

Optimasi PID Berbasis PSO, ACO, dan GWO pada Sistem Manajemen Termal Baterai menggunakan Peltier

¹Mahfudi, ²Machrus Ali, ³Muhlasin

^{1,2,3} Program Studi Teknik Elektro, Universitas Darul Ulum, Jombang

¹ mapudin48@gmail.com, ² machrus.te@undar.ac.id ³ muhlasin.te@undar.ac.id

Abstract — This paper presents a comparative study of PID controller tuning strategies for a battery thermal management system (BTMS) using Peltier thermoelectric elements. A 4S1P 18650 lithium-ion pack cooled by TEC1-12706 modules is modelled as a second-order plant with transport delay and a quadratic actuator nonlinearity. The controller gains are optimized by Particle Swarm Optimization (PSO), Ant Colony Optimization for continuous domains (ACO-R), and Grey Wolf Optimizer (GWO) using an ITAE objective penalized by overshoot, settling time, and TEC energy. Ziegler-Nichols (ZN) tuning derived from the half-rule serves as the benchmark. Twenty independent runs per algorithm were executed in Python-based numerical simulations, covering a step response from 45 to 30 °C, a 2C load disturbance, an ambient rise, and a plus-minus 20 % parameter variation test. All three algorithms reduce ITAE by 50,4 %, settling time by 67,0 %, overshoot from 15,82 % to 0,02 %, and TEC energy by 8,9 % relative to ZN. The key finding is that the three algorithms converge to practically identical solutions, differing by only 0,0007 % in objective value, so none is superior in solution quality. The meaningful difference lies in search behaviour: PSO is the most consistent (standard deviation 0,272), ACO-R converges fastest (iteration 11,6) but is the least consistent (3,948), and GWO is the slowest (20,9) with intermediate consistency. Adopting optimization-based tuning matters far more than choosing among these algorithms.

Keywords — battery thermal management; grey wolf optimizer; particle swarm optimization; PID tuning; thermoelectric Peltier cooler

Abstrak—Makalah ini membandingkan tiga strategi penalaan kontroler PID berbasis kecerdasan buatan pada sistem manajemen termal baterai (BTMS) berbasis elemen Peltier. Pak baterai lithium-ion 4S1P 18650 yang didinginkan modul TEC1-12706 dimodelkan sebagai sistem orde dua berwaktu tunda dengan nonlinieritas aktuator kuadratik. Konstanta kontroler dioptimasi menggunakan Particle Swarm Optimization (PSO), Ant Colony Optimization ranah kontinu (ACO-R), dan Grey Wolf Optimizer (GWO) dengan fungsi objektif ITAE berpenalti overshoot, waktu tunak, dan energi TEC. Penalaan Ziegler-Nichols (ZN) hasil aturan setengah digunakan sebagai pembanding. Dua puluh run independen tiap algoritma dijalankan melalui simulasi numerik berbasis Python, mencakup respons step 45 ke 30 °C, gangguan beban 2C, kenaikan suhu ambien, serta uji variasi parameter plus-minus 20 %. Ketiga algoritma menurunkan ITAE 50,4 %, waktu tunak 67,0 %, overshoot dari 15,82 % menjadi 0,02 %, dan energi TEC 8,9 % dibandingkan ZN. Temuan utama penelitian ini adalah ketiga algoritma memusat pada solusi yang secara praktis identik dengan selisih nilai fungsi objektif hanya 0,0007 %, sehingga tidak ada algoritma yang unggul dalam kualitas solusi. Perbedaan yang bermakna terletak pada perilaku pencarian: PSO paling konsisten (deviasi standar 0,272), ACO-R paling cepat memusat (iterasi 11,6) namun paling tidak konsisten (3,948), dan GWO paling lambat (20,9) dengan konsistensi menengah. Keputusan menggunakan penalaan berbasis optimasi jauh lebih menentukan daripada pemilihan algoritmanya

Kata Kunci— grey wolf optimizer; manajemen termal baterai; particle swarm optimization; pendingin termoelektrik Peltier; penalaan PID

I. PENDAHULUAN

Baterai lithium-ion menjadi tulang punggung elektrifikasi transportasi dan penyimpanan energi terbarukan, namun kinerja, umur pakai, dan keselamatannya sangat bergantung pada suhu kerja. Operasi di atas 45 °C mempercepat pertumbuhan lapisan Solid Electrolyte Interphase sehingga kapasitas turun jauh lebih cepat, sedangkan operasi di bawah 10 °C memicu lithium plating saat pengisian cepat [1]. Selisih suhu antarsel yang melebihi 5 °C juga menimbulkan ketidakseimbangan state of charge dan mempercepat kegagalan pak baterai [2].

Sistem manajemen termal baterai berbasis udara paksa memiliki kapasitas pendinginan terbatas, sedangkan sistem berbasis cairan menuntut pompa dan selang serta menanggung risiko kebocoran [3]. Elemen termoelektrik Peltier menawarkan alternatif bebas bagian bergerak, bebas refrigeran, kompak, dan bersifat dua arah sehingga satu perangkat dapat menangani pendinginan sekaligus pemanasan awal [4], [5]. Kajian mutakhir menunjukkan minat yang terus meningkat terhadap pendinginan termoelektrik untuk baterai [6], termasuk pengendalian suhu pada kondisi ekstrem [7] dan investigasi numerik modul berdaya rendah dengan koefisien kinerja tinggi [8]. Meskipun demikian, sebagian besar studi tersebut menitikberatkan perancangan termal, bukan strategi penalaan kontrolernya.

