

Optimasi Unit Commitment PLTMG Duri Menggunakan Binary Particle Swarm Optimization Dengan Mempertimbangkan Kendala Operasi

Rendy Abdullah*, Herry Nugraha, Rudy Setiabudy

Institut Teknologi PLN, Indonesia

Email: rendy2410742@itpln.ac.id*, herry Nugraha@itpln.ac.id, rudy.setiabudi@itpln.ac.id

Abstract

This study aims to develop a Unit Commitment (UC) model based on Binary Particle Swarm Optimization (BPSO) that integrates heat rate characteristics with the actual operational constraints of the Duri PLTMG, namely start-up inefficiency, temporary derating, and gas trip, and compares the Unit Commitment results obtained with the existing Unit Commitment pattern. The fuel cost function of seven units is formed through curve fitting of heat rate data, then combined with three components of expected operating constraint costs into the objective function. Furthermore, the BPSO algorithm is applied with a repair mechanism to correct solutions that violate operational constraints, such as unit capacity limits, maintenance schedules, and power balances, resulting in a Unit Commitment schedule in the form of optimal unit ON/OFF status for one simulation week (May 1–7, 2026) using historical data of the Duri PLTMG operation for six months. The optimization results show that the BPSO algorithm reached convergence at the 270th iteration with a total operational cost of Rp9,447,787,193.61, lower than the existing Unit Commitment of Rp9,552,661,959.47, resulting in savings of Rp104,874,765.86 without reducing the energy delivered (9,424.66 MWh). Although the start-stop frequency increased from 49 to 83 times, the optimization results were able to establish more economical unit operating priorities. These findings can serve as a basis for PT PLN Nusantara Power in developing a more efficient Unit Commitment strategy for the Duri PLTMG, with the novelty of integrating granular operational constraints based on field events into the UC-BPSO formulation.

Keywords : Unit Commitment; Binary Particle Swarm Optimization; Heat Rate; Operational Constraints; Duri PLTMG

Abstrak

Penelitian ini bertujuan mengembangkan model Unit Commitment (UC) berbasis Binary Particle Swarm Optimization (BPSO) yang mengintegrasikan karakteristik heat rate dengan kendala operasi aktual PLTMG Duri, yaitu inefisiensi start-up, derating temporer, dan gas trip, serta membandingkan hasil Unit Commitment yang diperoleh dengan pola Unit Commitment eksisting. Fungsi biaya bahan bakar tujuh unit dibentuk melalui curve fitting data heat rate, kemudian dipadukan dengan tiga komponen ekspektasi biaya kendala operasi ke dalam fungsi objektif. Selanjutnya, algoritma BPSO diterapkan dengan mekanisme repair untuk memperbaiki solusi yang melanggar batasan operasi, seperti batas kapasitas unit, jadwal pemeliharaan, dan keseimbangan daya, sehingga dihasilkan jadwal Unit Commitment berupa status ON/OFF unit yang optimal selama satu minggu simulasi (1–7 Mei 2026) menggunakan data historis operasi PLTMG Duri selama enam bulan. Hasil optimasi menunjukkan bahwa algoritma BPSO mencapai konvergensi pada iterasi ke-270 dengan total biaya operasional sebesar Rp9.447.787.193,61, lebih rendah dibandingkan Unit Commitment eksisting sebesar Rp9.552.661.959,47, sehingga menghasilkan penghematan sebesar Rp104.874.765,86 tanpa mengurangi energi yang disalurkan (9.424,66 MWh). Meskipun frekuensi start-stop meningkat dari 49 menjadi 83 kali, hasil optimasi mampu membentuk prioritas operasi unit yang lebih ekonomis. Temuan ini dapat menjadi dasar bagi PT PLN Nusantara Power dalam menyusun strategi Unit Commitment PLTMG Duri yang lebih efisien, dengan kebaruan berupa integrasi kendala operasional granular berbasis kejadian lapangan ke dalam formulasi UC-BPSO.

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik yang andal dan ekonomis menuntut pengelola sistem tenaga untuk mengambil keputusan operasi pembangkit secara tepat, terutama pada sistem yang memiliki kombinasi unit pembangkit dengan karakteristik dinamis seperti batas minimum–maksimum daya, ramp rate, minimum up/down time, serta biaya start-up dan shut-down. Permasalahan penjadwalan ini dikenal sebagai Unit Commitment (UC), yang pada intinya menentukan unit mana yang harus menyala pada setiap interval waktu dan berapa besar produksinya agar beban terpenuhi dengan biaya minimum serta tetap memenuhi seluruh kendala teknis operasi. Dalam praktik, kualitas keputusan UC sangat menentukan total biaya produksi, tingkat keandalan, serta risiko deviasi operasi akibat ketidakpastian dan kondisi peralatan. Pembahasan UC modern juga semakin banyak memasukkan aspek ketidakpastian dan risiko karena sistem tenaga saat ini beroperasi dalam kondisi yang lebih dinamis serta memiliki lebih banyak sumber variabilitas (Hong, 2022).

Di sisi lain, pembangkit berbasis mesin gas (gas engine) seperti PLTMG sering dipilih untuk menopang fleksibilitas sistem karena kemampuan start cepat dan respons beban yang baik. Namun, performa ekonominya sangat dipengaruhi oleh heat rate yang berubah terhadap level beban, kondisi ambient, dan degradasi peralatan, sehingga biaya bahan bakar tidak selalu dapat direpresentasikan secara sederhana. Studi sistem-level pada pembangkit gas engine juga menunjukkan bahwa nilai operasi pembangkit jenis ini tidak hanya ditentukan oleh energi yang dihasilkan, tetapi juga perannya dalam memenuhi layanan cadangan dan fleksibilitas, sehingga model biaya/operasi yang lebih realistis menjadi penting untuk keputusan penjadwalan (Alahäivälä, 2017).

Dalam konteks PLTMG Duri 14,32 MW x 7 unit, tantangan utama optimasi operasi tidak berhenti pada kendala UC klasik (P_{min}/P_{max} , ramp rate, min up/down time), tetapi juga mencakup kendala operasional berbasis kejadian yang muncul di lapangan. Tesis ini menyoroti tiga fenomena yang relevan dan sering menimbulkan deviasi biaya maupun risiko keandalan: (1) start dengan mode back up yang memicu restart singkat dan menambah konsumsi bahan bakar, (2) kejadian derating temporer saat running, dan (3) kejadian gas trip yang menyebabkan perpindahan bahan bakar dari gas ke solar pada beban tertentu. Ketiga hal tersebut, meskipun tampak "kecil" secara durasi (misalnya restart ± 5 menit atau derating beberapa menit), dapat memunculkan biaya bahan bakar tambahan dan mengubah strategi komitmen unit jika terjadi berulang. Perspektif ini sejalan dengan tren literatur UC yang makin menekankan pentingnya memasukkan kendala dan ketidakpastian yang mencerminkan operasi nyata, karena penyederhanaan model dapat berdampak pada kualitas solusi dan biaya operasional (Wuijts, 2024).

