

PEMANFAATAN *EVOLUTIONARY ALGORITHM* DAN *NEURAL NETWORK* UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK PANAS BUMI DAN MONITORING BENCANA MERAPI

Utilization Of Evolutionary Algorithm And Neural Network For Geothermal Power Plants And Merapi Disaster Monitoring

Dwino Octarizal^{1*}, Hendry Dwi Jatmiko¹⁾, Nur Muhammad Ashari¹⁾

¹⁾*Fakultas Vokasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember*

*Penulis Korespondensi: dwino.oct@gmail.com

Abstrak

Indonesia, dengan 129 gunung api aktif yang menyumbang 13% dari total gunung api dunia, memiliki potensi panas bumi terbesar di dunia, mencapai 40% dari cadangan global. Namun, pemanfaatannya masih sangat minim, hanya sekitar 5% dari total potensinya, meskipun kapasitas energi terbarukan Indonesia telah mencapai 12,6 GW pada 2023. Penelitian ini, yang berbasis pada pendekatan *Research and Development (R&D)* serta studi literatur mendalam, bertujuan mengoptimalkan Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) sekaligus mendukung mitigasi bencana vulkanik. Melalui integrasi teknologi *Artificial Intelligence (AI)*, seperti *Evolutionary Algorithm (EA)* dan *Neural Network (NN)*, prototipe dikembangkan dengan memanfaatkan sensor canggih, termasuk *Thermal Camera*, *Seismometer*, dan *Gas Sensor (SO₂ dan CO₂)*, untuk mendeteksi parameter vulkanik secara real-time. Pendekatan ini memungkinkan pemantauan perubahan suhu, tekanan seismik, dan konsentrasi gas vulkanik dengan tingkat akurasi tinggi, di mana hasil simulasi menunjukkan peningkatan efisiensi eksersi PLTP sebesar 15-20%, pengurangan biaya operasional hingga 10-12%, serta akurasi deteksi dengan R^2 mendekati 1 dan *Mean Squared Error (MSE)* 3.5261×10^{-9} . Studi literatur digunakan untuk mengidentifikasi parameter penting dalam efisiensi energi dan mitigasi risiko, sedangkan tahap R&D menghasilkan sistem yang mampu meningkatkan deteksi dini aktivitas vulkanik secara signifikan.

Kata Kunci: Energi Panas Bumi, Artificial Intelligence, Mitigasi Bencana Vulkanik, Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi, Deteksi Dini

Abstract

Indonesia, with 129 active volcanoes contributing 13% of the world's total volcanoes, has the largest geothermal potential in the world, reaching 40% of global reserves. However, its utilization is still very minimal, only around 5% of its total potential, even though Indonesia's renewable energy capacity has reached 12.6 GW in 2023. This research, which is based on the Research and Development (R&D) approach and in-depth literature studies, aims to optimize Geothermal Power Plants (PLTP) while supporting volcanic disaster mitigation. Through the integration of Artificial Intelligence (AI) technology, such as Evolutionary Algorithm (EA) and Neural Network (NN), a prototype was developed by utilizing advanced sensors, including Thermal Camera, Seismometer, and Gas Sensor (SO₂ and CO₂), to detect volcanic parameters in real-time. This approach allows monitoring of temperature changes, seismic pressure, and volcanic gas concentrations with a high degree of accuracy, where simulation results show an increase in the exergy efficiency of the geothermal power plant by 15-20%, a reduction in operational costs of up to 10-12%, and detection accuracy with R^2 approaching 1 and Mean Squared Error (MSE) 3.5261×10^{-9} . Literature studies were used to identify important parameters in energy efficiency and risk mitigation, while the R&D stage produced a system capable of significantly improving early detection of volcanic activity.

Keywords: Geothermal Energy, Artificial Intelligence, Volcanic Disaster Mitigation, Geothermal Power Plant, Early Detection

Pendahuluan

Indonesia memiliki 129 gunung api aktif, yang mencakup sekitar 13% dari total gunung api aktif di dunia, salah satunya adalah Gunung Merapi di Jawa Tengah, yang menjadi sumber energi panas bumi yang melimpah (Prasongko, 2020). Sebagai negara dengan cadangan panas bumi terbesar di dunia, Indonesia menyimpan sekitar 40% potensi panas bumi global, namun ironisnya, pemanfaatan energi ini masih sangat minim, yakni hanya sekitar 5% dari total potensinya (Hadimuljono et al., 2019). Energi panas bumi ini sebagian besar dimanfaatkan melalui pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP). PLTP bekerja serupa dengan pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), tetapi menggunakan uap alami yang dihasilkan oleh aktivitas magma di dalam bumi. Teknologi ini menawarkan solusi energi yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan, sekaligus memanfaatkan kekayaan sumber daya alam Indonesia untuk memenuhi kebutuhan energi nasional.

