



Pengaruh Modifikasi Polianilin terhadap Kinerja Elektrokimia Elektroda Reduced Graphene Oxide untuk Superkapasitor

Nina Aprilini^{1*}, Nur Hayati², Pratiwi Sanggusti³, Rahmat Hidayat⁴, Yahdi Bin Rus⁵

¹⁻⁵Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Padang, Indonesia

Email: ninaaprilini2@gmail.com¹, yahdi.bin.rus@brin.go.id⁵

*Penulis Korespondensi: ninaaprilini2@gmail.com

Abstract. Supercapacitors have attracted considerable attention as energy storage devices due to their high power density, rapid charge-discharge capability, and long cycle life. However, the relatively low capacitance of reduced graphene oxide (rGO) limits its electrochemical performance when used as a single electrode material. This study aimed to investigate the effect of polyaniline (PANI) deposition on rGO electrodes through an electrochemical deposition method using a 5 mM aniline solution. The rGO electrode was first prepared on a stainless-steel substrate, followed by PANI deposition using cyclic voltammetry within a potential window of -0.4 to $+0.4$ V at a scan rate of 100 mV s^{-1} for 10 cycles. The electrochemical performance of the fabricated electrodes was evaluated by cyclic voltammetry and cycling stability tests up to 1000 cycles. The cyclic voltammogram of the rGO/PANI electrode maintained a quasi-rectangular profile, indicating that the electrochemical deposition process produced an active electrode capable of charge storage. The specific capacitance of the rGO/PANI electrode reached 308.87 F g^{-1} , which was higher than that of pristine rGO at 240.88 F g^{-1} . Furthermore, the rGO/PANI electrode retained 67% of its initial capacitance after 1000 cycles, whereas pristine rGO retained only 49%. These results indicate that the incorporation of PANI improved both the specific capacitance and cycling stability of the electrode. The findings demonstrate that electrochemically deposited PANI is a promising approach for enhancing the electrochemical performance of rGO-based supercapacitor electrodes.

Keywords: Cyclic Voltammetry; Electrodeposition; Polyaniline; Reduced Graphene Oxide; Supercapacitor.

Abstrak. Superkapasitor merupakan salah satu perangkat penyimpanan energi yang banyak dikembangkan karena memiliki densitas daya tinggi, proses pengisian dan pengosongan muatan yang cepat, serta umur siklus yang panjang. Namun, penggunaan reduced graphene oxide (rGO) sebagai material elektroda tunggal masih memiliki keterbatasan pada nilai kapasitansi spesifik. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh deposisi polianilin (PANI) pada elektroda rGO melalui metode elektrodeposisi menggunakan larutan anilin berkonsentrasi 5 mM. Elektroda rGO terlebih dahulu dipersiapkan pada substrat stainless steel, kemudian dilakukan deposisi PANI menggunakan metode cyclic voltammetry pada rentang potensial $-0,4$ hingga $+0,4$ V dengan laju pindai 100 mV s^{-1} selama 10 siklus. Performa elektrokimia elektroda yang dihasilkan dievaluasi menggunakan pengujian cyclic voltammetry, kapasitansi spesifik, dan stabilitas siklus hingga 1000 siklus. Kurva cyclic voltammetry elektroda rGO/PANI menunjukkan bentuk kuasi-persegi yang tetap terjaga, menandakan bahwa proses elektrodeposisi menghasilkan elektroda yang mampu menyimpan muatan secara elektrokimia. Nilai kapasitansi spesifik elektroda rGO/PANI mencapai $308,87 \text{ F g}^{-1}$, lebih tinggi dibandingkan elektroda rGO sebesar $240,88 \text{ F g}^{-1}$. Selain itu, elektroda rGO/PANI mempertahankan retensi kapasitansi sebesar 67% setelah 1000 siklus, sedangkan elektroda rGO hanya mempertahankan 49% dari kapasitansi awalnya. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan lapisan PANI melalui metode elektrodeposisi mampu meningkatkan kapasitansi spesifik sekaligus mempertahankan stabilitas siklus elektroda berbasis rGO, sehingga berpotensi untuk dikembangkan sebagai material elektroda superkapasitor.

Kata kunci: Elektrodeposisi; Cyclic Voltammetry; Polianilin; Reduced Graphene Oxide; Superkapasitor

1. LATAR BELAKANG

Perkembangan teknologi penyimpanan energi terus meningkat seiring dengan kebutuhan perangkat elektronik portabel, kendaraan listrik, dan sistem energi terbarukan. Salah satu perangkat penyimpanan energi yang banyak dikembangkan adalah superkapasitor karena memiliki densitas daya yang tinggi, waktu pengisian yang cepat, efisiensi tinggi, serta umur siklus yang panjang dibandingkan baterai konvensional (Yu et al. 2023; Habib et al., 2023). Meskipun demikian, superkapasitor masih memiliki keterbatasan berupa densitas energi yang

relatif rendah sehingga pengembangan material elektroda dengan performa elektrokimia yang lebih baik menjadi fokus utama berbagai penelitian.

Reduced graphene oxide (rGO) merupakan salah satu material karbon yang banyak digunakan sebagai elektroda superkapasitor karena memiliki konduktivitas listrik tinggi, luas permukaan spesifik yang besar, stabilitas kimia yang baik, serta mampu menyimpan muatan melalui mekanisme *electrical double-layer capacitance* (EDLC). Akan tetapi, penggunaan rGO secara tunggal masih memiliki kelemahan berupa terjadinya *restacking* antarlembar graphene akibat gaya van der Waals yang menyebabkan berkurangnya luas permukaan aktif, menghambat difusi ion elektrolit, dan menurunkan kapasitas spesifik elektroda. Oleh karena itu, berbagai strategi modifikasi dikembangkan untuk meningkatkan performa elektrokimia material berbasis rGO (Pawar et al. 2024).