Secara metodologis, UC merupakan masalah optimasi kombinatorial dan nonlinier (campuran variabel biner untuk status ON/OFF dan variabel kontinu untuk daya). Berbagai pendekatan telah digunakan, mulai dari metode matematis (MILP, Lagrangian relaxation) hingga metaheuristik. Dalam banyak studi, metaheuristik dipilih karena fleksibilitasnya dalam menangani nonlinieritas, multi-kendala, serta variasi formulasi tanpa harus merombak struktur solver secara drastis. Salah satu metaheuristik yang banyak digunakan adalah Particle Swarm

Optimization (PSO) beserta varian dan hibridisasinya untuk UC. Tinjauan state of the art menunjukkan PSO kerap dipakai untuk UC karena implementasi relatif sederhana, kemampuan eksplorasi ruang solusi, dan dapat diadaptasi untuk berbagai fungsi tujuan (biaya, emisi, kombinasi biaya–risiko) serta kendala tambahan (Shaari, 2019).

Karena UC memiliki keputusan ON/OFF yang bersifat biner, muncul kebutuhan untuk menyesuaikan PSO agar cocok menangani variabel diskrit. Di sinilah Binary PSO (BPSO) menjadi relevan, karena mekanisme update "kecepatan" PSO dapat dipetakan menjadi probabilitas perubahan status biner. Dalam praktik penelitian UC berbasis PSO, ragam modifikasi PSO (misalnya "craziness", adaptive inertia, hybridization) dikembangkan untuk memperbaiki konvergensi dan menghindari jebakan optimum lokal yang umum terjadi pada masalah UC yang kompleks. Contoh penerapan PSO yang dimodifikasi untuk UC pada jurnal bereputasi menunjukkan bahwa strategi multi tahap dan modifikasi bobot/partikel dapat meningkatkan kualitas solusi pada sistem uji yang besar serta mempertimbangkan fitur seperti multi fuel dan nonlinieritas (Shukla, 2016).

Walaupun demikian, banyak formulasi UC dalam literatur masih menyederhanakan aspek "kondisi unit" menjadi parameter deterministik: unit dianggap tersedia penuh ketika ON, biaya Start up diperlakukan sebagai nilai tetap atau fungsi waktu OFF (hot/warm/cold start) tanpa mengaitkannya pada kejadian operasional mikro (misalnya restart singkat karena mode back up), dan bahan bakar diasumsikan konsisten sepanjang jam operasi. Padahal, pada pembangkit nyata terutama unit gas engine yang beroperasi dinamis terdapat kondisi operasi yang lebih granular seperti Derating jangka pendek, transien saat start, atau kejadian fuel switching akibat gangguan suplai/combustion. Di sisi permodelan, mengabaikan detail seperti ini dapat menyebabkan jadwal yang "optimal di atas kertas" tetapi kurang ekonomis ketika dieksekusi karena biaya tambahan muncul di luar komponen biaya konvensional. Literatur juga menekankan bahwa pilihan pemodelan (modeling choices) pada UC dapat memberi konsekuensi pada kualitas biaya dan hasil keputusan, sehingga studi yang lebih "grounded" pada kondisi unit menjadi signifikan (Wuijts, 2024).

Keterkaitan UC dengan ketidakpastian pasokan bahan bakar juga menjadi isu penting, terutama untuk pembangkit berbahan bakar gas. Studi pada IEEE Transactions on Power Systems menunjukkan bahwa ketidakpastian suplai gas dan variabilitas harga gas dapat memengaruhi keputusan UC dan dispatch secara material; oleh karena itu, representasi ketidakpastian bahan bakar dan kondisi jaringan pasokan dapat mengubah strategi komitmen unit. Ini relevan dengan fenomena gas trip atau fuel switching yang terjadi pada saat pengoperasian PLTMG yang terjadi ketika gangguan pada sistem pembakaran atau suplai gas memaksa perpindahan ke solar pada level beban tertentu, maka karakter biaya bahan bakar, efisiensi, dan strategi operasi berubah secara nyata, dan seharusnya tercermin dalam fungsi tujuan serta kendala UC (Zhao, 2017).

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini berangkat dari kebutuhan untuk menyusun model Unit Commitment yang lebih operationally aware pada PLTMG Duri menggunakan Binary Particle Swarm Optimization (BPSO). Integrasi karakteristik heat rate dan kendala operasional spesifik seperti inefisiensi start-up akibat restart singkat, derating temporer, serta kejadian gas trip diharapkan dapat menghasilkan jadwal pengoperasian yang memiliki biaya operasional optimal serta lebih representatif terhadap kondisi lapangan. Dengan pendekatan ini, penelitian diharapkan memberikan kontribusi praktis melalui rekomendasi strategi operasi

yang lebih efisien, sekaligus memberikan kontribusi teoretis dengan memperkaya formulasi UC berbasis metaheuristik melalui pemodelan kendala operasional yang selama ini masih jarang dibahas secara eksplisit dalam literatur.

