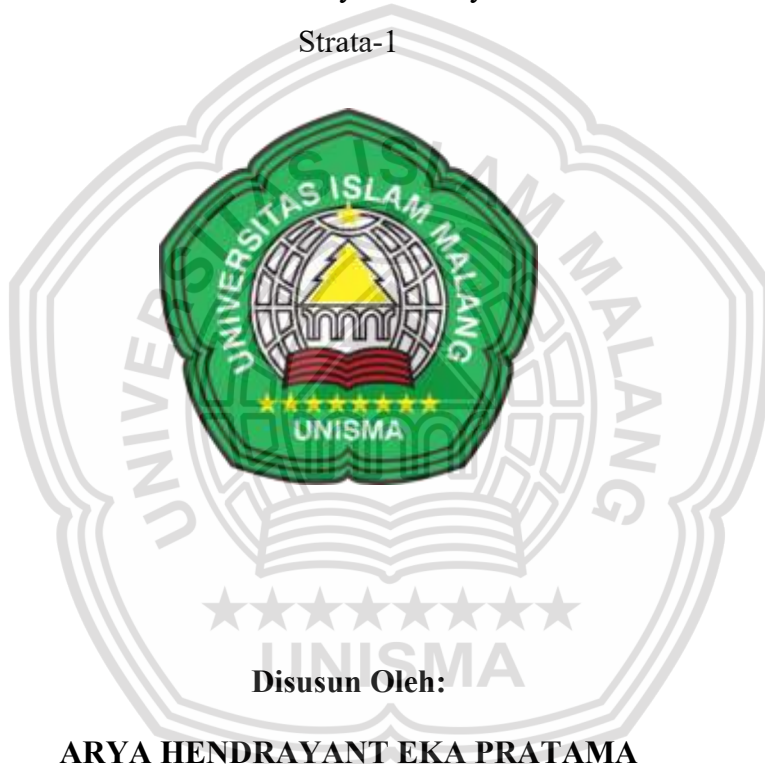


**OPTIMASI *UNIT COMMITMENT PROBLEM* YANG
TERINTEGRASI DENGAN *PV GENERATION* BERBASIS
ALGORITMA *PARTICLE SWARM OPTIMIZATION* (PSO)**

SKRIPSI

Disusun untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Menyelesaikan Pendidikan Sarjana

Strata-1



Disusun Oleh:

ARYA HENDRAYANT EKA PRATAMA

NPM. 22101053006

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM MALANG
2025**

Abstrak

Arya Hendrayant Eka Pratama. 22101053006 e-Inventory at the Electrical Engineering Laboratory at the Islamic University of Malang Using a Barcode Scanner. Supervisor I: Efendi S Wirateruna, S.T., M.Sc.: Supervisor II: Oktriza Melfazen, S.T., M.T. Electrical Engineering. Faculty of Engineering. Universitas Islam Malang.

The problem of Unit Commitment (UC) is becoming increasingly complex as the penetration of intermittent renewable energy increases. Therefore, this study proposes a Unit Commitment optimization method that is integrated with renewable energy plants and considers the limitation of nadir frequencies. One of the main challenges is maintaining the stability of the electric power system, especially in times of disturbance that can reduce the frequency of the system. The integration of renewable energy plants such as photovoltaic (PV) in the electric power system poses new challenges in the planning of plant operations, especially related to power irregularities and declining system inertial reserves. This study examines the optimization of Unit Commitment (UC) based on Artificial Intelligence algorithms, namely Particle Swarm Optimization (PSO), which is modified to take into account various operational limitations of the system. The UC model developed integrates conventional power plants, PV, and Energy Storage Systems (ESS), and takes into account nadir frequency limits, minimum up/down time, ramp rate, spinning reserve, startup/shutdown costs, and economic dispatch. Simulations were carried out on a generation system with nine conventional units, a PV plant, and an ESS. The results show that the proposed approach is able to reduce the total operating cost of the system and keep the nadir frequency above the critical threshold of 49.5 Hz.

Keywords: Particle Swarm Optimazition(PSO), Unit Commitmen(UC), Frekuensi Nadir, Photo Voltaic.

