

PREDIKSI JANGKA PENDEK DAYA KELUARAN MENGGUNAKAN BPNN PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SAMPAH (PLTSA) BENOWO**Rendy Nanda Saputra¹, Tri Wrahatnolo², Subuh Isnur Haryudo³**

S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

email: rendy.21045@mhs.unesa.ac.id, triwrahatnolo@unesa.ac.id, subuhisnur@unesa.ac.id**Abstract**

Waste Power Plants (PLTSA) are strategic solutions in waste management as well as the provision of renewable energy. However, the high fluctuations of waste characteristics have an impact on the instability of the electrical power produced. This study aims to predict the short-term output power of PLTSA Benowo using the Artificial Neural Network (JST) model based on the Backpropagation algorithm. The model is designed to process four main input parameters, namely the amount of daily waste generated, the initial temperature of combustion, the actual temperature of combustion, and the pressure of steam produced. The network architecture consists of a single hidden layer with ten neurons, a tansig activation function on the hidden layer, and a purelin on the output layer. Training is carried out using MATLAB software until optimal convergence is achieved. The results showed the lowest Mean Squared Error (MSE) value of 0.057575 in the first epoch, and the overall correlation coefficient (R) value of 0.62937. Although the model manages to capture the nonlinear relationship between the input and output power parameters, the prediction performance is still moderate and needs to be improved. Development recommendations include optimizing network architecture, increasing data volume, and implementing a time-series forecasting approach. This research is expected to contribute to improving the efficiency and reliability of waste-based power generation systems in Indonesia. Overall, the results of this study indicate that the application of the Artificial Neural Network (ANN) model using the Backpropagation algorithm has the potential to be an initial approach for making short-term predictions of the output power of the Benowo Waste Power Plant (PLTSA). Although the level of prediction accuracy obtained is still in the moderate category, the model is capable of representing the nonlinear relationship between operational parameters and the generated electrical power. Thus, it can be concluded that ANN has prospects for integration into the predictive operational system of PLTSA to support a more adaptive and efficient decision-making process. However, the effectiveness of the model can still be improved through efforts to optimize the network structure and expand the training database, thus being able to produce more precise and applicable predictions in the actual implementation of waste-based generation systems.

Article History

Submitted: 25 Februari 2026

Accepted: 28 Februari 2026

Published: 1 Maret 2026

Key Words

PLTSA, artificial neural network, backpropagation, power prediction, renewable energy

Abstrak

Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSA) merupakan solusi strategis dalam pengelolaan limbah sekaligus penyediaan energi terbarukan. Namun, fluktuasi karakteristik sampah yang tinggi berdampak pada ketidakstabilan daya listrik yang dihasilkan. Penelitian ini bertujuan untuk memprediksi daya keluaran jangka pendek PLTSA Benowo dengan menggunakan model Jaringan Syaraf Tiruan (JST) berbasis algoritma Backpropagation. Model dirancang untuk memproses empat parameter input utama, yakni jumlah timbulan sampah harian, suhu awal pembakaran, suhu aktual pembakaran, dan tekanan uap yang dihasilkan. Arsitektur jaringan terdiri dari satu lapisan tersembunyi dengan sepuluh neuron, fungsi aktivasi tansig pada hidden layer, dan purelin pada output layer. Pelatihan dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB hingga tercapai konvergensi optimal. Hasil pelatihan menunjukkan nilai Mean Squared Error (MSE) terendah sebesar 0,057575 pada epoch pertama, serta nilai koefisien korelasi (R) keseluruhan sebesar

Sejarah Artikel

Submitted: 25 Februari 2026

Accepted: 28 Februari 2026

Published: 1 Maret 2026

Kata Kunci

PLTSA, jaringan syaraf tiruan, backpropagation, prediksi daya, energi terbarukan.

0,62937. Meskipun model berhasil menangkap hubungan nonlinier antara parameter input dan output daya, performa prediksi masih tergolong sedang dan perlu ditingkatkan. Rekomendasi pengembangan meliputi optimalisasi arsitektur jaringan, peningkatan volume data, dan penerapan pendekatan time-series forecasting. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi kontribusi dalam peningkatan efisiensi dan keandalan sistem pembangkitan listrik berbasis limbah di Indonesia. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan model Jaringan Syaraf Tiruan (JST) dengan algoritma Backpropagation berpotensi sebagai pendekatan awal dalam melakukan prediksi jangka pendek terhadap daya keluaran Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa) Benowo. Meskipun tingkat akurasi prediksi yang diperoleh masih berada pada kategori sedang, model mampu merepresentasikan keterkaitan nonlinier antara parameter-parameter operasional dan daya listrik yang dihasilkan. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa JST memiliki prospek untuk diintegrasikan dalam sistem prediktif operasional PLTSa guna menunjang proses pengambilan keputusan yang lebih adaptif dan efisien. Namun demikian, efektivitas model masih dapat ditingkatkan melalui upaya optimalisasi struktur jaringan serta perluasan basis data pelatihan, sehingga mampu menghasilkan prediksi yang lebih presisi dan aplikatif dalam implementasi sistem pembangkitan berbasis limbah secara nyata.

PENDAHULUAN

Surabaya, sebagai ibu kota Provinsi Jawa Timur, merupakan salah satu kota terbesar di Indonesia yang mengalami pertumbuhan populasi dan urbanisasi yang pesat. Seiring dengan perkembangan tersebut, pengelolaan sampah di Surabaya menjadi semakin kompleks. Setiap hari, kota ini menghasilkan sekitar 1.500 hingga 1.800 ton sampah, sebagian besar berasal dari rumah tangga, pasar, dan area komersial. Volume sampah yang besar ini berpotensi menimbulkan berbagai masalah lingkungan, seperti pencemaran tanah, air, dan udara, yang berdampak pada kesehatan masyarakat. Untuk mengatasi hal tersebut, Pemerintah Kota Surabaya telah melakukan berbagai upaya pengelolaan sampah, seperti pengembangan sistem 3R (*reduce, reuse, recycle*) dan pengoperasian Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Benowo sebagai fasilitas utama pengolahan sampah. TPA Benowo telah dilengkapi dengan teknologi Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa), yang mengubah sampah menjadi energi listrik. Teknologi ini dianggap sebagai solusi untuk mengurangi volume sampah sekaligus menyediakan sumber energi terbarukan bagi kota. Namun, penerapan PLTSa di Surabaya menghadapi beberapa tantangan, seperti variabilitas kualitas sampah, pola pengelolaan sampah masyarakat, dan kemampuan operasional di TPA Benowo. Selain itu, aspek kelayakan ekonomi, sosial, dan lingkungan juga perlu dipertimbangkan untuk memastikan bahwa PLTSa dapat beroperasi secara berkelanjutan dan memberikan manfaat bagi masyarakat (Rajagukguk, 2020).

