

Perancangan Sistem Kontrol *Pitch Angle* Turbin Angin Skala Kecil Berbasis *Imperialist Competitive Algorithm (ICA)*

Akhmad Bakhrul Fauzi dan Dr. Ir. Ali Musyafa', M.Sc

Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: musyafa@ep.its.ac.id

Abstrak— Sistem Konversi Energi Angin (SKEA) adalah salah satu energi alternatif yang dikembangkan dari pemanfaatan energi angin. Turbin angin skala kecil adalah SKEA atau turbin angin yang kapasitasnya kurang dari 10 kW. Indonesia memiliki kecepatan angin yang berubah-ubah dan relatif rendah. Untuk mengatasi permasalahan tersebut diperlukan sistem kontrol sudut *pitch* turbin angin. Pada penelitian ini dirancang sebuah sistem kontrol sudut *pitch* turbin angin berbasis *Imperialist Competitive Algorithm (ICA)*. Sistem kontrol diharapkan pada kecepatan angin yang bervariasi, dapat memberikan kecepatan sudut rotor tetap stabil dan bekerja pada daerah optimal. ICA adalah sebuah evolusiner algoritma baru untuk mengoptimasi sebuah sistem yang diilhami dari kompetisi kekuasaan (*Imperialist Competition*). Optimasi berbasis ICA untuk sistem kontrol yang dirancang menggunakan ITAE (*Integral Time Absolute Error*) sebagai fungsi objektif dalam penentuan parameter kontrol PID. Hasil penelitian menunjukkan kontrol PID berbasis ICA memberikan respon yang baik untuk semua uji *setpoint*, dan pada uji *setpoint* 10 pps memberikan hasil respon yang terbaik jika dibandingkan dengan *setpoint* yang lebih tinggi. Dengan Kp, Ki, dan Kd berurutan 1.49, 3.13 dan 0.03 memberikan lonjakan maksimal (*maximum overshoot*) 11.30 % dengan waktu turun (*settling time*) selama 1.85 detik dan secara kuantitatif nilai ITAE selama 10 detik yaitu 0.42.

Kata Kunci— *Imperialist Competitive Algorithm (ICA)*, SKEA.

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi pembangkit listrik tenaga angin di Indonesia semakin pesat seiring akan adanya krisis energi dan upaya untuk melakukan usaha pengembangan energi alternatif. Pengembangan energi alternatif itu merupakan pengembangan energi listrik konvensional kearah energi listrik yang berbasis pada energi baru terbarukan (EBT). Pemanfaatan energi angin di Indonesia selain sebagai energi baru terbarukan juga mempunyai peranan penting dalam pemenuhan jaringan listrik bagi daerah-daerah atau pedesaan yang belum terjangkau, terutama penggunaan pembangkit listrik tenaga angin berskala kecil yang ekonomis dan terjangkau untuk diaplikasikan. Pembangkit energi angin yang ekonomis artinya memiliki efisiensi yang tinggi dan biaya yang lebih rendah dibandingkan pembangkit alternatif lain saat ini.

Sistem Konversi Energi Angin (SKEA) terdiri dari turbin angin, generator, daya elektronik, sistem jaringan dan sistem kontrol. Turbin angin skala kecil adalah turbin angin yang kapasitasnya kurang dari 10 kW. Turbin ini cocok untuk Indonesia yang mempunyai kecepatan angin yang rendah dan

berubah-ubah. Energi listrik yang dihasilkan oleh turbin angin bergantung pada daya mekanik yang bersumber dari masukan energi kinetik angin. Terdapat beberapa variabel yang mempengaruhi besaran daya mekanik turbin diantaranya adalah koefisien daya (C_p). Nilai dari koefisien daya dipengaruhi oleh kecepatan angin, sudut *pitch*, dan kecepatan rotor dari turbin.

Agar mendapatkan daya yang optimal maka diperlukan sistem kontrol pada turbin angin. sistem kontrol yang dirancang yaitu sistem kontrol sudut *pitch* turbin angin. Sistem kontrol sudut *pitch* turbin adalah pengendalian sudut dari bilah turbin terhadap arah tiupan angin agar menghasilkan kecepatan sudut rotor yang tetap stabil dan berada pada kerja optimal.

