



Sintesis One-Pot Komposit *Reduced Graphene Oxide/Polipirrol* (rGO/PPy) pada Substrat *Stainless Steel* Fleksibel sebagai Elektroda Superkapasitor

Nur Hayati^{1*}, Nina Aprilini², Pratiwi Sanggusti³, Rahmat Hidayat⁴, Hidayat⁵, Maria Ulfa⁶, Yahdi Bin Rus^{7*}

¹⁻⁷ Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Padang, Indonesia

Email: nrhytii199@gmail.com¹, yahdi.bin.rus@brin.go.id⁷

*Penulis Korespondensi: yahdi.bin.rus@brin.go.id

Abstract. The development of portable, wearable, and flexible electronic devices has increased the demand for energy storage systems with high electrochemical performance, long cycle life, and good mechanical flexibility. In this study, a reduced graphene oxide/polypyrrole (rGO/PPy) composite electrode was successfully synthesized on a flexible stainlesssteel substrate using a one-pot electropolymerization method for flexible supercapacitor applications. The rGO electrode was first prepared by the doctor blade technique and subsequently modified through the electropolymerization of 5 mM pyrrole using Cyclic Voltammetry (CV). The electrochemical performance of the synthesized electrodes was evaluated through Cyclic Voltammetry, capacitance measurements, cycling stability tests for up to 1000 cycles, and bending tests to assess their mechanical flexibility. The results showed that the incorporation of PPy significantly enhanced the electrochemical response and increased the capacitance of the electrode compared with pristine rGO, indicating the additional contribution of pseudocapacitive charge storage. However, during the cycling stability test, the rGO electrode exhibited higher capacitance retention after 1000 cycles than the rGO/PPy electrode, suggesting that the PPy layer experienced gradual structural degradation during repeated charge–discharge processes. Despite this decrease in cycling stability, the bending test demonstrated that the rGO/PPy electrode maintained good structural integrity without visible cracking or delamination after mechanical deformation. These findings indicate that the one-pot electropolymerization method successfully produced an rGO/PPy composite electrode with improved electrochemical performance and good mechanical flexibility, demonstrating its potential as an electrode material for flexible supercapacitor applications.

Keywords: Cycling Stability; Electropolymerization; Flexible Supercapacitor; Polypyrrole; Reduced Graphene Oxide.

Abstrak. Perkembangan perangkat elektronik portabel, wearable, dan fleksibel mendorong kebutuhan akan sistem penyimpanan energi yang memiliki performa elektrokimia tinggi, umur siklus panjang, serta fleksibilitas mekanik yang baik. Pada penelitian ini, elektroda komposit *reduced graphene oxide/polipirrol* (rGO/PPy) berhasil disintesis pada substrat stainless steel fleksibel menggunakan metode one-pot elektropolimerisasi untuk aplikasi superkapasitor fleksibel. Elektroda rGO terlebih dahulu dibuat dengan metode doctor blade, kemudian dimodifikasi melalui proses elektropolimerisasi monomer pirrol 5 mM menggunakan metode *Cyclic Voltammetry* (CV). Karakterisasi dilakukan melalui pengujian CV, pengukuran kapasitansi, uji stabilitas siklus hingga 1000 siklus, serta uji tekuk untuk mengevaluasi fleksibilitas elektroda. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan PPy mampu meningkatkan respons elektrokimia dan kapasitansi elektroda dibandingkan dengan rGO murni, yang menunjukkan adanya kontribusi pseudokapasitansi dari lapisan PPy. Namun, pada pengujian stabilitas siklus, elektroda rGO mempertahankan retensi kapasitansi yang lebih tinggi dibandingkan elektroda rGO/PPy setelah 1000 siklus, yang mengindikasikan terjadinya degradasi struktur PPy selama proses pengisian dan pengosongan muatan berulang. Meskipun demikian, hasil uji tekuk menunjukkan bahwa elektroda rGO/PPy tetap mempertahankan integritas lapisannya tanpa retak maupun terkelupas setelah mengalami pembengkokan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa metode one-pot elektropolimerisasi berhasil menghasilkan elektroda rGO/PPy dengan karakteristik elektrokimia yang baik serta fleksibilitas mekanik yang memadai sehingga berpotensi dikembangkan sebagai material elektroda superkapasitor fleksibel.