Abstrak

Arya Hendrayant Eka Pratama. 22101053006 e-Inventory pada Laboratorium Teknik Elektro di Universitas Islam Malang Menggunakan Barcode Scanner. Pembimbing I: Efendi S Wirateruna, S.T., M.Sc.: Pembimbing II: Oktriza Melfazen, S.T., M.T. Teknik Elektro. Fakultas Teknik. Universitas Islam Malang.

Permasalahan Unit Commitment (UC) menjadi semakin kompleks seiring meningkatnya penetrasi energi terbarukan yang bersifat intermiten. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan metode optimasi Unit Commitment yang terintegrasi dengan pembangkit energi terbarukan dan mempertimbangkan batasan frekuensi nadir salah satu tantangan utama adalah menjaga kestabilan sistem tenaga listrik, khususnya pada saat terjadi gangguan yang dapat menurunkan frekuensi sistem. Integrasi pembangkit energi terbarukan seperti fotovoltaik (PV) dalam sistem tenaga listrik menimbulkan tantangan baru dalam perencanaan operasi pembangkit, terutama terkait dengan ketidakteraturan daya dan penurunan cadangan inersia sistem. Penelitian ini meneliti mendekatkan optimasi Unit Commitment (UC) berbasis algoritma Artificial Intelligence, yaitu Particle Swarm Optimization (PSO), yang dimodifikasi untuk mempertimbangkan berbagai batasan operasional sistem. Model UC yang dikembangkan mengintegrasikan pembangkit konvensional, PV, dan Energy Storage System (ESS), serta memperhitungkan batasan frekuensi nadir, minimum up/down time, ramp rate, spinning reserve, biaya startup/shutdown, dan economic dispatch. Simulasi dilakukan pada sistem pembangkit dengan sembilan unit konvensional, pembangkit PV, dan ESS. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan yang diusulkan mampu menurunkan total biaya operasi sistem dan menjaga frekuensi nadir tetap berada di atas ambang batas kritis 49.5 Hz.

Kata Kunci: Particle Swarm Optimazition(PSO), Unit Commitmen(UC), Frekuensi Nadir, Photo Voltaic.

Bab I

Pendahuluan

1.1. Latar Belakang

Seiring dengan berjalannya waktu meningkatnya pertumbuhan penduduk dan ekonomi, kebutuhan energi listrik dalam negeri terus mengalami peningkatan dari setiap tahun ke tahun[1]. Untuk menjamin pasokan listrik yang handal serta meningkatkan keandalan sistem tenaga listrik, suplai listrik tidak hanya bergantung pada pembangkit listrik non thermal saja melainkan melibatkan pembangkit thermal yang membantu menghemat bahan bakar fosil berguna untuk memaksimalkan pemenuhan beban dalam energi listrik[2]. Dalam teknisnya, tidak semua pembangkit dioperasikan secara bersamaan untuk melayani seluruh kebutuhan beban listrik yang ada. Penyebab ini bisa dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti pemeliharaan, karakteristik, kapasitas pembangkit, biaya pembangkitan, dan faktor lainnya[3]. Oleh karena itu pada penelitian ini dilakukan simulasi penjadwalan operasi pembangkit untuk mengatur penggunaan secara optimal, Permintaan daya listrik yang terus bertambah menyebabkan daya listrik yang masuk oleh pembangkit menjadi sangat besar. Kondisi beban yang harus disuplai pembangkit selalu berubah-ubah tiap waktunya, maka transmisi energi listrik haruslah sesuai antara energi yang terbangkitkan oleh pembangkit dengan jumlah beban yang harus disuplai untuk memperoleh biaya pembangkitan yang paling ekonomis[4].