METODE PENELITIAN

Waktu dan Lokasi Penelitian

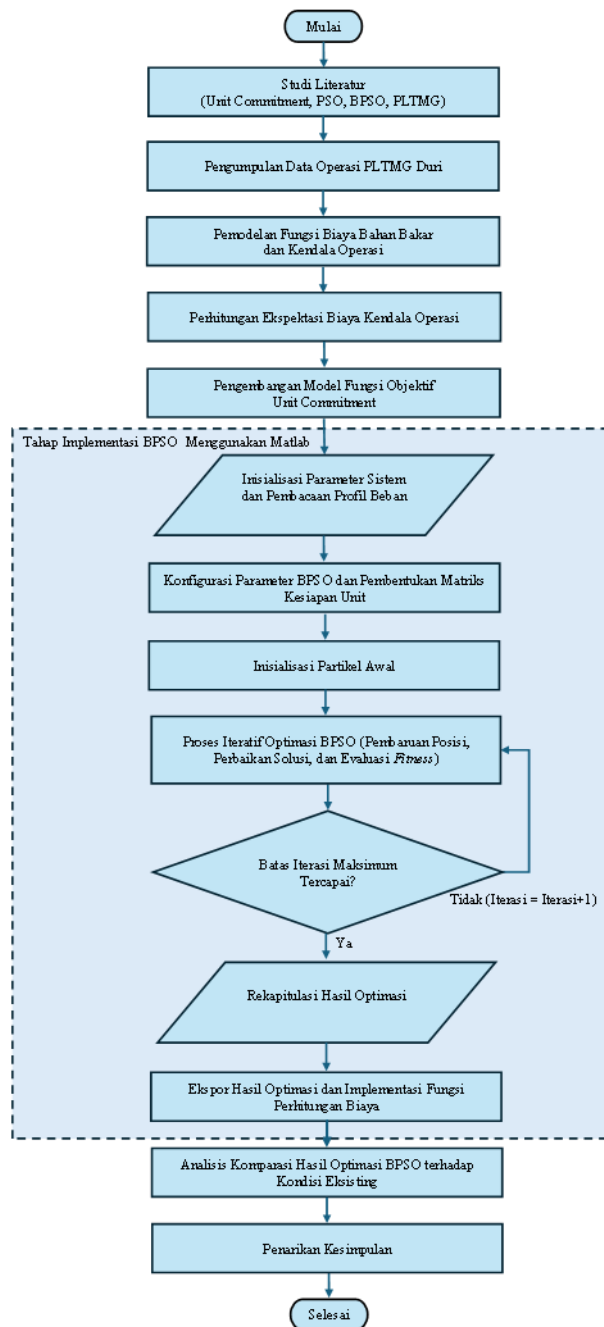
Penelitian ini dilaksanakan pada Pembangkit Listrik Tenaga Mesin Gas (PLTMG) Duri yang berlokasi di wilayah Duri, Desa Balai Pungut, Kecamatan Pinggir, Kabupaten Bengkalis, Provinsi Riau. PLTMG Duri merupakan salah satu pembangkit strategis yang berperan penting dalam menjaga keandalan pasokan listrik pada sistem kelistrikan Sumatera Bagian Tengah (Sumbagteng), khususnya pada subsistem Riau. Waktu penelitian ditentukan berdasarkan ketersediaan dan kelengkapan data operasi pembangkit. Data yang digunakan dalam penelitian ini mencakup periode enam bulan, yaitu mulai 01 November 2025 hingga 30 April 2026. Rentang waktu tersebut dipilih karena dianggap cukup representatif untuk menggambarkan variasi kondisi operasi PLTMG Duri, baik dari sisi fluktuasi beban sistem, pola operasi unit, maupun munculnya kendala operasional.

Metode Pengumpulan Data

Pengumpulan data merupakan tahap penting dalam penelitian ini karena kualitas dan kelengkapan data akan sangat memengaruhi akurasi pemodelan serta hasil optimasi yang diperoleh. Berdasarkan sumbernya, data dalam penelitian ini terdiri atas data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh langsung dari aktivitas operasional PLTMG Duri melalui pengamatan dan pencatatan data historis operasi pembangkit. Data ini mencerminkan kondisi aktual pengoperasian unit dan digunakan sebagai dasar utama dalam pemodelan Unit Commitment. Data primer meliputi data beban sistem, daya keluaran masing-masing unit, konsumsi bahan bakar gas dan HSD, serta catatan kejadian operasional seperti restart singkat saat start-up, derating temporer akibat knocking, dan kejadian gas trip. Data sekunder diperoleh dari dokumen pendukung yang bersumber dari internal pembangkit dan instansi terkait, meliputi spesifikasi teknis unit PLTMG, nilai kalor bahan bakar, batas operasi unit, serta data biaya bahan bakar gas dan HSD.

Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif terapan yang berfokus pada pemodelan matematis dan simulasi komputasi untuk mengoptimalkan penjadwalan operasi unit pembangkit (*Unit Commitment*) di PLTMG Duri menggunakan algoritma *Binary Particle Swarm Optimization* (BPSO).



Gambar 1 Diagram Alir Penelitian

Tahapan penelitian diawali dengan studi literatur mengenai *Unit Commitment*, *Particle Swarm Optimization* (PSO), BPSO, dan karakteristik operasi PLTMG, kemudian dilanjutkan dengan pengumpulan data historis operasi yang meliputi profil beban, daya keluaran unit, konsumsi bahan bakar, serta riwayat gangguan operasi berupa *Mode Back Up*, *Derating Temporer*, dan *Gas Trip*. Data tersebut selanjutnya digunakan untuk membangun model matematis fungsi biaya bahan bakar melalui metode *Ordinary Least Squares* (OLS) serta memodelkan kendala operasi pembangkit. Berdasarkan data historis, dilakukan perhitungan ekspektasi biaya kendala operasi menggunakan pendekatan *Value of Lost Load* (VoLL), yang kemudian diintegrasikan dengan fungsi biaya bahan bakar untuk mengembangkan model fungsi objektif *Unit Commitment*. Model yang telah dikembangkan diimplementasikan

menggunakan MATLAB dengan algoritma BPSO melalui tahapan inialisasi parameter sistem, konfigurasi parameter algoritma, pembentukan matriks kesiapan unit, inialisasi partikel, proses iteratif optimasi, evaluasi kriteria penghentian, serta rekapitulasi hasil optimasi. Hasil optimasi selanjutnya dikomparasikan dengan kondisi operasi eksisting berdasarkan jadwal *Unit Commitment*, total biaya operasi, komponen penyusun biaya, dan pola operasi unit pembangkit untuk mengevaluasi kinerja model yang dikembangkan. Tahap akhir penelitian dilakukan dengan menyusun kesimpulan berdasarkan hasil analisis sebagai jawaban atas tujuan penelitian serta menyusun rekomendasi untuk mendukung pengoperasian PLTMG Duri.

Pengembangan Fungsi Objektif Unit Commitment

Fungsi objektif *Unit Commitment* konvensional hanya mempertimbangkan biaya bahan bakar dan biaya *start-up*, sehingga belum mampu merepresentasikan kerugian ekonomi akibat kendala operasional yang bersifat stokastik, seperti *Mode Back Up*, *Derating Temporer*, dan *Gas Trip*. Oleh karena itu, penelitian ini mengembangkan fungsi objektif *Unit Commitment* dengan mengintegrasikan ekspektasi biaya kendala operasional sebagai komponen penalti ekonomi, sehingga proses optimasi tidak hanya meminimalkan biaya operasi, tetapi juga mempertimbangkan risiko operasional unit pembangkit.

