

RANCANG BANGUN *AUTOMATIC REVERSE FLOW CONTROL DIRECTION* PADA *REVERSE ELEKTRODIALYSIS POWER GENERATION*

Ratih Wahyu Diana Aprilia¹, Umi Yuliatin^{1*}, Suka Handaja¹

¹Program Studi Teknik Instrumentasi Kilang, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Cepu Jawa Tengah

E-mail : umi.yuliatin@esdm.go.id

ABSTRAK

Permasalahan kebutuhan energi terbarukan mendorong pengembangan teknologi ramah lingkungan dan efisien, salah satunya adalah *Reverse Electrodialysis* (RED) yang memanfaatkan perbedaan konsentrasi antara air garam dan air tawar untuk menghasilkan energi listrik. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem *Automatic Reverse Flow Control Direction* pada RED dengan pengaturan arah aliran fluida otomatis berdasarkan perubahan tegangan output. Sistem menggunakan mikrokontroler ESP32, sensor tegangan, relay, servo valve, dan komponen pendukung lain. Pengujian dilakukan untuk mengetahui respons sistem terhadap perubahan arah aliran serta performa sensor dalam mendeteksi nilai tegangan. Hasil pengujian menunjukkan sistem mampu mendeteksi penurunan tegangan dan melakukan pembalikan arah aliran secara otomatis. Tegangan meningkat seiring kenaikan konsentrasi larutan dan laju aliran. Misalnya, pada konsentrasi 175 gram garam dengan laju aliran 7 L/min, tegangan turun dari 78,3 mV menjadi -80,0 mV hingga -86,1 mV. Hal serupa terjadi pada konsentrasi 700 gram garam dan laju aliran 7 L/min.

Kata kunci: *Reverse Electrodialysis, Reverse Flow Control, Tegangan, ESP32, Energi Terbarukan*

1. PENDAHULUAN

Dalam beberapa tahun terakhir, kebutuhan akan sumber energi terbarukan dan ramah lingkungan semakin mendesak, seiring dengan meningkatnya permintaan energi global dan tantangan perubahan iklim. Air, sebagai sumber daya yang melimpah, menjadi salah satu pilihan utama dalam upaya eksplorasi dan pemanfaatan energi terbarukan. Dari total volume air di Bumi, sekitar 96,5% merupakan air laut, 1,7% dalam bentuk es, dan hanya sekitar 2,5% yang tergolong air tawar, dengan sebagian besar air tawar berada dalam bentuk es di gletser dan salju [1] [2]. Air payau, yang memiliki salinitas rendah, serta air tanah dalam lapisan akuifer asin, dapat ditemukan di seluruh dunia dan menawarkan potensi yang besar untuk menghasilkan energi melalui teknologi yang inovatif.

Reverse Electrodialysis (RED) muncul sebagai teknologi yang menjanjikan untuk mengkonversi perbedaan kadar garam antara air laut dan air tawar menjadi energi listrik. Teknologi ini berfungsi dengan memanfaatkan energi gradien salinitas (*Salinity Gradient Energy, SGE*) dan mengubahnya menjadi listrik melalui penggunaan membran pertukaran ion (*Ion Exchange Membrane/IEM*) [3]. Karakteristik unik dalam sistem RED memungkinkan pemanfaatan air laut dan air sungai secara efisien, memberikan keunggulan dibandingkan sumber energi terbarukan lainnya yang tergantung pada kondisi cuaca [4].

Sistem RED terdiri dari susunan membran selektif ion yang diatur secara bergantian antara membran kation (*Cation Exchange Membrane/CEM*) dan membran anion (*Anion Exchange Membrane/AEM*), dengan spacer yang menjaga stabilitas membran dan menciptakan kompartemen aliran yang optimal [5]. Ketika air dari dua sumber yang berbeda salinitas dipompa melalui membran ini, terjadi pergerakan ion yang dihasilkan dari difusi ion positif

menuju larutan yang lebih rendah salinitas dan sebaliknya untuk ion negatif, menginduksi aliran listrik dalam sistem [6]. Sayangnya, dalam praktiknya, terdapat kendala terkait efisiensi dan daya yang dihasilkan oleh sistem ini, termasuk permasalahan seputar pemilihan dan sifat membran yang mempengaruhi kinerja [7].