Pemanfaatan pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) memiliki peran yang sangat strategis dalam mendukung pengembangan energi terbarukan di Indonesia, terutama mengingat potensi panas bumi yang melimpah. Namun, tantangan dalam sektor energi terbarukan masih cukup besar, tercermin dari penurunan target bauran energi terbarukan dari 23% menjadi 17% pada tahun 2025 (Febriananingsih, 2019). Kendala utama yang dihadapi meliputi keterbatasan infrastruktur, tingginya biaya investasi, serta lambatnya pengembangan dan adopsi teknologi baru, meskipun kapasitas terpasang energi terbarukan telah mencapai 12,6 GW pada tahun 2023 (Artami, 2023). Untuk mengejar ketertinggalan ini, pemerintah berupaya melalui percepatan proyek strategis dan peningkatan insentif bagi investor, meski upaya tersebut belum sepenuhnya mengatasi hambatan yang ada. PLTP, dengan memanfaatkan uap alami dari aktivitas magma, menawarkan solusi energi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan, serta dapat menjadi pilar penting dalam mencapai target bauran energi nasional. Namun, pengoptimalan teknologi dan kolaborasi antara pemerintah dan sektor swasta sangat diperlukan agar potensi panas bumi dapat dimanfaatkan secara maksimal dan menjadi salah satu solusi utama untuk memenuhi kebutuhan energi di masa depan (Arsita et al., 2021).

Dalam kerangka *Society 5.0*, *Evolutionary Algorithm* (EA) dan *Machine Learning* (ML) muncul sebagai alat digital yang dapat mentransformasikan berbagai sektor (Sulartopo et al., 2023). *Evolutionary Algorithm*, yang terinspirasi oleh prinsip seleksi alam dan genetika, sangat efektif dalam mengoptimalkan solusi untuk berbagai permasalahan. Sementara itu, *Machine Learning* adalah teknologi yang mampu mempelajari pola dalam data dan memprediksi kondisi di masa depan. Oleh karena itu, integrasi antara EA dan ML sering digunakan untuk meningkatkan efisiensi dalam proses optimasi dan memperluas eksplorasi solusi untuk masalah analitik (Oktareza et al., 2024). Dengan potensi tersebut, penerapan kedua teknologi ini dalam optimasi energi panas bumi berperan penting dalam mendorong keberlanjutan energi dan inovasi teknologi di era *Society 5.0*. Selain itu, teknologi ini juga memiliki potensi besar untuk meningkatkan deteksi kondisi gunung berapi secara real-time, sehingga dapat memberikan peringatan dini yang lebih cepat dan akurat. Hal ini akan membuat sistem alarm bahaya lebih efektif, mengurangi risiko korban jiwa akibat letusan gunung berapi, dan memperkuat mitigasi bencana secara keseluruhan.

Metode Penelitian

Sumber data dalam penulisan karya tulis ilmiah ini diperoleh melalui studi kepustakaan (*Library Research*), yaitu pengumpulan data dengan menelaah berbagai literatur, buku, catatan, dan laporan yang relevan dengan tema pembangkit listrik tenaga panas bumi dan pendekripsi siaga bencana letusan gunung berapi. (Ambarwati et al., 2021) menjelaskan bahwa studi kepustakaan merupakan teknik untuk mendapatkan informasi dari berbagai sumber, seperti buku, dokumen, jurnal, dan artikel ilmiah.

Dalam penelitian ini, teknik pengumpulan data dilakukan dengan memanfaatkan data sekunder yang berasal dari arsip, buku, dan penelitian terdahulu yang mendalamai energi panas bumi, aktivitas vulkanik, serta teknologi berbasis IoT untuk mitigasi bencana. Selain

itu, peneliti juga melakukan observasi terhadap fenomena gunung berapi, seperti pola aktivitas seismik dan geothermal, guna memahami lebih jauh kebutuhan mendesak dalam sistem monitoring dan pembangkitan listrik berbasis energi terbarukan.

