

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kebutuhan energi listrik terus meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk, perkembangan industri, dan kemajuan teknologi sehingga diperlukan sumber energi yang mampu memenuhi kebutuhan tersebut secara berkelanjutan [1]. Namun, penyediaan energi global masih didominasi oleh bahan bakar fosil yang bersifat tidak terbarukan dan menghasilkan emisi gas rumah kaca yang berdampak terhadap perubahan iklim [2]. Di Indonesia, meskipun rasio elektrifikasi terus meningkat, penyediaan listrik di beberapa wilayah terpencil, pesisir, dan daerah kepulauan masih menghadapi berbagai kendala akibat keterbatasan infrastruktur kelistrikan [3]. Kondisi tersebut mendorong pengembangan teknologi energi alternatif yang sederhana, ekonomis, dan memanfaatkan sumber daya lokal sebagai solusi penyediaan energi listrik skala kecil.

Salah satu teknologi yang berpotensi dikembangkan adalah Baterai air garam yang memanfaatkan larutan natrium klorida (NaCl) sebagai elektrolit untuk menghasilkan energi listrik melalui reaksi elektrokimia sehingga berpotensi menjadi sumber penerangan alternatif yang ramah lingkungan dan berkelanjutan [4]. Pada sistem ini, magnesium digunakan sebagai anoda karena memiliki potensial elektroda yang rendah sehingga mudah mengalami reaksi oksidasi dan melepaskan elektron, sedangkan karbon digunakan sebagai katoda karena memiliki konduktivitas listrik yang baik, stabil secara kimia, serta tahan terhadap korosi dalam larutan elektrolit [5].

Elektron yang dihasilkan dari reaksi oksidasi magnesium kemudian mengalir melalui rangkaian luar menuju elektroda karbon sehingga menghasilkan arus listrik yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi untuk menyalakan lampu LED atau beban listrik berdaya rendah. Kombinasi elektroda magnesium-karbon banyak digunakan karena memiliki konstruksi yang sederhana, biaya pembuatan yang relatif rendah, serta berpotensi dikembangkan sebagai sumber penerangan alternatif bagi masyarakat di daerah yang memiliki keterbatasan akses terhadap jaringan listrik.

Meskipun Baterai air garam berbasis elektroda magnesium-karbon memiliki potensi sebagai sumber energi alternatif, kinerjanya masih dipengaruhi oleh karakteristik elektroda karbon sebagai katoda [4]. Elektroda karbon konvensional memiliki aktivitas

elektrokatalitik dan luas permukaan aktif yang relatif terbatas sehingga proses reaksi reduksi oksigen (*Oxygen Reduction Reaction*, ORR), transfer elektron dan difusi oksigen belum berlangsung secara optimal [6,7]. Oleh karena itu, diperlukan modifikasi elektroda karbon untuk meningkatkan aktivitas elektrokimia dan performa Baterai air garam [8].

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa performa katoda pada sistem baterai logam-udara dapat ditingkatkan melalui berbagai pendekatan, seperti penggunaan *Current Collector*, material karbon berpori, katalis MnO_2 , maupun modifikasi struktur elektroda [9]. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian tersebut mengevaluasi setiap modifikasi secara terpisah, pada sistem pengujian dan kondisi operasi yang berbeda-beda, sehingga kontribusi kumulatif dari setiap tahapan rekayasa terhadap peningkatan kinerja belum dapat dibandingkan secara langsung dalam satu rangkaian pengujian yang sama [9,11]. Selain itu, pengaruh penggunaan media penyangga pasta karbon, seperti kantong teh dan *Stainless Steel Mesh*, terhadap performa dan stabilitas elektroda karbon pada Baterai air garam juga masih terbatas dilaporkan.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini menerapkan rekayasa elektroda bertahap (*Progressive Electrode Engineering*), yaitu setiap modifikasi elektroda karbon merupakan pengembangan kumulatif dari tahap sebelumnya dan diuji dalam satu sistem pengujian yang sama, dimulai dari elektroda karbon konvensional, penambahan *Current Collector* tembaga, penambahan pasta karbon aktif- MnO_2 -PVA-NBR, hingga penggunaan media penyangga yang berbeda (kantong teh dan *Stainless Steel Mesh*). Pendekatan ini memungkinkan kontribusi setiap modifikasi terhadap kinerja Baterai air garam ditelusuri secara sistematis dan dibandingkan secara langsung, sehingga diperoleh pemahaman mengenai tahapan rekayasa yang paling efektif dalam meningkatkan performa sistem.

Penelitian ini mengevaluasi lima konfigurasi elektroda yang terdiri atas elektroda karbon konvensional (V1), elektroda karbon dengan *Current Collector* tembaga (V2), elektroda karbon yang dimodifikasi menggunakan pasta karbon aktif- MnO_2 -PVA-NBR dengan media kantong teh (V3), elektroda karbon yang dimodifikasi menggunakan pasta karbon aktif- MnO_2 -PVA-NBR dengan media *Stainless Steel Mesh* (V4), serta Baterai air garam komersial sebagai pembanding (V5). Kinerja setiap variasi dianalisis berdasarkan parameter tegangan, arus, daya, energi kumulatif, serta karakteristik elektrolit meliputi *Oxidation Reduction Potential* (ORP), konduktivitas, salinitas, dan pH.