Beban listrik yang selalu berubah-ubah setiap waktu dan akan terus meningkat dari tahun ke tahun mengharuskan pembangkit listrik dengan bahan bakar tidak dapat diperbarui menyesuaikan produksi energinya dengan cara dibantu oleh pembangkit listrik energi terbarukan agar biaya pembangkitan tetap ekonomis[5]. Jumlah energi listrik yang dihasilkan harus sedekat mungkin dengan jumlah beban yang harus disuplai. Operasi sistem tenaga listrik di area pembangkitan melibatkan peningkatan dan penurunan daya output, serta penyalan dan pemadaman unit-unit pembangkit guna menyeimbangkan beban. Untuk mengatasi beban listrik yang besar, pemerintah membangun pembangkit listrik

dengan kapasitas daya yang besar. Dalam pengoperasiannya, dibutuhkan pengaturan yang matang, baik dalam hal pengelolaan beban, daya, maupun bahan bakar. Tujuan akhirnya adalah menciptakan keseimbangan antara pasokan daya dari pembangkit dan kebutuhan daya yang harus dipenuhi. Optimasi *Unit Commitment* (UC)[3]. diperlukan untuk menentukan pengaturan dasar sistem pembangkitan listrik. UC bertujuan untuk menentukan unit pembangkit yang akan beroperasi guna memenuhi permintaan beban dalam periode tertentu. Masalah UC merupakan persoalan optimasi yang kompleks, terutama dengan adanya kendala-kendala seperti persyaratan pasar, batasan emisi, serta penggunaan sumber energi terbarukan. Prinsip utama UC adalah mengurangi seluruh biaya pembangkitan sambil memastikan sistem tetap memenuhi kebutuhan beban dengan mempertahankan keamanan dan stabilitas sistem[6].

Efisiensi biaya, tegangan, dan keamanan sistem harus tetap terjaga[7]. Ketidakstabilan tegangan dapat menyebabkan penurunan tegangan yang menjadi salah satu penyebab utama berbagai gangguan pada sistem tenaga listrik non terbarukan di berbagai belahan dunia[8]. Studi mengenai stabilitas tegangan setelah penerapan UC sangat penting untuk mengetahui biaya pembangkitan dan margin beban sistem. *Load margin* merupakan ukuran fundamental yang menunjukkan jarak sistem terhadap kemungkinan terjadinya tegangan (*voltage*) pada suatu bagian jaringan listrik turun drastis hingga mendekati atau mencapai nol dengan demikian, optimasi UC yang tepat dapat memastikan efisiensi biaya, keamanan sistem, dan stabilitas tegangan secara keseluruhan[8][9][10].

1.2. Tujuan Penelitian

1. Menganalisis dampak pembatasan frekuensi nadir terhadap performa sistem tenaga listrik, terutama dalam menjaga kestabilan frekuensi pada kondisi gangguan.
2. Mengembangkan model optimasi Unit Commitment (UC) yang terintegrasi dengan pembangkit energi terbarukan (PV) dan sistem penyimpanan energi (ESS), dengan mempertimbangkan kendala teknis sistem tenaga listrik.

1.3. Rumusan Masalah

1. Bagaimana cara mitigasi terjadi penurunan frekuensi pada *unit commitmen* ?
2. Bagaimana hasil performa *unit commitment constraint* dan virtual inersia berbasis algoritma PSO ?

1.4. Pembatasan Masalah

1. Frekuensi nadir dijadikan sebagai batasan dalam proses optimasi untuk menjaga kestabilan sistem terhadap gangguan. Nilai ambang minimum ditetapkan sebesar 49 Hz.
2. Kendala-kendala yang diperhitungkan dalam model optimasi meliputi kapasitas minimum dan maksimum pembangkit, *ramp rate*, *minimum up/down time*, *spinning reserve*, *economic dispatch*, serta batasan frekuensi nadir.

1.5. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat baik secara teoritis maupun praktis dalam pengelolaan sistem pembangkit tenaga listrik, khususnya yang terintegrasi dengan energi terbarukan dan mempertimbangkan kestabilan sistem tenaga. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan pembebanan daya listrik pada unit-unit pembangkit, terutama dalam sistem yang mengintegrasikan pembangkit energi terbarukan seperti Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Dengan optimasi yang tepat, kebutuhan beban listrik masyarakat dapat terpenuhi secara andal, efisien, dan berkelanjutan, terutama pada saat beban puncak. Model yang diusulkan juga berkontribusi dalam meningkatkan efisiensi dan penghematan energi dengan mengurangi konsumsi bahan bakar fosil melalui pemanfaatan energi terbarukan dan manajemen unit commitment yang efisien, sehingga berdampak pada pengurangan biaya operasional dan kehandalan dalam keamanan sistem dalam jangka panjang. Selain itu, dengan mengintegrasikan model pembatasan frekuensi nadir dan *Rate of Change of Frequency* (RoCoF), penelitian ini memberikan kontribusi dalam menjaga kestabilan sistem tenaga terhadap gangguan frekuensi yang disebabkan oleh

