



ANALISIS ENERGI, EKSERGI, DAN EKONOMI SISTEM DESALINASI AIR LAUT TENAGA SURYA

Satria Putra Handoyo¹, Natalia Magdalena Kawet², Joko Setiyono³, Sunny Ineza Putri⁴

^{1,2,3}Universitas Pamulang, ⁴Universitas Riau

E-mail : ¹ satriaph@gmail.com, ² lhiakawet@gmail.com, ³ dosen00889@unpam.ac.id, ⁴ sunnyinezap@gmail.com

Masuk : 16 Februari 2024

Direvisi : 3 Maret 2024

Disetujui : 28 Maret 2024

Abstrak: Kebutuhan akan air bersih terus meningkat seiring pertumbuhan populasi dan aktivitas manusia, sementara sumber daya air tawar semakin terbatas. Salah satu solusi potensial adalah desalinasi air laut, namun teknologi ini sering menghadapi tantangan berupa konsumsi energi yang tinggi dan biaya operasional yang mahal. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis aspek energi, eksergi, dan ekonomi dari sistem desalinasi air laut yang menggunakan tenaga surya sebagai sumber energi utamanya. Analisis energi dilakukan dengan menghitung efisiensi termal sistem, sedangkan analisis eksergi difokuskan pada pengukuran kerugian energi dalam proses desalinasi. Studi ekonomi dilakukan untuk menentukan kelayakan finansial proyek dengan mempertimbangkan biaya investasi awal, biaya operasional, dan potensi penghematan biaya jangka panjang. Hasil analisis energi menunjukkan bahwa efisiensi termal sistem desalinasi adalah 30,8 % untuk volume 500 ml dan 54,2% untuk volume 750 ml. Pada analisis eksergi, ditemukan bahwa efisiensi eksergi sistem adalah 25%, mengindikasikan adanya kerugian eksergi yang signifikan dalam proses desalinasi, terutama pada tahap pemanasan air laut. Dari perspektif ekonomi, nilai NPV negatif sebesar Rp 6.655.015,58 dan Indeks Profitabilitas (PI) sebesar 0,382. Penelitian ini menyimpulkan bahwa sementara sistem desalinasi tenaga surya menawarkan solusi ramah lingkungan dan tantangan signifikan terkait dengan biaya investasi. Penelitian lebih lanjut disarankan untuk fokus pada peningkatan efisiensi sistem dan pengurangan biaya, yang dapat menjadikan teknologi ini lebih praktis dan ekonomis di masa depan.

Kata kunci: Desalinasi air laut, tenaga surya, efisiensi termal, analisis ekonomi.

Abstract: The demand for clean water continues to increase as the population and human activities grow, while freshwater resources are increasingly limited. One potential solution is seawater desalination, but this technology often faces challenges in the form of high energy consumption and expensive operational costs. This study aims to analyze the energy, exergy, and economic aspects of a seawater desalination system that uses solar power as its main energy source. The energy analysis was conducted by calculating the thermal efficiency of the system, while the exergy analysis focused on measuring energy losses in the desalination process. The economic study was conducted to determine the financial feasibility of the project by considering the initial investment costs, operational costs, and potential long-term cost savings. The results of the energy analysis showed that the thermal efficiency of the desalination system was 30.8% for 500 ml volume and 54.2% for 750 ml volume. In the exergy analysis, it was found that the exergy efficiency of the system was 25%, indicating significant exergy losses in the desalination process, especially in the seawater heating stage. From an economic perspective, the NPV value was negative at IDR 6,655,015.58 and the Profitability Index (PI) was 0.382. This study concludes that while solar desalination systems offer an environmentally friendly solution and significant challenges are associated with investment costs. Further research is recommended to focus on improving system efficiency and reducing costs, which could make this technology more practical and economical in the future.

Keywords: Seawater desalination, solar power, thermal efficiency, economic analysis.