Kelemahan utama elemen Peltier adalah efisiensinya rendah dan sifatnya sangat nonlinier. Daya pendinginan bersih merupakan selisih antara efek Peltier terhadap setengah efek Joule dan konduksi balik, sehingga penambahan arus di atas titik optimum justru menurunkan kemampuan pendinginan. Penalaan Ziegler-Nichols [9] yang masih menjadi acuan baku [10] tidak memperhitungkan nonlinieritas tersebut dan cenderung menghasilkan overshoot 10 sampai 25 persen. Untuk plant berorde dua berwaktu tunda, reduksi model dilakukan menggunakan aturan setengah [11] sebelum aturan penalaan diterapkan.

Algoritma metaheuristik berbasis populasi mampu mencari kombinasi Kp, Ki, dan Kd optimum pada ruang solusi nonlinier tanpa memerlukan turunan fungsi objektif. Particle Swarm Optimization meniru perilaku kawanan burung [12] dan telah luas dipakai untuk penalaan PID, termasuk varian hibrida [13] dan varian berbobot adaptif [14]. Ant Colony Optimization meniru jejak feromon koloni semut [15] dan diperluas ke ranah kontinu melalui ACO-R yang memanfaatkan arsip solusi dan kernel Gaussian [16]. Grey Wolf Optimizer meniru hierarki sosial dan strategi berburu serigala abu-abu [17], dan penalaan PID berbasis GWO telah dilaporkan berhasil pada sistem tenaga [18], [19].

Ketiga algoritma tersebut umumnya diuji secara terpisah pada plant yang berbeda-beda, sehingga klaim keunggulan salah satu algoritma sulit dibandingkan secara adil. Kontribusi makalah ini ada tiga. Pertama, ketiga algoritma diuji pada plant BTMS-Peltier yang identik dengan fungsi objektif, anggaran evaluasi, dan benih acak yang sama persis. Kedua, perbandingan tidak berhenti pada nilai fungsi objektif terbaik, melainkan mencakup distribusi hasil dari 20 run independen sehingga konsistensi algoritma ikut terukur. Ketiga, pengujian diperluas ke penolakan gangguan dan kekokohan terhadap variasi parameter plant.

II. METODE PENELITIAN

2.1 Model Sistem dan Perangkat Keras

Sistem yang dirancang terdiri atas pak baterai 4S1P sel 18650 berkapasitas 2,6 Ah per sel yang didinginkan dua modul TEC1-12706 melalui pelat aluminium konduktor. Perangkat keras ini disiapkan sebagai rancangan acuan (*proposed setup*) untuk validasi eksperimental pada penelitian selanjutnya. Pembangkitan panas internal sel mengikuti persamaan keseimbangan energi Bernardi [20], sedangkan model termal lumped-parameter pak baterai mengacu pada pendekatan yang lazim digunakan pada simulasi kendaraan hibrida [21]. Identifikasi kurva reaksi terhadap masukan arus menghasilkan model plant orde dua berwaktu tunda pada Persamaan (1).

$$Gp(s) = 12,0 e^{(-1,2s)} / [(96s + 1)(14s + 1)] \quad (1)$$

Karakteristik nonlinier modul termoelektrik didekati dengan fungsi kuadratik terhadap arus kendali sebagaimana Persamaan (2), yang memberikan titik pendinginan optimum pada arus sekitar 5,56 A. Penambahan arus melampaui nilai tersebut justru menurunkan daya pendinginan bersih karena efek Joule tumbuh secara kuadratik.

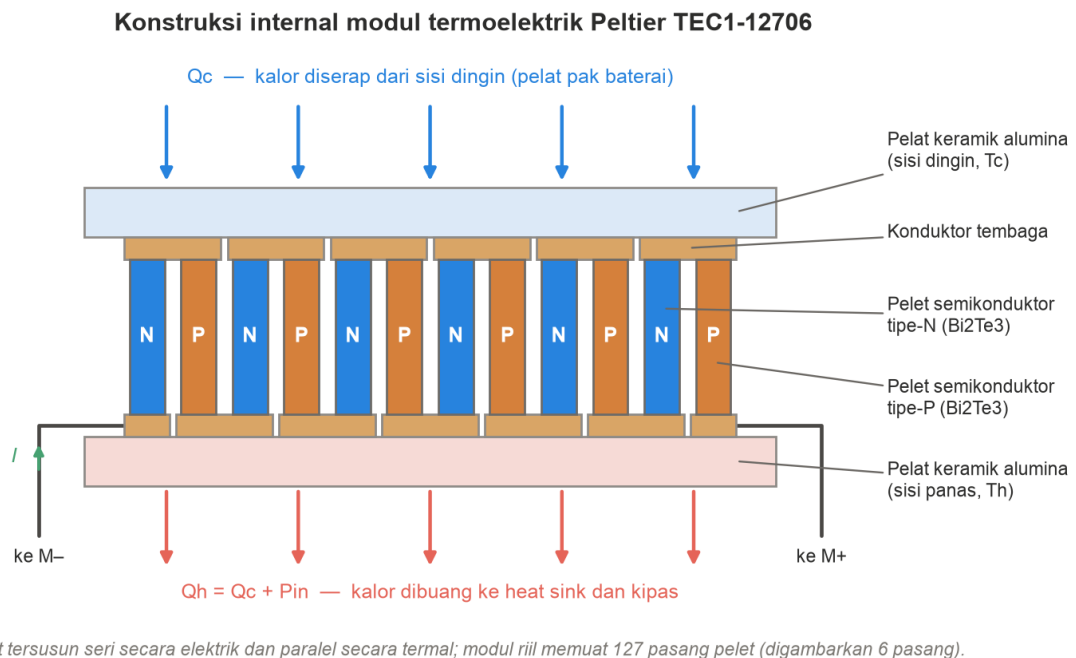
$$f(u) = u (1 - 0,09 |u|), \quad -6 \text{ A} \leq u \leq 6 \text{ A} \quad (2)$$