Salah satu pendekatan yang banyak dikembangkan adalah mengombinasikan rGO dengan polimer konduktif, khususnya polianilin (PANI). PANI memiliki konduktivitas listrik yang baik, biaya sintesis yang relatif rendah, serta mampu menghasilkan pseudokapasitansi melalui reaksi redoks yang reversibel. Kombinasi rGO dan PANI menghasilkan efek sinergis, di mana rGO berfungsi sebagai media transport elektron sekaligus penyangga struktur, sedangkan PANI meningkatkan kapasitas penyimpanan muatan melalui mekanisme faradaik. Dengan demikian, komposit rGO/PANI berpotensi menghasilkan kapasitas spesifik, kemampuan laju, dan stabilitas siklus yang lebih baik dibandingkan material tunggal (Xu et al. 2023).

Berbagai metode sintesis telah diterapkan untuk menghasilkan komposit rGO/PANI, seperti elektropolimerisasi, hidrotermal, dan polimerisasi *in-situ*. Di antara berbagai metode tersebut, polimerisasi *in-situ* menjadi salah satu metode yang efektif karena mampu membentuk lapisan PANI secara langsung pada permukaan rGO sehingga menghasilkan kontak antarmuka yang lebih kuat, distribusi polimer yang lebih merata, serta jalur transfer elektron yang lebih efisien. Struktur komposit yang terbentuk juga mampu mengurangi fenomena *restacking* pada rGO sehingga meningkatkan akses ion elektrolit ke permukaan elektroda dan memperbaiki performa elektrokimia superkapasitor (Yu et al. 2023).

Meskipun berbagai penelitian telah melaporkan peningkatan performa komposit rGO/PANI, sebagian besar penelitian masih berfokus pada optimasi struktur material melalui variasi komposisi, penambahan material lain, maupun karakterisasi morfologi dan kristalografi secara komprehensif. Kajian yang secara khusus mengevaluasi pengaruh pembentukan PANI secara *in-situ* terhadap peningkatan kapasitas spesifik dan stabilitas siklus melalui perbandingan langsung antara elektroda rGO murni dan elektroda rGO/PANI dengan

konsentrasi anilin 5 mM masih relatif terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada evaluasi performa elektrokimia kedua elektroda tersebut untuk mengetahui efektivitas modifikasi PANI terhadap peningkatan kinerja superkapasitor (Mohamed et al. 2023).

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh pembentukan polianilin secara *in-situ* pada elektroda reduced graphene oxide menggunakan konsentrasi anilin 5 mM terhadap kapasitas spesifik dan stabilitas siklus superkapasitor. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan informasi mengenai efektivitas modifikasi sederhana menggunakan PANI dalam meningkatkan performa elektroda rGO sebagai material penyimpanan energi yang berpotensi diaplikasikan pada perangkat elektronik modern.

2. KAJIAN TEORITIS

Superkapasitor

Superkapasitor merupakan salah satu perangkat penyimpanan energi elektrokimia yang berkembang pesat sebagai alternatif pelengkap maupun pengganti baterai pada berbagai aplikasi modern, seperti perangkat elektronik portabel, kendaraan listrik, sistem energi terbarukan, serta perangkat elektronik berdaya tinggi. Dibandingkan dengan baterai konvensional, superkapasitor memiliki keunggulan berupa densitas daya (*power density*) yang tinggi, waktu pengisian dan pengosongan (*charge-discharge*) yang sangat cepat, efisiensi energi yang tinggi, serta umur siklus yang dapat mencapai ratusan ribu kali tanpa mengalami penurunan performa yang signifikan. Karakteristik tersebut menjadikan superkapasitor sebagai teknologi penyimpanan energi yang mampu memenuhi kebutuhan sistem yang memerlukan suplai daya tinggi dalam waktu singkat (Pawar et al. 2024).

Prinsip kerja superkapasitor berbeda dengan baterai. Pada baterai, penyimpanan energi berlangsung melalui reaksi kimia di dalam material elektroda, sedangkan pada superkapasitor energi disimpan melalui mekanisme elektrostatis maupun elektrokimia yang berlangsung pada antarmuka elektroda dan elektrolit. Berdasarkan mekanisme penyimpanan muatan tersebut, superkapasitor dibedakan menjadi dua jenis utama, yaitu Electrical Double Layer Capacitor (EDLC) dan pseudocapacitor. EDLC menyimpan muatan melalui adsorpsi ion secara fisik pada permukaan elektroda tanpa melibatkan reaksi kimia, sedangkan pseudokapasitor memanfaatkan reaksi oksidasi-reduksi (*redox*) yang bersifat reversibel pada material aktif sehingga mampu menghasilkan kapasitansi yang lebih tinggi dibandingkan mekanisme EDLC (Bityasmawan et al., 2023).

Kinerja superkapasitor sangat dipengaruhi oleh karakteristik material elektroda yang digunakan. Material elektroda ideal harus memiliki luas permukaan spesifik yang besar, konduktivitas listrik tinggi, stabilitas kimia yang baik, struktur berpori yang memudahkan difusi ion elektrolit, serta kekuatan mekanik yang mampu mempertahankan integritas struktur selama proses pengisian dan pengosongan berulang. Selain itu, ukuran pori, distribusi pori, serta kompatibilitas antara elektroda dan elektrolit juga berperan penting dalam menentukan nilai kapasitansi spesifik, densitas energi, densitas daya, dan stabilitas siklus suatu superkapasitor. Oleh karena itu, pengembangan material elektroda menjadi aspek utama dalam meningkatkan performa perangkat penyimpanan energi berbasis superkapasitor (Simon and Gogotsi 2020;Zhao et al. 2024).