Kata kunci: Elektropolimerisasi; Polipirrol; *Reduced Graphene Oxide*; Stabilitas Siklus; Superkapasitor Fleksibel.

1. LATAR BELAKANG

Perkembangan perangkat elektronik portabel, wearable, dan teknologi fleksibel mendorong meningkatnya kebutuhan akan sistem penyimpanan energi yang memiliki kinerja

tinggi, waktu pengisian yang singkat, serta umur pakai yang panjang. Salah satu teknologi yang banyak dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan tersebut adalah superkapasitor karena memiliki densitas daya yang tinggi, proses pengisian dan pengosongan muatan yang cepat, serta stabilitas siklus yang lebih baik dibandingkan baterai konvensional. Dengan karakteristik tersebut, superkapasitor menjadi salah satu kandidat yang menjanjikan untuk digunakan pada berbagai perangkat elektronik fleksibel di masa mendatang (Yan et al., 2024)(Li et al., 2019).

Performa superkapasitor sangat dipengaruhi oleh material elektroda yang digunakan. Salah satu material karbon yang banyak diteliti adalah *reduced graphene oxide* (rGO) karena memiliki konduktivitas listrik yang tinggi, luas permukaan yang besar, serta stabilitas kimia yang baik (Abdillah et al., 2023). Material ini menyimpan muatan melalui mekanisme *electric double layer capacitance* (EDLC), sehingga mampu memberikan performa yang baik pada proses pengisian dan pengosongan muatan. Namun, kapasitas penyimpanan muatan rGO masih terbatas karena jumlah situs aktif redoks pada permukaannya relatif sedikit. Oleh sebab itu, berbagai upaya terus dilakukan untuk meningkatkan performa elektrokimia rGO tanpa mengurangi konduktivitas listriknya (Li et al., 2019)(Gadipelli et al., 2023).

Salah satu pendekatan yang banyak digunakan adalah mengombinasikan rGO dengan polimer konduktif, seperti *polipirrol* (PPy). PPy memiliki konduktivitas listrik yang baik, stabilitas yang cukup tinggi, serta mampu meningkatkan penyimpanan muatan melalui mekanisme pseudokapasitansi yang berasal dari proses doping dan dedoping ion selama reaksi elektrokimia (Aldulaimi et al., 2025). Ketika dikombinasikan, rGO berperan sebagai jalur transport elektron sekaligus penyangga struktur, sedangkan PPy menyediakan lebih banyak situs aktif untuk penyimpanan muatan. Interaksi keduanya menghasilkan efek sinergis yang dapat meningkatkan karakteristik elektrokimia elektroda dibandingkan penggunaan rGO maupun PPy secara terpisah (Abdul Bashid et al., 2017)(Aphale et al., 2015).

Selain komposisi material, metode sintesis juga berpengaruh terhadap karakteristik elektroda yang dihasilkan. Salah satu metode yang banyak digunakan adalah elektropolimerisasi karena prosesnya relatif sederhana, cepat, tidak memerlukan suhu tinggi, serta mampu membentuk lapisan polimer secara langsung pada permukaan elektroda (Pesqueira et al., 2024). Metode ini juga menghasilkan kontak antarmuka yang baik antara rGO dan PPy sehingga diharapkan dapat meningkatkan transport elektron serta memperbaiki kinerja elektrokimia elektroda (Yan et al., 2023)(Dang et al., 2024).