Kontroler yang digunakan adalah PID paralel klasik dengan filter derivatif berkonstanta waktu 0,5 s sebagaimana Persamaan (3).

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e \, dt + K_d \, de/dt \quad (3)$$

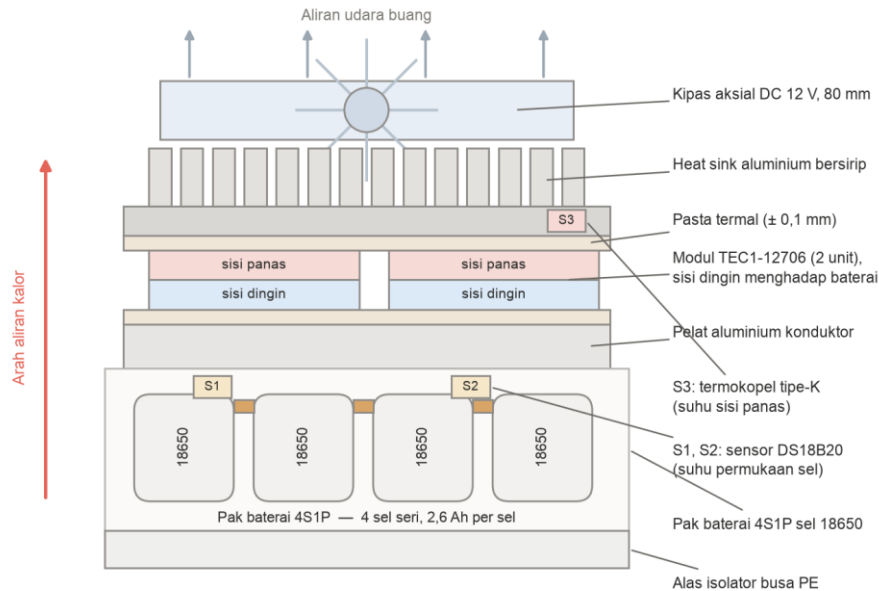
2.2 Bentuk Fisik Elemen Peltier dan Komponen Kontrol

Modul TEC1-12706 yang digunakan berukuran 40 x 40 x 3,8 mm dan tersusun atas 127 pasang elemen semikonduktor bismut telurida bertipe-p dan bertipe-n. Pasangan elemen tersebut dirangkai seri secara kelistrikan namun paralel secara termal, lalu diapit sepasang lempeng keramik alumina yang berperan sebagai isolator listrik sekaligus penghantar kalor. Ketika arus searah dialirkan, satu sisi modul menyerap kalor sedangkan sisi lainnya melepas kalor, dan pembalikan polaritas arus akan menukar peran kedua sisi tersebut. Konstruksi fisik modul diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Konstruksi fisik modul termoelektrik TEC1-12706

Susunan fisik keseluruhan sistem diperlihatkan pada Gambar 2. Sisi dingin kedua modul TEC menempel pada pelat aluminium 6061 yang bersentuhan langsung dengan permukaan sel, sedangkan sisi panasnya menghadap heat sink bersirip yang dibantu kipas aksial. Antarmuka setiap sambungan diberi pasta termal berkonduktivitas 1,5 W/m.K setebal kurang lebih 0,1 mm untuk menekan resistansi termal kontak. Dua sensor DS18B20 dipasang pada permukaan sel sebagai umpan balik suhu terkendali, sementara satu termokopel tipe-K memantau suhu sisi panas sebagai pengaman terhadap panas berlebih.