Dengan desain sistem yang lebih efisien, usaha untuk mengontrol arah aliran balik menjadi kunci dalam optimasi kinerja RED. Pendekatan ini tidak hanya bertujuan untuk meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi, tetapi juga untuk mengatasi masalah yang muncul akibat fluktuasi peredaran air di kompartemen yang berbeda, yang mampu mempengaruhi jumlah maksimum energi yang dapat dihasilkan [8]. Oleh karena itu, penelitian ini akan mengkaji rancang bangun *Automatic Reverse Flow Control Direction*, berfokus pada pengembangan dan optimalisasi teknologi RED sebagai solusi inovatif dalam menyediakan sumber energi terbarukan yang berkelanjutan dan ramah lingkungan.

Membran yang diperoleh dari inovasi terkini menunjukkan potensi besar tidak hanya dalam aplikasi RED, tetapi juga dalam sistem pemisahan berbasis elektrodialisis lainnya dengan kondisi operasi yang lebih kompleks [9] [10]. Dalam rangka mendukung pengembangan lebih lanjut terhadap teknologi RED, perhatian terhadap interaksi antara sistem dan lingkungan sekitarnya, termasuk pengaruh dari komponen-elektronika dan material baru, akan menjadi sangat penting untuk keberlanjutan operasi dan peningkatan efisiensi dari sistem pembangkit yang memanfaatkan gradien salinitas ini [11].

Pada sistem ini, digunakan susunan membran selektif ion yang disusun secara bergantian antara membran kation (*Cation Exchange Membrane/CEM*) dan membran anion (*Anion Exchange Membrane/AEM*). Membran-membran ini dipisahkan oleh spacer yang berfungsi menjaga posisi membran tetap stabil, membentuk kompartemen aliran yang jelas, sekaligus membantu menciptakan turbulensi. Melalui kompartemen tersebut, air sungai dan air laut dipompa secara bergantian. Ketika larutan dengan kadar salinitas berbeda mengalir melewati celah membran selektif, larutan dengan konsentrasi garam tinggi cenderung mengalir ke larutan dengan konsentrasi lebih rendah [12]. Dalam proses ini, ion bermuatan positif berdifusi dari air laut menuju air sungai melalui membran CEM ke satu arah, sedangkan ion bermuatan negatif bergerak melalui membran AEM ke arah yang berlawanan [13].

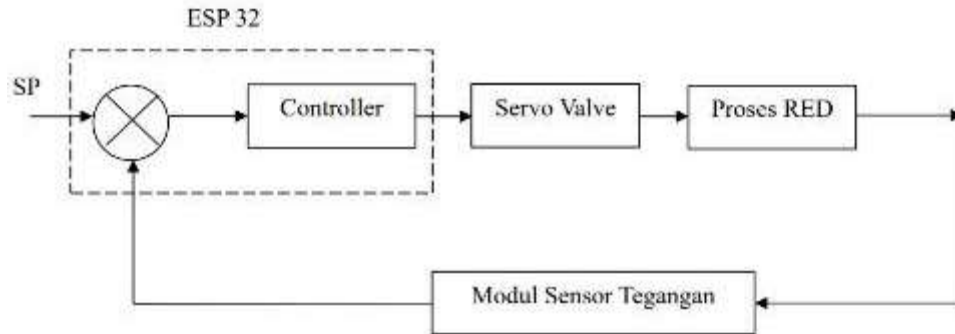
2. METODE

Reverse Electrodialysis adalah proses pengkonversi energi percampuran dua larutan berbeda salinitas menjadi tenaga listrik. Dalam proses RED, ion akan bergerak berdasarkan gradien konsentrasi dan membentuk ionik *current* yang berlawanan dengan elektrisitasnya. Untuk mengetahui efektifitas kinerja yang dihasilkan oleh RED maka diperlukan proses *switching*. Ketika terjadi *switching*, arah aliran akan berubah dan akan kembali ke *steady state* setelah beberapa waktu. Rancang bangun *automatic reverse flow control direction* pada *reverse electrodialysis power generation* merupakan proses untuk mengendalikan arah aliran yang kembali ke *steady state* setelah terjadi *switching*. Pada saat proses pengukuran jika terjadi penurunan *voltage* maka *switch* akan dijalankan secara otomatis. Perpindahan arah yang terjadi diatur oleh *three-way valve* yang dikontrol oleh *servo valve*.