Dalam Tugas Akhir ini dirancang sebuah sistem kontrol *pitch angle* berbasis *Imperialist Competitive Algorithm (ICA)*. Metode ICA adalah sebuah metode evolusi optimasi terbaru yang diilhami dari algoritma kompetisi imperialis[2]. Optimasi (ICA) mampu memberikan nilai parameter kontrol yang optimal dengan pencarian nilai parameter kontrol PID berupa nilai Kp, Ki, dan Kd optimal berbasis kompetisi imperialis.

II. METODOLOGI PENELITIAN

A. Spesifikasi Turbin Angin Skala Kecil

Berikut Turbin angin skala kecil yang digunakan dalam penelitian merupakan prototipe turbin angin sumbu horizontal dengan tipe bilah *non uniform* Airfoil NREL S83n dengan tiga buah bilah (*blade*). Turbin angin tersebut telah dirancang oleh peneliti sebelumnya. Berdasarkan hasil penelitian tersebut diperoleh posisi sudut *pitch* optimal yang menghasilkan kecepatan rotor yang optimal pada variasi kecepatan angin 2.8 m/s - 7.5 m/s [6].

Tabel 1. Sudut *pitch* optimal

Kecepatan angin (m/s)	Sudut <i>pitch</i> Optimal	RPM Maksimum
2.80	10.35	39.58
3.80	10.37	54.28
4.10	13.10	64.38
4.80	10.15	68.96
6.50	13.16	112.83
7.00	16.19	99.02
7.50	10.87	168.09

Berdasarkan tabel 3.1, Kecepatan rotor turbin yang maksimal pada kecepatan angin tertentu diperoleh dengan posisi sudut *pitch* tertentu. Posisi atau perubahan sudut *pitch* blade terhadap arah tiupan angin (*angle of attack*) mempengaruhi kecepatan sudut dari *shaft* turbin karena jumlah daya tiup angin yang diterima oleh bilah dan mempengaruhi proses konversi energi angin [1].

Data tersebut diatas digunakan untuk memperoleh fungsi alih plant turbin angin.

B. Pemodelan Turbin Angin

Berikut Pemodelan sistem turbin angin pada penelitian ini hanya ditinjau dari bagian mekanik turbin angin. Berdasarkan beberapa refrensi yang diperoleh [4],[5]. Model matematika turbin angin diperoleh dari hubungan torsi aerodinamika turbin (T_A), kecepatan putar rotor (ω), dan momen inersia (J_T) bilah turbin angin dalam menghasilkan daya mekanik turbin angin

$$P_T = \omega \cdot T_A \quad (1)$$

$$T_A = \frac{1}{2} \rho ARC_T(\beta, \lambda) v^2 \quad (2)$$

$$C_p(\beta, \lambda) = \lambda \cdot C_T(\beta, \lambda) \quad (3)$$

Koefisien daya atau C_p , yang digunakan pada penelitian ini berupa persamaan numerik berikut ini,

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.44 - 0.0167\beta) \sin \frac{\pi(\lambda-3)}{15-0.3\beta} - 0.00184(\lambda - 3) \quad (4)$$

Sistem kontrol yang akan dirancang adalah sistem kontrol turbin yang menggunakan PID kontroller. PID Kontroller adalah kontrol linear, sehingga dalam perancangannya turbin angin yang dinamis akan dilakukan proses linearisasi pada titik operasi tertentu yang ditunjukkan oleh persamaan berikut.

$$J_t \Delta \dot{\omega} = \frac{\partial \dot{\omega}}{\partial v} \Delta v + \frac{\partial \dot{\omega}}{\partial \omega} \Delta \omega + \frac{\partial \dot{\omega}}{\partial \beta} \Delta \beta \quad (5)$$

$$J_t \Delta \dot{\omega} = \alpha \Delta v + \gamma \Delta \omega + \delta \Delta \beta \quad (6)$$

Persamaan (5) dan (6) akan di *laplace* kan sehingga menjadi persamaan berikut.

$$J_t s \Delta \omega(s) = \alpha \Delta v(s) + \gamma \Delta \omega(s) + \delta \Delta \beta(s) \quad (7)$$

$$J_t \left(s - \frac{\gamma}{J_t} \right) \Delta \omega(s) = \alpha \Delta v(s) + \delta \Delta \beta(s) \quad (8)$$

$$\Delta \omega(s) = \left[\frac{\alpha}{J_t} \Delta v(s) + \frac{\delta}{J_t} \Delta \beta(s) \right] \frac{1}{s - \frac{\gamma}{J_t}} \quad (9)$$

$\Delta \omega(s)$ adalah keluaran dari sistem kontrol, yang berupa kecepatan putar rotor (*shaft*) sedangkan $\alpha \Delta v(s)$ dan $\delta \Delta \beta(s)$ merupakan masukan linear turbin yang berupa kecepatan angin dan sudut *pitch*.