Meskipun berbagai penelitian telah melaporkan keberhasilan sintesis komposit rGO/PPy untuk aplikasi superkapasitor, sebagian besar penelitian masih berfokus pada peningkatan nilai kapasitansi spesifik. Kajian yang secara khusus mengevaluasi hubungan antara proses *one-pot* elektropolimerisasi, peningkatan karakteristik elektrokimia, stabilitas siklus, dan fleksibilitas elektroda pada substrat flexible stainless steel masih relatif terbatas. Padahal, ketiga aspek tersebut merupakan parameter penting dalam pengembangan elektroda superkapasitor fleksibel yang tidak hanya memiliki performa elektrokimia yang baik, tetapi juga mampu mempertahankan kinerjanya setelah digunakan secara berulang dan mengalami deformasi mekanik.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan mensintesis elektroda komposit rGO/PPy pada substrat flexible stainless steel melalui metode *one-pot* elektropolimerisasi serta mengevaluasi karakteristik elektrokimia, stabilitas siklus, dan fleksibilitas elektroda yang dihasilkan. Karakterisasi dilakukan menggunakan metode *Cyclic Voltammetry* (CV) untuk mengevaluasi perilaku elektrokimia dan stabilitas siklus, sedangkan uji tekuk digunakan untuk mengamati ketahanan mekanik elektroda setelah mengalami pembengkokan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman mengenai potensi metode *one-pot* elektropolimerisasi dalam menghasilkan elektroda rGO/PPy dengan kombinasi karakteristik elektrokimia, stabilitas, dan fleksibilitas yang baik untuk aplikasi superkapasitor fleksibel.

2. KAJIAN TEORITIS

Reduced graphene oxide (rGO)

Reduced graphene oxide (rGO) merupakan material berbasis karbon yang diperoleh melalui proses reduksi graphene oxide (GO), sehingga sebagian besar gugus fungsi oksigen pada permukaannya berkurang dan struktur karbon sp^2 kembali terbentuk. Proses tersebut meningkatkan konduktivitas listrik rGO dibandingkan GO, namun tetap mempertahankan luas permukaan yang besar dan stabilitas kimia yang baik. Oleh karena itu, rGO banyak dimanfaatkan sebagai material elektroda pada berbagai perangkat penyimpanan energi, termasuk superkapasitor (Li et al., 2019).

Mekanisme penyimpanan muatan pada rGO didominasi oleh pembentukan *electric double layer capacitance* (EDLC), yaitu akumulasi ion elektrolit pada permukaan elektroda tanpa melibatkan reaksi kimia. Mekanisme ini memungkinkan proses pengisian dan

pengosongan muatan berlangsung cepat serta memberikan stabilitas siklus yang baik. Meskipun demikian, jumlah situs aktif redoks pada rGO masih relatif terbatas sehingga kapasitansi yang dihasilkan belum maksimal. Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, rGO sering dikombinasikan dengan material lain, terutama polimer konduktif, agar kemampuan penyimpanan muatannya dapat meningkat tanpa mengurangi konduktivitas listriknya (Li et al., 2019)(Wang et al., 2023).

Komposit rGO/PPy Elektrosintesis

Polipirrol (PPy) merupakan salah satu polimer konduktif yang banyak digunakan sebagai material elektroda superkapasitor karena memiliki konduktivitas listrik yang baik, stabilitas lingkungan yang tinggi, serta mampu menyimpan muatan melalui mekanisme pseudokapasitansi (Moyseowicz et al., 2023). Mekanisme ini terjadi melalui proses doping dan dedoping ion yang berlangsung secara reversibel selama reaksi elektrokimia, sehingga mampu meningkatkan kapasitas penyimpanan muatan elektroda (Abdul Bashid et al., 2017).

Penggabungan rGO dengan PPy menghasilkan material komposit yang memiliki karakteristik lebih baik dibandingkan masing-masing material penyusunnya. Dalam komposit tersebut, rGO berfungsi sebagai jalur transport elektron sekaligus penyangga struktur, sedangkan PPy menyediakan lebih banyak situs aktif untuk proses penyimpanan muatan. Kombinasi keduanya menghasilkan efek sinergis yang dapat meningkatkan karakteristik elektrokimia elektroda. Salah satu metode yang banyak digunakan untuk membentuk komposit ini adalah elektropolimerisasi, karena mampu menumbuhkan lapisan PPy secara langsung pada permukaan rGO sehingga menghasilkan kontak antarmuka yang baik antara kedua material (Abdul Bashid et al., 2017)(Aphale et al., 2015).