Performa perpindahan arah dapat dilihat dari *switching* berapa lama *flow* kembali ke *steady state*, kinerja sistem, dan efisiensi. Untuk mencapai proses ini juga dilakukan dengan beberapa langkah. Pertama, perlu dilakukan pengukuran tingkat konsentrasi ion di dalam lautan. Kemudian, perlu dilakukan pengukuran tegangan dan arus yang terjadi pada elektroda. Dengan data-data tersebut, dapat dilakukan analisis dan perhitungan untuk mengoptimalkan rancang bangun *reverse flow control direction*.

Rancang bangun *automatic reverse flow control direction* pada RED ini adalah proses yang kompleks, tetapi dengan pengembangan teknologi dan penelitian yang terus berjalan, dapat diperoleh kinerja yang lebih baik dan efisiensi yang lebih tinggi. Dengan rancang bangun yang tepat, dapat diperoleh tenaga listrik yang lebih banyak dan lebih efisiensi dari proses RED

A. Blok Diagram

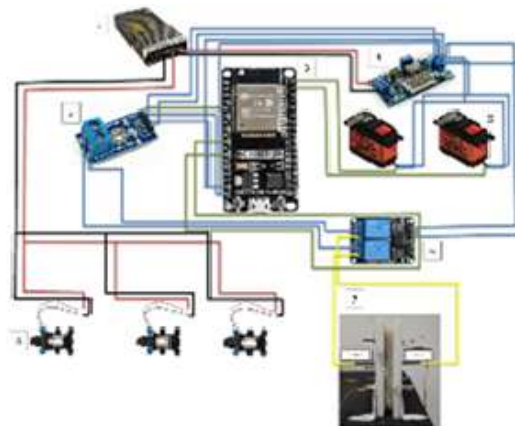


Gambar 1. Blok Diagram Rancang Bangun

Blok diagram ini menggambarkan sistem pengendalian laju aliran fluida dalam *Reverse Electrodialysis* (RED). Sistem pengendalian ini berfungsi untuk melakukan pembalikan arah aliran larutan garam dan air tawar secara otomatis melalui *three-way valve* yang dikontrol oleh servo valve. Ketepatan bukaan *three-way valve* diatur oleh servo valve berdasarkan sinyal kontrol dari mikrokontroler, sehingga memungkinkan pengalihan aliran fluida ke jalur yang berbeda dalam RED stack. Data tegangan yang dihasilkan oleh proses RED secara berkelanjutan diukur oleh sensor tegangan dan akan kemudian ditampilkan pada serial monitor di Arduino IDE untuk pemantauan dan analisis performa sistem.

B. Rancangan Hardware

Rancangan hardware dibawah ini merupakan penelitian tentang "Rancang Bangun *Automatic Reverse Flow Control Direction* pada *Reverse Elektrodialysis Power Generation*". Dimana pada penelitian tersebut, ESP32 digunakan sebagai mikrokontroler dari pembacaan pengukuran sensor *voltage* dan servo valve. Kemudian ketika nilai pengukuran pada sensor *voltage* turun, maka servo valve akan otomatis membuka. Kemudian data yang diperoleh akan ditampilkan pada serial monitor yang terdapat di Arduino IDE. Rancangan ini dibuat untuk membantu dalam mengendalikan laju aliran air pada *reverse electrodialysis* dan mengontrol bukaan *three-way valve* melalui servo valve.



Gambar 2. Rancangan Hardware

Keterangan Gambar:

1. Power Supply
2. Sensor Tegangan
3. ESP 32
4. Buck Converter
5. Servo Valve
6. Relay 2 Channel
7. RED Stack
8. Pompa High Pressure DC

Pada rancangan prototype keseluruhan ini, proses dimulai dari dua tangki yang masing-masing berisi larutan encer (air tawar), larutan pekat (air garam), serta tambahan tangki bilas untuk mendukung kestabilan sistem. Ketiga larutan tersebut akan dialirkan secara bersamaan ke dalam RED stack, dimana di dalam RED ini akan terjadi perbedaan konsentrasi ionik antara dua larutan untuk menghasilkan energi listrik melalui membran semi permeabel. Setiap larutan akan dipisahkan oleh membran AEM (Anion Exchange Membrane) dan CEM (Cation Exchange Membrane), yang berfungsi untuk mengarahkan ion-ion tertentu agar tercipta beda potensial antara elektroda (anoda dan katoda). Untuk mengalirkan larutan tersebut diperlukan pompa agar ketiga larutan dapat masuk ke dalam RED stack.