Desain kontrol yang dirancang merupakan kontrol dengan mengekspresikan gangguan sudut *pitch* ($\Delta \beta$). Desain kontrol tersebut ditunjukkan oleh persamaan berikut ini

dengan persamaan PID kontrol standar dalam *laplace* atau domain s

$$\Delta \beta(s) = K_p \Delta \omega(s) + K_i \frac{1}{s} \Delta \omega(s) + K_D s \Delta \omega(s) \quad (10)$$

Dengan mengintegrasikan persamaan (9) dengan persamaan (10) dan menggunakan beberapa nilai parameter turbin angin berikut.

Tabel 2. Parameter turbin angin

Parameter	Nilai
Kecepatan angin	4.8 m/s
Beta (<i>pitch</i> angle)	10.15 deg
Kecepatan rotor	68.96 rpm
Panjang Blade	1.0 m
Momen Inersia rotor	1.297 kgm ²
Densitas Udara	1.25 kg/m ³

Maka diperoleh fungsi transfer turbin angin sebagaimana persamaan berikut ini,

$$F_t(s) = \frac{\Delta \omega(s)}{\Delta v(s)} = \frac{1.2103s}{s^2 + 0.1816s} \quad (11)$$

Pada *plant* turbin angin skala kecil yang dirancang dalam perancangan sistem kontrol ini terdapat *opto interrupter* tipe ITR8105 [7]. *Opto interrupter* ini bagian *plant* turbin angin yang berfungsi untuk merekam kecepatan rotor turbin pada poros turbin angin. Keluaran dari *opto interrupter* berupa tegangan sebesar 0-5 volt untuk masukan ke sistem digital. Desain *opto interrupter* yang akan digunakan mempunyai waktu konstan (τ) sebesar 10 ms. Dengan memasukkan nilai-nilai parameternya diatas, maka diperoleh fungsi alih *opto interrupter* sebagai berikut,

$$F_{opto} = \frac{Output}{Input} = \frac{5}{0.01s + 1} \quad (12)$$

Dengan mengintegrasikan persamaan (11) dengan persamaan (12), maka fungsi alih *plant* turbin angin secara keseluruhan untuk desain sistem kontrol yang dirancang menjadi persamaan berikut,

$$F_T(s) = \frac{\Delta \omega(s)}{\Delta v(s)} = \frac{6.051s}{0.01s^3 + 1.002s^2 + 0.1816s} \quad (13)$$

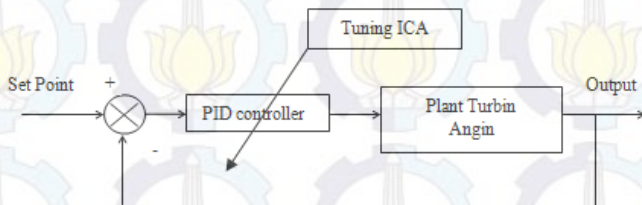
C. Sistem Kontrol Pitch Angle Turbin Angin Skala Kecil Berbasis Imperialist Competitive Algorithm (ICA)

Imperialist Competitive Algorithm (ICA) adalah sebuah evolusi algoritma baru untuk mengoptimasi sebuah sistem yang dasar strateginya bersumber pada kompetisi imperialis. Algoritma optimasi ini diperkenalkan oleh Gargari Atashpaz dan E. Lucas pada tahun 2007. Secara *pseudo code*, algoritma Imperialist Competitive dapat dijelaskan dengan langkah-langkah berikut ini [3],[2].