Permintaan energi listrik yang terus meningkat mendorong perlunya pemanfaatan sumber energi alternatif yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan. Salah satu solusi yang dikembangkan adalah Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa), yang mengubah limbah padat menjadi energi listrik melalui proses termal. Di Indonesia, PLTSa Benowo di Surabaya menjadi salah satu proyek percontohan nasional dalam penerapan teknologi *Waste to Energy* (WtE) (Putu et al., 2023). PLTSa ini tidak hanya berperan dalam penyediaan energi terbarukan tetapi juga dalam pengelolaan limbah kota. Namun, daya listrik yang dihasilkan oleh PLTSa sangat dipengaruhi oleh sifat sampah yang berubah-ubah, seperti volume harian, kadar kelembaban, dan nilai kalor sampah itu sendiri. Variasi ini menyebabkan daya listrik yang dihasilkan bersifat tidak stabil, sehingga menjadi tantangan dalam menjaga efisiensi dan keandalan sistem pembangkitan.

Oleh karena itu, diperlukan analisis kelayakan yang komprehensif untuk menilai potensi PLTSA di TPA Benowo sebagai solusi pengelolaan sampah yang berkelanjutan di Kota Surabaya. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kelayakan teknis, ekonomi, dan lingkungan dari proyek ini, serta memberikan rekomendasi kebijakan yang tepat untuk pengembangan energi berbasis sampah di masa depan.

Energi baru terbarukan (EBT) semakin banyak dikembangkan sebagai alternatif untuk menggantikan bahan bakar fosil. EBT mencakup sumber energi seperti energi surya, angin, hidro, biomassa, dan panas bumi yang bersifat ramah lingkungan dan dapat mengurangi emisi gas rumah kaca, mendukung upaya mitigasi perubahan iklim. Di Indonesia, penggunaan EBT menjadi prioritas dalam diversifikasi energi nasional, dengan target mencapai 23% pada tahun 2025. Indonesia memiliki potensi besar dalam sumber daya EBT, termasuk energi panas bumi, hidro, dan biomassa. Biomassa memiliki keunggulan karena dapat memanfaatkan limbah organik, termasuk sampah kota, sebagai sumber energi. Oleh karena itu, pengelolaan sampah menjadi fokus dalam pengembangan energi biomassa, khususnya di kota-kota besar yang menghadapi permasalahan sampah.

Pemanfaatan sampah sebagai sumber energi sejalan dengan pendekatan ekonomi sirkular, yang menjadikan sampah sebagai sumber daya, bukan limbah. Salah satu teknologi yang mendukung konsep ini adalah PLTSA, yang mengonversi sampah menjadi energi listrik melalui proses pembakaran. Teknologi ini memberikan manfaat ganda: mengurangi volume sampah di TPA dan menghasilkan energi yang dapat digunakan oleh masyarakat. Di TPA Benowo Surabaya, teknologi PLTSA telah diterapkan sebagai inovasi pengelolaan sampah berbasis energi terbarukan. Sistem ini mengolah sampah anorganik dan organik untuk menghasilkan energi, sehingga mengurangi ketergantungan pada sumber energi fosil. Namun, pengembangan PLTSA menghadapi tantangan besar, terutama dalam hal investasi awal yang tinggi dan pengelolaan yang efektif untuk memenuhi standar lingkungan dan kesehatan (Rajagukguk, 2020). Oleh karena itu, evaluasi teknis, ekonomi, dan lingkungan terhadap PLTSA di Surabaya sangat penting untuk memastikan bahwa pemanfaatan sampah sebagai sumber EBT dapat memberikan manfaat optimal bagi masyarakat dan lingkungan.

Kinerja PLTSA dapat dievaluasi melalui beberapa aspek utama, seperti efisiensi energi, kapasitas pengolahan sampah, dan dampak lingkungan. Di TPA Benowo, PLTSA mengolah sampah menjadi energi listrik, yang merupakan solusi inovatif dalam pengelolaan limbah padat. Kinerja PLTSA sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk jenis dan komposisi sampah yang diolah, teknologi konversi energi yang digunakan, serta kondisi operasional fasilitas. Efisiensi energi adalah salah satu indikator penting untuk menilai kinerja PLTSA. Di TPA Benowo, sebagian besar sampah yang diolah adalah sampah domestik dengan nilai kalor rendah, terutama sampah organik yang memiliki kadar air tinggi.

Teknologi PLTSA di Benowo dirancang untuk mengoptimalkan proses konversi energi meskipun nilai kalor sampah bervariasi. Secara umum, teknologi PLTSA modern mampu mencapai efisiensi sekitar 20-30%, yang berarti 20-30% energi potensial dalam sampah diubah menjadi listrik yang dapat digunakan.

Selain itu, kapasitas pengolahan sampah juga menentukan kinerja PLTSA. Semakin besar volume sampah yang diproses, semakin banyak energi yang dihasilkan. Di TPA Benowo, PLTSA dirancang untuk mengolah sekitar 1.000 ton sampah per hari, dengan kapasitas produksi listrik yang dapat mencapai beberapa megawatt, tergantung pada kondisi sampah dan efisiensi pembakaran. Namun, operasi PLTSA juga menghasilkan emisi gas dan abu sisa pembakaran yang perlu dikelola dengan hati-hati untuk meminimalkan dampak terhadap lingkungan. Oleh karena itu, evaluasi terkait dampak lingkungan PLTSA sangat penting untuk memastikan bahwa sistem ini dapat beroperasi sesuai dengan regulasi yang berlaku.

Dari perspektif ekonomi, biaya operasional dan pemeliharaan juga memengaruhi kinerja keseluruhan PLTSA. PLTSA memerlukan investasi besar untuk teknologi, infrastruktur, dan

pelatihan sumber daya manusia. Untuk mengatasi hal ini, sistem prediksi daya keluaran jangka pendek diperlukan untuk mendeteksi tren daya secara real-time, mengoptimalkan pembebanan dan proses pembakaran, serta memastikan kestabilan integrasi daya dengan jaringan PLN. Dengan sistem prediksi yang andal, pemborosan energi dapat diminimalkan dan gangguan operasional dapat dicegah.