PENDAHULUAN

Pesatnya peningkatan pertumbuhan populasi manusia dan tidak memadainya pengolahan air kotor yang dihasilkan dari limbah industri dengan menggunakan bahan kimia yang mencemari sumber air tawar menyebabkan berkurangnya ketersediaan air minum dari sumber alami setiap hari [1]. Kelangkaan air bersih merupakan masalah umum di kota-kota pesisir. Karena air laut melimpah di wilayah pesisir, salah satu cara untuk mendapatkan air tawar yang bersih dan layak untuk diminum adalah dengan mengubah air laut menjadi air tawar. Ada banyak teknik untuk mendapatkan air bersih dan desalinasi adalah salah satunya [2].

Salah satu dari berbagai metode pembersihan air adalah desalinasi dan sinar matahari adalah salah satu sumber panas yang dapat digunakan sebagai sumber energi untuk menjalankan metode tersebut. Karena sinar matahari tidak memerlukan bahan bakar, maka sinar matahari memiliki keunggulan dalam memanfaatkan energi panas matahari sehingga menjadikannya sumber energi yang berkelanjutan dan terbarukan. Namun diperlukan ruang yang lebih besar untuk mengumpulkan energi panas matahari. Ini adalah solusi praktis yang sangat baik untuk menghidupkan kehidupan di tempat-tempat yang kekurangan air bersih [3].

Desalinasi termal menggunakan energi listrik dan panas karena melibatkan pemanasan air laut dan mengembunkan uap menjadi air murni. Karena kemampuannya untuk desalinasi air asin dengan salinitas tinggi, proses desalinasi termal adalah pilihan yang lebih disukai di negara-negara sepanjang Teluk Arab [4]. Sistem gabungan sumber energi terbarukan dan teknik desalinasi air menghasilkan sekitar 1% dari total kapasitas air tawar dunia. Mereka mengklaim bahwa produksi air dengan pemanfaatan sel fotovoltaik dan sistem tenaga surya terkonsentrasi masing-masing menghasilkan 43% dan 27%. Hal ini menyoroti bahwa teknologi energi surya kurang dimanfaatkan dalam industri desalinasi air [4].

Pada sistem ini terdapat hot tank sebagai tempat penyulingan yang mengubah air laut menjadi air bersih dengan proses *heat transfer*. Untuk memperoleh keefektifan dalam memperoleh air bersih maka *hot tank* pada sistem ini menggunakan pemanas elektrik agar pemanasan pada *hot tank* lebih efektif. [5]

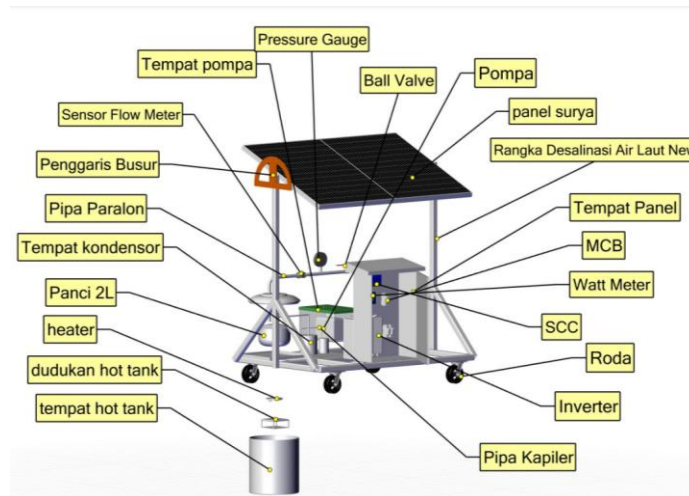
Relevansi mempelajari peralatan dan sistem desalinasi yaitu untuk mengembangkan formula baru yang efektif dalam meningkatkan *output* air bersih dan mengoptimalkan sistem peralatan desalinasi yang dapat dilihat pada beberapa literatur yang dikutip di atas. Dalam penelitian sebelumnya, alat desalinasi air laut yang menggunakan energi surya masih belum bisa bekerja secara optimal. Untuk itu dilakukan optimasi pada alat desalinasi air laut yang menggunakan 2 buah panel surya dengan kapasitas masing-masing 120 WP. Maka dari itu penelitian yang akan dilakukan oleh penulis adalah melakukan perhitungan kinerja termodinamika dan ekonomi secara bersamaan, beberapa indikator evaluasi dipilih termasuk daya yang digunakan sebagai *power supply* alat desalinasi air laut, efisiensi termal, dan yang terakhir perbandingan sistem yang disajikan serta bagaimana keputusan yang diambil penulis sebagai langkah untuk optimasi sistem desalinasi air laut.