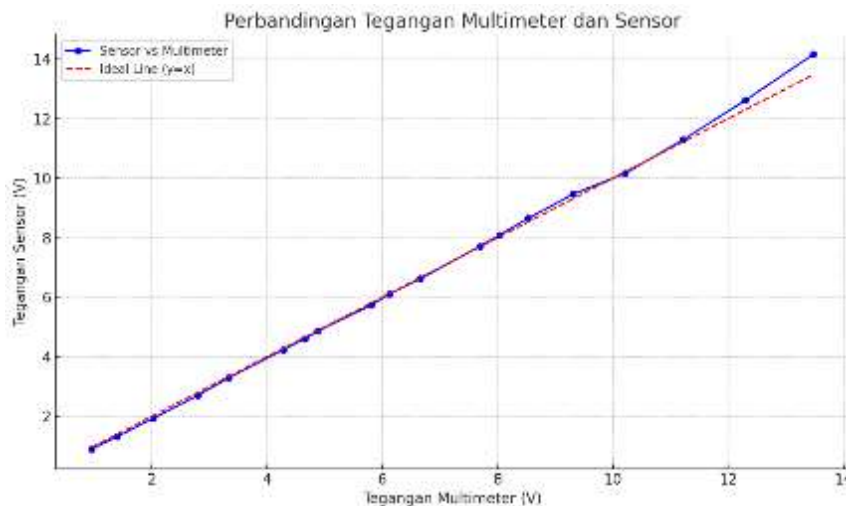
Sebelum larutan mencapai RED stack, laju aliran akan dikontrol menggunakan sensor flow, yang berfungsi untuk memastikan agar kecepatan aliran tetap stabil dan tidak terlalu keras demi menghindari gangguan pada proses elektrodialisis. Selanjutnya, sistem dilengkapi dengan servo valve yang bertugas untuk mengatur arah aliran secara otomatis. Servo ini sangat penting dalam proses pembalikan arah, yaitu saat sistem mendeteksi bahwa nilai tegangan output RED mulai mengalami penurunan dibawah nilai set point yang ditetapkan. Penurunan ini menandakan bahwa konsentrasi antar larutan telah mengalami penurunan, sehingga perlu dilakukan pembalikan arah larutan dan polaritas elektroda agar sistem dapat kembali bekerja secara optimal.

3. PEMBAHASAN

Sistem *Automatic Reverse Flow Control Direction* pada *Reverse Electrodialysis* ini dirancang untuk mengoptimalkan efisiensi energi dari larutan yang memiliki perbedaan konsentrasi. Sistem dibangun menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai pengendali utama, dilengkapi dengan dua buah servo untuk mengatur pembukaan three-way valve, sensor tegangan untuk memantau output sistem, serta relay untuk pengendalian polaritas. Implementasi sistem dimulai dari pengaturan tiga tangki, yakni tangki larutan pekat (air garam), tangki larutan encer (air tawar), dan tangki larutan bilas. Ketiga jenis larutan ini dipompa ke dalam sistem RED menggunakan pompa DC. Tegangan output dari sistem RED dipantau secara real-time. Ketika sistem mendeteksi penurunan tegangan yang signifikan, secara otomatis mikrokontroler akan membalik arah aliran fluida dan polaritas elektroda, sehingga kestabilan efisiensi sistem tetap terjaga. Seluruh data hasil pemantauan, termasuk nilai tegangan, posisi bukaan servo valve, polaritas sistem RED, serta status mode manual atau otomatis dalam proses pembalikan aliran, ditampilkan melalui serial monitor Arduino IDE.

Bagian panel box dalam sistem ini terdiri dari beberapa komponen utama yaitu ESP32, rangkaian buck converter, sensor tegangan, relay, serta power supply yang menyediakan daya untuk seluruh komponen yang bekerja dalam sistem. Serial monitor digunakan untuk memantau

kinerja sistem secara real-time. Data yang ditampilkan meliputi tegangan output dari RED stack, posisi bukaan servo valve, serta mode operasi (manual atau otomatis). Dalam mode otomatis, sistem secara mandiri melakukan pembalikan arah aliran berdasarkan nilai set point tegangan. Sebaliknya, pada mode manual, pembalikan arah aliran dapat diatur secara langsung oleh operator.