- Pilihlah beberapa titik (nilai) secara random pada fungsi dan inialisasi *empire* (kerajaan)
- Gerakkan koloni menuju imperialisnya yang relevan (assimilasi)

- Jika terdapat koloni pada sebuah *empire* atau kerajaan yang memiliki harga lebih rendah dari imperialisnya. Tukarkan posisi koloni dan imperialis
- Menghitung *total cost* dari semua *empire* (berhubungan dengan kekuatan dari imperialis dan koloninya.
- Pilih koloni yang paling lemah dari sebuah *empire* yang paling lemah dan berikan mereka pada *empire* yang paling memungkinkan untuk memilikinya (kompetisi imperialis)
- Eliminasi *empire* (kerajaan) yang paling lemah
- Jika hanya terdapat satu *empire* (kerajaan), stop algoritma, jika tidak kembali ke langkah 2.

Perancangan sistem kontrol *pitch angle* berbasis algoritma kompetisi imperialis (ICA) dapat dijelaskan dengan diagram blok berikut ini,



Gambar 1. Diagram blok sistem kontrol berbasis ICA

Berdasarkan gambar 1 diatas, sistem kontrol berbasis algoritma kompetisi imperialist (ICA) berupa sistem kontrol yang menggunakan kontrol PID. Nilai parameter kontrol K_p , K_i , dan K_d dioptimasi dengan algoritma ICA, sehingga memberikan solusi nilai parameter kontrol yang optimal untuk sistem kontrol yang dirancang. ICA akan menala nilai K_p , K_i , K_d dengan memberikan terlebih dahulu batasan nilai K_p , K_i , K_d yang ingin diperoleh. Prosesnya optimasi didasarkan pada fungsi objektif berupa nilai minimal dari ITAE (*Integral Time Absolute Error*). *Error* adalah selisih antara *output* dengan *input* dari sistem kontrol.

Proses optimasi dilakukan dengan menentukan parameter algoritma yang akan digunakan terlebih dahulu, berikut parameter algoritma Optimasi ICA pada perancangan sistem kontrol,

Tabel 3. Parameter Algoritma ICA

Parameter	Nilai
Jumlah Negara	50.00
Jumlah imperialis awal	5.00
Jumlah koloni	45.00
Dekade	50.00
Kecepatan Revolusi	0.30
Asimilasi (β)	2.00
Sudut Asimilasi (γ)	0.50
Zetta (ξ)	0.02
K_p	$0.50 \leq K_p \leq 1.50$
K_i	$1.00 \leq K_i \leq 5.00$
K_d	$0.01 \leq K_d \leq 0.10$

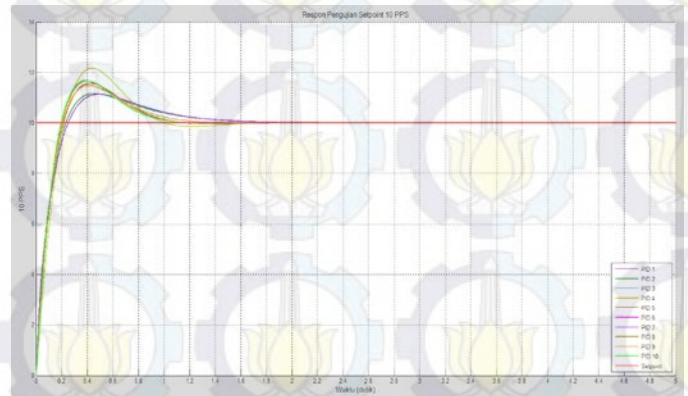
Proses Optimasi bekerja berdasarkan algoritma ICA dengan alur kerja sebagaimana ditunjukkan oleh *pseudo code* langkah-langkah algoritma ICA diatas.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk mengetahui performansi sistem kontrol yang dirancang maka dilakukan dengan sebuah pengujian dengan dengan input sebuah *setpoint*. *Setpoint* yang diujikan merupakan variasi kecepatan putar rotor turbin yang berupa nilai pps (*pulse per second*). *Setpoint* berupa sinyal step dengan tiga nilai *setpoint* yaitu 10 pps, 20 pps, dan 40 pps, masing-masing ketiganya mewakili untuk kecepatan angin rendah, sedang, dan tinggi. Setiap *setpoint* dilakukan pengambilan data sebanyak 10 kali pengambilan data menggunakan optimasi ICA. Kemudian dianalisa berdasarkan data kuantitatif berdasarkan nilai minimum ITAE, dan data kualitatif yang berdasarkan maksimum *overshoot*, dan *settling time* dari respon yang diberikan.