Fungsi objektif *Unit Commitment* konvensional dinyatakan sebagai berikut:

$$\min F_{conv} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [C_i(P_{i,t}) \cdot u_{i,t} + SU_{i,t}] \quad (1)$$

Pada penelitian ini, ekspektasi biaya *Derating Temporer* dan *Gas Trip* diintegrasikan ke dalam komponen biaya operasi selama unit beroperasi (*running cost*), sedangkan ekspektasi biaya *Mode Back Up* diintegrasikan ke dalam komponen biaya *start-up*. Selain itu, faktor durasi interval waktu (Δt) diterapkan untuk menyesuaikan formulasi dengan resolusi optimasi 30 menit, sedangkan variabel indikator *start-up* ($\delta_{i,t}$) digunakan agar biaya *start-up* dan ekspektasi biaya *Mode Back Up* hanya dikenakan pada saat terjadi transisi status unit dari OFF ke ON. Dengan demikian, fungsi objektif yang diusulkan dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\min F_{new} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [(C_i(P_{i,t}) + Ex[C_{running,i}]) \cdot u_{i,t} \cdot \Delta t + (SU_{i,t} + Ex[C_{backup,i}]) \cdot \delta_{i,t}] \quad (2)$$

Tabel 1. Definisi variabel dan parameter pada fungsi objektif yang dimodifikasi

Simbol	Definisi	Satuan
F	Total biaya operasi yang akan diminimalkan	Rp
T	Jumlah interval waktu dalam horizon optimasi (48 interval untuk 24 jam dengan resolusi 30 menit)	-
Δt	Durasi nilai interval waktu per slot (bernilai 0,5 jam untuk resolusi 30 menit)	jam
N	Jumlah unit pembangkit PLTMG Duri	7 unit
i	Indeks pengenalan unit (1, 2, ..., 7)	-
t	Indeks interval waktu berjalan (1, 2, ..., 48)	-
$u_{i,t}$	Variabel keputusan biner status operasi unit (1 = ON, 0 = OFF)	biner

$\delta_{i,t}$	Variabel biner indikator transisi penyalan mesin (<i>start up order</i>), yang secara otomatis bernilai 1 jika unit ke-I berubah status dari mati menjadi menyala pada jam ke-t, dan bernilai 0 pada kondisi lainnya.	biner
$P_{i,t}$	Daya keluaran unit pada interval t	MW
$C_i(P)$	Fungsi biaya bahan bakar gas (polinomial orde 2 dari Tabel 4.13)	Rp/jam
$SU_{i,t}$	Biaya <i>start up</i> unit	Rp
$Ex[C_{running,i}]$	Nilai ekspektasi biaya kendala operasional per jam berjalan (<i>derating + gas trip</i>)	Rp/jam
$Ex[C_{backup,i}]$	Nilai ekspektasi biaya inefisiensi penyalan akibat kemunculan <i>mode backup</i>	Rp/kejadian

Pemodelan Unit Commitment dan Implementasi BPSO

Tahapan ini merupakan fase integrasi dari kerangka metodologi penelitian, di mana hasil ekstraksi data operasional dan formulasi kendala dari PLTMG Duri disatukan ke dalam sebuah sistem pengambilan keputusan yang komprehensif. Pemodelan Unit Commitment (UC) pada dasarnya merupakan proses optimasi matematis untuk menentukan jadwal status menyala atau mati (ON/OFF) dari sekumpulan unit pembangkit, beserta alokasi pembebanannya, guna memenuhi kebutuhan daya sistem dengan biaya operasional yang paling minimum. Kelemahan utama dari model Unit Commitment konvensional adalah ketidakmampuannya dalam mengantisipasi kerugian finansial akibat gangguan operasional yang bersifat stokastik di lapangan. Oleh karena itu, kebaruan (*novelty*) dari penelitian ini adalah mengembangkan fungsi objektif tersebut dengan menginternalisasikan nilai ekspektasi biaya gangguan sebagai komponen penalti ekonomi. Fungsi objektif modifikasi (F_{mod}) dikembangkan dengan menambahkan biaya ekspektasi tersebut ke dalam persamaan konvensional.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengolahan Data Operasi PLTMG Duri

Pengolahan data operasi merupakan tahap awal dalam penelitian ini untuk memperoleh parameter masukan yang digunakan pada pemodelan Unit Commitment. Data operasi PLTMG Duri selama periode 01 November 2025 hingga 30 April 2026 diolah guna menghasilkan parameter yang menjadi dasar dalam pembentukan fungsi objektif serta kendala operasi pada algoritma Binary Particle Swarm Optimization (BPSO). Parameter operasi unit merupakan batasan teknis yang digunakan sebagai acuan dalam pengoperasian PLTMG Duri sekaligus menjadi kendala pada pemodelan Unit Commitment dalam penelitian ini. Penentuan parameter tersebut mengacu pada Prosedur Operasi Tetap (PROTAP) yang diterbitkan oleh PT PLN (Persero) Unit Induk Pengatur Penyaluran Tenaga Listrik (UIP3B) Sumatera. Berdasarkan PROTAP UIP3B Sumatera, batas daya minimum (P_{min}) setiap unit PLTMG Duri ditetapkan sebesar 10 MW dan batas daya maksimum (P_{max}) ditetapkan sebesar 14,32 MW.

Tabel 2. Parameter Operasi Unit PLTMG Duri

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Daya minimum	P_{min}	10,00	MW
Daya maksimum	P_{max}	14,32	MW
Ramp up	-	0,5	MW/Menit

Ramp down	-	2	MW/Menit
Minimum up time	-	-	-
Minimum down time	-	-	-
Jumlah unit	N	7	Unit
Kapasitas Total	Pmax total	100,24	MW

Parameter bahan bakar yang digunakan dalam penelitian ini meliputi data bahan bakar utama berupa gas alam serta bahan bakar cadangan berupa High Speed Diesel (HSD). Gas alam digunakan sebagai sumber energi utama dalam pengoperasian PLTMG Duri, sedangkan HSD digunakan ketika terjadi gas trip yang menyebabkan unit beralih dari mode gas ke mode diesel (fuel switching). Parameter utama bahan bakar gas yang digunakan dalam penelitian ini meliputi nilai kalor (Gross Heating Value atau GHV) dan harga gas. Nilai GHV sebesar 1.070 Btu/scf diperoleh dari Daily Report PT Transportasi Gas Indonesia (PT TGI), sedangkan harga gas sebesar 6,62 USD/MMBTU mengacu pada Berita Acara Penyaluran Gas antara PT PLN (Persero) Energi Primer Indonesia (EPI) untuk periode April 2026.