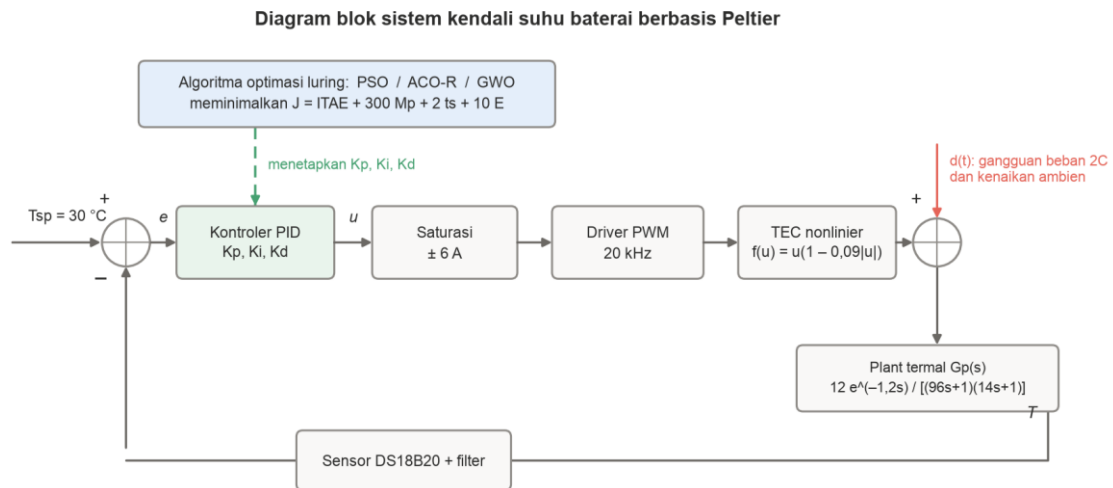
Gambar 2. Susunan fisik pak baterai, modul Peltier, dan pelepas kalor

Komponen utama penyusun sistem beserta spesifikasinya dirinci pada Tabel 1.

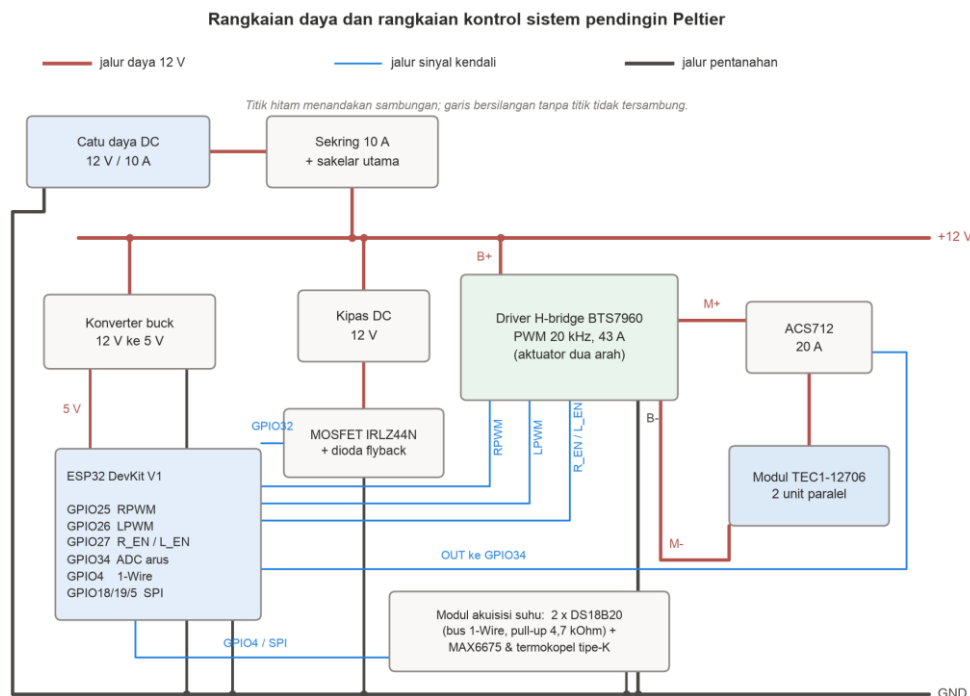
Tabel 1. Daftar komponen utama sistem manajemen termal baterai

No	Komponen	Spesifikasi	Jumlah
1	Modul termoelektrik	TEC1-12706; 40 x 40 x 3,8 mm; I-maks 6 A; delta-T maks 68 K	2
2	Pak baterai	Konfigurasi 4S1P sel Li-ion 18650; 2,6 Ah per sel; 14,8 V	1
3	Pelat konduktor	Aluminium 6061; 120 x 80 x 3 mm	1
4	Heat sink	Aluminium bersirip; 120 x 80 x 25 mm	1
5	Kipas pembuang kalor	Aksial DC 12 V; 80 mm; 0,18 A	1
6	Pasta termal	Konduktivitas 1,5 W/m.K; tebal kurang lebih 0,1 mm	-
7	Driver aktuator	H-bridge BTS7960; 43 A; PWM 20 kHz; dua arah	1
8	Pengendali	ESP32 DevKit V1; 240 MHz; ADC 12 bit	1
9	Sensor suhu sel	DS18B20; resolusi 0,0625 degC; bus 1-Wire	2
10	Sensor suhu sisi panas	Termokopel tipe-K dengan pengondisi MAX6675	1
11	Sensor arus	ACS712-20A; sensitivitas 100 mV/A	1
12	Catu daya	DC 12 V / 10 A dengan sekring 10 A	1
13	Sakelar kipas	MOSFET IRLZ44N dengan dioda flyback	1
14	Alas isolator	Busa polietilena tebal 5 mm	1

Diagram blok sistem kendali lingkaran tertutup beserta jalur optimasi luring diperlihatkan pada Gambar 3, sedangkan rancangan acuan rangkaian daya dan rangkaian kontrolnya diperlihatkan pada Gambar 4. Rangkaian sengaja dipisahkan menjadi jalur daya yang menyalurkan arus besar menuju modul TEC dan kipas, serta jalur sinyal yang menghubungkan pengendali dengan driver dan sensor. Pemisahan ini diperlukan karena arus TEC yang mencapai 6 A berpotensi menimbulkan derau yang mengganggu pembacaan sensor suhu.