METODOLOGI

2.1 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Luxmeter* untuk mengukur intensitas cahaya dengan prinsip kerja mengubah intensitas cahaya yang datang menjadi arus listrik, *Multimeter* untuk mengukur tiga jenis besaran listrik yaitu arus listrik, tegangan listrik, dan hambatan listrik, *Thermometer* untuk mengukur suhu fluida saat operasi sistem desalinasi air laut, *Stopwatch* untuk menghitung waktu proses desalinasi air laut, panel surya 120 WP sebanyak 2 buah, heater spiral, inverter, MPPT, pompa tangki penampung air laut, pompa air pendingin, kabel dan Arduino, besi *hollow*. Penelitian ini dilakukan di workshop Universitas Pamulang Kampus 3 Witana Harja, Jl. Witana Harja No. 18b, Pamulang Barat, Kec. Pamulang, Kota Tangerang Selatan, Banten 15417, Indonesia. Tahapan penelitian yang dilakukan yaitu pertama, tahapan perhitungan energi dengan melakukan perhitungan pada alat tentang energi yang dapat diserap melalui panel surya. Kedua tahapan perhitungan eksergi yaitu melakukan perhitungan pada proses desalinasi sampai menghasilkan air tawar dan garam, energi yang digunakan seberapa banyak. Kemudian tahapan perhitungan ekonomi yaitu melakukan perhitungan total biaya yg dihabiskan untuk membuat alat dan melakukan perhitungan pada hasil yg di dapatkan atas kinerja alat desalinasi

2.2 Desain dan Spesifikasi Alat Desalinasi Air Laut



Gambar 1 Gambar alat desalinasi air laut dengan menggunakan Solidworks

2.3 Metode Analisis Data

Analisis data yang dilakukan dengan mengolah data berdasarkan aspek teknis dan aspek biaya, berikut adalah tahapan perhitungan yang dapat dilakukan :

2.3.1 Perhitungan Beban

Data didapatkan berdasarkan hasil analisa dan perhitungan dari penelitian komponen *heater* dan pompa.

Lalu menghitung total beban dengan cara [6] :

$$\text{Cadangan energi} = 10\% \times \text{daya listrik per hari}$$

$$\text{Rugi - rugi sistem} + \text{jtr} = 10\% \times \text{daya listrik per hari}$$

$$\text{Total daya yang dibutuhkan} = \text{cadangan energi} + (\text{rugi-rugi sistem} + \text{jtr}) + \text{daya listrik per hari}$$

2.3.2 Perhitungan Panel Surya

Daya input dari Panel Surya yakni intensitas cahaya matahari (W/m^2) dengan luas penampang Panel Surya (m^2).