Tabel 3. Parameter Bahan Bakar Gas dan HSD

Parameter	Nilai	Satuan	Sumber
GHV gas	1.070	Btu/scf	Daily Report PT TGI
Densitas standar gas	0,803	kg/m ³	Daily Report PT TGI
Harga gas	6,62	USD/MMBTU	BA Penyaluran Gas April 2026
Kurs USD	16.500	Rp/USD	Kurs acuan
SFC HSD	0,24	liter/kWh	Laporan HOP & Stok BBM PLTMG Duri
Harga HSD	18.336	Rp/liter	Surat Resmi PLN Kantor Pusat April 2026

Heat rate merupakan salah satu parameter utama dalam mengevaluasi kinerja termal pembangkit. Karakteristik heat rate masing-masing unit PLTMG Duri diperoleh melalui pengujian lapangan dengan mengamati konsumsi bahan bakar gas pada berbagai tingkat pembebanan. Pengujian dilakukan terhadap seluruh tujuh unit pembangkit pada rentang beban 3 MW hingga 14,32 MW dengan interval 1 MW. Hasil perhitungan heat rate untuk masing-masing unit pembangkit pada berbagai tingkat pembebanan menunjukkan bahwa seluruh unit menunjukkan pola heat rate yang serupa, yaitu bernilai relatif tinggi pada beban rendah kemudian menurun secara bertahap seiring dengan meningkatnya beban operasi. Pola tersebut menunjukkan bahwa efisiensi termal unit pembangkit meningkat ketika unit beroperasi mendekati kapasitas maksimumnya. Karakteristik ini sejalan dengan prinsip kerja mesin gas internal combustion yang memiliki efisiensi optimum pada daerah pembebanan tinggi.

Tabel 4. Karakteristik Heat Rate Unit 1

No.	Beban (MW)	Flow gas (kg/h)	Konsumsi energi (MMBtu/h)	Heat rate (MMBtu/MWh)	Heat rate (kJ/kWh)
1	3	832	39,151	13,0504	13.769
2	4	993	46,727	11,6819	12.325
3	5	1.098	51,668	10,3337	10.903
4	6	1.332	62,68	10,4466	11.022

5	7	1.510	71,056	10,1508	10.710
6	8	1.678	78,961	9,8702	10.414
7	9	1.843	86,726	9,6362	10.167
8	10	1.973	92,843	9,2843	9.795
9	11	2.123	99,902	9,082	9.582
10	12	2.306	108,513	9,0428	9.541
11	13	2.483	116,842	8,9879	9.483
12	14	2.640	124,23	8,8736	9.362
13	14,32	2.689	126,536	8,8363	9.323

Setelah karakteristik heat rate masing-masing unit diperoleh, tahap berikutnya adalah menyusun fungsi biaya bahan bakar yang akan digunakan sebagai komponen utama dalam fungsi objektif Unit Commitment. Fungsi biaya ini dibentuk dalam bentuk persamaan kuadratik. Proses curve fitting dilakukan menggunakan metode Ordinary Least Squares (OLS) yang bertujuan memperoleh persamaan dengan jumlah kuadrat galat (sum of squared errors) minimum. Koefisien hasil curve fitting selanjutnya digunakan untuk membentuk fungsi biaya bahan bakar yang menjadi komponen utama dalam fungsi objektif Unit Commitment.

Tabel 5. Koefisien Fungsi Biaya Bahan Bakar Gas 7 Unit PLTMG Duri

Unit	a (konstanta) (Rp/jam)	b (linier) (Rp/jam/MW)	c (kuadratik) (Rp/jam/MW ²)
1	730.440,42	987.005,97	-5.001,49
2	8.749.327,72	-233.692,29	42.023,49
3	18.285.373,34	-1.359.404,62	84.444,89
4	4.321.554,83	566.566,78	6.708,23
5	-866.517,36	1.409.048,68	-25.473,46
6	-32.755,26	1.302.211,51	-22.859,66
7	2.261.974,58	947.942,10	-7.875,99

Analisis dan Valuasi Kendala Operasi PLTMG Duri

Setelah parameter operasi unit, karakteristik heat rate, fungsi biaya bahan bakar, dan profil beban sistem ditetapkan, tahap berikutnya adalah menganalisis karakteristik kendala operasi yang memengaruhi kinerja PLTMG Duri serta mengkuantifikasi dampak ekonominya. Berdasarkan hasil evaluasi data operasi selama periode 1 November 2025 hingga 30 April 2026, teridentifikasi tiga kendala operasi yang paling dominan memengaruhi keandalan dan biaya operasi PLTMG Duri, yaitu (1) Mode Back Up pada proses start-up, (2) Derating temporer akibat high knocking pada silinder mesin, dan (3) Gas Trip yang menyebabkan terjadinya fuel switching dari mode gas ke mode diesel.

Analisis Mode Back Up

Mode back up merupakan kondisi operasi sementara yang biasanya muncul pada fase awal start up unit PLTMG. Pada kondisi ini, mesin belum mencapai parameter operasi yang stabil sehingga sistem kontrol secara otomatis mengalihkan operasi ke mode back up sebagai langkah proteksi. Akibatnya, proses start up perlu diulang yang menyebabkan konsumsi bahan bakar HSD pemantik menjadi dua kali lipat dari kondisi start up normal. Berdasarkan dokumen

prosedur start up dan rekapitulasi konsumsi HSD PLTMG Duri, konsumsi HSD pada start up normal adalah 35 liter per kejadian start, sedangkan pada kejadian back up adalah 70 liter per kejadian (2 kali start up normal), sehingga tambahan konsumsi HSD per kejadian back up adalah 35 liter.

Tabel 6. Frekuensi Mode Back Up, Probabilitas, dan Biaya Inefisiensi Start-Up per Unit

Unit	Jumlah Kejadian	Jumlah Start Up	Probabilitas (per start up)	Total Biaya (Rp)
1	1	175	0,00571	641.760
2	1	143	0,00699	641.760
3	34	173	0,196531	21.819.840
4	3	166	0,018072	1.925.280
5	3	148	0,020270	1.925.280
6	0	168	0	0
7	27	172	0,156976	17.327.520
Total	69	1145	-	44.281.440

Analisis Derating Temporer

Derating temporer merupakan penurunan daya keluaran unit secara otomatis dari Pmax 14,32 MW menjadi 12 MW yang dipicu oleh alarm LR (Load Reduction) High Knock. Fenomena ini terjadi ketika sensor knocking mendeteksi intensitas knocking melebihi ambang batas aman yang diizinkan, sehingga sistem proteksi mesin secara otomatis menurunkan beban untuk menghindari kerusakan komponen internal. Total energi hilang per kejadian derating dihitung sebesar 0,128373 MWh per kejadian. Frekuensi kejadian derating untuk masing-masing unit selama periode November 2025 hingga April 2026 diperoleh dari rekapitulasi log alarm LR High Knock pada WOIS PLTMG Duri.

