini terjadi reaksi kimia pembakaran endapan $\text{Mn(OH)}_2(s)$ yang dihasilkan membentuk partikel MnOx yang telah terbentuk dibakar untuk menghilangkan air. Reaksi kimia dari pembakaran Mn(OH)_2 dapat dilihat pada persamaan (4):



Mangan (II) oksida (MnO) yang telah terbentuk kemudian akan bereaksi lebih lanjut dengan oksigen untuk membentuk oksida mangan MnO_2 , yang dapat dilihat pada persamaan reaksi (5):



D. Pengukuran Elektrokimia

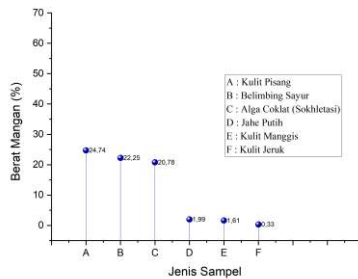
Hasil elektroda selanjutnya di uji elektrokimia berupa Cyclic Voltammetry guna mengetahui nilai kapasitansi yang dihasilkan. Pada pengujian ini, dilakukan juga beberapa variasi guna memaksimalkan hasil kapasitansi yang dapat terukur oleh elektroda. Variasi tersebut diantaranya berupa pengujian dari variasi bahan alami, variasi scanrate dan variasi massa elektroda. Hasil terbaik dari variasi tersebut akan dijadikan acuan dalam pelaksanaan variasi berikutnya untuk mendapatkan hasil yang maksimal. Dalam pengukuran CV, elektrolit yang digunakan berupa Na_2SO_4 dengan

E. Karakterisasi fisis dan kimia

Selain dilakukan pengujian elektrokimia, dilakukan juga karakterisasi sampel dalam segi fisis dan kimia. Karakterisasi yang dilakukan mencakup SEM-EDS dan juga PSA. Karakterisasi SEM-EDS dilakukan untuk mengetahui struktur morfologi sampel elektroda dan kandungan unsur Mangan pada sampel hasil green synthesis, sedangkan karakterisasi PSA berfungsi untuk mengetahui rata-rata ukuran partikel pada tiap sampel.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

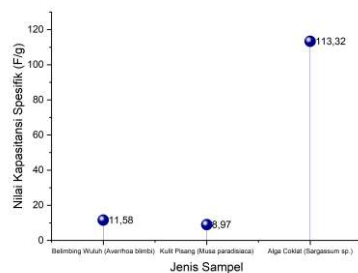
Tahap awal dilakukan pengujian EDS untuk mengetahui distribusi kandungan mangan pada setiap sampel bahan alami. Hasilnya terdapat pada gambar 2(A) sebagai berikut:



Gambar 2 (A) Distribusi Kandungan Mangan tiap sampel

Hasil menunjukkan bahwa alga coklat (*Sargassum sp.*), belimbing wuluh (*Averrhoa bilimbi*), dan kulit pisang (*Musa paradisiaca*) mampu mengikat mangan lebih dari 20% berat, sedangkan jahe putih (*Zingiber officinale*), kulit manggis (*Garcinia mangostana*), dan kulit jeruk (*Citrus aurantifolia*) menunjukkan kandungan Mn di bawah 2% berat. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa bioaktif dengan kandungan polifenol tinggi lebih efektif dalam mengompleksasi ion Mn^{2+} sehingga meningkatkan deposisi $MnOx$ pada permukaan elektroda.