Stabilitas Elektroda Superkapasitor

Stabilitas elektroda merupakan salah satu parameter penting dalam mengevaluasi kinerja superkapasitor karena menunjukkan kemampuan material mempertahankan kapasitansinya selama proses pengisian dan pengosongan muatan yang berlangsung berulang. Stabilitas umumnya dinyatakan sebagai retensi kapasitansi setelah sejumlah siklus pengujian tertentu. Semakin tinggi retensi kapasitansi yang diperoleh, semakin baik kemampuan elektroda dalam mempertahankan performa elektrokimianya selama penggunaan jangka panjang (Tene et al., 2024). Pada elektroda komposit berbasis rGO dan PPy, stabilitas dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti kekuatan interaksi antara rGO dan PPy, adhesi lapisan aktif terhadap substrat, serta perubahan struktur polimer selama proses doping dan dedoping ion. Interaksi yang baik antara kedua material dapat membantu

mempertahankan jalur transport elektron dan mengurangi degradasi struktur selama pengujian siklus, sehingga retensi kapasitansi dapat dipertahankan lebih baik (Yan et al., 2023) (Jagfeld et al., 2023).

Fleksibilitas Elektroda

Fleksibilitas elektroda merupakan kemampuan material untuk mempertahankan bentuk, struktur, dan performanya ketika mengalami pembengkokan atau deformasi mekanik. Karakteristik ini menjadi salah satu persyaratan penting bagi pengembangan superkapasitor fleksibel yang ditujukan untuk perangkat elektronik portabel maupun wearable. Penggunaan substrat stainless steel fleksibel memberikan kombinasi antara konduktivitas listrik yang baik, ketahanan korosi, dan kekuatan mekanik yang memadai. Selain itu, lapisan komposit rGO/PPy yang terbentuk melalui proses elektropolimerisasi diharapkan mampu melekat dengan baik pada permukaan substrat sehingga tetap mempertahankan integritas elektroda setelah mengalami pembengkokan. Oleh karena itu, uji tekuk menjadi salah satu metode sederhana untuk mengevaluasi ketahanan mekanik elektroda terhadap deformasi (Wang et al., 2023)(Lucassen et al., 2022).

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan stainless steel fleksibel sebagai substrat sekaligus kolektor arus untuk elektroda superkapasitor. Material aktif yang digunakan adalah *reduced graphene oxide* (rGO) dan monomer pirrol (Py) untuk membentuk komposit rGO/PPy. Proses sintesis dilakukan menggunakan larutan elektrolit yang terdiri atas asetonitril (ACN) dan tetrabutylammonium hexafluorophosphate (TBAPF₆) sebagai elektrolit pendukung. Monomer pirrol ditambahkan ke dalam larutan elektrolit dengan konsentrasi 5 mM sebagai prekursor pembentukan lapisan polipirrol pada permukaan elektroda.

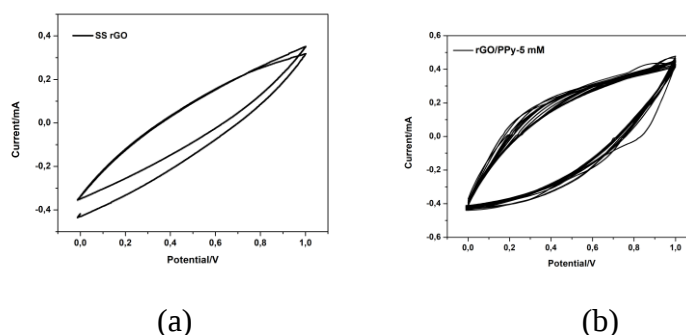
Elektroda rGO/PPy disintesis melalui metode elektropolimerisasi menggunakan sistem tiga elektroda, yaitu elektroda rGO pada substrat stainless steel sebagai working electrode, pelat platina sebagai counter electrode, dan kawat perak sebagai reference electrode. Proses elektropolimerisasi dilakukan menggunakan metode *Cyclic Voltammetry* (CV) pada rentang potensial 0–1 V dengan laju pindai 100 mV s⁻¹ selama 20 siklus sehingga terbentuk lapisan polipirrol secara langsung pada permukaan rGO.