Perkembangan teknologi kecerdasan buatan, khususnya jaringan syaraf tiruan (JST) dengan algoritma backpropagation, memberikan peluang baru dalam mengembangkan model prediksi berbasis data historis. Keunggulan metode ini terletak pada kemampuannya menangani data yang kompleks dan non-linear, menjadikannya cocok untuk diterapkan pada sistem seperti PLTSa. Penelitian ini difokuskan pada pengembangan dan implementasi model prediksi daya keluaran jangka pendek pada PLTSa Benowo menggunakan metode JST backpropagation. Diharapkan, penelitian ini dapat mendukung optimalisasi efisiensi energi dan peningkatan keandalan sistem pembangkitan listrik berbasis sampah di Indonesia, khususnya di Surabaya.

METODE

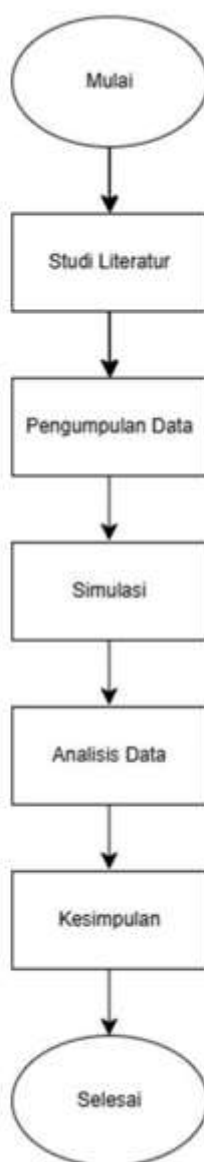
Penelitian ini menerapkan pendekatan kuantitatif yang berorientasi pada pengumpulan data berbentuk angka melalui pengamatan langsung terhadap objek studi, yakni fasilitas PLTSa Benowo. Pengumpulan data dilakukan secara terstruktur dengan mengamati setiap komponen sistem pembangkit secara detail guna memperoleh parameter yang bersifat numerik dan relevan untuk dianalisis lebih lanjut. Data yang diperoleh kemudian diolah menggunakan rumus perhitungan potensi energi listrik serta konversi limbah menjadi energi, sehingga menghasilkan keluaran yang akurat dan objektif. Untuk mendukung akurasi data, metode observasi langsung digunakan dengan pendekatan sistematis, di mana setiap elemen sistem dianalisis berdasarkan spesifikasinya dan dibandingkan dengan standar efisiensi energi yang diacu, yakni ISO 50001.

Tujuan utama dari pendekatan ini adalah mengidentifikasi kapasitas konversi limbah menjadi energi listrik yang efektif serta mengukur efisiensinya sebagai bentuk dukungan terhadap energi berkelanjutan. Teknik pengumpulan data dalam penelitian ini terdiri dari empat metode utama: pertama, studi literatur dilakukan untuk memperoleh landasan teoritis dan metodologis yang kokoh, serta untuk menggali kebaruan topik dan pendekatan yang paling sesuai; kedua, observasi lapangan dilakukan langsung di lokasi untuk mengidentifikasi kondisi aktual dan kinerja komponen sistem; ketiga, wawancara dengan narasumber ahli di lokasi penelitian digunakan untuk memperdalam pemahaman mengenai operasional sistem; dan keempat, pengumpulan data teknis yang meliputi informasi terkait kapasitas energi, tahun operasional, durasi operasional bulanan, serta parameter teknis lainnya yang mendukung tujuan penelitian. Instrumen yang digunakan dirancang untuk menjamin keandalan data, termasuk dua jenis pengujian utama, yaitu potensi energi listrik dan efisiensi konversi limbah, yang dianalisis menggunakan standar ISO 50001.

Prediksi daya jangka pendek dilakukan menggunakan metode jaringan syaraf tiruan jenis Back-Propagation, yang diimplementasikan melalui perangkat lunak MATLAB untuk menyimulasikan dan mengevaluasi performa sistem berdasarkan data yang telah dikumpulkan. Penelitian ini dilaksanakan di PLTSa Benowo pada rentang waktu Maret hingga April 2025, dengan fokus penelitian diarahkan pada unit pembakaran (*Combustion Unit*) sebagai komponen utama konversi energi. Teknik analisis data dilakukan melalui perhitungan berdasarkan hasil uji empiris, yang selanjutnya dibandingkan dengan acuan standar untuk menentukan nilai potensi dan efisiensi sistem dalam menghasilkan energi listrik dari limbah secara optimal dan ramah lingkungan.

Gambar 1. menyajikan urutan sistematis dari tahapan metodologis yang digunakan dalam pelaksanaan penelitian ini. Prosedur dimulai dengan kegiatan studi literatur sebagai fondasi

teoritis yang mendasari arah penelitian, sekaligus untuk mengidentifikasi celah penelitian dan pendekatan metodologi yang sesuai. Selanjutnya, dilakukan pengumpulan data secara terstruktur yang mencakup observasi lapangan, wawancara, serta akuisisi data teknis dari objek penelitian. Data yang diperoleh kemudian dijadikan dasar dalam proses simulasi untuk memodelkan kinerja sistem konversi sampah menjadi energi listrik. Hasil simulasi selanjutnya dianalisis guna mengevaluasi potensi energi yang dihasilkan, serta untuk menilai tingkat efisiensi proses konversi yang dilakukan. Tahapan akhir melibatkan penyusunan kesimpulan berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan secara kuantitatif dan komprehensif.



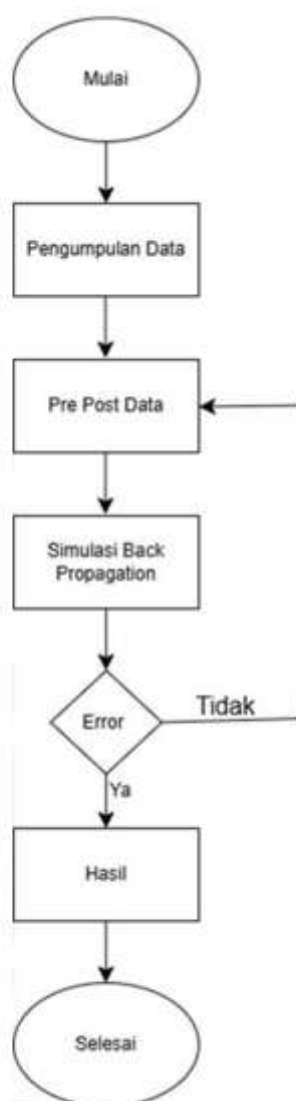
Gambar 1. Flowchart Langkah Penelitian

Dengan mengikuti tahapan yang terstruktur sebagaimana digambarkan dalam diagram alir 1, proses penelitian ini diharapkan mampu menghasilkan temuan yang valid dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

Setiap tahap dalam alur kerja ini saling berkaitan dan membentuk kerangka kerja analitis yang logis, mulai dari penelusuran literatur hingga penyusunan simpulan berdasarkan data yang telah dianalisis. Model ini dirancang untuk menjamin keterlacakan dan konsistensi proses

ilmiah, sekaligus mendukung pencapaian tujuan utama penelitian, yaitu mengukur dan mengevaluasi potensi konversi limbah menjadi energi listrik secara efisien dan berkelanjutan.