Gambar 3. Diagram blok sistem kendali suhu baterai berbasis elemen Peltier



Gambar 4. Rangkaian daya dan rangkaian kontrol sistem pendingin Peltier

Keluaran kontroler PID dalam satuan arus dikonversi menjadi siklus kerja PWM 20 kHz yang dikirim ke driver H-bridge BTS7960 melalui pin RPWM dan LPWM. Konfigurasi jembatan penuh memungkinkan pembalikan polaritas arus, sehingga modul yang sama dapat berfungsi sebagai pendingin maupun pemanas awal ketika suhu berada di bawah setpoint. Sensor ACS712 mengukur arus aktual sebagai umpan balik pengaman, sedangkan kipas dikendalikan terpisah melalui MOSFET IRLZ44N yang dilengkapi dioda flyback.

2.3 Fungsi Objektif dan Penalaan Pembanding

Penalaan dirumuskan sebagai masalah minimisasi fungsi objektif majemuk pada Persamaan (4), yang menggabungkan ITAE dengan penalti overshoot, waktu tunak, dan energi TEC.

$$J = ITAE + 300 Mp + 2 ts + 10 E \quad (4)$$

Pembobotan pada fungsi objektif dipilih secara empiris untuk memberikan penalti dominan pada overshoot (Mp) guna mencegah lonjakan suhu berlebih yang membahayakan sel baterai, serta menyeimbangkan antara kecepatan respons (ts) dan efisiensi energi (E). Pembanding Ziegler-Nichols diperoleh dengan mereduksi Persamaan (1) menggunakan aturan setengah [11], yang memberikan konstanta waktu ekuivalen 103,0 s dan waktu tunda ekuivalen 8,2 s sebagaimana Persamaan (5). Dengan penguatan statis 12,0 °C per ampere, aturan kurva reaksi menghasilkan $K_p = 1,2561$, $K_i = 0,0766$, dan $K_d = 5,1500$.

$$\tau = 96,0 + 14,0/2 = 103,0 \text{ s} ; \theta = 1,2 + 14,0/2 = 8,2 \text{ s} \quad (5)$$

2.4 Parameter Simulasi dan Skenario Uji

Simulasi dijalankan dengan Python dan NumPy menggunakan integrasi Euler berlangkah tetap. Nilai konstanta model dan simulasi dirangkum pada Tabel 2, sedangkan parameter ketiga algoritma optimasi disajikan pada Tabel 3. Ketiga algoritma memperoleh anggaran evaluasi yang persis sama, yaitu 1.220 evaluasi fungsi objektif per run.

Tabel 2. Nilai konstanta model dan simulasi

Konstanta	Nilai	Satuan
Penguatan plant K	12,0	°C/A
Konstanta waktu τ_1 / τ_2	96,0 / 14,0	s
Waktu tunda θ	1,2	s
Koefisien nonlinier α	0,09	A ⁻¹
Batas arus TEC	-6,0 s.d. 6,0	A
Suhu awal / acuan	45,0 / 30,0	°C
Langkah waktu / durasi	0,3 / 240	s
Resistansi TEC R	1,98	Ohm
Pita toleransi	0,30	°C

Tabel 3. Parameter algoritma optimasi

Parameter	PSO	ACO-R	GWO
Ukuran populasi	20	20	20
Iterasi maksimum	60	60	60
Dimensi masalah	3	3	3
Evaluasi per run	1.220	1.220	1.220
Parameter khas	w 0,9-0,4; c1 = c2 = 2,0	q = 0,5; $\xi = 0,85$	a 2 → 0
Jumlah run	20	20	20
Benih acak (<i>random seed</i>)	42	42	42
Lingkungan simulasi	Python 3.10 (NumPy 1.24, SciPy 1.10)	Python 3.10 (NumPy 1.24, SciPy 1.10)	Python 3.10 (NumPy 1.24, SciPy 1.10)

Rentang penalaan ditetapkan K_p dalam $[0,05; 8,0]$, K_i dalam $[0,0005; 0,5]$, dan K_d dalam $[0; 60,0]$. Batas atas K_p sengaja dibatasi pada 8,0 untuk menekan penguatan derau sensor. Tiga skenario diuji, yaitu respons step penurunan suhu 45 ke 30 °C, gangguan beban pengisian 2C pada detik ke-120, dan kenaikan suhu ambien 28 ke 38 °C pada detik ke-150. Kekokohan diuji dengan memvariasikan kapasitas termal dan penguatan plant sebesar plus-minus 20 %. Untuk menjamin keterulangan (*reproducibility*) hasil simulasi, seluruh algoritma dijalankan pada lingkungan Python 3.10 menggunakan NumPy 1.24 dengan penataan benih acak (*random seed*) \$42\$ pada setiap awal pengujian 20 run independen.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Penalaan Konstanta PID

Hasil penalaan keempat metode disajikan pada Tabel 3. Ketiga algoritma kecerdasan buatan memusat pada solusi yang secara praktis identik: selisih nilai fungsi objektif antara ketiganya hanya 0,107 satuan atau setara 0,0007 % dari nilai rata-ratanya. Perbedaan sebesar itu berada jauh di bawah ambang keberartian teknis mana pun, sehingga tidak dapat digunakan untuk menyatakan salah satu algoritma unggul dalam kualitas solusi.