variabilitas sumber energi terbarukan. Dari sisi akademik, penelitian ini turut berkontribusi dalam pengembangan ilmu pengetahuan di bidang optimasi sistem tenaga listrik dan penerapan algoritma kecerdasan buatan seperti *Particle Swarm Optimization* (PSO) dalam menyelesaikan permasalahan unit commitment yang kompleks. Hasil dari penelitian ini juga dapat dijadikan acuan dalam merancang strategi operasional sistem pembangkit di masa depan, terutama dalam menghadapi transisi energi menuju sistem yang lebih hijau, hemat energi, dan adaptif terhadap kebutuhan listrik masyarakat yang terus berkembang.

1.6. Sistematika Penulisan

Dalam penelitian ini memiliki struktur penulisan yang meliputi :

1. Pada BAB I, Pada bab ini diterangkan mengenai latar belakang identifikasi masalah, Manfaat penelitian yang membahas permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian ini dan BAB I juga membahas tentang sistematika penulisan.
2. BAB 2, membahas tentang perbedaan penelitian terdahulu dan menjelaskan tentang bagaimana dasar teori yang digunakan dalam penelitian ini
3. BAB 3, membahas tentang metodologi penelitian, tahapan perencanaan, spesifikasi system yang dibangun, perancangan perangkat lunak, perangkat apa saja yang dibutuhkan untuk digunakan dan lokasi penelitian
4. BAB 4, membahas tentang hasil kerja dan pembahasan yang sebelumnya landasan teori dan perencanaan penelitian dirancang pada BAB 2 dan 3
5. BAB 5, yang berisi tentang kesimpulan saran dan kritik rangkuman dari BAB 1 – BAB 4 kekurangan maupun kelebihan dalam sebuah penelitian

BAB V

Kesimpulan Dan Saran

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, maka kesimpulan yang dapat diambil untuk menjawab rumusan masalah adalah sebagai berikut:

1. Model optimasi Unit Commitment (UC) yang diterapkan dalam studi ini berhasil melaksanakan integrasi pembangkit fotovoltaik (PV) dan unit penyimpanan energi (ESS) beserta dengan perhitungan sejumlah baik soft constraints maupun hard constraints dalam sistem tenaga seperti batas kapasitas minimum/maksimum, ramp rate, minimum up/down time, spinning reserve, economic dispatch serta batasan frekuensi nadir. Model ini terbukti efektif dengan simulasi pada tiga skenario sistem, yaitu sistem tanpa ESS dan frekuensi nadir (Skenario 1), sistem dengan frekuensi nadir namun tanpa ESS (Skenario 2), dan sistem dengan ESS dan frekuensi nadir (Skenario 3). Semua skenario simulasi ini menunjukkan sistem yang diusulkan dapat menyesuaikan pada sistem operasi pembangkit dan pengelolaan ESS dan memberikan penjadwalan unit yang optimal serta terendah dari segi biaya dan pembebanan frekuensi.
2. Efisiensi dan optimalitas solusi masalah Unit Commitment yang diperoleh dengan menggunakan PSO dikarenakan PSO mampu menyelesaikan masalah dengan optimal dalam waktu komputer yang singkat 1 sampai 1.5 detik per iterasi. Ini dibuktikan dengan simulasi pada tiap-tiap skenario. PSO tidak hanya mampu di dalam menyelesaikan masalah dengan waktu yang singkat namun juga di dalam mencapai konversi solusi baik pada biaya operasi sistem yang minimum. Berdasarkan pada Tabel 4.6 biaya operasi sistem untuk Skenario 1a adalah Rp 5.288.550,00. dan untuk Skenario 1c pada Tabel 4.10 berjumlah Rp 6.646.486,02. PSO juga mampu mengakomodasi perubahan beban dan variabilitas pembangkitan