Seiring berkembangnya penelitian di bidang penyimpanan energi, berbagai material telah dikembangkan sebagai elektroda superkapasitor, antara lain karbon aktif, karbon nanotube (CNT), *graphene*, *reduced graphene oxide* (rGO), logam oksida, serta polimer konduktif. Material karbon umumnya memberikan konduktivitas listrik yang tinggi dan stabilitas siklus yang sangat baik melalui mekanisme EDLC, sedangkan logam oksida dan polimer konduktif mampu menghasilkan pseudokapasitansi yang lebih besar melalui reaksi faradaik. Kombinasi kedua mekanisme tersebut menjadi strategi yang banyak diterapkan untuk memperoleh superkapasitor dengan keseimbangan antara densitas energi, densitas daya, dan umur siklus yang tinggi (Wang et al. 2020).

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa pengembangan material komposit menjadi salah satu pendekatan yang efektif dalam meningkatkan performa superkapasitor. Penggabungan material karbon dengan polimer konduktif mampu menghasilkan efek sinergis yang mengombinasikan konduktivitas tinggi, luas permukaan besar, serta kemampuan penyimpanan muatan melalui mekanisme pseudokapasitansi. Salah satu material komposit yang banyak dikembangkan adalah *reduced graphene oxide* (rGO) dan polianilin (PANI) karena keduanya memiliki karakteristik yang saling melengkapi. Oleh sebab itu, penelitian mengenai modifikasi elektroda berbasis rGO menggunakan PANI terus berkembang sebagai upaya meningkatkan kapasitas spesifik dan stabilitas siklus superkapasitor untuk mendukung aplikasi penyimpanan energi berperforma tinggi (Habib et al. 2023)

Reduced Graphene Oxide (rGO)

Reduced graphene oxide (rGO) merupakan material karbon dua dimensi yang diperoleh melalui proses *reduksi graphene oxide* (GO) untuk menghilangkan sebagian besar gugus fungsi yang mengandung oksigen. Proses reduksi tersebut mampu mengembalikan struktur konjugasi karbon sehingga meningkatkan konduktivitas listrik dibandingkan *graphene oxide*. Selain itu,

rGO memiliki luas permukaan spesifik yang tinggi, stabilitas kimia yang baik, fleksibilitas mekanik, serta mobilitas elektron yang tinggi sehingga banyak dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi, seperti sensor, katalis, baterai, sel surya, dan terutama sebagai material elektroda superkapasitor (Habib et al. 2023).

Dalam aplikasi superkapasitor, rGO berperan sebagai material elektroda berbasis karbon yang menyimpan muatan melalui mekanisme *Electrical Double Layer Capacitance* (EDLC). Mekanisme tersebut terjadi akibat adsorpsi ion elektrolit pada permukaan elektroda tanpa melibatkan reaksi kimia sehingga proses pengisian dan pengosongan muatan berlangsung sangat cepat. Luas permukaan spesifik yang besar pada rGO memungkinkan lebih banyak ion elektrolit berinteraksi dengan permukaan elektroda sehingga meningkatkan nilai kapasitansi. Selain itu, konduktivitas listrik yang tinggi pada rGO juga mempercepat transfer elektron selama proses elektrokimia sehingga menghasilkan densitas daya yang tinggi (Gao et al. 2023).

Meskipun memiliki berbagai keunggulan, penggunaan rGO sebagai elektroda tunggal masih menghadapi beberapa keterbatasan. Salah satu kendala utama adalah terjadinya fenomena *restacking*, yaitu penumpukan kembali lembaran-lembaran graphene akibat adanya interaksi gaya van der Waals selama proses sintesis maupun penggunaan (Abdillah et al. 2023). Fenomena tersebut menyebabkan berkurangnya luas permukaan aktif yang dapat diakses oleh ion elektrolit, menghambat difusi ion ke dalam struktur elektroda, serta meningkatkan hambatan internal material. Akibatnya, kapasitas spesifik dan performa elektrokimia elektroda rGO menjadi lebih rendah dibandingkan nilai teoritisnya (Mustafa et al. 2024)

Berbagai strategi telah dikembangkan untuk mengatasi kelemahan tersebut, salah satunya dengan membentuk material komposit antara rGO dan material aktif lainnya, seperti logam oksida, logam hidroksida, karbon berpori, maupun polimer konduktif. Pembentukan material komposit bertujuan untuk mempertahankan jarak antarlembar graphene sehingga mengurangi terjadinya *restacking*, meningkatkan jumlah situs aktif, memperbaiki jalur transport elektron, serta meningkatkan kemampuan difusi ion elektrolit. Dengan demikian, komposit berbasis rGO mampu menghasilkan kapasitansi spesifik yang lebih tinggi, densitas energi yang lebih baik, dan stabilitas siklus yang lebih panjang dibandingkan penggunaan rGO secara tunggal (Umar et al. 2024)

Salah satu material yang paling banyak dikombinasikan dengan rGO adalah polianilin (PANI), yaitu polimer konduktif yang memiliki kemampuan menyimpan muatan melalui mekanisme pseudokapasitansi. (Cho et al., 2023) Kombinasi rGO dan PANI menghasilkan efek sinergis karena rGO berfungsi sebagai jaringan penghantar elektron sekaligus penyangga

struktur, sedangkan PANI meningkatkan jumlah situs aktif melalui reaksi redoks yang reversibel. Selain meningkatkan kapasitas spesifik, keberadaan PANI juga mampu mengurangi fenomena *restacking* pada rGO sehingga memperbaiki stabilitas siklus selama proses pengisian dan pengosongan muatan. Oleh karena itu, komposit rGO/PANI menjadi salah satu material elektroda yang banyak dikembangkan dalam penelitian superkapasitor berperforma tinggi. (Cho et al. 2023).