Setelah proses sintesis, elektroda yang diperoleh dikarakterisasi untuk mengevaluasi performa elektrokimia dan fleksibilitasnya. Karakterisasi elektrokimia dilakukan menggunakan metode *Cyclic Voltammetry* (CV) dengan sistem tiga elektroda yang sama dan

menggunakan larutan ACN/TBAPF₆ sebagai elektrolit. Pengujian dilakukan untuk membandingkan karakteristik kapasitansi antara elektroda rGO dan rGO/PPy 5 mM, serta mengevaluasi stabilitas elektrokimia melalui pengujian hingga 1000 siklus pada rentang potensial 0–1 V dengan laju pindai 100 mV s⁻¹. Selain itu, fleksibilitas elektroda diamati melalui uji tekuk (bending test) dengan membengkokkan sampel secara manual untuk mengetahui apakah lapisan aktif tetap melekat dan mempertahankan integritasnya setelah mengalami deformasi mekanik.

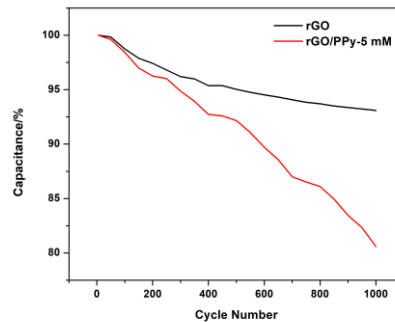
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sintesis dan karakterisasi elektroda rGO/PPy.



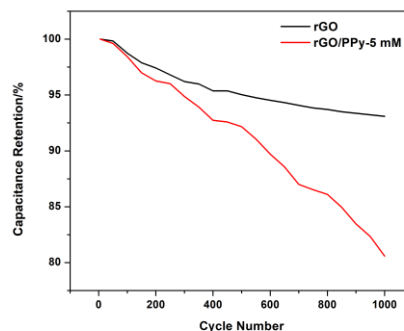
Gambar 1. Kurva *Cyclic Voltammetry* (CV) selama proses one-pot elektropolimerisasi pada (a) elektroda rGO dan (b) elektroda rGO/PPy 5 mM yang difabrikasi pada substrat stainless steel fleksibel.

Gambar 1 menunjukkan kurva CV selama proses sintesis elektropolimerisasi pada elektroda rGO dan rGO/PPy 5 mM. Pengukuran dilakukan pada rentang potensial 0–1 V dengan laju pindai 100 mV/s. Setiap kurva merepresentasikan siklus CV selama proses sintesis berlangsung. Pada elektroda rGO (Gambar 1a), bentuk kurva relatif stabil dengan luas area yang hampir tidak berubah pada setiap siklus. Hal ini menunjukkan bahwa tidak terjadi reaksi polimerisasi pada permukaan elektroda sehingga respons arus terutama berasal dari sifat kapasitif material rGO. Sebaliknya, pada elektroda rGO/PPy 5 mM (Gambar 1b), luas area kurva meningkat secara bertahap seiring bertambahnya jumlah siklus. Peningkatan respons arus tersebut menunjukkan bahwa monomer pirol berhasil mengalami elektropolimerisasi dan membentuk lapisan polipirrol (PPy) pada permukaan elektroda rGO. Pertumbuhan lapisan PPy selama proses sintesis menghasilkan area aktif elektrokimia yang lebih besar, sehingga arus yang dihasilkan juga meningkat. Hasil ini mengonfirmasi bahwa metode one-pot electropolymerization berhasil membentuk komposit rGO/PPy secara langsung pada substrat stainless steel fleksibel.



Gambar 2. Perbandingan kapasitansi elektroda rGO (hitam) dan rGO/PPy 5 mM (merah) berdasarkan kurva *Cyclic Voltammetry* (CV).