Tabel 7. Frekuensi Derating, Probabilitas, dan Total Energi Hilang per Unit

Unit	Jumlah Kejadian	Jam Operasi	Probabilitas (per jam)	Energi Hilang Total (MWh)
1	52	1.945	0,026735	6,68
2	10	1.509	0,006627	1,28
3	118	1.821	0,0648	15,15
4	241	1.651	0,145972	30,94
5	181	1.553	0,116549	23,24
6	11	2.083	0,005281	1,41
7	10	2.091	0,004782	1,28
Total	623	-	-	79,98

Analisis Gas Trip

Gas trip merupakan kondisi penghentian operasi mode gas yang dipicu oleh alarm GT (Gas Trip) High Knock, yang terjadi ketika nilai knocking mencapai limit atas sebesar 200. Ketika Gas trip terjadi, sistem kontrol mesin secara otomatis melakukan fuel switching dari mode gas ke mode diesel sebagai langkah proteksi. Berbeda dengan derating yang hanya menurunkan daya, gas trip melibatkan perubahan jenis bahan bakar yang menimbulkan kebutuhan recovery yang lebih kompleks dan berbiaya lebih tinggi. Total energi tidak tersuplai

(Energy Not Served) akibat satu siklus kejadian gas trip diperoleh dari akumulasi defisit energi pada fase ramp down dan fase ramp up, yang dihitung sebesar 2,2188 MWh per kejadian.

Tabel 8. Frekuensi Gas Trip, Probabilitas, Total Konsumsi HSD, dan Total Energi Hilang per Unit

Unit	Jumlah Kejadian	Jam Operasi	Probabilitas (per jam)	Total HSD (liter)	Energi Hilang Total (MWh)
1	16	1.945	0,008226	3.024,96	35,5
2	7	1.509	0,004639	1.323,42	15,53
3	13	1.821	0,007139	2.457,78	28,84
4	23	1.651	0,013931	4.348,38	51,03
5	17	1.553	0,010947	3.214,02	37,72
6	2	2.083	0,00096	378,12	4,44
7	11	2.091	0,005261	2.079,66	24,41
Total	89	-	-	16.826,34	197,47

Implementasi BPSO pada Unit Commitment PLTMG Duri

Setelah seluruh parameter operasi, fungsi biaya bahan bakar, serta ekspektasi biaya akibat kendala operasi (mode back up, derating temporer, dan gas trip) ditetapkan, tahapan berikutnya adalah mengimplementasikan algoritma Binary Particle Swarm Optimization (BPSO) untuk menyelesaikan permasalahan Unit Commitment. Untuk mengevaluasi kinerja algoritma yang diusulkan, dilakukan perbandingan antara dua kondisi operasi. Kondisi pertama merupakan Unit Commitment eksisting yang merepresentasikan pola pengoperasian unit berdasarkan praktik operasional di lapangan, sedangkan kondisi kedua merupakan Unit Commitment hasil optimasi menggunakan algoritma BPSO. Kedua kondisi tersebut menggunakan profil beban yang sama sehingga hasil perbandingan dilakukan secara setara.

Simulasi Pola Operasi Eksisting (Base Case)

Untuk mendapatkan tolok ukur (baseline) sebagai pembanding kinerja algoritma BPSO, skenario ini memodelkan pola operasi eksisting yang saat ini diterapkan di PLTMG Duri. Guna memastikan pengujian yang komprehensif dan mewakili pola operasi mingguan yang dinamis (mencakup hari kerja dan akhir pekan), simulasi ini menggunakan riwayat order dispatch historis selama satu minggu penuh, yakni pada periode 1 hingga 7 Mei 2026. Data ini dibagi ke dalam 336 slot waktu operasional (dengan resolusi 30 menit per slot). Berdasarkan hasil simulasi, diperoleh rincian komponen biaya operasional pada kondisi Unit Commitment eksisting.

Tabel 9. Rincian Biaya Operasional Unit Commitment Eksisting

Komponen Biaya	Nilai (Rp)
Total Biaya Bahan Bakar Gas	9.513.985.466,22
Total Ekspektasi Biaya Mode Back Up	1.776.279,64
Total Ekspektasi Biaya Derating	5.762.286,49
Total Ekspektasi Biaya Gas Trip	31.137.927,12
Total Biaya Operasi	9.552.661.959,47

Tabel 10. Statistik Operasi Unit Kondisi Eksisting

Unit	Frekuensi Start (kali)	Frekuensi Stop (kali)	Durasi Operasi (Jam)
Unit 1	6	6	97,5
Unit 2	9	9	99,0
Unit 3	6	6	95,5
Unit 4	6	6	95,0
Unit 5	6	6	101,0
Unit 6	8	8	103,5
Unit 7	8	8	101,0

Implementasi Algoritma Binary Particle Swarm Optimization

Tahap berikutnya adalah mengimplementasikan algoritma Binary Particle Swarm Optimization (BPSO) untuk menghasilkan jadwal Unit Commitment yang lebih optimal. Pada tahap ini, keputusan start dan stop operasi unit tidak lagi ditentukan secara manual oleh operator, melainkan diperoleh melalui proses optimasi yang mempertimbangkan fungsi objektif serta kendala operasi yang berlaku. Parameter BPSO yang digunakan dalam simulasi Unit Commitment PLTMG Duri disajikan pada Tabel 10.

Tabel 11. Parameter Inisiasi Algoritma BPSO

Parameter BPSO	Nilai Spesifikasi	Keterangan / Fungsi Batasan
Jumlah Partikel (Swarm Size)	30	Jumlah kandidat solusi dalam satu iterasi
Jumlah Iterasi Maksimum	500	Batas akhir penghentian proses pencarian iteratif program
Koefisien Kognitif (c1)	2	Bobot kecenderungan partikel menuju posisi terbaik lokal (Pbest)
Koefisien Sosial (c2)	2	Bobot kecenderungan partikel menuju posisi terbaik global (gbest)
Bobot Inersia Awal (wmax)	0,9	Mengendalikan kemampuan eksplorasi pada awal iterasi
Bobot Inersia Akhir (wmin)	0,4	Meningkatkan eksploitasi solusi pada akhir iterasi
Random Seed	1	Menjamin hasil simulasi dapat direproduksi
Batas Kecepatan Minimum (Vmin)	-4	Membatasi nilai kecepatan batas bawah transisi probabilitas
Batas Kecepatan Maximum (Vmax)	4	Membatasi nilai kecepatan batas atas transisi probabilitas

Berdasarkan hasil simulasi, algoritma Binary Particle Swarm Optimization (BPSO) berhasil memperoleh solusi Unit Commitment dengan karakteristik konvergensi yang stabil menuju nilai minimum fungsi objektif. Perkembangan nilai biaya operasional terbaik pada setiap iterasi menggambarkan proses pencarian solusi sejak iterasi awal hingga algoritma mencapai kondisi konvergen. Pada tahap awal iterasi, nilai fungsi objektif mengalami

penurunan yang cukup signifikan. Nilai biaya operasional yang pada iterasi ke-10 masih sebesar Rp9.467.317.158,34 berhasil diturunkan menjadi Rp9.462.491.518,22 pada iterasi ke-30, kemudian kembali menurun menjadi Rp9.455.274.218,30 pada iterasi ke-40 dan Rp9.449.277.024,45 pada iterasi ke-50. Setelah iterasi ke-50, penurunan nilai fungsi objektif berlangsung lebih lambat. Algoritma mencapai nilai minimum pada iterasi ke-270 sebesar Rp9.447.787.193,61. Nilai tersebut bertahan hingga iterasi ke-500 tanpa mengalami perubahan, yang menunjukkan bahwa algoritma telah mencapai kondisi konvergen.