Rumus perhitungan daya masukan panel adalah :

$$P_{rad} = I \times A$$

Rumus perhitungan daya keluaran Panel Surya:

$$P_{out} = V \times I$$

2.3.3 Perhitungan Analisa Energi

Tujuan analisis energi adalah untuk memastikan nilai termal sistem dengan memanfaatkan hukum pertama termodinamika untuk menetapkan parameter termodinamika setiap kondisi. Semua proses dianggap berada dalam kondisi tunak untuk tujuan analisis ini (aliran tunak kondisi tunak). [7]

$$\dot{E}_{n_{state}} = \dot{m} \times h_{state}$$

Berdasar pada hukum termodinamika pertama, panas yang masuk ke sistem, harus sama dengan kerja yang dihasilkan oleh sistem dalam bentuk daya atau mekanik [8]. Sehingga dapat ditentukan:

$$Q_i - Q_o = \dot{W}_{output}$$

Selanjutnya, efisiensi termal pada pembangkit, khususnya Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$\eta_{thermal} = \frac{\dot{W}_{output}}{Q_{in}} \times 100\%$$

2.3.4 Perhitungan Analisa Eksergi

Salah satu teknik untuk menyelesaikan dan menyempurnakan pemeriksaan pengujian termal adalah analisis eksergi. Pendekatan ini akan memberikan gambaran yang jelas tentang jenis, sumber, dan posisi kerugian, sehingga memungkinkan penyesuaian dilakukan untuk menciptakan desain pengujian terbaik. Perencanaan proyek pembangkit listrik memerlukan evaluasi kinerja dan nilai ekonomis generator selain masalah efisiensi termodinamika. Faktor lingkungan dan isu pemanasan global juga harus diperhitungkan [9].

Sehingga laju eksergi total pada sebuah sistem dapat diformulasikan seperti dibawah ini:

$$\dot{E} = \dot{E}^{PH} + \dot{E}^{KN} + \dot{E}^{PT} + \dot{E}^{CH}$$

Eksergi fisik selalu berkaitan dengan temperatur, entalpi dan entropi dari bahan atau komponen.

$$\dot{E}_{in} = \dot{m} \times ((h - h_0) - T_0(s - s_0))$$

Sedangkan untuk menentukan efisiensi exergy sistem menggunakan persamaan berikut:

$$\eta_{sistem} = \frac{\dot{W}_{out}}{\dot{E}_{in}} \times 100\%$$

Untuk menghitung kerugian massa dalam proses desalinasi, kita dapat menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\Delta m = m_{in} - m_{fresh} - m_{brine}$$

2.3.5 Perhitungan Analisa Ekonomi

NPV adalah rumus yang sering digunakan untuk menentukan hasil investasi. agar kita dapat menentukan apakah nilai investasi tersebut untung atau rugi [10].

Untuk menghitung *Net Present Value* (NPV) dipergunakan rumus sebagai berikut:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{NCF_t}{(1+i)^t} - II$$

Kriteria pengambilan keputusan apakah usulan investasi layak diterima atau layak ditolak adalah sebagai berikut:

1. Investasi dinilai layak, apabila *Net Present Value* (NPV) bernilai positif (>0).
2. Investasi dinilai tidak layak, apabila *Net Present Value* (NPV) bernilai negatif (< 0).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dengan perhitungan total keseluruhan beban pada sistem desalinasi air laut selama 1 siklus per hari, maka variasi volume 500 ml akan menghabiskan daya listrik sebesar 618,015 watt dan variasi volume 750 ml akan menghabiskan daya listrik sebesar 928,012 watt.