Diagram alur pada Gambar 2 menggambarkan tahapan proses yang digunakan dalam penelitian ini untuk melakukan prediksi keluaran energi listrik menggunakan metode jaringan syaraf tiruan tipe Backpropagation. Proses diawali dengan tahap pengumpulan data yang mencakup parameter input dan output dari sistem pembangkit. Data yang diperoleh kemudian diolah dalam tahap pre-processing dan post-processing guna memastikan bahwa format dan struktur data sesuai dengan kebutuhan pemodelan. Setelah data dipersiapkan, dilakukan proses simulasi dengan metode Backpropagation untuk melatih model jaringan syaraf terhadap data yang tersedia. Proses pelatihan ini melibatkan evaluasi tingkat kesalahan (error) sebagai indikator kinerja model dalam memetakan pola data.

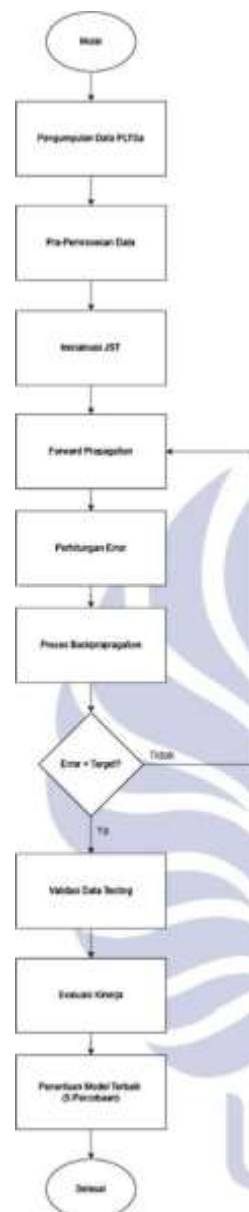


Gambar 2. Flowchart analisis data

Jika nilai kesalahan (error) yang dihasilkan dari proses pelatihan belum berada dalam ambang batas yang dapat diterima, maka sistem akan kembali ke tahap awal pemrosesan data untuk dilakukan penyesuaian ulang. Proses ini berlangsung secara iteratif hingga model menghasilkan tingkat kesalahan yang minimal dan dapat dikatakan optimal. Setelah kondisi

tersebut tercapai, hasil simulasi akan dikaji untuk mendapatkan keluaran prediksi daya listrik yang dihasilkan oleh sistem konversi sampah. Dengan alur kerja yang sistematis dan berbasis umpan balik ini, diharapkan model yang dibangun memiliki tingkat akurasi yang tinggi serta dapat digunakan sebagai alat bantu prediktif yang andal dalam konteks perencanaan dan pengembangan energi terbarukan.

Alur permodelan jaringan syaraf tiruan Backpropagation pada penelitian ini disusun secara sistematis untuk menggambarkan tahapan pengolahan data hingga evaluasi kinerja model secara komprehensif. Pada Gambar 3 menunjukkan flowchart yang menyajikan urutan proses permodelan yang digunakan, mulai dari tahap persiapan sistem, pengumpulan dan pra-pemrosesan data operasional PLT Sa Benowo, proses pelatihan jaringan, hingga tahap validasi dan penentuan model terbaik sebagai dasar prediksi daya keluaran.



Gambar 3. Flowchart Proses Permodelan Backpropagation

Proses permodelan diawali dengan penetapan ruang lingkup sistem dan persiapan lingkungan komputasi menggunakan MATLAB sebagai platform pengembangan jaringan syaraf tiruan Backpropagation. Data yang digunakan berasal dari laporan operasional PLT Sa

Benowo Surabaya, meliputi jumlah sampah masuk harian, suhu awal pembakaran, suhu insinerasi, tekanan uap boiler, dan daya keluaran turbin sebagai variabel input dan target prediksi.

Data selanjutnya melalui tahap pra-pemrosesan yang mencakup pembersihan data dari anomali dan normalisasi menggunakan metode Min-Max untuk menyeragamkan skala variabel, meningkatkan stabilitas pelatihan, serta mempercepat konvergensi jaringan. Arsitektur jaringan ditetapkan terdiri atas empat neuron pada lapisan input, lima puluh neuron pada lapisan tersembunyi, dan satu neuron pada lapisan output. Bobot dan bias diinisialisasi secara acak, sedangkan parameter pelatihan ditentukan untuk mendukung proses pembelajaran yang optimal.

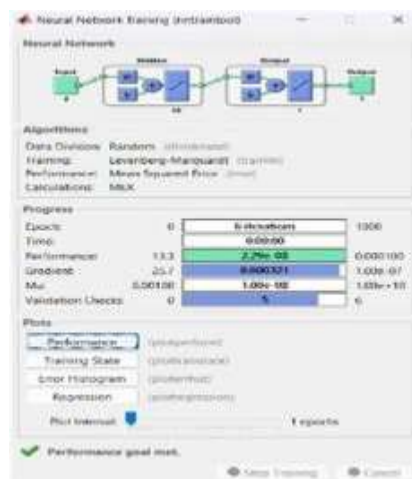
Pelatihan jaringan dilakukan melalui mekanisme forward propagation untuk menghasilkan nilai prediksi awal, diikuti perhitungan error sebagai selisih antara nilai prediksi dan target. Error tersebut digunakan dalam proses backpropagation untuk memperbarui bobot dan bias secara iteratif menggunakan metode gradient descent hingga mencapai kondisi konvergen. Model yang telah terlatih kemudian diuji menggunakan data pengujian untuk mengevaluasi kemampuan generalisasi.