Tabel 12. Komponen Penyusun Total Biaya Operasional Hasil Optimasi BPSO

Komponen Biaya	Nilai (Rp)
Total Biaya Bahan Bakar Gas	9.408.170.954,46
Total Ekspektasi Biaya Mode Back Up	3.836.999,71
Total Ekspektasi Biaya Derating	5.559.062,30
Total Ekspektasi Biaya Gas Trip	30.220.177,14
Total Biaya Operasi	9.447.787.193,61

Tabel 13. Statistik Operasi Unit Hasil Optimasi BPSO

Unit	Frekuensi Start (kali)	Frekuensi Stop (kali)	Durasi Operasi (Jam)
Unit 1	11	11	99,5
Unit 2	12	12	103,0
Unit 3	13	13	83,5
Unit 4	10	10	97,5
Unit 5	13	13	93,5
Unit 6	9	9	98,5
Unit 7	18	18	92,5

Komparasi Unit Commitment Eksisting dan Hasil Optimasi BPSO

Evaluasi kinerja algoritma dilakukan dengan membandingkan Unit Commitment eksisting dengan Unit Commitment hasil optimasi menggunakan Binary Particle Swarm Optimization (BPSO). Perbandingan tersebut dilakukan dengan memastikan bahwa kedua kondisi operasi melayani kebutuhan beban yang sama. Berdasarkan hasil simulasi, baik kondisi operasi eksisting maupun hasil optimasi mampu menyalurkan energi sebesar 9.424,66 MWh selama periode pengamatan. Kesamaan total energi yang disalurkan menunjukkan bahwa kedua kondisi memiliki tingkat pelayanan sistem yang identik, sehingga perbandingan biaya operasional dapat dilakukan secara setara.

Tabel 14. Perbandingan Biaya Operasional Unit Commitment

Komponen Biaya	Kondisi Operasi Eksisting (Rp)	Hasil Optimasi BPSO (Rp)	Penghematan (Rp)
Biaya Bahan Bakar Gas	9.513.985.466,22	9.408.170.954,46	105.814.511,76
Biaya Ekspektasi Mode Back Up	1.776.279,64	3.836.999,71	-2.060.720,07
Biaya Ekspektasi Derating	5.762.286,49	5.559.062,30	203.224,19

Biaya Ekspektasi Gas Trip	31.137.927,12	30.220.177,14	917.749,98
Total Biaya Operasi	9.552.661.959,47	9.447.787.193,61	104.874.765,86

Tabel 15. Perbandingan Frekuensi Start dan Stop Unit Commitment Eksisting dan Hasil Optimasi BPSO

Unit	Jumlah Start Kondisi Eksisting	Jumlah Start Hasil Optimasi BPSO	Jumlah Stop Kondisi Eksisting	Jumlah Stop Hasil Optimasi BPSO
Unit 1	6	11	6	11
Unit 2	9	12	9	12
Unit 3	6	13	6	13
Unit 4	6	10	6	10
Unit 5	6	13	6	13
Unit 6	8	9	8	9
Unit 7	8	18	8	18
Total	49	83	49	83

Tabel 16. Perbandingan Prioritas Start Unit Commitment

Peringkat	Prioritas Start Kondisi Eksisting	Prioritas Start Hasil Optimasi BPSO	Prioritas Stop Kondisi Eksisting	Prioritas Stop Hasil Optimasi BPSO
1	Unit 6	Unit 2	Unit 4	Unit 3
2	Unit 5	Unit 1	Unit 3	Unit 7
3	Unit 7	Unit 6	Unit 1	Unit 5
4	Unit 2	Unit 4	Unit 2	Unit 4
5	Unit 1	Unit 5	Unit 7	Unit 6
6	Unit 3	Unit 7	Unit 5	Unit 1
7	Unit 4	Unit 3	Unit 6	Unit 2

Berdasarkan hasil komparasi, penerapan algoritma BPSO berhasil mengoptimalkan penjadwalan *Unit Commitment* PLTMG Duri sehingga total biaya operasi menurun dari Rp9.552.661.959,47 pada kondisi eksisting menjadi Rp9.447.787.193,61. Optimasi tersebut menghasilkan penghematan biaya operasi sebesar Rp104.874.765,86 selama satu periode simulasi. Selain itu, hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan efisiensi operasi tersebut tidak mengurangi kemampuan sistem dalam memenuhi kebutuhan beban, yang dibuktikan dengan kedua skenario mampu menyalurkan energi listrik sebesar 9.424,66 MWh.

Analisis terhadap setiap komponen biaya menunjukkan bahwa hasil optimasi *Unit Commitment* menggunakan algoritma BPSO memberikan penghematan terbesar pada biaya bahan bakar gas, yaitu sebesar Rp105.814.511,76. Selain itu, ekspektasi biaya *Derating Temporer* dan *Gas Trip* juga mengalami penurunan masing-masing sebesar Rp203.224,19 dan Rp917.749,98 sebagai dampak dari penjadwalan operasi yang lebih optimal. Di sisi lain, ekspektasi biaya *Mode Back Up* meningkat sebesar Rp2.060.720,07 dibandingkan kondisi operasi eksisting. Meskipun demikian, peningkatan tersebut relatif kecil dibandingkan penghematan yang diperoleh pada biaya bahan bakar serta ekspektasi biaya risiko operasi lainnya. Dengan demikian, optimasi *Unit Commitment* menggunakan algoritma BPSO tetap mampu menghasilkan total biaya operasi yang lebih minimum dibandingkan kondisi eksisting.