D. Respon Hasil Uji Setpoint Sebesar 10 PPS

Berikut respon hasil uji *setpoint* 10 pps menggunakan optimasi ICA,

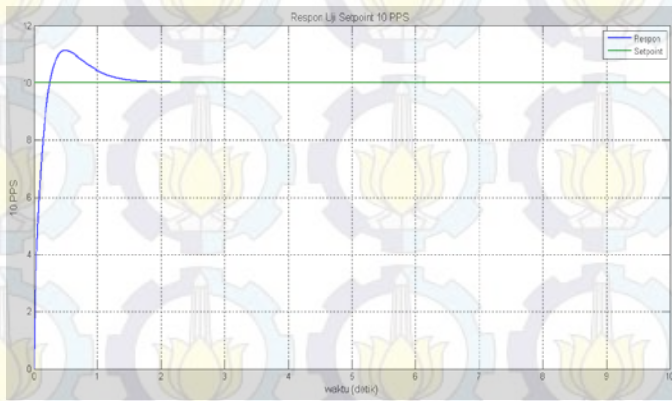


Gambar 2. 10 Respon hasil pengujian *setpoint* 10 pps

Tabel 4. Respon hasil uji *setpoint* 10 pps

Data-Ke	Parameter PID Kontrol			Settling time, t_s (detik)	Maximum overshoot, M_p (%)	ITAE
	K_p	K_i	K_d			
1	1.50	4.96	0.01	1.13	16.70	0.42
2	1.50	3.08	0.01	1.94	11.60	0.42
3	1.50	5.00	0.01	1.12	16.80	0.42
4	1.15	4.59	0.01	1.67	21.70	0.44
5	1.50	5.00	0.03	1.64	15.70	0.42
6	1.50	4.97	0.01	1.13	16.70	0.42
7	1.49	3.13	0.03	1.85	11.30	0.42
8	1.49	5.00	0.02	1.11	16.60	0.42
9	1.50	4.20	0.01	1.37	14.70	0.42
10	1.50	5.00	0.01	1.12	16.80	0.42

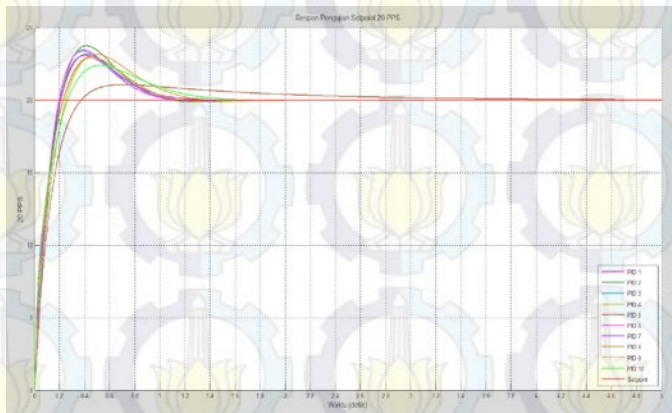
Berdasarkan hasil pengambilan data sebanyak 10 kali pada *setpoint* 10 pps, optimasi ICA memberikan nilai ITAE minimal sebesar 0.42. Memberikan respon terbaik pada parameter PID dengan nilai $K_p=1.49$, $K_i=3.13$ dan $K_d=0.03$. Respon memberikan *maximum overshoot* sebesar 11.30 % dan *settling time* nya 1.85 detik. Berikut respon sistem yang dihasilkan oleh parameter PID optimal pada uji set point 10 pps.