Kinerja model dinilai menggunakan Mean Absolute Error (MAE), Mean Squared Error (MSE), dan Mean Absolute Percentage Error (MAPE). Seluruh hasil dari beberapa perlakuan pelatihan dibandingkan, dan model dengan 50 neuron pada lapisan tersembunyi ditetapkan sebagai model terbaik berdasarkan nilai error terendah dan kestabilan prediksi, sehingga layak digunakan untuk prediksi daya keluaran PLTSa Benowo.

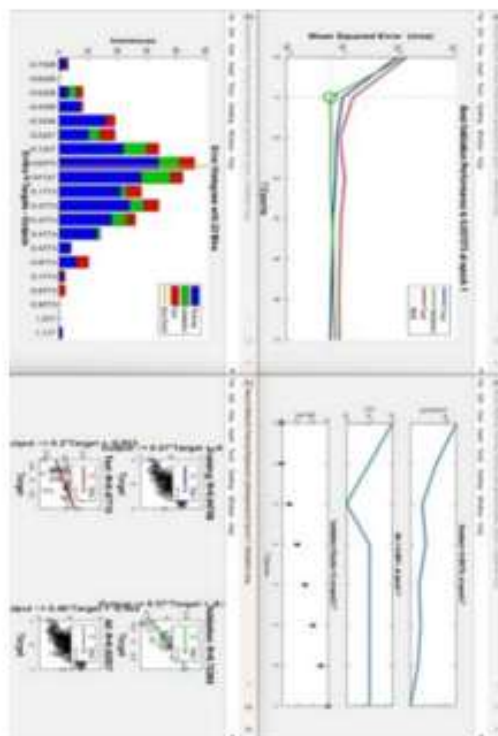
HASIL DAN PEMBAHASAN

Prediksi daya keluaran jangka pendek pada Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa) Benowo dilakukan menggunakan pendekatan Backpropagation Neural Network (BPNN), yang efektif dalam memodelkan hubungan nonlinier antara parameter masukan dan keluaran sistem. Model BPNN dilatih menggunakan data historis operasional PLTSa yang mencakup variabel-variabel utama yang berpengaruh terhadap produksi energi listrik.

Model prediksi dikembangkan menggunakan algoritma Backpropagation sebagai metode pelatihan utama dan diimplementasikan melalui perangkat lunak MATLAB. Empat parameter operasional digunakan sebagai variabel input, yaitu jumlah timbunan sampah harian, suhu awal pembakaran, suhu proses pembakaran, dan tekanan uap, sedangkan daya listrik keluaran (MW) ditetapkan sebagai variabel output. Struktur model ini dirancang untuk menangkap pola hubungan kompleks antar-variabel dalam sistem termal PLTSa. Pengaturan model Neural Network Training ditunjukkan pada Gambar 4 sebagai berikut.



Gambar 4 Neural Network Training



Gambar 5 Plots Neural Network Training

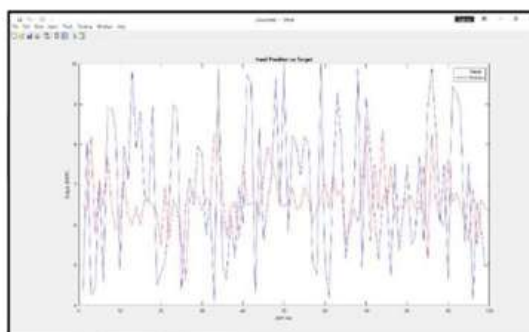
Prediksi daya keluaran jangka pendek pada Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSA) Benowo dilakukan dengan menerapkan metode Backpropagation Neural Network (BPNN), yaitu salah satu algoritma dalam jaringan syaraf tiruan (JST) yang dikenal mampu menangani hubungan nonlinier antara variabel input dan output secara efektif. Pendekatan ini digunakan untuk membangun model prediktif berdasarkan data historis operasional PLTSA, yang mencerminkan dinamika berbagai parameter yang memengaruhi pembangkitan energi listrik. Model BPNN dilatih dengan dataset yang mencakup sejumlah variabel penting merepresentasikan kondisi aktual di lapangan, sehingga yang memungkinkan sistem untuk mengenali pola tersembunyi dalam data.

Pengujian BPNN dengan Perlakuan Hidden Layer

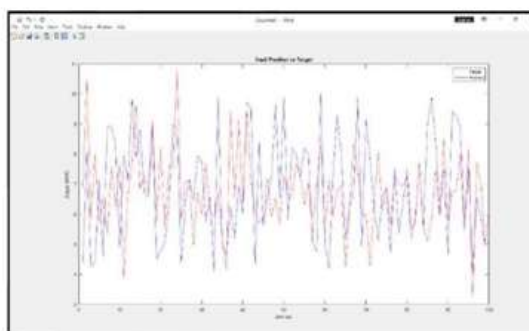
Struktur arsitektur JST yang diterapkan terdiri atas satu hidden layer yang berisi sepuluh neuron. Fungsi aktivasi yang digunakan pada lapisan tersembunyi adalah tangent sigmoid (tansig), sementara pada output layer digunakan fungsi aktivasi linier (purelin), agar sesuai dengan karakteristik regresi dari variabel target. Proses pelatihan model dilakukan secara iteratif hingga MATLAB menghentikan pelatihan secara otomatis setelah melewati tujuh epoch. Penghentian ini dilakukan berdasarkan mekanisme early stopping, yakni ketika tidak terjadi peningkatan nilai validasi selama enam iterasi berturut-turut. Strategi ini digunakan untuk mencegah overfitting serta memastikan bahwa model tetap memiliki kemampuan generalisasi yang baik terhadap data baru.

1) Hasil Grafik Simulasi BPNN

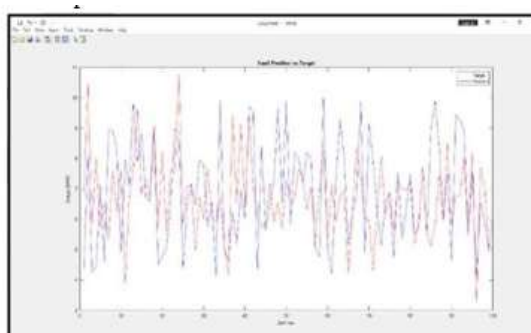
Untuk mengetahui pengaruh jumlah neuron pada lapisan tersembunyi terhadap kinerja model Backpropagation Neural Network (BPNN), dilakukan serangkaian simulasi dengan variasi jumlah hidden layer neuron. Pada penelitian ini diterapkan lima perlakuan, yaitu penggunaan 10, 20, 30, 40, dan 50 neuron pada lapisan tersembunyi. Hasil simulasi dari masing-masing perlakuan kemudian disajikan dalam bentuk grafik untuk memperlihatkan perbandingan performa prediksi daya keluaran PLTSa Benowo serta kecenderungan perubahan tingkat akurasi akibat variasi arsitektur jaringan. Hasil grafik ditunjukkan masing-masing pada Gambar 6, 7, 8, 9, dan 10 sebagai berikut.