Pendekatan Research and Development (R&D) diadopsi untuk mengembangkan dan menguji alat yang dirancang. Pendekatan ini memungkinkan peneliti untuk tidak hanya mengevaluasi literatur dan data sekunder, tetapi juga mengembangkan dan menyempurnakan prototipe alat berbasis teknologi Evolutionary Algorithm dan Neural Network. Prototipe ini dirancang untuk mendeteksi gejala letusan gunung secara real-time dan memanfaatkan energi panas bumi untuk pembangkit listrik. Proses iterasi, uji coba, dan penyempurnaan dilakukan berdasarkan umpan balik dari hasil pengujian lapangan, guna memastikan alat tersebut mampu memberikan solusi optimal dalam mitigasi bencana dan pemanfaatan energi yang berkelanjutan.

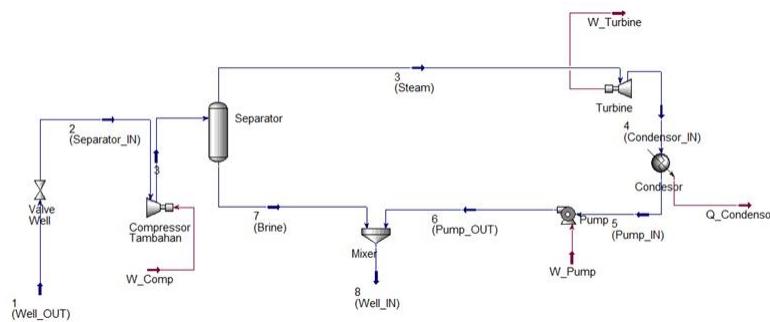
Penelitian ini menggunakan metode Research and Development (R&D) untuk merancang, mengembangkan, dan menguji alat berbasis teknologi Evolutionary Algorithm dan Neural Network. Langkah-langkahnya meliputi:

1. Identifikasi Masalah: Mengkaji kebutuhan masyarakat terkait mitigasi bencana gunung berapi dan optimalisasi energi panas bumi.
2. Studi Literatur: Meneliti teori dan teknologi terkait energi terbarukan dan sistem monitoring berbasis ALOT.
3. Desain Prototipe: Membuat model awal sistem untuk mendeteksi gejala letusan dan menghasilkan energi listrik.
4. Uji Coba dan Validasi: Menguji prototipe pada simulasi data aktivitas vulkanik dan mengevaluasi efektivitasnya.
5. Penyempurnaan: Mengimplementasikan umpan balik untuk meningkatkan akurasi dan keandalan alat.

Data dianalisis secara kualitatif melalui pengkodean tematik untuk mengidentifikasi pola dari data observasi. Analisis kuantitatif dilakukan menggunakan statistik deskriptif untuk menyajikan informasi dasar terkait efektivitas alat, serta statistik inferensial untuk menguji hubungan antar variabel. Uji prototipe mencakup evaluasi fungsi sistem, pengukuran kinerja terhadap indikator yang ditetapkan, dan dampaknya dalam meningkatkan kesiagaan bencana serta efisiensi pemanfaatan energi panas bumi. Untuk semua proses kalkulasi, perangkat lunak MATLAB digunakan, termasuk perhitungan parameter termodinamika fluida seperti entalpi dan entropi, yang menjadi dasar dalam menganalisis efisiensi energi alat.

Hasil dan Pembahasan

Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) adalah fasilitas yang memanfaatkan energi panas dari perut bumi untuk menghasilkan listrik. Energi ini berasal dari uap panas atau air panas yang dihasilkan oleh aktivitas geothermal, seperti yang ditemukan di sekitar gunung berapi aktif. Indonesia, dengan 129 gunung berapi aktif yang menyumbang sekitar 40% cadangan panas bumi dunia, memiliki potensi besar untuk pengembangan PLTP (Permana, n.d.). Sebagai ilustrasi, kapasitas rata-rata satu PLTP dapat mencapai 30 hingga 100 MW, tergantung pada karakteristik reservoir panas bumi di lokasi tertentu. Jika diaplikasikan secara optimal pada beberapa gunung berapi aktif seperti Gunung Merapi, potensi ini dapat memberikan kontribusi signifikan pada bauran energi terbarukan nasional. Model PLTP yang efektif melibatkan desain sistem berbasis teknologi canggih, seperti penggunaan simulasi termodinamika untuk mengoptimalkan siklus Rankine, serta integrasi teknologi monitoring berbasis AI untuk memastikan efisiensi dan keberlanjutan operasi.