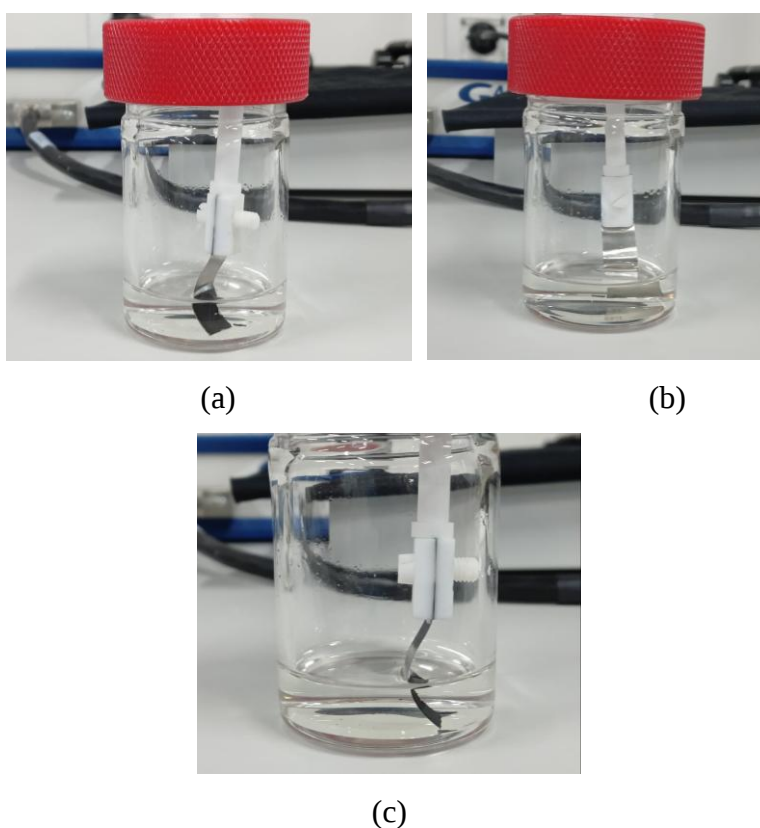
Gambar 2 menunjukkan perbandingan kapasitansi elektroda rGO dan rGO/PPy 5 mM yang diperoleh dari hasil pengukuran *Cyclic Voltammetry* (CV). Terlihat bahwa elektroda rGO/PPy 5 mM memiliki nilai kapasitansi yang lebih tinggi dibandingkan elektroda rGO pada seluruh rentang pengujian. Peningkatan ini menunjukkan bahwa penambahan *polipirrol* (PPy) mampu meningkatkan kemampuan penyimpanan muatan elektroda melalui kontribusi mekanisme pseudokapasitansi, sementara rGO tetap berperan sebagai jalur transport elektron yang baik. Peningkatan kapasitansi tersebut menunjukkan adanya efek sinergis antara rGO dan PPy. Struktur rGO menyediakan konduktivitas listrik yang tinggi dan luas permukaan yang besar, sedangkan PPy menambahkan lebih banyak situs aktif untuk proses reaksi redoks. Kombinasi kedua material tersebut menghasilkan elektroda dengan kemampuan penyimpanan muatan yang lebih baik dibandingkan elektroda rGO tanpa penambahan PPy.



Gambar 3. Retensi kapasitansi elektroda rGO (hitam) dan rGO/PPy 5 mM selama 1000 siklus pengujian *Cyclic Voltammetry* (CV).

Gambar 3 menunjukkan retensi kapasitansi elektroda rGO dan rGO/PPy 5 mM selama 1000 siklus pengujian *Cyclic Voltammetry* (CV). Sumbu X menunjukkan jumlah siklus pengujian, sedangkan sumbu Y menunjukkan retensi kapasitansi terhadap nilai awal (%). Kedua elektroda mengalami penurunan retensi kapasitansi seiring bertambahnya jumlah

siklus, yang menandakan adanya degradasi elektrokimia selama proses pengisian dan pengosongan muatan secara berulang. Elektroda rGO mempertahankan retensi kapasitansi sekitar 93% setelah 1000 siklus, sedangkan elektroda rGO/PPy 5 mM mempertahankan retensi sekitar 80,5%. Penurunan yang lebih besar pada elektroda rGO/PPy mengindikasikan bahwa lapisan PPy mengalami perubahan struktur akibat proses doping–dedoping yang berlangsung berulang selama pengujian. Meskipun demikian, elektroda rGO/PPy tetap mampu mempertahankan sebagian besar kapasitansinya hingga akhir pengujian, sehingga menunjukkan bahwa komposit tersebut masih memiliki stabilitas elektrokimia yang cukup baik meskipun mengalami penurunan dibandingkan elektroda rGO.