Polianilin (PANI)

Polianilin (PANI) merupakan salah satu polimer konduktif yang paling banyak diteliti sebagai material elektroda superkapasitor karena memiliki konduktivitas listrik yang tinggi, proses sintesis yang relatif sederhana, biaya produksi yang rendah, serta stabilitas kimia yang baik. Dibandingkan dengan polimer konduktif lainnya, seperti polipirol (PPy) dan politiofena (PTh), PANI memiliki kapasitas teoritis yang lebih tinggi dan mudah disintesis melalui berbagai metode, seperti polimerisasi kimia, elektropolimerisasi, maupun polimerisasi *in situ*. Karakteristik tersebut menjadikan PANI sebagai material yang berpotensi meningkatkan performa perangkat penyimpanan energi, khususnya superkapasitor (Umar et al. 2024)

Kemampuan PANI dalam meningkatkan kinerja superkapasitor berasal dari mekanisme penyimpanan muatan melalui pseudokapasitansi, yaitu proses penyimpanan energi yang melibatkan reaksi oksidasi dan reduksi (*redox*) secara reversibel pada permukaan material elektroda. Berbeda dengan material karbon yang umumnya menyimpan muatan melalui mekanisme *Electrical Double Layer Capacitance* (EDLC), PANI mampu menghasilkan kapasitansi yang lebih besar karena adanya perpindahan elektron dan ion selama reaksi elektrokimia berlangsung. Proses tersebut memungkinkan peningkatan kapasitas spesifik sehingga PANI banyak dimanfaatkan sebagai material aktif pada elektroda superkapasitor (Bityasmawan et al. 2023)

Meskipun memiliki kapasitas spesifik yang tinggi, penggunaan PANI sebagai elektroda tunggal masih memiliki beberapa kelemahan. Selama proses pengisian dan pengosongan muatan secara berulang, PANI mengalami proses ekspansi dan kontraksi volume akibat mekanisme *doping* dan *dedoping* ion elektrolit. Perubahan volume tersebut dapat menyebabkan retaknya struktur polimer, menurunkan konduktivitas listrik, serta mengurangi jumlah situs aktif yang tersedia untuk reaksi redoks. Akibatnya, kapasitas spesifik dan stabilitas siklus elektroda PANI cenderung menurun setelah digunakan dalam jumlah siklus yang banyak (Cho et al. 2023).

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, berbagai penelitian mengembangkan material komposit berbasis PANI dengan material karbon, terutama reduced graphene oxide (rGO). Penggabungan kedua material tersebut mampu menghasilkan efek sinergis karena rGO berfungsi sebagai kerangka konduktif yang mempercepat transfer elektron, meningkatkan kekuatan mekanik, serta menahan perubahan volume PANI selama proses elektrokimia. Sebaliknya, PANI berkontribusi dalam meningkatkan jumlah situs aktif melalui mekanisme pseudokapasitansi sehingga menghasilkan kapasitansi spesifik yang lebih tinggi dibandingkan penggunaan masing-masing material secara terpisah (Zhao et al. 2024)

Selain meningkatkan kapasitas spesifik, keberadaan PANI pada komposit rGO juga mampu memperbaiki stabilitas siklus dan kemampuan laju (*rate capability*) elektroda. Hal ini disebabkan oleh terbentuknya kontak antarmuka yang baik antara rGO dan PANI sehingga jalur transport elektron menjadi lebih efisien serta difusi ion elektrolit berlangsung lebih cepat. Berbagai penelitian melaporkan bahwa komposit rGO/PANI yang disintesis melalui metode polimerisasi *in situ* menunjukkan performa elektrokimia yang lebih baik dibandingkan elektroda rGO maupun PANI tunggal. Oleh karena itu, PANI tetap menjadi salah satu material polimer konduktif yang paling menjanjikan untuk pengembangan elektroda superkapasitor berkapasitas tinggi dan memiliki umur siklus yang panjang (Pawar et al. 2024).

Komposit Reduced Graphene Oxide/Polianilin (rGO/PANI)

Komposit *reduced graphene oxide*/polianilin (rGO/PANI) merupakan salah satu material elektroda yang banyak dikembangkan untuk meningkatkan performa superkapasitor melalui pemanfaatan efek sinergis antara material karbon dan polimer konduktif. Reduced graphene oxide (rGO) memiliki konduktivitas listrik yang tinggi, luas permukaan spesifik yang besar, serta stabilitas mekanik yang baik sehingga mampu membentuk jalur transport elektron yang efisien. Sementara itu, polianilin (PANI) berperan sebagai material pseudokapasitif yang mampu meningkatkan kapasitas penyimpanan muatan melalui reaksi redoks reversibel. Kombinasi kedua material tersebut menghasilkan elektroda dengan kapasitansi spesifik yang lebih tinggi dibandingkan penggunaan rGO maupun PANI secara tunggal (Pawar et al. 2024); (Habib et al. 2023).

Interaksi antarmuka antara rGO dan PANI memberikan kontribusi penting terhadap peningkatan performa elektrokimia komposit. Lembaran rGO berfungsi sebagai kerangka konduktif yang mempercepat perpindahan elektron sekaligus menopang pertumbuhan PANI sehingga distribusi material aktif menjadi lebih merata. Struktur tersebut mampu meningkatkan akses ion elektrolit menuju permukaan elektroda, menurunkan hambatan transfer muatan, serta

mengurangi fenomena *restacking* yang umum terjadi pada rGO sehingga luas permukaan aktif dapat dipertahankan selama proses elektrokimia berlangsung (Wang et al. 2023)

Sintesis komposit rGO/PANI telah dilakukan menggunakan berbagai metode, seperti polimerisasi kimia, elektropolimerisasi, metode hidrotermal, deposisi lapis demi lapis, dan polimerisasi *in situ*. Di antara metode tersebut, polimerisasi *in situ* dinilai mampu menghasilkan distribusi PANI yang lebih homogen pada permukaan rGO, membentuk kontak antarmuka yang lebih kuat, serta menyediakan jalur transfer elektron yang lebih efektif. Kondisi tersebut mendukung peningkatan kapasitansi spesifik dan stabilitas siklus elektroda karena proses difusi ion berlangsung lebih efisien (Okafor et al. 2023).