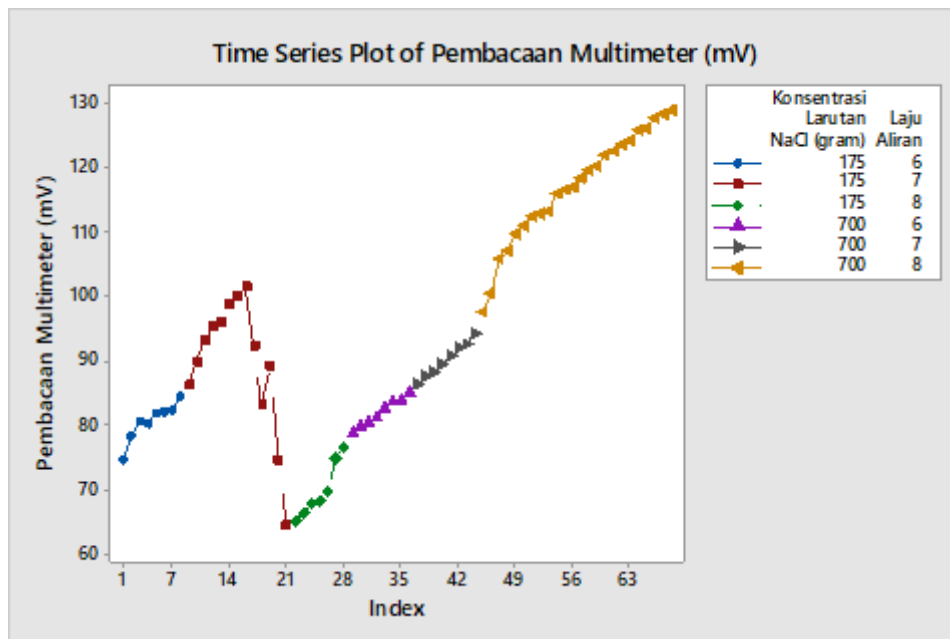


Gambar 3. Grafik Pembacaan Sensor Tegangan

Gambar 3 menunjukkan adanya hubungan yang linier antara tegangan yang terbaca pada multimeter dan tegangan yang terbaca oleh sensor. Sumbu horizontal (x) sebagai tegangan yang diukur dengan multimeter, sementara sumbu vertikal (y) sebagai tegangan yang dibaca oleh sensor. Titik-titik biru pada grafik menunjukkan hasil pengukuran aktual sensor terhadap tegangan pada multimeter, sedangkan garis merah putus-putus menunjukkan garis ideal ($y = x$) antara nilai sensor dan multimeter. Jika semua titik pengukuran berada tepat pada garis ini, berarti sensor bekerja dengan akurasi sempurna tanpa deviasi.

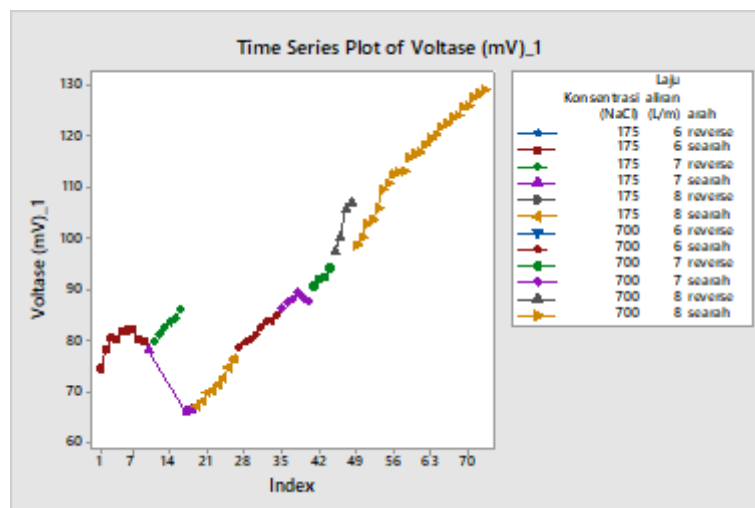
Dari grafik tersebut, dapat dilihat bahwa hasil pembacaan sensor cukup mendekati nilai tegangan yang ditunjukkan oleh multimeter. Meskipun terdapat sedikit penyimpangan pada beberapa titik, secara umum sensor mampu memberikan pembacaan yang konsisten dan cukup akurat. Beberapa nilai sensor sedikit lebih tinggi atau lebih rendah dibandingkan multimeter, namun selisihnya relatif kecil dan masih dalam batas toleransi yang dapat diterima. Penyimpangan ini dapat disebabkan oleh faktor-faktor seperti kesalahan kalibrasi, toleransi komponen elektronik, atau gangguan sinyal (noise).