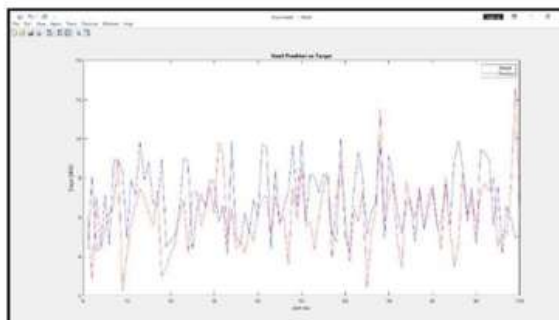
Gambar 6 Grafik dengan 10 Hidden Layer



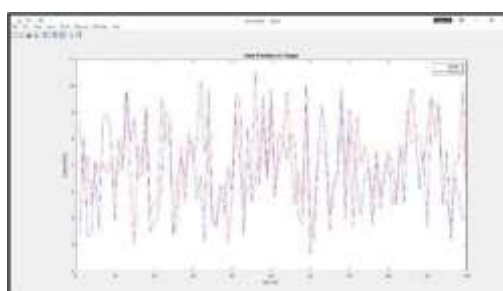
Gambar 7 Grafik dengan 20 Hidden Layer



Gambar 8 Grafik dengan 30 Hidden Layer



Gambar 9 Grafik dengan 40 Hidden Layer



Gambar 10 Grafik dengan 50 Hidden Layer

2) Tabel Hasil Simulasi BPNN

Berdasarkan hasil simulasi Backpropagation Neural Network (BPNN) yang telah disajikan dalam bentuk grafik pada berbagai variasi jumlah neuron pada lapisan tersembunyi, diperlukan penyajian data secara kuantitatif untuk memperjelas perbandingan kinerja antar-perlakuan. Oleh karena itu, hasil simulasi tersebut selanjutnya dirangkum dalam bentuk tabel yang memuat nilai evaluasi kinerja model pada masing-masing konfigurasi hidden layer, sehingga perbedaan tingkat akurasi dan kestabilan prediksi dapat dianalisis secara lebih sistematis. Masing- masing hasil tabel simulasi ditunjukkan pada Tabel 1, 2, 3, 4, dan 5 sebagai berikut.

Tabel 1 Hasil Prediksi dengan 10 Hidden Layer

Jam ke-	Target	Prediksi	Error	Error %
1	4,3	4,03	0,27	6,27907
5	8	7	1	12,5
10	4,89	7,3	-2,41	-49,2843
15	8,8	6,5	2,3	26,13636
20	4,7	6,5	-1,8	-38,2979
25	4,3	4,2	0,1	2,325581
30	7,7	6	1,7	22,07792
35	5	7,9	-2,9	-58
40	6,03	6,8	-0,77	-12,7695
45	5,6	6,3	-0,7	-12,5
50	9,8	8,5	1,3	13,26531
55	8,1	6,2	1,9	23,45679

60	5	4,3	0,7	14
65	5,1	5,7	-0,6	-11,7647
70	9,1	7,1	2	21,97802
75	6,8	2,9	3,9	57,35294
80	7,4	8,2	-0,8	-10,8108
85	8,9	7,1	1,8	20,22472
90	4,6	7,5	-2,9	-63,0435
95	7,5	7,3	0,2	2,666667
100	5	6,4	-1,4	-28

Tabel 2 Hasil Prediksi dengan 20 Hidden Layer

Jam ke-	Target	Prediksi	Error	Error %
1	4,3	6,5	-2,2	-51,1628
5	7,12	7,02	0,1	1,404494
10	4,89	5,9	-1,01	-20,6544
15	8,8	6,01	2,79	31,70455
20	4,7	5,4	-0,7	-14,8936
25	4,3	5,5	-1,2	-27,907
30	7,7	6,3	1,4	18,18182
35	6,7	5	1,7	25,37313
40	6,03	7,4	-1,37	-22,7197
45	5,6	7,2	-1,6	-28,5714
50	9,8	6,4	3,4	34,69388
55	8,1	6,9	1,2	14,81481
60	5	7	-2	-40
65	5,1	5,5	-0,4	-7,84314
70	9,1	8,4	0,7	7,692308
75	6,8	6,4	0,4	5,882353
80	7,4	6,6	0,8	10,81081
85	8,9	5,1	3,8	42,69663
90	4,6	7,6	-3	-65,2174
95	7,5	5,5	2	26,66667
100	5	6,3	-1,3	-26

Tabel 3 Hasil Prediksi dengan 30 Hidden Layer

Jam ke-	Target	Prediksi	Error	Error %
1	4,3	7	-2,7	-62,7907
5	8	7,6	0,4	5
10	4,89	6,1	-1,21	-24,7444
15	8,8	7,5	1,3	14,77273
20	4,7	6,7	-2	-42,5532
25	4,3	6	-1,7	-39,5349

30	7,7	3,8	3,9	50,64935
35	5	7,9	-2,9	-58
40	6,03	5,8	0,23	3,814262
45	5,6	4,4	1,2	21,42857
50	9,8	9,1	0,7	7,142857
55	8,1	7,2	0,9	11,11111
60	5	5,6	-0,6	-12
65	5,1	6,2	-1,1	-21,5686
70	9,1	7,5	1,6	17,58242
75	6,8	7,1	-0,3	-4,41176
80	7,4	8,2	-0,8	-10,8108
85	8,9	7,5	1,4	15,73034
90	4,6	7,2	-2,6	-56,5217
95	7,5	6,5	1	13,33333
100	5	8	-3	-60