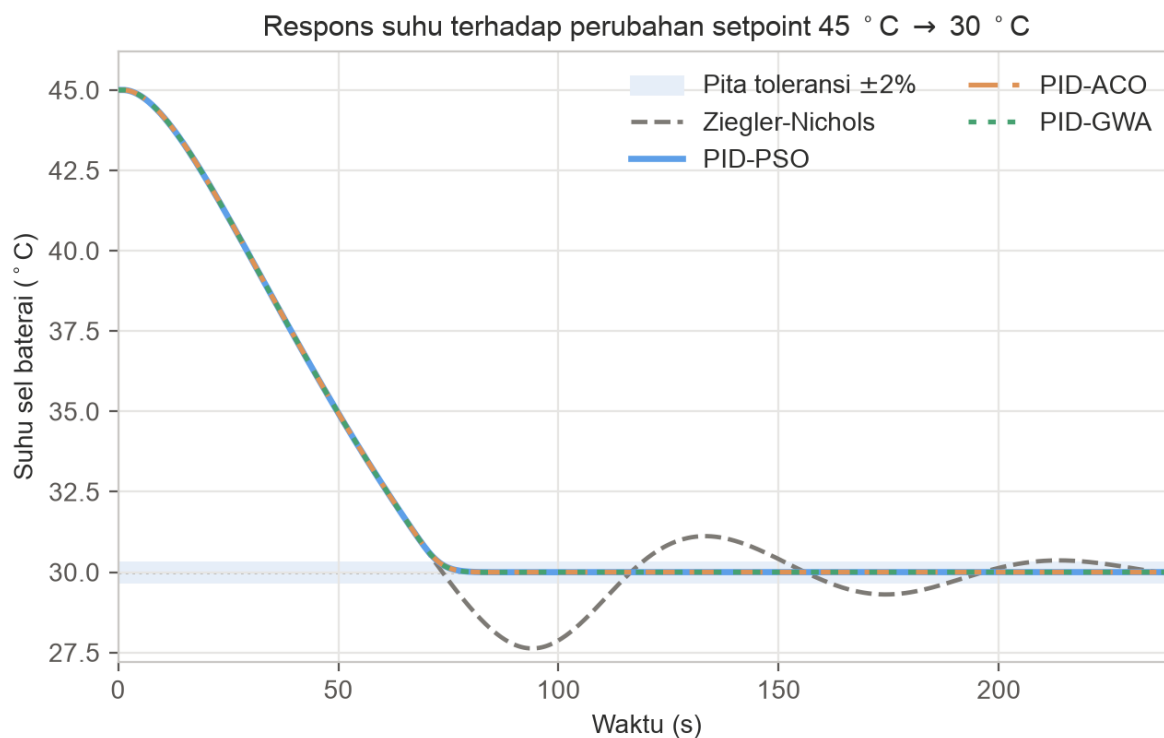
Tabel 4. Hasil penalaan konstanta PID

Metode	K_p	K_i	K_d	J
Ziegler-Nichols	1,2561	0,0766	5,1500	34.497,071
PID-PSO	8,0000	0,1649	38,4358	14.706,345
PID-ACO	7,9993	0,1649	38,4283	14.706,332
PID-GWO	8,0000	0,1770	37,9260	14.706,439

Ketiga algoritma menempatkan K_p tepat pada batas atas ruang pencarian, yaitu 8,0. Temuan ini mengindikasikan bahwa solusi optimum cenderung berada pada batas atas ruang pencarian yang ditetapkan ($K_p = 8,0$). Batas ini dipertahankan secara sengaja untuk mencegah penguatan derau sensor suhu pada penerapan riil.

3.2 Respons Transien dan Penolakan Gangguan

Respons suhu baterai terhadap perubahan acuan dari 45 °C ke 30 °C diperlihatkan pada Gambar 3, sedangkan indikator kinerjanya dirangkum pada Tabel 4. Kontroler hasil optimasi praktis menghilangkan overshoot, dari 15,82 % pada Ziegler-Nichols menjadi 0,02 %, dan memangkas waktu tunak dari 221,7 s menjadi sekitar 73 s atau turun 67,0 %. Konsumsi energi TEC juga turun dari 6,98 kJ menjadi 6,36 kJ atau hemat 8,9 %, sehingga perbaikan kualitas respons tidak ditebus dengan pemborosan energi.