Untuk memperoleh pemahaman yang lebih menyeluruh mengenai kontribusi setiap tahapan modifikasi, data hasil pengujian dianalisis secara bertingkat, mulai dari analisis deskriptif berupa tren harian dan nilai rata-rata setiap parameter, koefisien variasi (*Coefficient of Variation*, CV) untuk mengevaluasi stabilitas kinerja, hingga analisis statistik multivariat berupa korelasi Pearson antarparameter, *Principal Component Analysis* (PCA), dan *Hierarchical Cluster Analysis* (HCA) untuk mengevaluasi hubungan antarparameter serta kemiripan karakteristik antarvariasi secara simultan.

Kebaruan (novelty) penelitian ini terletak tidak hanya pada material atau komponen elektroda yang digunakan, melainkan pada pendekatan *Progressive Electrode Engineering* itu sendiri, yaitu evaluasi kumulatif kontribusi setiap tahapan modifikasi elektroda karbon dalam satu sistem pengujian yang sama, yang diperkuat melalui analisis statistik multivariat (korelasi, PCA, HCA, dan CV) untuk mengukur baik besaran performa maupun stabilitas kinerja secara kuantitatif. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan rekomendasi strategi rekayasa elektroda karbon yang efektif, baik dari sisi performa maupun stabilitas, untuk meningkatkan kinerja Baterai air garam berbasis elektroda magnesium-karbon.

1.2. Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi elektroda karbon terhadap tegangan, arus, daya, dan energi kumulatif yang dihasilkan Baterai air garam berbasis elektroda magnesium-karbon?
2. Bagaimana pengaruh variasi elektroda karbon terhadap karakteristik elektrokimia elektrolit yang meliputi ORP, konduktivitas, salinitas, dan pH, serta bagaimana indikasi konsumsi elektroda magnesium berdasarkan parameter listrik dan ORP?
3. Bagaimana perbandingan kinerja masing-masing variasi elektroda karbon terhadap Baterai air garam komersial?
4. Variasi elektroda karbon manakah yang memberikan kinerja terbaik ditinjau dari aspek performa listrik dan stabilitas kinerja selama pengujian?

1.3. Tujuan

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis pengaruh variasi elektroda karbon terhadap tegangan, arus, daya, energi kumulatif Baterai air garam berbasis elektroda magnesium-karbon
2. Menganalisis pengaruh variasi elektroda karbon terhadap karakteristik elektrokimia elektrolit (*Oxidation Reduction Potential* (ORP), konduktivitas, salinitas, dan pH) selama pengoperasian Baterai air garam, serta mengevaluasi indikasi konsumsi elektroda magnesium secara tidak langsung berdasarkan tren parameter listrik dan ORP.
3. Membandingkan kinerja seluruh variasi elektroda karbon dengan Baterai air garam komersial sebagai pembanding
4. Menentukan variasi elektroda karbon yang memberikan kinerja terbaik berdasarkan aspek performa listrik dan stabilitas kinerja, menggunakan analisis deskriptif, koefisien variasi, dan analisis statistik multivariat.

1.4. Luaran Yang Diharapkan

1. Data eksperimen mengenai pengaruh variasi elektroda karbon terhadap kinerja Baterai air garam berbasis elektroda magnesium-karbon
2. Rekomendasi desain elektroda karbon (*Current Collector* dan media penyangga konduktif) yang memiliki performa dan stabilitas terbaik untuk aplikasi Baterai air garam
3. Publikasi ilmiah pada artikel jurnal nasional sesuai target luaran penelitian
4. Laporan akhir penelitian sebagai referensi dalam pengembangan teknologi Baterai air garam berbasis elektroda magnesium-karbon

1.5. Kegunaan

1. Manfaat Teoritis (Akademis)

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan ilmu pengetahuan di bidang energi alternatif, khususnya mengenai pemanfaatan larutan elektrolit NaCl sebagai media pembangkit listrik pada Baterai air garam berbasis elektroda magnesium-karbon. Selain itu, hasil penelitian ini diharapkan dapat memperkaya referensi ilmiah mengenai pengaruh variasi elektroda karbon terhadap parameter kinerja listrik, mekanisme transfer elektron, dan aktivitas reaksi reduksi oksigen (ORR), serta menjadi referensi bagi penelitian

selanjutnya yang berkaitan dengan pengembangan sistem baterai air garam, termasuk penerapan analisis statistik multivariat dalam mengevaluasi kontribusi setiap tahapan modifikasi elektroda.

2. Manfaat Praktis

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi mengenai variasi elektroda karbon yang paling sesuai untuk meningkatkan kinerja Baterai air garam berbasis elektroda magnesium-karbon, dengan mempertimbangkan baik besaran performa maupun konsistensi kinerjanya selama waktu operasi. Hasil penelitian juga diharapkan dapat menjadi acuan dalam pengembangan teknologi penerangan sederhana berbasis energi alternatif yang memanfaatkan sumber daya lokal, sehingga berpotensi diterapkan sebagai sumber penerangan darurat, pada wilayah pesisir, daerah terpencil, maupun kondisi kebencanaan yang memiliki keterbatasan akses listrik.