Tabel 1 Perbandingan Total Daya Variasi Volume 500 ml dan 750 ml

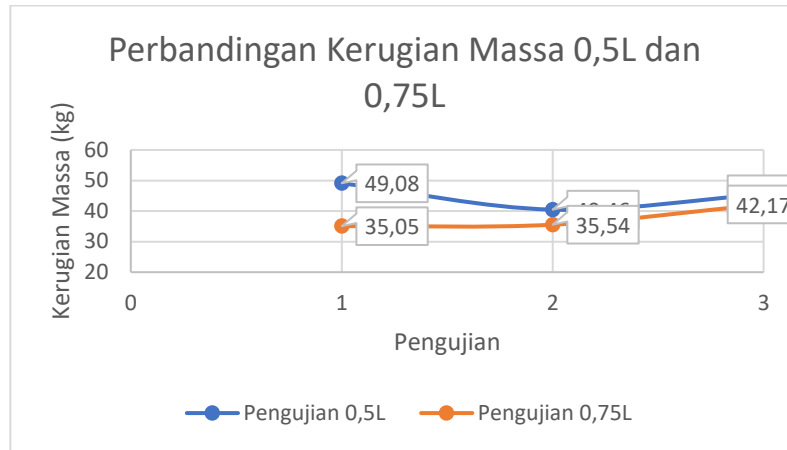
No.	Volume Air Laut (ml)	Daya (Watt)	Daya (kilo Watt)
1.	500	741,619	0,741619
2.	750	1113,614	1,113614

Hasil rata-rata daya masuk panel surya adalah 155,33 Watt per jam, kita asumsikan minimal panel surya mendapatkan sinar matahari dengan baik selama 7 jam. Maka total daya input panel surya 155,33 Watt x 7 jam = 1087,33 Wh. Hasil rata-rata daya keluar panel surya volume air laut 500 ml adalah 302,89 watt per jam. Maka total daya keluar panel surya 302,89 Wh x 2 jam = 605,78 Wh, sedangkan Hasil rata-rata daya keluar panel surya volume air laut 750 ml adalah 305,12 watt. Maka total daya keluar panel surya 305,12 Wh x 3 jam = 915,36 Wh.

sistem desalinasi menghasilkan kerja sebesar 63,57 kJ untuk volume air 500 ml dan 168,51 kJ untuk volume air 750 ml selama proses desalinasi air laut berlangsung. Ini berarti bahwa energi yang dimasukkan ke dalam sistem lebih besar daripada energi yang keluar sehingga ada surplus energi yang dapat digunakan untuk melakukan kerja. Efisiensi termal untuk variasi volume 500 ml adalah 30,8%. Ini menunjukkan bahwa sekitar 30,8% dari energi yang masuk (*input*) digunakan secara efektif sebagai keluaran kerja (*output*). Efisiensi termal untuk variasi volume 750 ml adalah 54,2%. Ini menunjukkan bahwa sekitar 54,2% dari energi yang masuk (*input*) digunakan secara efektif sebagai keluaran kerja (*output*).

jumlah keseluruhan eksergi yang tersedia dalam sistem adalah sebesar 2.353,012 Wh dengan laju kesergergi sebesar 5,813 kJ/s, yang merupakan penjumlahan dari berbagai komponen eksergi yang telah dihitung. Eksergi adalah ukuran

dari potensi maksimum untuk melakukan kerja yang berguna dalam kondisi tertentu, dan hasil ini menunjukkan total potensi kerja yang dapat diperoleh dari sistem berdasarkan komponen-komponen yang terlibat.



Grafik 1 Grafik perbandingan kerugian massa

Grafik menunjukkan bahwa kerugian massa pada volume 0,75L lebih rendah dibandingkan dengan volume 0,5L di semua pengujian. Ini bisa diartikan bahwa sistem dengan volume yang lebih besar cenderung kehilangan lebih sedikit air. Penyebabnya bisa jadi karena pada volume 0,75L, terdapat lebih banyak air yang bisa menahan kondisi penguapan atau adsorpsi, sehingga proses kehilangan air menjadi lebih lambat.

Pada volume 0,5L, ada variasi yang cukup signifikan antara pengujian pertama (49,08 gram) dengan pengujian kedua (40,46 gram), tetapi nilai kerugian massa di pengujian ketiga kembali meningkat menjadi 45,48 gram. Ini menunjukkan bahwa faktor kondisi pengujian (seperti suhu, tekanan, atau durasi) bisa mempengaruhi tingkat kerugian massa.