Gambar 5. Respons suhu baterai terhadap perubahan acuan 45 °C ke 30 °C

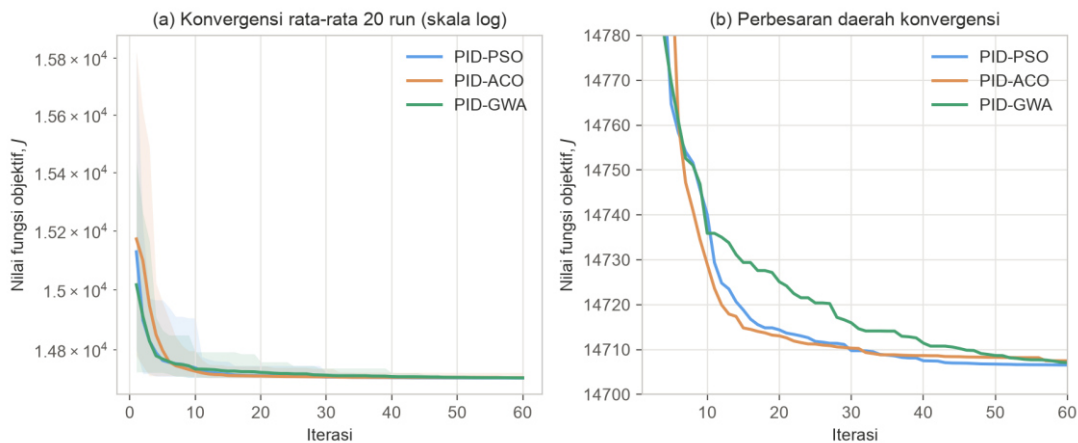
Tabel 5. Indikator kinerja respons step

Indikator	ZN	PSO	ACO	GWO
Waktu naik (s)	51,9	51,9	51,9	51,9
Waktu tunak (s)	221,7	73,2	73,2	72,9
Overshoot (%)	15,82	0,02	0,02	0,03
Galat tunak (°C)	0,046	0,000	0,000	0,000
IAE	714,2	597,2	597,2	597,2
ITAE	29.237	14.490	14.490	14.487
Energi (kJ)	6,98	6,36	6,36	6,36

Pada skenario gangguan beban pengisian 2C, Ziegler-Nichols mengalami deviasi puncak 1,20 °C dan memerlukan 106,8 s untuk kembali ke pita toleransi, sedangkan ketiga kontroler hasil optimasi menahan deviasi pada 0,03 °C sehingga suhu tidak pernah keluar dari pita toleransi. Pola serupa terjadi pada kenaikan suhu ambien 28 ke 38 °C, dengan deviasi puncak 0,41 °C pada Ziegler-Nichols berbanding 0,04 °C pada kontroler hasil optimasi. ITAE pascagangguan turun dari 9.795,7 menjadi sekitar 180 pada skenario beban, dan dari 3.917,7 menjadi sekitar 330 pada skenario ambien.

3.3 Perilaku Pencarian dan Konsistensi

Karena kualitas solusi ketiga algoritma setara, pembeda yang bermakna harus dicari pada perilaku pencariannya. Kurva konvergensi rata-rata dari 20 run independen ditampilkan pada Gambar 4, sedangkan statistiknya dirangkum pada Tabel 5.



Gambar 6. Kurva konvergensi rata-rata 20 run independen

Tabel 6. Statistik konvergensi 20 run independen

Statistik	PSO	ACO-R	GWO
Nilai terbaik	14.706,345	14.706,332	14.706,439
Nilai terburuk	14.707,490	14.724,132	14.708,566
Rata-rata	14.706,545	14.707,498	14.707,076
Deviasi standar	0,272	3,948	0,590
Iterasi konvergen	13,8	11,6	20,9
Waktu komputasi (s)	1,49	1,48	1,48

PSO merupakan algoritma paling konsisten dengan deviasi standar 0,272 dan tidak memiliki run yang gagal. ACO-R paling cepat memusat, yaitu pada iterasi ke-11,6, namun paling tidak konsisten dengan deviasi standar 3,948 karena satu run terjebak pada nilai 14.724,132. GWO paling lambat memusat pada iterasi ke-20,9 dengan konsistensi menengah, yaitu deviasi standar 0,590. Waktu komputasi ketiganya praktis sama, sekitar 1,5 s per run, sehingga beban komputasi bukan faktor pembeda.

3.4 Uji Kekokohan

Hasil uji kekokohan terhadap variasi parameter plant plus-minus 20 % disajikan pada Tabel 6. Ziegler-Nichols mengalami degradasi relatif yang lebih kecil, yaitu 50,6 % berbanding 56,6 sampai 57,3 %. Namun perbandingan relatif ini menyesatkan bila berdiri sendiri, sebab dalam nilai absolut kontroler hasil optimasi tetap 41 sampai 53 % lebih baik pada setiap kondisi. Bahkan kondisi terburuk kontroler hasil optimasi, yaitu ITAE 22.691 sampai 22.793, masih lebih baik daripada kondisi nominal Ziegler-Nichols sebesar 29.237.

Tabel 7. Nilai ITAE pada uji kekokohan

Kondisi	ZN	PSO	ACO	GWO
Nominal	29.237	14.490	14.490	14.487
m-cp +20 %	44.028	20.910	20.910	20.870
m-cp -20 %	16.247	9.577	9.576	9.561
Penguatan +20 %	22.927	10.793	10.793	10.811
Penguatan -20 %	38.998	22.793	22.793	22.692
Degradasi maks (%)	50,6	57,3	57,3	56,6

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa perdebatan mengenai algoritma mana yang terbaik menjadi kurang relevan untuk masalah penalaan PID berdimensi tiga seperti ini. Ruang pencarian yang relatif kecil membuat ketiga algoritma sama-sama mampu menemukan kawasan optimum yang sama. Keputusan untuk beralih dari penalaan analitik ke penalaan berbasis optimasi memberikan dampak yang jauh lebih besar daripada pemilihan algoritmanya.