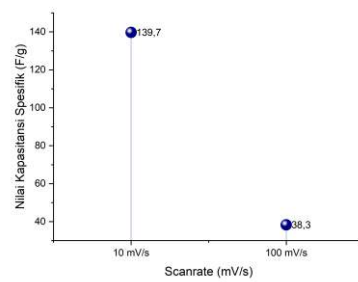
Sampel dengan nilai kandungan mangan diatas 20% berat selanjutnya dibuat elektroda untuk mengetahui nilai kapasitansi yang dihasilkan pada gambar berikut :



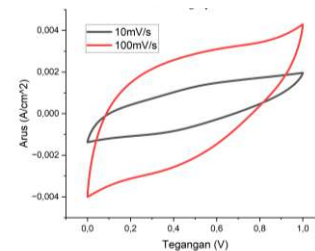
Gambar 2 (B) Perbandingan Nilai Kapasitansi tiap Sampel

Gambar 2(B) menunjukkan besarnya kapasitansi spesifik dari elektroda kerja seberat 1 mg dengan bahan mangan menggunakan bahan pengkelat dan pereduksi alami menggunakan belimbing sayur (*Averrhoa bilimbi*), kulit pisang (*Musa paradisiaca*), dan alga coklat (*Sargassum sp.*). Dari ketiga jenis ekstrak bahan alami tersebut didapatkan *Sargassum sp.* Memiliki nilai kapasitansi spesifik terbesar yakni 113,32 F/g. dibandingkan dengan belimbing sayur (*Averrhoa bilimbi*) 11,58 F/g dan kulit pisang (*Musa paradisiaca*) 8,97 F/g. Maka dari itu, penelitian ini dilanjutkan dengan memperdalam sampel elektroda superkapasitor dengan menggunakan ekstrak alga coklat (*Sargassum sp.*) sebagai bahan pegkelat dan pereduksi alami.

Variasi *Scanrate* pada sampel elektroda kerja superkapasitor adalah untuk mengetahui varian *scan rate* yang tertinggi untuk pengujiannya. Sampel elektroda dengan nilai tertinggi pada pengujian yakni sampel alga coklat (*Sargassum sp.*) dengan penambahan TETA dan massa elektroda 1 mg dilakukan pengujian variasi *scan rate*. Variasi *scan rate* yang digunakan adalah 10, dan 100 mV/s. Gambar 2(C) perbandingan nilai kapasitansi dan Gambar 2(D) kurva *cyclic voltammetry* dengan variasi *scan rate*.



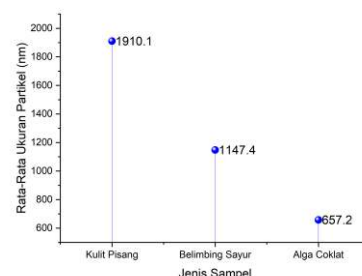
Gambar 2 (C) Perbandingan Nilai Kapasitansi Variasi Scanrate sampel Alga Coklat + TETA



Gambar 2 (D) Perbandingan Kurva CV terhadap variasi Scanrate Alga Coklat + TETA

Gambar 2(C) dan Gambar 2(D) menunjukkan hasil pengujian Cyclic Voltammetry (CV) pada variasi scan rate 10 mV/s dan 100 mV/s. Kapasitansi spesifik tertinggi diperoleh pada scan rate 10 mV/s sebesar 139,70 F/g, sedangkan pada scan rate 100 mV/s hanya 38,30 F/g. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan scan rate menyebabkan penurunan nilai kapasitansi spesifik, karena ion elektrolit tidak memiliki cukup waktu untuk berinteraksi secara optimal dengan permukaan elektroda. Sebaliknya, pada scan rate rendah, ion elektrolit dapat berpenetrasi lebih baik ke dalam pori elektroda, sehingga menghasilkan kapasitansi yang lebih tinggi. Dengan demikian, scan rate berbanding terbalik dengan nilai kapasitansi spesifik elektroda superkapasitor.