Tabel 4 Hasil Prediksi dengan 40 Hidden Layer

Jam ke-	Target	Prediksi	Error	Error %
1	4,3	5,3	-1	-23,2558
5	8	9	-1	-12,5
10	4,89	4,4	0,49	10,02045
15	8,8	11	-2,2	-25
20	4,7	4,2	0,5	10,6383
25	4,3	4,4	-0,1	-2,32558
30	7,7	6,5	1,2	15,58442
35	5	4,2	0,8	16
40	6,03	-1	7,03	116,5837
45	5,6	5,7	-0,1	-1,78571
50	9,8	8,4	1,4	14,28571
55	8,1	2,7	5,4	66,66667
60	5	3,8	1,2	24
65	5,1	5,5	-0,4	-7,84314
70	9,1	3,9	5,2	57,14286
75	6,8	9,7	-2,9	-42,6471
80	7,4	7,9	-0,5	-6,75676
85	8,9	9,5	-0,6	-6,74157
90	4,6	6	-1,4	-30,4348
95	7,5	3,2	4,3	57,33333
100	5	4,7	0,3	6

Tabel 5 Hasil Prediksi dengan 50 Hidden Layer

Jam ke-	Target	Prediksi	Error	Error %
1	4,3	6,3	-2	-46,5116
5	8	5,7	2,3	28,75

10	4,89	7,5	-2,61	-53,3742
15	8,8	8,8	0	0
20	4,7	5	-0,3	-6,38298
25	4,3	3,2	1,1	25,5814
30	7,7	4,8	2,9	37,66234
35	5	4,3	0,7	14
40	6,03	6,1	-0,07	-1,16086
45	5,6	3,4	2,2	39,28571
50	9,8	7,4	2,4	24,4898
55	8,1	4,6	3,5	43,20988
60	5	8,6	-3,6	-72
65	5,1	5,1	0	0
70	9,1	8,7	0,4	4,395604
75	6,8	2,8	4	58,82353
80	7,4	5,5	1,9	25,67568
85	8,9	9,5	-0,6	-6,74157
90	4,6	3,4	1,2	26,08696
95	7,5	6,8	0,7	9,333333
100	5	3,8	1,2	24

Evaluasi Kinerja Perhitungan Proses BPNN

Pada tahap ini dilakukan evaluasi terhadap kinerja model Jaringan Syaraf Tiruan (JST) berdasarkan lima perlakuan berbeda yang telah diujikan. Setiap perlakuan menghasilkan nilai prediksi yang dibandingkan dengan data target aktual untuk menilai tingkat keakuratannya. Dari kelima perlakuan tersebut, perlakuan kelima dengan jumlah hidden layer sebesar 50 menunjukkan hasil terbaik dengan error yang relatif lebih rendah serta pola prediksi yang lebih mendekati nilai aktual. Oleh karena itu, perlakuan kelima dijadikan acuan utama untuk analisis lanjutan, dengan menghitung nilai *Mean Absolute Error* (MAE), *Mean Squared Error* (MSE), dan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) sebagai indikator kuantitatif kinerja model.

a. *Mean Absolute Error* (MAE)

$$MAE = \frac{\sum |y_i - \hat{y}_i|}{n}$$

$$MAE = 1,60$$

Nilai MAE sebesar 1,60 menunjukkan bahwa rata-rata selisih absolut antara nilai target dan hasil prediksi jaringan syaraf tiruan adalah sebesar 1,60 MW. Hal ini mengindikasikan bahwa model mampu menghasilkan estimasi daya keluaran dengan tingkat deviasi yang relatif kecil, sehingga kesalahan rata-rata prediksi terhadap target masih dalam batas yang wajar untuk digunakan sebagai acuan.

b. *Mean Squared Error* (MSE)

$$MSE = \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}$$

$$MSE = 4,08$$

Nilai MSE yang diperoleh sebesar 4,08 menggambarkan bahwa rata-rata kesalahan kuadrat model cukup rendah. Meskipun terdapat beberapa titik data dengan deviasi yang cukup besar, nilai MSE yang relatif kecil menunjukkan bahwa mayoritas hasil prediksi jaringan syaraf tiruan memiliki kedekatan yang baik dengan nilai target. Dengan demikian, model dapat dikatakan cukup andal dalam merepresentasikan pola hubungan antara input dan output pada data pelatihan maupun pengujian.

c. *Mean Absolute Percentage Error (MAPE)*

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right|$$

$$MAPE = 26,07\%$$

Nilai MAPE sebesar 26,07% menandakan bahwa rata-rata kesalahan persentase prediksi terhadap nilai aktual adalah sekitar seperempat dari nilai target. Jika dikonversikan, tingkat akurasi model mencapai kurang lebih 74%. Hasil ini dapat dikategorikan sebagai tingkat akurasi moderat, yang berarti model telah mampu memberikan gambaran prediksi daya keluaran yang cukup representatif, meskipun masih terdapat ruang untuk peningkatan akurasi melalui optimasi parameter maupun struktur jaringan.

Analisis Kesalahan Model

Berdasarkan hasil evaluasi terhadap kelima tabel prediksi daya keluaran PLTSa menggunakan metode backpropagation, diperoleh bahwa performa model menunjukkan variasi akurasi pada setiap skenario pengujian. Tabel 1 hingga Tabel 4 masih menunjukkan tingkat kesalahan yang cukup tinggi, dengan deviasi prediksi mencapai lebih dari 50% pada beberapa titik, bahkan pada tabel keempat ditemukan nilai error ekstrem di atas 100% akibat ketidakmampuan model dalam menangkap pola data tertentu. Meskipun terdapat beberapa titik dengan error rendah, distribusi ketidakakuratan pada tabel-tabel tersebut masih relatif besar sehingga belum dapat dikategorikan stabil.

Sementara itu, hasil pada Tabel 5 menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan keempat tabel sebelumnya. Hal ini ditunjukkan dengan adanya beberapa titik prediksi yang sangat akurat dengan error 0% (misalnya pada jam ke-15 dan 65), serta sebagian besar prediksi memiliki error relatif kecil (<10%) dengan jumlah deviasi ekstrem yang lebih sedikit.

PENUTUP

Simpulan

Hasil penelitian yang telah dilakukan mengenai prediksi jangka pendek daya keluaran pada Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa) Benowo menggunakan model Jaringan Syaraf Tiruan (JST) berbasis algoritma *Backpropagation*, maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

Model JST yang dikembangkan dengan arsitektur satu *hidden layer* berisi sepuluh neuron dan fungsi aktivasi tansig di lapisan tersembunyi serta purelin pada lapisan output, mampu mempelajari hubungan nonlinier antara parameter-parameter input operasional PLTSa—yakni jumlah timbulan sampah harian, suhu awal pembakaran, suhu aktual pembakaran, dan tekanan uap—dengan output daya listrik yang dihasilkan.