IV. KESIMPULAN

Ketiga algoritma kecerdasan buatan yang diuji memusat pada solusi yang secara praktis identik, dengan selisih nilai fungsi objektif hanya 0,0007 %, sehingga tidak ada algoritma yang unggul secara teknis dalam kualitas solusi. Dibandingkan penalaan Ziegler-Nichols, kontroler hasil optimasi menurunkan ITAE sebesar 50,4 %, waktu tunak 67,0 %, overshoot dari 15,82 % menjadi 0,02 %, sekaligus menghemat energi TEC sebesar 8,9 %. Pada pengujian gangguan, kontroler hasil optimasi menahan deviasi suhu pada 0,03 sampai 0,04 °C tanpa keluar dari pita toleransi.

Pembeda yang bermakna terletak pada perilaku pencarian. PSO direkomendasikan untuk penerapan praktis karena paling konsisten dengan deviasi standar 0,272, ACO-R sesuai bila kecepatan konvergensi diutamakan namun memerlukan beberapa kali pengulangan, sedangkan GWO menawarkan konsistensi menengah. Penelitian lanjutan diarahkan pada validasi eksperimental menggunakan prototipe hardware-in-the-loop serta pengembangan kontroler Fractional Order PID.

V. DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Ma et al., "Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review," *Progress in Natural Science: Materials International*, vol. 28, no. 6, pp. 653–666, 2018.
- [2] Q. Wang, B. Jiang, B. Li, and Y. Yan, "A critical review of thermal management models and solutions of lithium-ion batteries for the development of pure electric vehicles," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 64, pp. 106–128, 2016.
- [3] M. M. Hamed, A. El-Tayeb, I. Moukhtar, A. Z. El Dein, and E. H. Abdelhameed, "A review on recent key technologies of lithium-ion battery thermal management: External cooling systems," *Results in Engineering*, vol. 16, art. 100703, 2022.
- [4] A. R. M. Siddique, S. Mahmud, and B. Van Heyst, "A comprehensive review on a passive (phase change materials) and an active (thermoelectric cooler) battery thermal management system and their limitations," *Journal of Power Sources*, vol. 401, pp. 224–237, 2018.
- [5] D. M. Rowe, *Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2018.

-
- [6] M. K. Mahek, M. Ramadan, S. S. bin Dol, M. Ghazal, and M. Alkhedher, "A comprehensive review of thermoelectric cooling technologies for enhanced thermal management in lithium-ion battery systems," *Heliyon*, vol. 10, no. 24, art. e40649, 2024.
- [7] D. Luo et al., "Effective temperature control of a thermoelectric-based battery thermal management system under extreme temperature conditions," *Journal of Energy Storage*, vol. 103, art. 114344, 2024.
- [8] A. Metallo, "Numerical investigation of thermoelectric cooling for Li-ion battery modules: A high-efficiency, low-power approach," *Applied Thermal Engineering*, 2025, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2025.128979.
- [9] J. G. Ziegler and N. B. Nichols, "Optimum settings for automatic controllers," *Transactions of the ASME*, vol. 64, pp. 759–768, 1942.
- [10] K. J. Åström and T. Hägglund, *Advanced PID Control*. Research Triangle Park, NC, USA: ISA, 2006.
- [11] S. Skogestad, "Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning," *Journal of Process Control*, vol. 13, no. 4, pp. 291–309, 2003.
- [12] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *Proc. IEEE International Conference on Neural Networks (ICNN'95)*, Perth, Australia, 1995, vol. 4, pp. 1942–1948.
- [13] X. Zhang and Y. Yang, "Optimization of PID controller parameters using a hybrid PSO algorithm," *International Journal of Dynamics and Control*, vol. 12, no. 10, pp. 3617–3627, 2024.
- [14] X. Sun et al., "Nonlinear PID controller parameters optimization using improved particle swarm optimization algorithm for the CNC system," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 20, art. 10269, 2022.
- [15] M. Dorigo and T. Stützle, *Ant Colony Optimization*. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2004.
- [16] K. Socha and M. Dorigo, "Ant colony optimization for continuous domains," *European Journal of Operational Research*, vol. 185, no. 3, pp. 1155–1173, 2008.
- [17] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and A. Lewis, "Grey wolf optimizer," *Advances in Engineering Software*, vol. 69, pp. 46–61, 2014.
- [18] K. Jagatheesan, D. Boopathi, S. Samanta, B. Anand, and N. Dey, "Grey wolf optimization algorithm-based PID controller for frequency stabilization of interconnected power generating system," *Soft Computing*, vol. 28, no. 6, 2024.
- [19] D. K. Lal, A. K. Barisal, and M. Tripathy, "Grey wolf optimizer algorithm based fuzzy PID controller for AGC of multi-area power system with TCPS," *Procedia Computer Science*, vol. 92, pp. 99–105, 2016.
- [20] D. Bernardi, E. Pawlikowski, and J. Newman, "A general energy balance for battery systems," *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 132, no. 1, pp. 5–12, 1985.
- [21] A. A. Pesaran, "Battery thermal models for hybrid vehicle simulations," *Journal of Power Sources*, vol. 110, no. 2, pp. 377–382, 2002.