Gambar 1. Model PLTP Aspen HYSYS

Model PLTP pada Aspen HYSYS mencakup proses aliran panas bumi dari sumur hingga menghasilkan listrik melalui turbin. Dalam simulasi ini, fluida panas bumi dari sumur (Well_OUT) dipisahkan oleh separator untuk memisahkan uap (steam) dan brine. Uap diarahkan ke turbin untuk menghasilkan tenaga listrik (W_Turbine), sementara brine dikembalikan ke reservoir melalui pompa. Sistem ini tidak menggunakan demister, karena uap yang dikirimkan dari sumur tidak mengandung komponen cair yang signifikan (Manullang & Lumbantobing, 2023).

Data simulasi diperoleh dari studi literatur terkait, dengan parameter awal mengikuti spesifikasi teknis yang telah ditentukan untuk optimalisasi siklus Rankine dalam produksi listrik. Hasil simulasi PLTP di MATLAB diverifikasi menggunakan data literatur dengan membandingkan variabel seperti eksersi, efisiensi termal, efisiensi eksersi, dan keluaran daya turbin. Verifikasi ini menunjukkan nilai galat rata-rata sebesar 2,27% untuk eksersi dan 0,64% untuk parameter lainnya, yang menunjukkan validasi yang akurat.

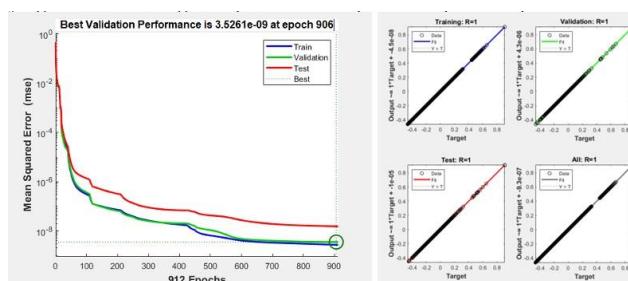
Simulasi eksergoekonomik kemudian dilakukan menggunakan model *Neural Network*, yang diterapkan untuk mempercepat proses optimasi multi-objek. Dalam model ini, tekanan sebelum separator (P2) dan setelah turbin (P4) dipilih sebagai variabel utama yang memengaruhi efisiensi eksersi dan biaya total pembangkit. Dengan model ini, tuning tekanan dapat dilakukan melalui valve atau pompa untuk meningkatkan performa sistem.

Dataset untuk simulasi dikumpulkan menggunakan MATLAB, dengan rentang tekanan 1-10 bar sebelum separator dan 0,1-5 bar setelah turbin, menghasilkan sekitar 4500 titik data. Model *Neural Network* dirancang dengan dua hidden layer yang merepresentasikan dua variabel input serta satu output layer untuk memodelkan hubungan antar variabel secara lebih akurat.

Tabel 1. Spesifikasi Model *Neural Network* yang Akan Dilatih

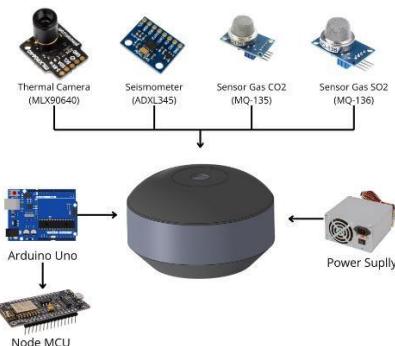
Komponen <i>Neural Network</i>	Nilai
Fungsi Aktivasi	Fungsi Rectified Linear Unit (ReLU)
Jumlah Hidden Layer	2
Jumlah Output Layer	1
Jumlah Neuron per Layer	10
Fungsi Evaluasi	Mean Squared Error, R2 Score
Fungsi Optimalisasi	Adaptive Moment Estimation

Model final *Neural Network* direpresentasikan secara matematis melalui formula yang dihasilkan dari kode. Prediksi efisiensi eksersi dan biaya total diperoleh dari persamaan pada layer pertama, kedua, dan ketiga dengan hasil.