Peningkatan performa elektrokimia komposit rGO/PANI telah dibuktikan melalui berbagai penelitian. Elektroda komposit dilaporkan mampu menghasilkan kapasitansi spesifik yang lebih tinggi dibandingkan elektroda berbasis rGO maupun PANI tunggal, disertai retensi kapasitansi yang tetap tinggi setelah ribuan siklus pengisian dan pengosongan. Peningkatan tersebut dikaitkan dengan sinergi antara mekanisme Electrical Double Layer Capacitance (EDLC) dari rGO dan mekanisme pseudokapasitansi dari PANI yang memungkinkan proses penyimpanan muatan berlangsung lebih efektif (Umar et al. 2024); (Pawar et al. 2024)

Komposit rGO/PANI memiliki prospek yang sangat baik sebagai material elektroda superkapasitor karena mampu mengombinasikan konduktivitas listrik yang tinggi, luas permukaan aktif yang besar, serta kemampuan penyimpanan muatan melalui mekanisme faradaik. Performa komposit tersebut dipengaruhi oleh metode sintesis, rasio komposisi material, serta kondisi pembentukan PANI pada permukaan rGO. Oleh karena itu, evaluasi terhadap kapasitas spesifik dan stabilitas siklus menjadi aspek penting untuk menentukan efektivitas modifikasi rGO menggunakan PANI dalam meningkatkan kinerja elektroda superkapasitor.

3. METODE PENELITIAN

Alat

Peralatan utama yang digunakan meliputi neraca analitik, *magnetic stirrer*, *doctor blade*, oven vakum, potensiostat Autolab yang dioperasikan menggunakan perangkat lunak NOVA 2.1, serta perangkat lunak OriginLab 8.5 untuk pengolahan dan analisis data.

Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi *reduced graphene oxide* (rGO) sebagai material aktif, polivinilidena fluorida (PVDF) sebagai *binder*, *N-methyl-2-pyrrolidone* (NMP) sebagai pelarut, acetonitrile (ACN) sebagai pelarut elektrolit, tetrabutylammonium

hexafluorophosphate (TBAPF₆) sebagai garam elektrolit pendukung, anilin sebagai monomer pembentuk polianilin (PANI), serta substrat stainless steel (INOX) sebagai kolektor arus.

Prosedur Kerja

Persiapan Elektroda rGO

Elektroda rGO dipersiapkan melalui metode *doctor blade*. Serbuk rGO dicampurkan dengan larutan PVDF/NMP hingga diperoleh slurry yang homogen. Slurry kemudian dilapiskan pada substrat INOX menggunakan *doctor blade* dengan ketebalan lapisan sekitar 1 mm. Elektroda yang telah dilapisi dikeringkan menggunakan *hot plate* pada suhu 40 °C selama ± 10 menit, kemudian dilanjutkan dengan pengeringan menggunakan oven vakum melalui proses *temperature ramping* hingga mencapai suhu 80 °C untuk menghilangkan sisa pelarut dan meningkatkan adhesi lapisan pada substrat..

Elektrodeposisi Polianilin secara In Situ

Pembentukan komposit rGO/PANI dilakukan melalui metode elektrodeposisi secara in situ menggunakan teknik cyclic voltammetry (CV). Metode ini dipilih karena mampu menghasilkan lapisan polimer konduktif yang tumbuh secara langsung pada permukaan elektroda sehingga kontak antarmuka antara rGO dan PANI menjadi lebih baik dibandingkan metode pencampuran (physical mixing). Pertumbuhan PANI secara langsung pada permukaan rGO dapat memperbaiki jalur transport elektron, meningkatkan luas permukaan aktif, serta meminimalkan hambatan antarmuka yang berpengaruh terhadap performa elektrokimia elektroda.



Gambar 1. Proses Sintesis rGO/PANI

Elektrodeposisi dilakukan menggunakan sistem tiga elektroda yang terdiri atas elektroda kerja berupa rGO pada substrat INOX, elektroda pembanding berupa *silver wire*, dan elektroda lawan berupa *platinum plate*. Larutan elektrolit menggunakan acetonitrile (ACN) yang mengandung tetrabutylammonium hexafluorophosphate (TBAPF₆), sedangkan anilin ditambahkan sebagai monomer dengan konsentrasi 5 mM. Pengujian dilakukan pada rentang

potensial $-0,4$ hingga $+0,4$ V dengan laju pindai 100 mV s^{-1} selama 10 siklus. Rentang potensial tersebut dipilih agar proses pembentukan PANI berlangsung secara terkendali tanpa menyebabkan degradasi lapisan polimer akibat potensial yang terlalu tinggi.

Selama proses sintesis, larutan elektrolit tetap tampak bening tanpa terbentuk endapan secara visual (Gambar 3). Kondisi tersebut menunjukkan bahwa tidak terjadi pembentukan polimer dalam jumlah besar di dalam larutan selama proses elektrodposisi. Dengan demikian, pertumbuhan PANI diperkirakan berlangsung secara dominan pada permukaan elektroda rGO sehingga material aktif yang terbentuk dapat langsung berfungsi sebagai lapisan elektroaktif. Pertumbuhan lapisan secara langsung pada permukaan elektroda juga mengurangi kehilangan material aktif ke dalam larutan serta menghasilkan kontak yang lebih baik antara rGO dan PANI.

Metode elektrodposisi *in situ* dipilih karena ketebalan lapisan PANI dapat dikendalikan melalui parameter elektrokimia, seperti rentang potensial, laju pindai, dan jumlah siklus. Pengendalian parameter tersebut penting untuk menghasilkan lapisan PANI yang cukup tipis sehingga tidak menghambat difusi ion elektrolit, tetapi tetap mampu memberikan kontribusi pseudokapasitif terhadap peningkatan performa elektroda. Selanjutnya, keberhasilan metode ini dievaluasi berdasarkan perubahan karakteristik kurva *cyclic voltammetry*, nilai kapasitansi spesifik, dan stabilitas siklus elektroda.