Gambar 4 menunjukkan hubungan antara laju aliran (L/min) dengan pembacaan tegangan oleh multimeter (mV) pada dua konsentrasi larutan NaCl yang berbeda, yaitu 175 gram dan 700 gram. Dari tabel tersebut, terlihat bahwa laju aliran yang sama, nilai pembacaan multimeter terlihat meningkat seiring bertambahnya konsentrasi larutan. Seperti, pada laju aliran 8 L/min yang digunakan pada konsentrasi 700 gram, pembacaan multimeter menunjukkan kenaikan yang signifikan, mencapai nilai maksimum sebesar 129 mV. Sebaliknya, pada konsentrasi 175 gram dengan laju aliran 6-7 L/min, pembacaan multimeter berada dibawah 105 mV.



Gambar 4. Time series plot dari Voltase yang dihasilkan

Secara umum, Gambar 4 menunjukkan bahwa tegangan keluaran meningkat seiring dengan peningkatan laju aliran dan konsentrasi larutan. Hal ini menunjukkan bahwa sensor memiliki sensitivitas terhadap perubahan jumlah ion dalam larutan dan volume aliran yang mempengaruhi respon listrik yang diukur oleh multimeter. Pada Gambar 5 hasil pengukuran tegangan listrik pada larutan NaCl dengan variasi laju aliran dan konsentrasi, mendapatkan hasil bahwa perubahan arah aliran (*reverse flow*) memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai tegangan yang terukur. Hal ini ditandai dengan adanya perubahan nilai yaitu sebelum nilai tegangan menjadi negatif, terlebih dahulu terjadi penurunan nilai tegangan secara bertahap. Hal ini dapat dilihat pada tabel, misalnya pada laju aliran 7 L/min dengan konsentrasi 175 gram, dimana nilai tegangan awal mengalami kenaikan hingga titik tertentu, kemudian mengalami penurunan sebelum akhirnya menghasilkan nilai negatif yang terus menurun, seperti dari 78,3 mV menurun menjadi -80,0 mV hingga -86,1 mV. Hal serupa juga terjadi pada konsentrasi 700 gram, di mana laju aliran 7 L/min dan 8 L/min menunjukkan penurunan nilai pembacaan sebelum beralih ke nilai negatif yang lebih besar. Penurunan nilai tegangan ini mengindikasikan adanya respons sistem terhadap perubahan arah aliran yang memengaruhi distribusi ion dan potensi listrik di dalam larutan.



Gambar 5. Boxplot dari Voltase yang dihasilkan ketika aliran mengalami pembalikan arah (reverse)