Proses pelatihan model menunjukkan konvergensi yang cepat dengan nilai *Mean Squared Error* (MSE) validasi terendah sebesar 0.057575 yang dicapai pada epoch pertama. Pelatihan dihentikan secara otomatis oleh sistem setelah tujuh epoch melalui mekanisme *early stopping* guna menghindari overfitting.

Analisis distribusi error menunjukkan bahwa kesalahan prediksi bersifat simetris dan tidak bias, dengan error yang tersebar pada rentang ± 1 megawatt (MW), menandakan masih adanya fluktuasi yang perlu diminimalkan untuk meningkatkan akurasi prediksi.

Nilai koefisien korelasi (R) pada data pelatihan, validasi, pengujian, dan keseluruhan data masing-masing adalah 0.64788, 0.72268, 0.47719, dan 0.62937. Hal ini mengindikasikan bahwa hubungan antara variabel input dan output berada pada kategori sedang (*moderate correlation*), dengan kemampuan generalisasi model yang belum optimal terhadap data yang belum pernah dilihat sebelumnya.

Saran

1. Optimalisasi struktur jaringan syaraf tiruan melalui eksperimen jumlah neuron, penambahan hidden layer, maupun penggunaan arsitektur JST yang lebih kompleks perlu dipertimbangkan untuk memperoleh representasi fungsi yang lebih akurat. Selain itu, diperlukan penerapan teknik preprocessing data yang lebih cermat, seperti normalisasi berbasis z- score atau min-max scaling, serta eksplorasi metode reduksi dimensi seperti Principal Component Analysis (PCA) untuk mengurangi redundansi data.
2. Penelitian lanjutan disarankan mengadopsi pendekatan time-series forecasting, misalnya menggunakan teknik sliding window atau Recurrent Neural Network (RNN), agar konteks temporal data operasional PLTSA dapat dimanfaatkan secara optimal. Peneliti selanjutnya juga disarankan menggunakan dataset dengan jumlah lebih besar, parameter yang lebih kompleks, serta mengombinasikan BPNN dengan metode optimasi seperti Genetic Algorithm atau Particle Swarm Optimization.
3. PLTSA Benowo merupakan bentuk nyata penerapan teknologi ramah lingkungan, sehingga Pemerintah Kota Surabaya diharapkan terus mendukung pengembangan energi terbarukan, menyediakan akses data terbuka, serta melakukan sosialisasi pengelolaan sampah kepada masyarakat.
4. Sebagai institusi pendidikan tinggi, UNESA diharapkan mendukung penelitian mahasiswa melalui penyediaan data, laboratorium, serta kerja sama riset dengan industri dan pemerintah daerah. PLN diharapkan lebih terbuka terhadap kerja sama penelitian dan mempertimbangkan penerapan model prediksi daya seperti BPNN untuk meningkatkan efisiensi distribusi energi dari pembangkit nonkonvensional.
5. Peran masyarakat juga sangat penting, khususnya dalam pemilahan sampah dan dukungan terhadap kebijakan energi bersih, guna menjamin keberlanjutan operasional PLTSA dan masa depan lingkungan yang lebih hijau.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdillah, H., Baihaqi, M. A., Hakim, L., Analisa, A., & Arista, H. (2023). *Analisis Pengukuran Tahanan Isolasi dan Indeks Polaritas pada Motor 3 Fasa*. Jurnal INTRO (Informatika dan Teknik Elektro). 2(1), 37–42.
- Amin, M. S. Al. (2018). *Pembangkitan Tegangan Generator Induksi Satu Fasa*. Jurnal Ampere 3(2), 176–186.
- Amri, R., & Darmawan, I. A. (2018). *Pengujian Standar Mutu Pada Perbaikan Motor Traksi 130 Kw PT. Pindad (Persero) Bandung*. Vokasional, Pendidikan Elektro, Teknik Teknik, Fakultas Jakarta, Universitas Negeri.
- Life Time Assessment Motor Container Crane PT PELINDO III*. Undergraduate thesis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Bagia, I. N., & Parsa, I. M. (2018). *Motor - motor Listrik*. CV. Rasi Terbit.
- Gianto, R., & Hiendro, A. (2020). *Evaluasi Kinerja Motor Induksi 3 Fasa 100 HP / 75 KW pada Panel Star – Delta di PDAM Tirta Raya Adi Sucipto*. Journal of Electrical Engineering Energy, and Information Technology, 8(2), 1–8.

- Novianto, D., Zondra, E., & Yuvendius, H. (2022). *Analisis Efisiensi Motor Induksi Tiga Fasa Sebagai Penggerak Vacuum Di PT. Pindo Deli Perawang. SainETIn: Jurnal Sains ...*, 4(2), 73–80.
- Purnomo, R. A., Riawan, & Sugianto, L. O. (2017). *Studi kelayakan bisnis*. UNMUH Ponorogo Press: Ponorogo.
- Saputra, R., Juhan, N., & Bahri, S. (2019). *Rancang bangun alat pengaduk adonan kue dengan daya motor penggerak ½ hp*. Jurnal Mesin Sains Terapan. 3(1), 22–27.
- Sundari, E., Martomi, E. S., Widagdo, T., & Witjahjo, S. (2018). *Penentuan Karakteristik Mekanik Motor Listrik Induksi Menggunakan Beban Dinamometer Hidrolik*. Austenit, 9(2), 1–8.
- Torkaman, H., & Karimi, F. (2015). *Measurement variations of insulation resistance / polarization index during utilizing time in HV electrical machines – A survey*. MEASUREMENT, 59, 21–29.
- Wahyudi, M., Asfani, D. A., Negara, I. M. Y., Fahmi, D., Ngurah, I. G., & Hernanda, S. (2019). *Evaluasi Degradasi Isolasi Motor akibat Multi-factor Aging berdasarkan Indeks Polarisasi dan SEM-EDX*. Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi (JNTETI). 8(1),
- Warren, V. (2000). *IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery*. 2000. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc: United States of America.10.1109/IEEESTD.2000.91301
- Yusniati, Pelawi, Z., Armansyah, & Taufik, I. (2021). *Pengukuran Resistansi Isolasi Instalasi Penerangan Basement Pada Gedung Rumah Sakit Grend Mitra Medika Medan*. Buletin Utama Teknik. 16 (3).
- Zulfikar, Evalina, N., H, A. A., & Nugraha, Y. T. (2019). *Analisis Perubahan Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa dengan Menggunakan Inverter 3G3MX2*. Prosiding Seminar Nasional Teknik UISU 2–5. Header halaman genap: Nama Jurnal. Volume 01 Nomor 01 Tahun 2012, 0 - 2164