Analisis Data

Kapasitansi spesifik dihitung berdasarkan luas kurva CV yang diperoleh dari hasil integrasi kurva arus terhadap potensial menggunakan persamaan:

$$C_s = \frac{I\Delta t}{m\Delta E} \dots \dots \dots (i)$$

Stabilitas siklus dianalisis berdasarkan perubahan kapasitansi spesifik terhadap jumlah siklus pengujian yang dinyatakan sebagai capacitance retention menggunakan persamaan:

$$Capacitance \ retention \ (\%) = \frac{C_n}{C_0} \times 100\% \dots \dots \dots (ii)$$

Dimana, C_s = Kapasitansi spesifik (F/g), $\int IdV$ = Luas kurva CV ($V \text{ s}^{-1}$), v = scan rate ($V \text{ s}^{-1}$), m = massa potensial aktif (g), ΔV = window potensial (V), C_n = Kapasitansi siklus ke- n (F/g), C_0 = Kapasitansi siklus awal (F/g).

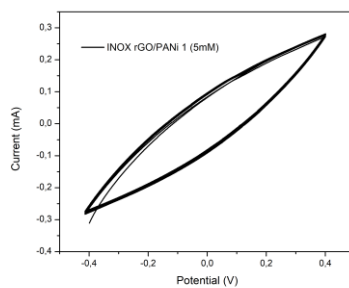
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian mengenai pengaruh pembentukan komposit *Reduced Graphene Oxide/Polyaniline* (rGO/PANI) secara *in situ* terhadap kinerja superkapasitor diperoleh melalui tahapan sintesis elektrokimia dan pengujian elektrokimia. Proses sintesis dilakukan

menggunakan metode elektrodeposisi melalui Cyclic Voltammetry (CV) dengan penambahan monomer anilin berkonsentrasi 5 mM pada elektroda rGO. Selanjutnya, performa elektroda dievaluasi melalui pengujian Cyclic Voltammetry (CV) untuk menentukan kapasitansi spesifik serta pengujian stabilitas siklus (*cycling stability*) hingga 1000 siklus untuk mengetahui kemampuan elektroda dalam mempertahankan kinerjanya selama proses pengisian dan pengosongan muatan secara berulang. Hasil pengujian kemudian dibandingkan antara elektroda rGO murni dan elektroda rGO/PANI guna mengevaluasi pengaruh pembentukan lapisan PANI secara *in situ* terhadap performa elektrokimia superkapasitor.

Sintesis Elektroda

Sintesis komposit rGO/PANI dilakukan menggunakan metode elektrodeposisi secara *in situ* melalui teknik *Cyclic Voltammetry* (CV). Selama proses sintesis, monomer anilin dipolimerisasi secara langsung pada permukaan elektroda rGO sehingga diharapkan membentuk lapisan PANI yang melekat pada elektroda. Dokumentasi proses sintesis dan kurva CV selama elektrodeposisi ditunjukkan pada Gambar 2



Gambar 2. Sintesis PANI pada Elektroda

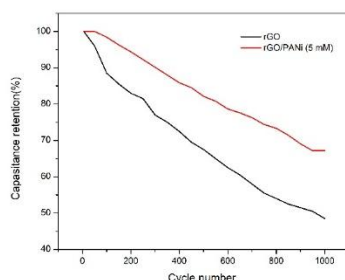
Gambar 2 memperlihatkan kurva Cyclic Voltammetry (CV) hasil elektrodeposisi elektroda rGO/PANI dengan konsentrasi anilin 5 mM pada rentang potensial $-0,4$ hingga $+0,4$ V dan scan rate 100 mV s^{-1} selama 10 siklus. Kurva membentuk lintasan tertutup (closed loop) dengan respons arus yang berubah secara kontinu sepanjang proses pemindaian potensial. Bentuk kurva tersebut menunjukkan bahwa proses elektrokimia berlangsung secara stabil selama elektrodeposisi tanpa adanya perubahan arus yang bersifat fluktuatif.

Selama proses pemindaian, respons arus meningkat secara bertahap seiring bertambahnya potensial dari arah negatif menuju positif, kemudian kembali menurun pada saat pemindaian balik. Perbedaan lintasan antara forward scan dan reverse scan membentuk area tertutup yang menunjukkan adanya perpindahan muatan pada antarmuka elektroda dan elektrolit selama proses elektrodeposisi. Karakteristik ini merupakan respons yang umum dijumpai pada sintesis material konduktif menggunakan metode cyclic voltammetry.

Kurva pada Gambar 2 juga tidak menunjukkan pasangan puncak oksidasi dan reduksi yang terdefinisi secara tajam. Sebaliknya, perubahan arus berlangsung secara gradual di sepanjang rentang potensial sehingga menghasilkan bentuk kurva yang relatif halus. Hal ini menunjukkan bahwa respons elektrokimia selama proses sintesis berlangsung secara bertahap dan tidak didominasi oleh satu reaksi elektrokimia pada potensial tertentu. Secara keseluruhan, kurva CV yang diperoleh menunjukkan respons elektrokimia yang stabil selama proses elektrodposisi pada kondisi sintesis yang digunakan. Hasil sintesis ini kemudian menjadi dasar untuk melakukan pengujian lebih lanjut terhadap kapasitansi spesifik dan stabilitas siklus elektroda rGO/PANI pada pembahasan berikutnya

Kapasitansi Spesifik

Setelah proses sintesis selesai dilakukan, kinerja elektrokimia elektroda dievaluasi melalui pengujian cyclic voltammetry (CV). Berdasarkan kurva CV yang diperoleh, nilai kapasitansi spesifik dihitung pada setiap siklus pengujian untuk membandingkan kemampuan penyimpanan muatan antara elektroda rGO dan elektroda komposit rGO/PANI (5 mM). Hasil perhitungan kapasitansi spesifik tersebut disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. kapasitansi Spesifik

Gambar 3 menunjukkan perubahan kapasitansi spesifik elektroda rGO dan rGO/PANI (5 mM) selama 1000 siklus pengujian. Pada awal pengujian, elektroda rGO memiliki kapasitansi spesifik sebesar 240,88 F/g, sedangkan elektroda rGO/PANI (5 mM) mencapai 308,87 F/g. Nilai tersebut menunjukkan bahwa penambahan lapisan PANI melalui proses elektrodposisi mampu meningkatkan kemampuan elektroda dalam menyimpan muatan dibandingkan elektroda rGO tanpa modifikasi.