PV pada sistem, mempertahankan kestabilan frekuensi sistem dengan memilih kombinasi unit yang tepat seperti yang diperlihatkan pada Gambar 4.1-4.9



Daftar Pustaka

- [1] M. Qian, J. Wang, D. Yang, H. Yin, and J. Zhang, "An Optimization Strategy for Unit Commitment in High Wind Power Penetration Power Systems Considering Demand Response and Frequency Stability Constraints," *Energies (Basel)*, vol. 17, no. 22, Nov. 2024, doi: 10.3390/en17225725.
- [2] M. I. Romadhon and R. A. Nugraha, "KONSULI: Knowledge on Sustainability and Innovative Technology Optimisasi dan Permasalahan Pada Pembangkit Listrik Berbasis Energi baru Terbarukan," 2025.
- [3] A. Aharwar, R. Naresh, V. Sharma, and V. Kumar, "Unit commitment problem for transmission system, models and approaches: A review," *Electric Power Systems Research*, vol. 223, p. 109671, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.epsr.2023.109671.
- [4] A. A. B. Osman, M. J. Afroni, D. Efendi, and S. Wirateruna, "Perencanaan Jadwal Pembangkit Listrik untuk Mempertahankan Frekuensi Jaringan dengan Integrasi Baterai dan Tenaga Surya yang Tinggi Menggunakan Algoritma PSO."
- [5] "Voc_Isc_Vm_Im_Vm_Im_2_5_Voc_Isc_Tegangan".
- [6] A. O. Olasoji, D. T. O. Oyedokun, S. O. Omogoye, and C. Thron, "Review of frequency response strategies in renewable-dominated power system grids: Market adaptations and unit commitment formulation," *Sci Afr*, vol. 26, p. e02357, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.sciaf.2024.e02357.
- [7] F. M. Noor and A. F. Rahman, "Studi Penerapan Integrasi Sumber Energi Baru Terbarukan dengan Smart grid dan Sistem Pengendalian SCADA."
- [8] Z. Chu and F. Teng, "Voltage Stability Constrained Unit Commitment in High IBG-Penetrated Power Systems," Dec. 2021, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2112.02754>
- [9] M. S. Dwi Putra and S. Abadi, "Penjadwalan Ekonomis Pada Pembangkit Termal Dengan Menggunakan Particle Swarm Optimization," *Jurnal Teknik Mesin Sinergi*, vol. 21, no. 1, pp. 156–162, Apr. 2023, doi: 10.31963/sinergi.v21i1.4239.

- [10] N. Zhang, Q. Zhou, and H. Hu, "Minimum Frequency and Voltage Stability Constrained Unit Commitment for AC/DC Transmission Systems," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 16, p. 3412, Aug. 2019, doi: 10.3390/app9163412.
- [11] A. Giedraityte, S. Rimkevicius, M. Marciukaitis, V. Radziukynas, and R. Bakas, "Hybrid Renewable Energy Systems—A Review of Optimization Approaches and Future Challenges," *Applied Sciences*, vol. 15, no. 4, p. 1744, Feb. 2025, doi: 10.3390/app15041744.
- [12] A. S. Daroini, "SECURITY CONSTRAINED UNIT COMMITMENT MEMPERTIMBANGKAN KAPASITAS DAN RUGI DAYA SALURAN TRANSMISI DENGAN KURVA BIAYA TIDAK RATA MENGGUNAKAN ALGORITMA BINARY PARTICLE SWARM OPTIMIZATION (BPSO) PADA SISTEM IEEE 30 BUS."
- [13] M. Arindra, R. S. Wibowo, and D. C. Riawan, "Unit Commitment Pada Sistem Pembangkitan Tenaga Angin Untuk Mengurangi Emis Menggunakan Particle Swarm Optimization," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 5, no. 2, Sep. 2016, doi: 10.12962/j23373539.v5i2.16122.
- [14] G. Shaari, N. Tekbiyik-Ersoy, and M. Dagbasi, "The state of art in particle swarm optimization based unit commitment: A review," 2019, *MDPI AG*. doi: 10.3390/pr7100733.
- [15] M. A. Mquqwana and S. Krishnamurthy, "Particle Swarm Optimization for an Optimal Hybrid Renewable Energy Microgrid System under Uncertainty," *Energies (Basel)*, vol. 17, no. 2, Jan. 2024, doi: 10.3390/en17020422.
- [16] M. Rajabdorri, B. Kazemtabrizi, M. Troffaes, L. Sigrist, and E. Lobato, "Inclusion of frequency nadir constraint in the unit commitment problem of small power systems using machine learning," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 36, p. 101161, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.segan.2023.101161.
- [17] P. Pengukuhan and J. Guru Besar, "INTEGRASI VARIABLE RENEWABLE ENERGY DALAM PERENCANAAN DAN OPERASI SISTEM TENAGA LISTRIK