Gambar 3. Respon optimal hasil uji setpoint 10 pps

E. Respon Hasil Uji Setpoint Sebesar 20 PPS

Berikut respon hasil uji setpoint 20 pps menggunakan optimasi ICA,

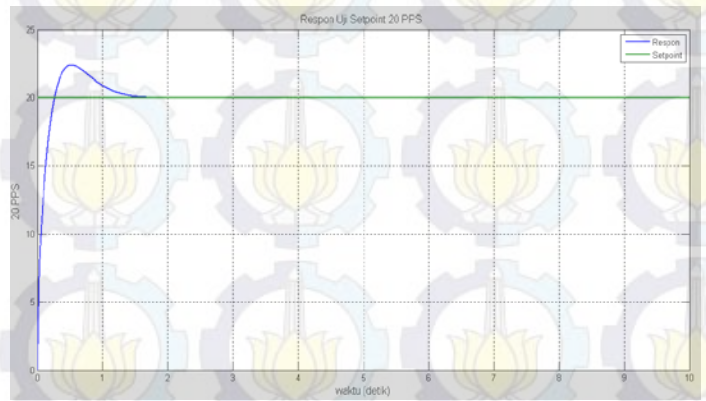


Gambar 4. 10 Respon hasil pengujian setpoint 20 pps

Tabel 5. Respon hasil uji set point 20 pps

Data-Ke	Parameter PID Kontrol			Settling time, t_s (detik)	Maximum overshoot, Mp (%)	ITAE
	Kp	Ki	Kd			
1	1.50	4.44	0.01	1.34	15.40	0.85
2	1.32	4.66	0.01	1.72	18.65	0.85
3	1.50	5.00	0.01	1.17	16.80	0.85
4	1.49	5.00	0.06	1.87	14.60	0.85
5	1.27	1.00	0.01	5.18	5.35	0.85
6	1.47	5.00	0.01	1.12	17.25	0.85
7	1.50	5.00	0.03	1.72	15.80	0.85
8	1.50	5.00	0.05	1.85	14.80	0.85
9	1.25	3.52	0.02	1.38	15.75	0.85
10	1.44	3.43	0.05	1.67	12.05	0.85

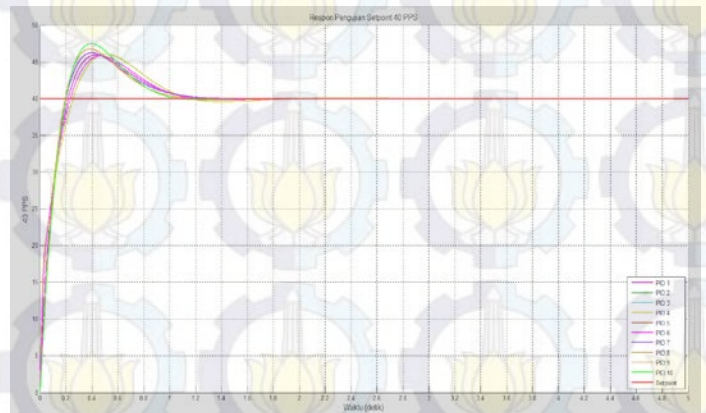
Berdasarkan hasil pengambilan data sebanyak 10 kali pada setpoint 20 pps, optimasi ICA memberikan nilai ITAE minimal sebesar 0.85. Memberikan respon terbaik pada parameter PID dengan nilai $K_p=1.44$, $K_i= 3.43$ dan $K_d= 0.05$. Respon memberikan maximum overshoot sebesar 12.05 % dan settling time nya 1.67 detik. Berikut Berikut respon sistem yang dihasilkan oleh parameter PID optimal pada uji set point 20 pps.