Seiring bertambahnya jumlah siklus, kedua elektroda mengalami penurunan kapasitansi spesifik. Namun, laju penurunan pada elektroda rGO/PANI (5 mM) lebih lambat dibandingkan elektroda rGO. Setelah 1000 siklus, kapasitansi spesifik rGO menurun menjadi 116,83 F/g, sedangkan rGO/PANI (5 mM) masih mencapai 207,56 F/g. Perbedaan tersebut

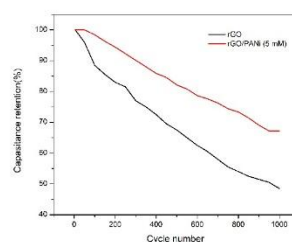
menunjukkan bahwa keberadaan lapisan PANI masih mampu mempertahankan kemampuan penyimpanan muatan selama proses cycling berlangsung.

Peningkatan kapasitansi spesifik pada elektroda rGO/PANI berkaitan dengan kontribusi mekanisme penyimpanan muatan dari kedua material penyusunnya. rGO berperan sebagai material konduktif dengan mekanisme electric double-layer capacitance (EDLC), sedangkan PANI memberikan tambahan kontribusi melalui reaksi redoks yang bersifat pseudokapasitif. Kombinasi kedua mekanisme tersebut menyebabkan jumlah muatan yang dapat disimpan menjadi lebih besar dibandingkan elektroda rGO murni.

Selain menghasilkan kapasitansi awal yang lebih tinggi, penurunan kapasitansi spesifik pada elektroda rGO/PANI juga berlangsung lebih bertahap selama pengujian. Hal ini menunjukkan bahwa lapisan PANI yang terbentuk melalui elektrodposisi tetap aktif berkontribusi dalam proses penyimpanan muatan selama siklus berlangsung. Dengan demikian, pembentukan komposit rGO/PANI menggunakan konsentrasi anilin 5 mM memberikan peningkatan performa elektrokimia, baik dari sisi besarnya kapasitansi spesifik maupun kemampuannya mempertahankan nilai kapasitansi selama pengujian berulang.

Stabilitas Siklus

Stabilitas siklus merupakan salah satu parameter penting dalam mengevaluasi performa superkapasitor karena menunjukkan kemampuan elektroda mempertahankan kapasitansinya selama proses pengisian dan pengosongan berulang. Pada penelitian ini, stabilitas dievaluasi berdasarkan perubahan retensi kapasitansi hingga 1000 siklus pengujian. Hasil pengujian stabilitas elektroda rGO dan rGO/PANI (5 mM) ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Stabilitas Siklus

Berdasarkan Gambar 4, kedua elektroda menunjukkan kecenderungan penurunan retensi kapasitansi seiring dengan bertambahnya jumlah siklus. Penurunan tersebut berlangsung secara bertahap dari awal hingga akhir pengujian tanpa adanya perubahan yang bersifat fluktuatif. Meskipun demikian, pola penurunan yang ditunjukkan oleh kedua elektroda berbeda.

Pada elektroda rGO, penurunan retensi kapasitansi berlangsung lebih cepat. Setelah sekitar 100 siklus pertama, nilai retensi telah turun hingga sekitar 89% dan terus menurun secara bertahap hingga mencapai 49% pada siklus ke-1000. Sebaliknya, elektroda rGO/PANI (5 mM) mempertahankan retensi kapasitansi yang lebih tinggi selama keseluruhan pengujian. Pada siklus ke-100, retensi kapasitansi masih berada pada 98%, kemudian menurun secara gradual hingga 67% pada siklus ke-1000.

Perbedaan tersebut terlihat konsisten hampir pada seluruh rentang siklus, di mana kurva rGO/PANI (5 mM) selalu berada di atas kurva rGO. Hal ini menunjukkan bahwa elektroda rGO/PANI (5 mM) mampu mempertahankan kapasitansinya lebih baik dibandingkan elektroda rGO selama pengujian berlangsung. Selain memiliki retensi akhir yang lebih tinggi, laju penurunan retensi pada elektroda rGO/PANI (5 mM) juga tampak lebih landai dibandingkan rGO, sehingga penurunan performanya berlangsung lebih lambat.

Secara keseluruhan, hasil pengujian stabilitas menunjukkan bahwa modifikasi elektroda rGO dengan PANI pada konsentrasi 5 mM menghasilkan retensi kapasitansi yang lebih tinggi setelah 1000 siklus dibandingkan elektroda rGO. Berdasarkan data pengujian, elektroda rGO/PANI (5 mM) mempertahankan 67% kapasitansi awal, sedangkan elektroda rGO mempertahankan 49%, sehingga elektroda rGO/PANI (5 mM) menunjukkan stabilitas siklus yang lebih baik pada kondisi pengujian yang digunakan dalam penelitian ini.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian, pembentukan komposit Reduced Graphene Oxide/Polyaniline (rGO/PANI) melalui metode elektrodposisi dengan konsentrasi anilin 5 mM memberikan pengaruh positif terhadap kinerja elektroda superkapasitor pada kondisi pengujian yang digunakan. Dibandingkan dengan elektroda rGO, elektroda rGO/PANI menunjukkan kemampuan penyimpanan muatan yang lebih baik serta mampu mempertahankan performanya selama pengujian siklus hingga 1000 siklus. Hasil tersebut menunjukkan bahwa modifikasi permukaan elektroda menggunakan PANI berpotensi meningkatkan performa elektrokimia rGO sebagai material elektroda superkapasitor. Namun, penelitian ini masih terbatas pada satu variasi konsentrasi anilin dan evaluasi performa berdasarkan pengujian *cyclic voltammetry* serta stabilitas siklus. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk mengkaji pengaruh variasi parameter elektrodposisi, seperti konsentrasi anilin, rentang potensial, *scan rate*, dan jumlah siklus sintesis, serta melengkapi penelitian dengan karakterisasi material dan pengujian elektrokimia lainnya sehingga

hubungan antara struktur material dan performa elektroda dapat dipahami secara lebih komprehensif.