MENUJU TRANSISI ENERGI BERKELANJUTAN UNIVERSITAS GADJAH MADA.”

- [18] P. Denholm, T. Mai, R. W. Kenyon, B. Kroposki, and M. O’malley, “Inertia and the Power Grid: A Guide Without the Spin,” 2020. [Online]. Available: www.nrel.gov/publications.
- [19] H. O. R. Howlader, O. B. Adewuyi, Y. Y. Hong, P. Mandal, A. M. Hemeida, and T. Senjyu, “Energy storage system analysis review for optimal unit commitment,” *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 1, Jan. 2020, doi: 10.3390/en13010158.
- [20] P. Aaslid, M. Korpås, M. M. Belsnes, and O. B. Fosso, “Stochastic operation of energy constrained microgrids considering battery degradation,” *Electric Power Systems Research*, vol. 212, p. 108462, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.epsr.2022.108462.
- [21] L. Montero, A. Bello, and J. Reneses, “A Review on the Unit Commitment Problem: Approaches, Techniques, and Resolution Methods,” *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 4, p. 1296, Feb. 2022, doi: 10.3390/en15041296.
- [22] Y. Weng, G. Geng, and Q. Jiang, “Unit commitment of power systems considering system inertia constraints and uncertainties,” *IET Renewable Power Generation*, Oct. 2024, doi: 10.1049/rpg2.13095.
- [23] R. H. Wuijts, M. van den Akker, and M. van den Broek, “Effect of modelling choices in the unit commitment problem,” *Energy Systems*, vol. 15, no. 1, pp. 1–63, Feb. 2024, doi: 10.1007/s12667-023-00564-5.
- [24] H. K. Ren, M. Ashtine, M. McCulloch, and D. Wallom, “An analytical method for sizing energy storage in microgrid systems to maximize renewable consumption and minimize unused storage capacity,” *J Energy Storage*, vol. 68, p. 107735, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.107735.
- [25] “Inertia and Rate of Change of Frequency (RoCoF),” 2020.
- [26] M. Paturet, U. Markovic, S. Delikaraoglou, E. Vrettos, P. Aristidou, and G. Hug, “Stochastic Unit Commitment in Low-Inertia Grids,” Apr. 2019, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1904.03030>

- [27] P. Denholm, T. Mai, R. W. Kenyon, B. Kroposki, and M. O'malley, "Inertia and the Power Grid: A Guide Without the Spin," 2020. [Online]. Available: www.nrel.gov/publications.
- [28] "Chapter 4 ECONOMIC DISPATCH AND UNIT COMMITMENT ECONOMIC DISPATCH AND UNIT COMMITMENT."
- [29] H. B. Tambunan *et al.*, "The challenges and opportunities of renewable energy source (RES) penetration in Indonesia: Case study of Java-Bali power system," *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 22, Nov. 2020, doi: 10.3390/en13225903.
- [30] E. Yuniarti, D. Tara, A. Pratama, and D. R. Putra, "Analisis Tren Konsumsi Energi Listrik pada Penyulang Singkarak," *Serambi Engineering*, vol. VI, no. 3, 2021.