4. SIMPULAN

Pada penelitian ini, sistem *Automatic Reverse Flow Control Direction* pada Reverse Electrodialysis Power Generation berhasil diimplementasikan sesuai dengan rancangan yang telah ditetapkan. Sistem ini menggunakan komponen utama berupa mikrokontroler ESP32, buck converter, relay, power supply, servo DS3225, dan sensor tegangan. Mikrokontroler ESP32 berperan penting dalam memantau tegangan secara real-time dan mengatur secara otomatis pembalikan arah aliran serta polaritas elektroda ketika tegangan turun di bawah ambang batas yang telah ditentukan. Pergantian arah aliran dilakukan secara otomatis menggunakan dua servo DS3225 yang mengatur three-way valve berdasarkan pembacaan sensor tegangan. Ketika tegangan menurun, servo mengalihkan aliran larutan pekat dan encer, sementara modul relay akan mengatur ulang polaritas elektroda sesuai dengan arah aliran baru. Hasil pengujian menunjukkan bahwa proses reverse flow menyebabkan penurunan tegangan hingga mencapai nilai negatif, yang menandakan terjadinya perubahan polaritas. Setelah pembalikan arah aliran, tegangan kembali naik seiring dengan terbentuknya gradien ionisasi baru, yang menandakan bahwa sistem dapat berfungsi secara efisien dalam menghasilkan daya melalui perubahan polaritas secara otomatis. Dengan demikian, penelitian ini menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan berhasil bekerja sesuai harapan dan dapat mengoptimalkan kinerja Reverse Electrodialysis Power Generation.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] W. Zhang *et al.*, "Studies on Anion Exchange Membrane and Interface Properties by Electrochemical Impedance Spectroscopy: The Role of pH," *Membranes (Basel)*, 2021, doi: 10.3390/membranes11100771.
- [2] H. B. Park, J. Kamcev, L. M. Robeson, M. Elimelech, and B. D. Freeman, "Maximizing the Right Stuff: The Trade-Off Between Membrane Permeability and Selectivity," *Science (80-.)*, 2017, doi: 10.1126/science.aab0530.
- [3] J. Kamcev, "Reformulating the <sc>permselectivity-conductivity</Sc> Tradeoff Relation in <sc>ion-exchange</Sc> Membranes," *J. Polym. Sci.*, 2021, doi: 10.1002/pol.20210304.
- [4] Y. Tang *et al.*, "Impact of Phenol on Membranes During Bipolar Membrane Electrodialysis for High Salinity Pesticide Wastewater Treatment," *Separations*, 2022, doi: 10.3390/separations9090241.

- [5] N. Kalita and M. Qureshi, "Hollow Cuboidal Metal Oxide-Based Asymmetric Electrode Configuration for High-Performance Anion Exchange Through Quaternized Pyridine-Poly(vinyl Alcohol) @ Metal Hydroxide Nanosheets for Water Dissociation," *J. Phys. Chem. C*, 2024, doi: 10.1021/acs.jpcc.3c07749.
- [6] Q. Wu *et al.*, "Novel Inorganic Integrated Membrane Electrodes for Membrane Capacitive Deionization," *Acs Appl. Mater. & Interfaces*, 2021, doi: 10.1021/acsami.1c10119.
- [7] N. F. Shoparwe, A. L. Ahmad, N. A. Ahmad, and Z. M. Hafis Shafie, "Fabrication, Characterisation and Electrochemical Properties of Heterogeneous Multiwalled Carbon Nanotubes Cation Exchange Membranes (MWCNT-CEMs)," *J. Phys. Sci.*, 2018, doi: 10.21315/jps2018.29.s1.6.
- [8] A. Tamburini, G. La Barbera, A. Cipollina, M. Ciofalo, and G. Micale, "CFD Simulation of Channels for Direct and Reverse Electrodialysis," *Desalin. Water Treat.*, 2012, doi: 10.1080/19443994.2012.705084.
- [9] W. Zhao, C. He, C. Nie, S. Sun, and C. Zhao, "Synthesis and Characterization of Ultrahigh Ion-Exchange Capacity Polymeric Membranes," *Ind. & Eng. Chem. Res.*, 2016, doi: 10.1021/acs.iecr.6b02770.
- [10] S. Purwanto, "Penerapan Teknologi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Untuk Mendukung Terwujudnya Kemandirian Energi Listrik Di Pesantren Raudhatul Ishlah, Tangerang Selatan," *Terang*, 2021, doi: 10.33322/terang.v3i2.1034.
- [11] S. B. Byremo Solberg and O. S. Burheim, "Transport Phenomena in Ion-Exchange Membranes," *Ecs Meet. Abstr.*, 2022, doi: 10.1149/ma2022-01451903mtgabs.
- [12] E. Karbon and O. C. Voltage, "Prosiding Seminar Nasional NCIET Vol.1 (2020) B242-B250 National Conference of Industry, Engineering and Technology 2020, Semarang, Indonesia.," vol. 1, pp. 242–250, 2020.
- [13] J. A. Veerman, R. M. D. J. B, M. A. Saakes, S. J. M. A, and G. J. H. C, "Jurnal Ilmu Membran Elektrodialisis terbalik: Perbandingan enam pasangan membran komersial pada efisiensi termodinamika dan kepadatan daya," vol. 343, pp. 7–15, 2009, doi: 10.1016/j.memsci.2009.05.047.