Gambar 4. Hasil uji tekuk elektroda rGO/PPy, tampak depan (a); tampak belakang (b); tampak samping.

Gambar 4 menunjukkan hasil uji tekuk elektroda rGO/PPy setelah mengalami pembengkokan yang diamati dari tampak depan, belakang, dan samping. Pengujian dilakukan secara manual untuk mengevaluasi fleksibilitas elektroda serta kemampuan lapisan aktif dalam mempertahankan adhesinya pada substrat stainless steel setelah proses sintesis dan pengujian elektrokimia. Berdasarkan hasil pengamatan, elektroda tetap mengikuti perubahan bentuk tanpa menunjukkan kerusakan yang terlihat secara visual, seperti retak, patah, maupun terlepasnya lapisan aktif dari permukaan substrat. Hasil tersebut menunjukkan bahwa lapisan

komposit rGO/PPy memiliki adhesi yang baik terhadap substrat stainless steel, sehingga struktur elektroda tetap terjaga selama proses pembengkokan. Kemampuan ini menunjukkan bahwa elektroda tidak hanya memiliki karakteristik elektrokimia yang baik, tetapi juga mampu mempertahankan integritas mekaniknya setelah mengalami deformasi. Dengan demikian, elektroda komposit rGO/PPy yang disintesis memiliki potensi untuk digunakan sebagai material elektroda pada aplikasi superkapasitor fleksibel.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Elektroda komposit rgo/ppy pada substrat stainless steel fleksibel berhasil disintesis melalui metode one-pot elektropolimerisasi. Proses sintesis menghasilkan lapisan ppy yang terdepresiasi dengan baik pada permukaan rgo, sehingga meningkatkan respons arus dan kapasitansi elektroda dibandingkan rgo murni. Pengujian stabilitas menunjukkan bahwa elektroda rgo memiliki retensi kapasitansi yang lebih tinggi dibandingkan rgo/ppy setelah 1000 siklus, yang menunjukkan bahwa penambahan ppy mampu meningkatkan performa kapasitif, namun masih memengaruhi stabilitas siklus elektroda. Selain itu, hasil uji tekuk memperlihatkan bahwa elektroda rgo/ppy tetap mempertahankan integritas lapisannya setelah mengalami deformasi, sehingga menunjukkan potensi yang baik sebagai material elektroda untuk aplikasi superkapasitor fleksibel. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan dilakukan optimasi parameter elektropolimerisasi serta pengujian mekanik dan elektrokimia yang lebih komprehensif guna memperoleh keseimbangan yang lebih baik antara kapasitansi, stabilitas siklus, dan fleksibilitas elektroda.

DAFTAR REFERENSI

- Abdillah, O. B., Rus, Y. Bin, Ulfa, M., Dedi, & Iskandar, F. (2023). Recent progress on *reduced graphene oxide* and polypyrrole composites for high performance supercapacitors: A review. In *Journal of Energy Storage* (Vol. 74). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109300>
- Abdul Bashid, H. A., Lim, H. N., Kamaruzaman, S., Abdul Rashid, S., Yunus, R., Huang, N. M., Yin, C. Y., Rahman, M. M., Altarawneh, M., Jiang, Z. T., & Alagarsamy, P. (2017). Electrodeposition of Polypyrrole and *Reduced graphene oxide* onto Carbon Bundle Fibre as Electrode for Supercapacitor. *Nanoscale Research Letters*, 12(1). <https://doi.org/10.1186/s11671-017-2010-3>
- Aldulaimi, A., Saeed, S. M., Menon, S. V., Saber, R. Y., Ray, S., Jayabalan, K., Sinha, A., Sharma, R., Taher, W. M., & Alwan, M. (2025). Exploring recent advances and synthesis strategies in conductive polymers and their composites in supercapacitor systems: a comprehensive review. *RSC Advances*, 15(53), 45245–45267. <https://doi.org/10.1039/d5ra06603d>