Gambar 5. Respon optimal hasil uji setpoint 20 pps

F. Respon Hasil Uji Setpoint Sebesar 40 PPS

Berikut respon hasil uji setpoint 40 pps menggunakan optimasi ICA,

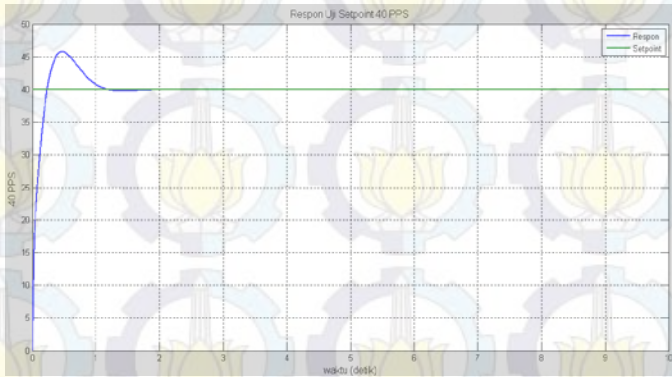


Gambar 6. 10 Respon hasil pengujian setpoint 40 pps

Tabel 6. Respon hasil uji set point 40 pps

Data-Ke	Parameter PID Kontrol			Settling time, t_s (detik)	Maximum overshoot, Mp (%)	ITAE
	Kp	Ki	Kd			
1	1.50	4.55	0.03	1.92	14.80	1.97
2	1.50	5.00	0.01	1.73	16.80	1.97
3	1.50	5.00	0.01	1.73	16.80	1.97
4	1.38	5.00	0.09	1.99	15.10	1.97
5	1.50	5.00	0.01	1.73	16.80	1.97
6	1.50	5.00	0.06	1.98	14.38	1.97
7	1.50	4.49	0.01	1.36	15.55	1.97
8	1.50	5.00	0.01	1.73	16.80	1.97
9	1.50	5.00	0.01	1.73	16.80	1.97
10	1.38	5.00	0.01	1.75	18.63	1.97

Berdasarkan hasil pengambilan data sebanyak 10 kali pada setpoint 40 pps, optimasi ICA memberikan nilai ITAE minimal sebesar 1.97. Memberikan respon terbaik pada parameter PID dengan nilai $K_p=1.5$, $K_i= 5.00$ dan $K_d= 0.06$. Respon memberikan maximum overshoot sebesar 14.38 % dan settling time nya 1.98 detik. Berikut Berikut respon sistem yang dihasilkan oleh parameter PID optimal pada uji set point 40 pps.

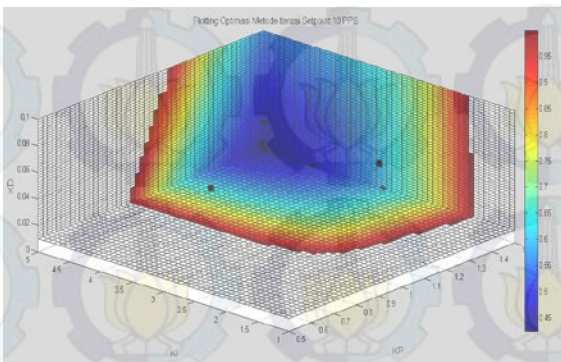


Gambar 7. Respon optimal hasil uji setpoint 40 pps

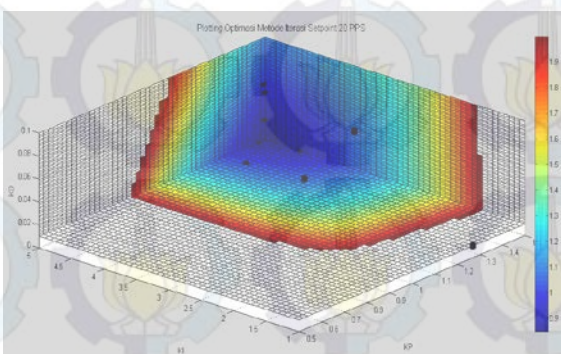
Berdasarkan hasil respon masing-masing setpoint uji yang diberikan selama waktu 10 detik untuk tiap simulasi, sistem kontrol yang telah dirancang memberikan respon sistem yang baik pada semua uji setpoint, dan memberikan hasil yang terbaik pada uji setpoint 10 pps, jika dibandingkan dengan set point yang lain. Sistem kontrol memberikan respon yang memiliki maximum overshoot lebih besar pada uji setpoint yang lebih tinggi hal ini dikarenakan pada waktu yang sama, error yang dihasilkan cukup besar sehingga nilai ITAE yang dihasilkan pada setpoint 20 pps dan 40 pps lebih besar jika dibandingkan dengan setpoint yang lebih kecil.

G. Optimasi Metode Iterasi dan Metode ICA

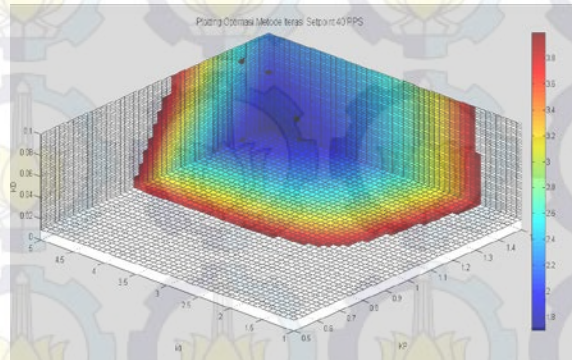
Dengan menggunakan banyaknya data parameter kontrol PID, batasan parameter kontrol Kp, Ki, dan Kd yang sama dengan optimasi ICA. Setelah dilakukan simulasi dengan iterasi sebanyak 50, diperoleh visualisasi hasil optimasi iterasi dalam pencarian nilai ITAE yang paling kecil untuk setiap uji set point.