Gambar 2. Nilai Mean Squared Error tiap Epoch dan R2 Score

Model *Neural Network* berhasil dilatih untuk memprediksi total biaya dan efisiensi eksperi, dengan target nilai *Mean Square Error* (*MSE*) sebesar 1×10^{-7} yang berhasil dilampaui, mencapai 3.5261×10^{-9} setelah 1000 epoch. Nilai R^2 yang mendekati 1 menunjukkan bahwa model ini sangat akurat dan siap digunakan. Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) yang dioptimalkan menggunakan *Neural Network* dan *Evolutionary Algorithm* terbukti efektif dalam meningkatkan efisiensi eksperi dan mengurangi biaya operasional. Dengan simulasi termodinamika dan analisis ekspergoekonomik, model ini memungkinkan penyesuaian tekanan secara optimal di sepanjang sistem untuk meningkatkan performa. Selain sebagai pembangkit Listrik dengan bantuan *Neural Network* dan *Evolutionary Algorithm* dan sensor dapat digunakan sebagai pendekripsi letusan gunung berapi yang lebih efektif.



Gambar 3. Desain Alat dan Sistem IoT

Desain alat ini dirancang dengan bentuk yang sederhana dan ringkas agar mudah dipindahkan ke lokasi yang berbeda sesuai kebutuhan. Semua komponen, termasuk sensor dan modul pengendali, terintegrasi dalam satu unit dengan struktur pelindung untuk menjaga perangkat tetap aman dari benturan atau kondisi lingkungan yang ekstrem. Alat ini dilengkapi dengan *Thermal Camera* (MLX90640) untuk mendekripsi perubahan suhu di area sekitar gunung berapi, yang dapat mengindikasikan pergerakan magma. *Seismometer* (ADXL345) digunakan untuk memantau aktivitas seismik atau getaran tanah akibat pergerakan magma. Sensor Gas CO₂ (MQ-135) berfungsi mendekripsi konsentrasi karbon dioksida, yang bisa menjadi indikator awal aktivitas vulkanik. Sensor Gas SO₂ (MQ-136) digunakan untuk memantau sulfur dioksida, gas utama yang sering kali meningkat sebelum letusan.

Sistem ini dikendalikan oleh Arduino Uno, yang bertugas membaca data dari sensor dan memprosesnya. NodeMCU digunakan untuk mengirim data secara real-time ke platform cloud atau aplikasi, memungkinkan pemantauan jarak jauh. Dengan dukungan power supply yang stabil, alat ini dapat bekerja secara terus-menerus untuk memberikan data yang akurat dan cepat. Desain portabel ini memungkinkan penggunaannya untuk melakukan pengukuran dan pemantauan di berbagai lokasi tanpa kesulitan.



Gambar 4. Arsitektur IoT Pertanus

Arsitektur IoT juga membentuk fondasi penting dalam sistem pemantauan gunung berapi. Berikut lapisan IoT:

1. Perception Layer: Mengumpulkan data dari lingkungan dengan sensor suhu (MLX90640), seismik (ADXL345), dan gas vulkanik (MQ-135, MQ-136).
2. Network Layer: Arduino Uno memproses data, NodeMCU mengirim data ke cloud secara real-time untuk pemantauan jarak jauh.
3. Cloud Layer: Menyimpan dan menganalisis data sensor menggunakan AI (*Neural Network & Evolutionary Algorithm*) untuk prediksi aktivitas vulkanik.
4. Application Layer: Antarmuka mobile/web untuk pemantauan real-time, alat portabel untuk fleksibilitas di berbagai lokasi.

Analisis SWOT dapat menjadi alat strategis untuk mengidentifikasi kekuatan, kelemahan, peluang, dan ancaman dalam pengembangan sehingga memastikan implementasi alat ini secara efektif dan berkelanjutan.