DAFTAR REFERENSI

- Abdillah, B., Bin Rus, Y., Ulfa, M., Dedi, & Iskandar, F. (2023). Recent progress on reduced graphene oxide and polypyrrole composites for high performance supercapacitors: A review. *Journal of Energy Storage*, 74, 109300. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109300>
- Bityasmawan, O., Bin, Y., & Ulfa, M. (2023). Recent progress on reduced graphene oxide and polypyrrole composites for high performance supercapacitors: A review. *Journal of Energy Storage*, 74, 109300. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109300>
- Cho, W.-H., Cheng, I. C., & Chen, J.-Z. (2023). Performance comparison of reduced graphene oxide (RGO)-polyaniline (PANI) supercapacitors with LiCl, Li₂SO₄, and H₂SO₄ electrolytes. *Journal of The Electrochemical Society*, 170(1), 010532. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/acb38b>
- Gao, X., Wu, H., Su, C., Lu, C., Dai, Y., Zhao, S., Hu, X., Zhao, F., Zhang, W., Parkin, I., Carmalt, C., & He, G. (2023). Recent advances in carbon-based nanomaterials for multivalent-ion hybrid capacitors: A review. *Energy & Environmental Science*, 16, 1364–1383. <https://doi.org/10.1039/D2EE03719J>
- Habib, H., Wani, I. S., & Husain, S. (2023). High performance symmetric reduced graphene oxide/polyaniline/tellurium supercapacitor electrodes. *Nanotechnology*, 34(41). <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ace3c7>
- Mohamed, H. M., Abo-Aly, M. M., Abdel Wahab, S. M., Mousa, M. A., & Ali, A. A. I. (2023). An electrode for a high-performance asymmetric supercapacitor made of RGO/PANI/PB ternary nanocomposite. *Journal of Energy Storage*, 70, 108056. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108056>
- Mustafa, Z., Kumar, R., Pradhan, B. B., Prasad, B., Biswas, J., & Kumar, D. (2024). Recent advances in polyaniline/graphene nanocomposites for supercapacitor applications: Synthesis, properties, and future directions. *Results in Surfaces and Interfaces*, 17, 100316. <https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2024.100316>
- Okafor, O., Popoola, P., Popoola, O., Uyor, U., & Ogbonna, V. (2024). Review of advances in improving thermal, mechanical and electrochemical properties of polyaniline composite for supercapacitor application. *Polymer Bulletin*, 81, 1–58. <https://doi.org/10.1007/s00289-023-04710-y>
- Pawar, D. C., Bagde, A. G., Thorat, J. P., & Lokhande, C. D. (2024). Synthesis of reduced graphene oxide (RGO)/polyaniline (PANI) composite electrode for energy storage: Aqueous asymmetric supercapacitor. *European Polymer Journal*, 218, 113366. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2024.113366>
- Simon, P., & Gogotsi, Y. (2020). Perspectives for electrochemical capacitors and related devices. *Nature Materials*, 19(11), 1151–1163. <https://doi.org/10.1038/s41563-020-0747-z>
- Umar, A., Ahmed, F., Ullah, N., Ansari, S. A., Hussain, S., Ibrahim, A. A., Qasem, H., Ashok Kumar, S., Alhamami, M. A., Almehbad, N., Algadi, H., Selim, A. F., & Baskoutas, S. (2024). Exploring the potential of reduced graphene oxide/polyaniline (RGO@PANI)

- nanocomposites for high-performance supercapacitor application. *Electrochimica Acta*, 479, 143743. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.143743>
- Wang, B., Ruan, T., Chen, Y., Jin, F., Peng, L., Zhou, Y., Wang, D., & Dou, S. (2020). Graphene-based composites for electrochemical energy storage. *Energy Storage Materials*, 24, 22–51. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2019.08.004>
- Wang, Y., Wang, Y., Wang, Y., & Liu, J. (2023). Facile preparation of covalent modified reduced graphene oxide/polyaniline composite and its stable-enhanced electrochemical performance. *Heliyon*, 9. (DOI tidak dicantumkan karena tidak tersedia pada data yang diberikan.)
- Xu, H., Lei, Z., Xu, M., Zhu, J., Song, X., & Jin, X. (2023). Free-standing reduced graphene oxide/carboxymethylcellulose-polyaniline (RGO/CMC-PANI) hybrid film electrode for high-performance asymmetric supercapacitor device. *International Journal of Biological Macromolecules*, 236, 123934. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123934>
- Yu, Y., Xu, A., Zhang, Y., Zhao, Z., Ye, S., & Qin, Y. (2023). Construction of hierarchical graphene/polyaniline@polyaniline electrodes by chemical and electrochemical polymerization for high-energy supercapacitors. *Electrochimica Acta*, 454, 142414. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.142414>
- Zhao, W., Cui, M., Zhou, Y., Liu, Y., Liang, R., Ou, Q., & Zhang, S. (2024). Enhancing electrochemical performance of graphene oxide/polyaniline composite through plasma-assisted chemical cross-linking and surface modification. *Journal of Energy Storage*, 99, 113471. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.113471>