Gambar 8. Plotting slice pada uji set point 10 PPS



Gambar 9. Plotting slice pada uji set point 20 PPS



Gambar 10. Plotting slice pada uji set point 40 PPS

Berdasarkan gambar 8 hingga 10, terlihat bahwa nilai ITAE minimum tersebar didaerah yang berwarna biru. Sedangkan solusi hasil optimasi menggunakan ICA juga berada di daerah tersebut yang ditunjukkan oleh tanda titik hitam yang ada pada gambar. Meskipun ICA tidak mampu memberikan nilai data yang tepat pada titik tertentu, namun ICA mampu mendekatinya dengan memberikan hasil di daerah tersebut berdasarkan fungsi objektif ITAE.

IV. KESIMPULAN/RINGKASAN

Setelah dilakukan penelitian tentang perancangan sistem kontrol pitch angle turbin angin berbasis Imperialist competitive Algorithm (ICA), diperoleh beberapa kesimpulan diantaranya:

1. Berdasarkan hasil pengujian pada berbagai variasi setpoint, sistem kontrol yang dirancang menggunakan PID yang dioptimasi menggunakan ICA mampu memberikan nilai parameter PID kontrol, berdasarkan nilai minimal fungsi objektif ITAE (Integral Time Absolute Error).
2. Ditinjau dari analisa kuantitatif berupa nilai minimal ITAE sistem dan analisa kualitatif yang didasarkan pada lonjakan maksimal dan settling time yang diberikan. Sistem kontrol PID berbasis ICA yang dirancang bekerja dengan baik pada semua uji set point, dan pada uji setpoint 10 pps, sistem kontrol yang dirancang memberikan hasil terbaik dengan nilai ITAE yang lebih kecil yaitu 0.42, dan menghasilkan respon yang memiliki lonjakan maksimal yang lebih kecil, yaitu 11.30% dan settling time 1.85 detik.
3. Berdasarkan visualisasi hasil optimasi metode iterasi, optimasi ICA sebagai metode optimasi, mampu memberikan solusi yang mendekati nilai optimalnya yang didasarkan pada nilai minimal fungsi objektifnya (ITAE).

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Pendidikan Tinggi, Departemen Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia yang telah memberikan dukungan finansial melalui Beasiswa Bidik Misi tahun 2010-2014.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Zhang, J, Cheng, M, Chen, Z, Fu X, "Pitch Angle Control for Variable Speed Wind Turbines". Nanjing, China, 2008.
- [2] Gargari, Atashpaz, E, Lucas, C, "Imperialist Competitive Algorithm: An Algorithm for Optimization Inspired by Imperialistic Competition". IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2007), 4661-4667, 2007.
- [3] Gargari, Atashpaz, E, Lucas, C. "Designing an Optimal PID controller using Colonial Competitive Algorithm".
- [4] Abbas, F.A.R, Abdulsada, M. A.. "Simulation of Wind Turbine Speed Control by MATLAB". International Journal of Computer and Electrical Engineering, Vol 2.No.5, 1793-8163, October,2010.
- [5] Malinga, B, Sneckenberger, Jhon, E, Feliachi, Ali, 2003. "Modeling and Control of Wind Turbine as a Distributed Resource". IEEE, Proceedings of the 35th Southeastern Symposium on System Theory, 108 - 112. 2003.
- [6] Farid Ridha Muttaqin, Ali Musyafa, "Traceability of pitch angle position for small scale wind turbine to get a maximum energy extraction". Workshop and annual meeting University of Dar es Salaam Preliminary Program, 2011.
- [7] Sunarto, "Rancang Bangun Sistem Pengendalian Sudut *Pitch* Turbin Angin Horizontal Axis Berbasis *Particle Swarm Optimization*" Jurusan Teknik Fisika FTI ITS Surabaya, 2012.