Untuk volume 0,75L, kerugian massa cenderung lebih konsisten antara pengujian pertama (35,05 gram) dan kedua (35,54 gram), meskipun ada sedikit kenaikan pada pengujian ketiga (42,27 gram). Konsistensi ini menunjukkan bahwa volume air yang lebih besar lebih stabil dalam menjaga kehilangan massa, tetapi kondisi tertentu di pengujian ketiga mungkin meningkatkan kerugian massa.

Variasi dalam kerugian massa dapat dipengaruhi oleh faktor-faktor eksternal seperti suhu lingkungan, kelembapan, durasi pengujian, dan tingkat adsorpsi. Misalnya, jika suhu meningkat, laju penguapan juga bisa meningkat, menyebabkan kerugian massa yang lebih besar. Untuk volume yang lebih kecil (0,5L), sedikit perubahan dalam kondisi mungkin berdampak lebih signifikan karena jumlah air yang tersedia lebih sedikit, sehingga setiap proses kehilangan air terasa lebih besar.

Tabel 2 Hasil Pengujian Alat Desalinasi Air Laut Variasi 500 ml dan 750 ml

Pengujian Ke	Volume Air Laut (ml)	Hasil Air Tawar (gr)	Hasil Rata-Rata Air Tawar (gr)	Hasil Garam (gr)	Hasil Rata-Rata Garam (gr)
1	500	436,8	440,13	14,12	14,86
2		443,9		15,64	
3		439,7		14,82	
1	750	691,62	687,64	23,33	24,77
2		688,08		26,38	
3		683,21		24,62	

Dalam tiga kali pengujian volume 500 ml rata-rata menghasilkan air tawar 440,13 gram dan garam 14,86 gram. Dalam tiga kali pengujian volume 750 ml rata-rata menghasilkan air tawar 687,64 gram dan garam 24,77 gram. Total air tawar variasi volume 500 ml yang dihasilkan setiap tahun mencapai 160.650 ml dan garam 5.420 gram. Total air tawar variasi volume 750 ml yang dihasilkan setiap tahun mencapai 250.989 ml dan garam 9.040 kg. Total kas air tawar dan garam per tahun dari variasi 500 ml yaitu Rp 102.395. Sedangkan total kas air tawar dan garam per tahun dari variasi 750 ml yaitu Rp 165.696,7. Hasil perhitungan dengan NPV bernilai negatif sebesar Rp 6.194.578,58

(NPV<0). Dengan biaya investasi awal sebesar Rp 12.400.000, nilai NPV yang diperoleh adalah negatif sebesar Rp 6.194.578,58.