- Aphale, A., Maisuria, K., Mahapatra, M. K., Santiago, A., Singh, P., & Patra, P. (2015). Hybrid electrodes by in-situ integration of graphene and carbon-nanotubes in polypyrrole for supercapacitors. *Scientific Reports*, 5(August), 1–8. <https://doi.org/10.1038/srep14445>
- Dang, F., Cai, Y., & Yang, P. (2024). Electrodeposition of Graphene/Polypyrrole Electrode for Flexible Supercapacitor with Large Areal Capacitance. *ACS Applied Energy Materials*, 7(14), 5832–5838. <https://doi.org/10.1021/acsaem.4c00968>
- Gadipelli, S., Guo, J., Li, Z., Howard, C. A., Liang, Y., Zhang, H., Shearing, P. R., & Brett, D. J. L. (2023). Understanding and Optimizing Capacitance Performance in Reduced Graphene-Oxide Based Supercapacitors. *Small Methods*, 7(6), 1–11. <https://doi.org/10.1002/smt.202201557>
- Jagfeld, S. M. P., Birke, K. P., Fill, A., & Keil, P. (2023). How Cell Design Affects the Aging Behavior: Comparing Electrode-Individual Aging Processes of High-Energy and High-Power Lithium-Ion Batteries Using High Precision Coulometry. *Batteries*, 9(4). <https://doi.org/10.3390/batteries9040232>
- Li, Q., Horn, M., Wang, Y., MacLeod, J., Motta, N., & Liu, J. (2019). A review of supercapacitors based on graphene and redox-active organic materials. *Materials*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/ma12050703>
- Lucassen, M. F. G., Núñez-García, A., Rimes, K. A., Wallace, L. M., Brown, K. E., & Samra, R. (2022). Coping Strategies to Enhance the Mental Wellbeing of Sexual and Gender Minority Youths: A Scoping Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(14). <https://doi.org/10.3390/ijerph19148738>
- Moyseowicz, A., Minta, D., & Gryglewicz, G. (2023). Conductive Polymer/Graphene-based Composites for Next Generation Energy Storage and Sensing Applications. *ChemElectroChem*, 10(9). <https://doi.org/10.1002/celec.202201145>
- Pesqueira, C., Hryniewicz, B. M., Klobukoski, V., Weheabby, S., Kanoun, O., Rüffer, T., Pašti, I. A., & Vidotti, M. (2024). Enhancement of the Potential Window of Ppy Electrodes in the Presence of a Bis(Oxamato) Nickel(II) Complex for High-Performance Supercapacitor. *ChemElectroChem*, 11(19), 1–10. <https://doi.org/10.1002/celec.202400384>
- Tene, T., Bellucci, S., Guevara, M., Romero, P., Guapi, A., Gahramanli, L., Straface, S., Caputi, L. S., & Vacacela Gomez, C. (2024). Role of Graphene Oxide and Reduced graphene oxide in Electric Double-Layer Capacitors: A Systematic Review. *Batteries*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/batteries10070256>
- Wang, F., Zhou, W., Xu, J., Liu, X., & Yang, H. (2023). *Flexible Supercapacitors Based on Stretchable Conducting Polymer Electrodes*.
- Yan, Z., Luo, S., Li, Q., Wu, Z. S., & Liu, S. (2024). Recent Advances in Flexible Wearable Supercapacitors: Properties, Fabrication, and Applications. *Advanced Science*, 11(8), 1–22. <https://doi.org/10.1002/advs.202302172>
- Yan, Z., Zhang, H., Liu, S., & Huang, Y. (2023). Recent Advances in Flexible Wearable Supercapacitors: Properties, Fabrication, and Applications. *Advanced Science*, 10(2). <https://doi.org/10.1002/advs.202204715>