Hasil optimasi juga menunjukkan bahwa algoritma BPSO menghasilkan frekuensi transisi operasi yang lebih tinggi dibandingkan kondisi eksisting. Total frekuensi Start dan Stop meningkat dari 49 kali menjadi 83 kali selama periode simulasi. Peningkatan terbesar terjadi pada Unit 7, yang mengalami kenaikan frekuensi operasi dari 8 kali menjadi 18 kali. Hasil ini menunjukkan bahwa algoritma BPSO membentuk pola Unit Commitment yang lebih dinamis dengan melakukan penyesuaian status operasi unit secara lebih fleksibel untuk memperoleh kombinasi biaya operasi yang lebih minimum. Perubahan frekuensi transisi operasi tersebut diikuti oleh perubahan distribusi durasi operasi masing-masing unit. Unit 2 mengalami peningkatan durasi operasi terbesar, yaitu dari 99,0 jam menjadi 103,0 jam, sedangkan Unit 3 mengalami penurunan durasi operasi paling besar, yaitu dari 95,5 jam menjadi 83,5 jam. Secara keseluruhan, total durasi operasi seluruh unit menurun dari 692,5 jam menjadi 668,0 jam.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan model Unit Commitment berbasis Binary Particle Swarm Optimization (BPSO) yang mengintegrasikan karakteristik heat rate hasil curve fitting serta tiga kendala operasi spesifik PLTMG Duri (inefisiensi start-up akibat restart singkat, derating temporer, dan kejadian gas trip) ke dalam fungsi objektif biaya operasional. Hasil optimasi menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan kondisi pengoperasian riil pada periode simulasi 1–7 Mei 2026, dengan algoritma BPSO mencapai konvergensi pada iterasi ke-270 dan total biaya operasi minimum sebesar Rp9.447.787.193,61, lebih rendah dari kondisi eksisting sebesar Rp9.552.661.959,47, sehingga diperoleh jadwal *Unit Commitment* yang lebih optimal dengan total biaya operasi sebesar Rp9.447.787.193,61, atau lebih rendah Rp104.874.765,86 dibandingkan kondisi eksisting, tanpa mengurangi keandalan penyaluran energi karena kedua skenario sama-sama berhasil memenuhi total energi sebesar 9.424,66 MWh. Strategi Unit Commitment hasil optimasi BPSO berbeda secara signifikan dari pola operasi eksisting, dengan frekuensi transisi start dan stop yang lebih tinggi (meningkat dari 49 menjadi 83 kali) dan redistribusi durasi operasi antarunit sehingga total durasi operasi seluruh unit menurun dari 692,5 jam menjadi 668,0 jam. Untuk penelitian selanjutnya, fungsi biaya operasional dapat diperluas dengan memasukkan estimasi biaya perawatan yang dipengaruhi oleh frekuensi start-stop unit, serta dilakukan benchmarking terhadap metode metaheuristik lain seperti Genetic Algorithm atau algoritma hybrid untuk membandingkan kecepatan konvergensi dan kualitas solusi. Bagi PT PLN Nusantara Power, hasil penelitian ini dapat dijadikan salah satu dasar pertimbangan dalam menyusun strategi penjadwalan operasi unit PLTMG Duri yang lebih ekonomis melalui penerapan pendekatan berbasis optimasi secara bertahap.

REFERENSI

- Abdul-Adheem, W. R. (2019). An enhanced particle swarm optimization algorithm. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, *9*(6), 4904–4907.
- Alahäivälä, A., Kiviluoma, J., Leino, J., & Lehtonen, M. (2017). System-level value of a gas engine power plant in electricity and reserve production. *Energies*, *10*(7), 983.

- Anyaka, B. O., Manirakiza, J. F., Chike, K. C., & Okoro, P. A. (2020). Optimal unit commitment of a power plant using particle swarm optimization approach. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, *10*(2), 1135–1141.
- Aryani, K., Wibowo, R. S., Rosida, Y. N., Santoso, D. B., & Kurniawan, M. (2025). Unit commitment scenarios for distributed energy resources using binary particle swarm optimization. *JST (Jurnal Sains dan Teknologi)*, *14*(1), 190–199.
- Ashraf, W. M., Uddin, G. M., Arafat, S. M., Krzywanski, J., & Xiaonan, W. (2021). Strategic-level performance enhancement of a 660 MWe supercritical power plant and emissions reduction by AI approach. *Energy Conversion and Management*, *250*, 114913.
- Eberhart, R., & Kennedy, J. (1995). Particle swarm optimization. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks* (Vol. 4, pp. 1942–1948). IEEE.
- Hong, Y.-Y., Apolinario, G. F. D. G., Lu, T.-K., & Chu, C.-C. (2022). Chance-constrained unit commitment with energy storage systems in electric power systems. *Energy Reports*, *8*, 1067–1090.
- Ismail, A. A., & Hussain, A. N. (2021). Solving the unit commitment problem in large systems using hybrid PSO algorithms. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1105, No. 1, Article 012007). IOP Publishing.
- Nugraha, D. A., & Wibowo, R. S. (2017). Unit commitment mempertimbangkan stabilitas tegangan dengan metode binary particle swarm optimization (BPSO). *Jurnal Teknik ITS*, *5*(2).
- Rao, S. S. (2020). *Engineering optimization: Theory and practice* (5th ed.). John Wiley & Sons.
- Reynaldo, A. F. Y. (2016). Security constrained unit commitment considering spinning reserve and transmission line capacity using binary particle swarm algorithm (Doctoral dissertation). Sepuluh Nopember Institute of Technology.
- Samuel, O Kurniawan, M Rosyadi. (2025). Optimasi Produksi Listrik PLTMG Melalui Peningkatan Kapasitas Sistem Pasok CNG Plant: Studi kasus PLTMG Bangkanai 295 MW. Institut Teknologi PLN.
- Shaari, G., Tekbiyik-Ersoy, N., & Dagbasi, M. (2019). The state of the art in particle swarm optimization-based unit commitment: A review. *Processes*, *7*(10), 733.
- Vetian, S. (2025). Optimasi multi-objective operasi Pembangkit Listrik Tenaga Mesin Gas (PLTMG) Duri unit 4–7 menggunakan metode response surface methodology (RSM)–multi-objective genetic algorithm (MOGA) untuk peningkatan efisiensi dan penurunan emisi (Tesis magister). Universitas Indonesia.
- Wadhwa, C. L. (2012). *Electrical power systems*. New Academic Science Limited.
- Wuijts, R. H., van den Akker, J. M., & van den Broek, M. (2024). Effect of modelling choices in the unit commitment problem. *Energy Systems*, *15*(2), 1–63.
- Zhao, B., Conejo, A. J., & Sioshansi, R. (2017). Unit commitment under gas-supply uncertainty and gas-price variability. *IEEE Transactions on Power Systems*, *32*(3), 2394–2405.
- Zhu, J., Liu, J., Chen, Y., Xue, X., & Sun, S. (2023). Binary restructuring particle swarm optimization and its application. *Biomimetics*, *8*(2), Article 266.