KESIMPULAN

Sistem desalinasi air laut menggunakan tenaga surya menunjukkan efisiensi termal sebesar 30%. Ini mengindikasikan bahwa hanya 30,8 % untuk volume 500 ml dan 54,2 % untuk volume 750 ml dari energi yang diserap oleh sistem digunakan untuk proses desalinasi, sementara sisanya hilang sebagai panas terbang. Efisiensi ini perlu ditingkatkan melalui optimasi teknologi dan material yang digunakan dalam sistem. Efisiensi eksergi dari sistem desalinasi adalah 25%. Kerugian eksergi terbesar terjadi pada tahap pemanasan air laut, yang menunjukkan adanya potensi signifikan untuk peningkatan efisiensi melalui pengembangan teknologi pemanas yang lebih efisien dan pengurangan kerugian termal. Dalam tiga kali pengujian pada volume 500 ml menghasilkan rata – rata air tawar sebanyak 440,13 gram dan garam sebanyak 14,86 gram. Sedangkan untuk pengujian dengan volume 750 ml menghasilkan rata – rata air tawar sebanyak 687,64 gram dan garam 24,77 gram. Efisiensi eksergi yang lebih tinggi akan menghasilkan penggunaan energi yang lebih efektif dan mengurangi biaya operasional jangka panjang. Hasil perhitungan dengan NPV bernilai negatif sebesar Rp 6.194.578,58 (NPV<0). Dengan biaya investasi awal sebesar Rp 12.400.000, nilai NPV yang diperoleh adalah negatif sebesar Rp 6.194.578,58. Ini berarti bahwa proyek desalinasi air laut menggunakan tenaga surya tidak menguntungkan secara finansial berdasarkan perhitungan NPV yang diberikan, karena nilai sekarang dari arus kas yang masuk tidak mampu menutupi biaya investasi awal. Namun mengesampingkan nilai ekonomi alat ini direkomendasikan untuk daerah yang belum memiliki sumber daya air.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. A. Siregar, W. S. Damanik, and S. Lubis, “Analisa Energi pada Alat Desalinasi Air Laut Tenaga Surya Model Lereng Tunggal,” *J. Rekayasa Mesin*, vol. 12, no. 1, p. 193, 2021, doi: 10.21776/ub.jrm.2021.012.01.21.
- [2] A. Fasselis Ojan, B. V Tarigan, and D. G. H. Adoe, “Analisis Pengaruh Variasi Massa Material Arang Terhadap Proses Desalinasi Air Laut Tenaga Surya,” *LJTMU J.*, vol. 09, no. 01, pp. 101–109, 2022.
- [3] W. Naibaho, “Analisis Efisiensi Eksergi Alat Desalinasi Aktif Tenaga Surya Sistem Aktif Dengan Penggabungan Kolektor Surya,” *NOSTEJ J.*, vol. 01, no. 01, pp. 18–25, 2020.
- [4] M. A. Al-Obaidi, R. H. A. Zubo, F. L. Rashid, H. J. Dakkama, R. Abd-Alhameed, and I. M. Mujtaba, “Evaluation of Solar Energy Powered Seawater Desalination Processes: A Review,” *Energies*, vol. 15, no. 18, 2022, doi: 10.3390/en15186562.
- [5] B. B. Taqwa, R. Rosalina, and H. Ramza, “Perancangan Alat Proses Distilasi Air Laut menggunakan Pemanas Elektrik,” *Pros. Semin. Nas. Teknoka*, vol. 5, no. 2502, pp. 204–214, 2020, doi: 10.22236/teknoka.v5i.327.
- [6] Krisnandar, “ANALISA BIAYA PERENCANAAN SISTEM PENGAIRAN HIDROPONIK TEKNIK N.F.T (Nutrient Film Technique) MENGGUNAKAN POMPA AIR BERBASIS SOLAR PANEL DIBANDINGKAN DENGAN PENGGUNAAN LISTRIK DARI PT.PLN(Persero),” *Progr. Stud. Tek. ELEKTRO Fak. Tek. Univ. MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA MEDAN*, vol. 167, no. 1, pp. 1–5, 2020.
- [7] A. Wicaksono, Widjonarko, and B. Rudyanto, “Optimasi Tekanan Vakum Main Condenser Menggunakan Analisis Exergy Di Pltp Kamojang,” *Pros. Semin. Nas. NCIET*, vol. 1, no. 1, pp. 67–78, 2020, doi: 10.32497/nciet.v1i1.31.
- [8] A. L. Sati, R. Anugrah, and Safruddin, “Analisis Energi Dan Eksergi Pada Sistem Rotary Kiln Rkc-2 Pt. Semen Baturaja,” *J. Multidisipliner Bharasumba*, vol. 1, no. 3, pp. 523–537, 2022.
- [9] P. Sundari, “STUDI PEMANFAATAN KELEBIHAN UAP DARI KATUP BUANG PLTP KAMOJANG,” *Inst. Teknol. BANDUNG*, pp. 1–7, 2019.
- [10] M. Ilham Amba and R. Dalimi, “Economic Analysis of Hybrid Power Plant (Solar-Diesel) on Kawaluso Island, North Sulawesi,” *J. EECCIS (Electrics, Electron. Commun. Control. Informatics, Syst.*, vol. 17, no. 1,