Selain EDS dilakukan karakterisasi Particle Size Analyzer (PSA) untuk mengetahui rata-rata ukuran hasil proses sintesis $MnOx$. Perbandingan ukuran dapat dilihat pada grafik berikut:

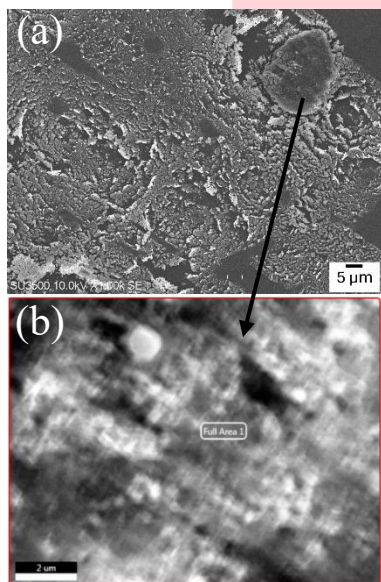


Gambar 2 (E) Perbandingan rata-rata ukuran partikel dari sampel dengan kandungan mangan diatas 20%

Gambar 2(E) menunjukkan hasil analisis ukuran partikel rata-rata dari tiga jenis sampel bioaktif. Sampel kulit pisang memiliki ukuran partikel terbesar, yaitu 1910,1 nm, diikuti belimbing wuluh dengan 1147,4 nm, dan alga coklat dengan

ukuran partikel terkecil yaitu 657,2 nm. Hasil ini memperlihatkan bahwa alga coklat lebih efektif dalam menghasilkan partikel berukuran kecil dan relatif seragam dibandingkan sampel lain. Ukuran partikel yang lebih kecil berpotensi meningkatkan luas permukaan aktif sehingga mendukung kinerja elektrokimia yang lebih baik pada aplikasi superkapasitor. Sebaliknya, ukuran partikel yang lebih besar pada kulit pisang dan belimbing wuluh mengindikasikan adanya aglomerasi yang dapat menurunkan stabilitas serta efektivitas material sebagai elektroda.

Hasil kapasitansi tertinggi yaitu elektroda alga coklat kemudian dikarakterisasi SEM-EDS untuk menunjukkan morfologi permukaan berpori dengan distribusi partikel anorganik yang relatif homogen. Pada perbesaran tinggi terlihat adanya pori-pori mikro berukuran sekitar 100–200 nm yang berfungsi sebagai jalur transportasi ion elektrolit. Struktur ini mendukung terbentuknya mekanisme pseudokapasitansi, yang selaras dengan hasil pengujian CV sebelumnya.



Element	Weight %
C K	57.22
O K	21.77
ClK	0.23
MnK	20.78

Gambar 2 (E) Hasil SEM pada perbesaran 10000x(a), Spot area pengujian EDS (b) dan kandungan unsur spot area EDS

Hasil uji SEM pada gambar 4.24 dengan sampel alga coklat (*Sargassum sp.*) dan $MnCl_2$ di pH 8,00-9,00 menunjukkan morfologi elektroda hasil sintesis $MnOx$ dengan perbesaran 10000x. Gambar 2(E)(a) menunjukkan adanya aglomerasi partikel yang berukuran mikrometer.

Analisis EDS pada daerah tembak (*spot area*) yang ditunjukkan pada gambar 2(E) menunjukkan keberadaan unsur Karbon (C) sebesar 57,22% *weight*, oksigen (O) sebesar 21,77% *weight*, mangan (Mn) sebesar 20,78%