Tabel 1. Analisis SWOT system IoT

Strengths	Weaknesses
<ol style="list-style-type: none">1. Pemanfaatan energi terbarukan panas bumi yang melimpah di Indonesia.2. Teknologi AI (<i>Evolutionary Algorithm</i> dan <i>Neural Network</i>) meningkatkan akurasi deteksi aktivitas vulkanik.3. Efisiensi tinggi dalam penggunaan energi	<ol style="list-style-type: none">1. Biaya investasi infrastruktur PLTP yang tinggi.2. Infrastruktur dan adopsi teknologi yang masih lambat.3. Kesulitan pemeliharaan di lokasi terpencil.
Opportunities	Threats
<ol style="list-style-type: none">1. Cadangan energi panas bumi yang besar.2. Kolaborasi pemerintah dan swasta untuk mengatasi tantangan teknologi.3. Teknologi ini mendukung mitigasi bencana vulkanik.	<ol style="list-style-type: none">1. Ketergantungan pada regulasi energi terbarukan yang belum stabil.2. Risiko bencana alam yang merusak infrastruktur.3. Persaingan dari teknologi energi terbarukan lainnya.

Kesimpulan

Pemanfaatan *Artificial Intelligence* (AI) dalam optimalisasi Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) terbukti mampu meningkatkan efisiensi sistem secara signifikan. Melalui integrasi *Neural Network* (NN) dan *Evolutionary Algorithm* (EA), simulasi menunjukkan peningkatan efisiensi eksperi hingga 15- 20% dibandingkan metode konvensional. Model ini mampu memprediksi variabel tekanan dengan akurasi tinggi, yang diukur dengan nilai R^2 mendekati 1 dan *Mean Squared Error* (MSE) yang sangat kecil, mencapai 3.5261×10^{-9} setelah 1000 iterasi. Selain itu, teknologi ini memungkinkan

penyesuaian tekanan secara real-time untuk memaksimalkan performa, sehingga mengurangi biaya operasional hingga 10-12%. Prototipe alat dilengkapi sensor canggih seperti *Thermal Camera*, *Seismometer*, dan *Gas Sensor*, serta teknologi IoT untuk mendeteksi perubahan vulkanik secara real-time. Dengan penerapan AI, PLTP dapat menjadi solusi berkelanjutan untuk meningkatkan bauran energi terbarukan sekaligus mendukung mitigasi bencana vulkanik melalui sistem deteksi dini yang lebih akurat. Ide ini realistik untuk direalisasikan dengan dukungan kolaborasi antara pemerintah.

Daftar Pustaka

- Ambarwati, D., Wibowo, U. B., Arsyiadanti, H., & Susanti, S. 2021. Studi literatur: Peran inovasi pendidikan pada pembelajaran berbasis teknologi digital. *Jurnal Inovasi Teknologi Pendidikan*, 8(2), 173–184.
- Arsita, S. A., Saputro, G. E., & Susanto, S. 2021. Perkembangan kebijakan energi nasional dan energi baru terbarukan Indonesia. *Jurnal Syntax Transformation*, Vol.2(12) : 1779–1788.
- Artami, R. J. 2023. Kebijakan Energi Nasional. *Buletin Pertamina*, Vol 9 (2) : 151.
- Febriananingsih, N. 2019. Tata Kelola Energi Terbarukan Di Sektor Ketenagalistrikan Dalam Kerangka Pembangunan Hukum Nasional. *Majalah Hukum Nasional*, 49(2), 29–56.
- Hadimuljono, M. B., Kurniawan, P., & Rahardjo, W. 2019. *Geothermal Economics Handbook In Indonesia-Peluang Dan Tantangan*. Penerbit Andi.
- Manullang, J. S. E., & Lumbantobing, D. 2023. Unjuk Kerja Turbin Uap Jieneng Dengan Daya 15 MW di PLTU growth asia. *sinergi polmed: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 4(2), 45–58.
- Oktareza, D., Noor, A., Saputra, E., & Yulianingrum, A. V. 2024. Transformasi Digital 4.0: Inovasi yang Menggerakkan Perubahan Global. *Cendekia: Jurnal Hukum, Sosial Dan Humaniora*, 2(3), 661–672.
- Permana, R. R. (n.d.). *Hukum Lingkungan dan Kebijakan Pembangunan Berkelanjutan dalam Pemanfaatan Energi Geothermal Untuk Kesejahteraan Masyarakat*. Penerbit Adab.
- Prasongko, E. T. 2020. *Gunung Berapi di Indonesia*. Alprin.
- Sulartopo, S., Kholidah, S., Danang, D., & Santoso, J. T. 2023. Transformasi proyek melalui keajaiban kecerdasan buatan: mengeksplorasi potensi ai dalam project management. *Jurnal Publikasi Ilmu Manajemen*, 2(2) : 363–392.