weight, dan klorin (Cl) sebesar 0,23% *weight*. Hasil analisis EDS menunjukkan bahwa unsur karbon terdeteksi tinggi, yang dapat disebabkan oleh dua faktor utama. Pertama, daerah tembak yang dipilih untuk pengujian EDS berada pada daerah yang memiliki kandungan unsur karbon yang tinggi. Kedua, bentuk sampel yang berupa suspensi endapan memberikan area permukaan terbuka, sehingga unsur karbon mudah diidentifikasi.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa alga coklat merupakan bioaktif paling potensial dalam meningkatkan deposisi $MnOx$ dan performa elektrokimia elektroda. Hal tersebut menegaskan bahwa pemanfaatan biomassa kaya polifenol dapat menjadi strategi ramah lingkungan dalam pengembangan material aktif superkapasitor.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil menyintesis elektroda superkapasitor berbasis mangan oksida ($MnOx$) dengan bantuan ekstrak bioaktif alami yang berperan sebagai agen pengkelat dan pereduksi. Hasil karakterisasi EDS menunjukkan bahwa alga coklat, belimbing wuluh, dan kulit pisang mampu mengikat ion Mn di atas 20%, sedangkan jahe putih, kulit manggis, dan kulit jeruk menunjukkan pengikatan di bawah 2%. Analisis PSA memperlihatkan bahwa alga coklat menghasilkan ukuran partikel yang lebih kecil (657,2 nm) dibandingkan kulit pisang (1910,1 nm) dan belimbing wuluh (1147,4 nm), yang menunjukkan potensi lebih baik dalam meningkatkan luas permukaan aktif elektroda. Uji elektrokimia melalui Cyclic Voltammetry (CV) menunjukkan bahwa elektroda berbasis alga coklat memberikan kapasitansi spesifik tertinggi sebesar 113,32 F/g, diikuti belimbing wuluh sebesar 11,58 F/g, dan kulit pisang sebesar 8,97 F/g, sedangkan bahan lainnya menunjukkan nilai lebih rendah. Secara keseluruhan, pemanfaatan bioaktif alami terbukti mampu meningkatkan pembentukan $MnOx$ dengan karakteristik morfologi dan ukuran partikel yang mendukung kinerja elektrokimia, sehingga material ini berpotensi dikembangkan sebagai elektroda ramah lingkungan untuk aplikasi superkapasitor.

REFERENSI

- [1] B. Conway, *Electrochemical Supercapacitors: Scientific Fundamentals and Technological ...* - B. E. Conway - Google Books. 1999.
- [2] E. S. Appiah *et al.*, "Biopolymers-Derived Materials for Supercapacitors: Recent Trends, Challenges, and Future Prospects," 2022. doi: 10.3390/molecules27196556.
- [3] S. Unknown, P. Chand, and A. Joshi, "Biomass derived carbon for supercapacitor applications: Review," Jul. 01, 2021, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.est.2021.102646.
- [4] D. Yanti, "Jurnal Ayurveda Medistra PERBANDINGAN AKTIVITAS ANTIOKSIDAN DAN TOKSISITAS ANTARA DAGING BUAH, KULIT BAGIAN DALAM DAN KULIT BAGIAN LUAR BUAH MANGGIS (GARCINIA MANGOSTANA L.)." [Online]. Available: <http://ojs.stikesmedistra-indonesia.ac.id/>

- [5] M. Fadhil Safari, V. Maharani Patricia, L. Syafnir Prodi Farmasi, and F. Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, "Penelusuran Pustaka Kandungan Senyawa dari Ekstrak Kulit Pisang Raja (*Musa paradisiaca* var raja) dan Kulit Pisang Cavendish (*Musa cavendishii*) dalam Beberapa Aktivitas Farmakologi", doi: 10.29313/bcsp.v2i2.ID.
- [6] M. S. P. Mahardika and I. K. E. Wiratnyana Putera, "Kajian Pengembangan Metode Ekstraksi Soxhletasi Terhadap Kadar Antioksidan Ekstrak Daun Matoa (*Pomitea pinnata*) Menggunakan Spektrofotometer UV VIS," *JURNAL REKAYASA DAN MANAJEMEN AGROINDUSTRI*, vol. 11, no. 2, 2023, doi: 10.24843/jrma.2023.v11.i02.p13.
- [7] I. W. Fathona and A. Yabuki, "Mesh-like thin-film electrodes of manganese oxide with high specific capacitance synthesized via thermal decomposition of manganese formate-amine complexed ink," *Mater Res Bull*, vol. 112, pp. 346–353, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.materresbull.2019.01.004.

