

# Bat Algorithm Sebagai Optimasi PID Controller Pada Turbin Angin

<sup>1</sup> Muhammad Ade Yusuf Alghifrani, <sup>2</sup> Hidayatul Nurohmah, <sup>3</sup> Dwi Ajiatmo, <sup>4</sup> Machrus Ali  
<sup>1,2,3</sup> Teknik Elektro, Universitas Darul Ulum, Jombang

<sup>1</sup>yusufagif@gmail.com, <sup>2</sup>hidayatul.nurohmah.mt@gmail.com, <sup>3</sup>ajiatmo@gmail.com, machrus7@gmail.com

**Abstract** – Wind turbines are more widely used to accommodate the electricity needs of the community, using the principle of energy conversion and using renewable natural resources, namely wind. Although until now the construction of wind turbines still cannot compete with conventional power plants. Wind turbines were developed by scientists because in the near future humans will be faced with the problem of the lack of renewable natural resources as a base for generating electricity. Intelligent control based on Artificial Intelligent (AI) has evolved to improve conventional controls to control so that the output voltage is always rated constant at changing loads. In this research assignment, we will discuss the speed control of the turbine to keep it constant with PID and tuning Bat Algorithm (BA). Based on the equation of the echolocation concept of bats in the previous discussion, the following will be given a pseudo-code of the bat algorithm developed by Yang. The BA tuning results obtained by changing the output voltage found to have a steady-state error, better settling time and overshoot. The research will be developed by trying other artificial intelligence methods.

**Kata Kunci** – Artificial Intelligent, Bat Algorithm, PID Controller, Synchronous generator, Win Turbine

**Abstract** - Turbin angin lebih banyak digunakan untuk mengakomodasi kebutuhan listrik masyarakat, dengan menggunakan prinsip konversi energi dan menggunakan sumber daya alam yang dapat diperbaharui yaitu angin. Walaupun sampai saat ini pembangunan turbin angin masih belum dapat menyaingi pembangkit listrik konvensional. Turbin angin dikembangkan oleh para ilmuwan karena dalam waktu dekat manusia akan dihadapkan dengan masalah kekurangan sumber daya alam tak terbaharui sebagai bahan dasar untuk membangkitkan listrik. Kontrol cerdas berbasis Artificial Intelligent (AI) banyak berkembang untuk memperbaiki kontrol konvensional untuk mengontrol agar tegangan keluaran selalu berada dinilai konstan pada beban yang berubah-ubah. Pada tugas penelitian ini akan dibahas mengenai kontrol kecepatan turbin agar tetap berada dinilai konstan dengan PID dan dengan tuning Bat Algorithm (BA). Berdasarkan persamaan konsep ekolokasi dari kelelawar pada pembahasan sebelumnya maka berikut ini akan di berikan suatu pseudocode dari algoritma kelelawar yang dikembangkan oleh Yang. Hasil tuning BA diperoleh perubahan tegangan keluaran didapatkan memiliki steady state error, settling time dan overshoot yang lebih baik. Penelitian akan dikembangkan dengan mencoba metode kecerdasan buatan lainnya

**Keywords** – Artificial Intelligent, Bat Algorithm, PID Controller, Synchronous generator, Win Turbine

## I. PENDAHULUAN

Pada kecepatan angin yang sangat rendah di bawah nilai rating, kontroler mengatur kecepatan rotor untuk mempertahankan kecepatannya. Sehingga akan memberikan koefisien daya maksimum dan kemudian efisiensi turbin akan meningkat. Pengaturan Pitch angle sangat diperlukan untuk menilai kecepatan angin pada saat kecepatan rotasi dipertahankan konstan. Perubahan kecil dalam pitch angle dapat mempengaruhi output daya. Tujuan dari kontrol dapat diringkas dalam tiga tujuan sebagai berikut: Mengoptimalkan output daya ketika kecepatan angin kurang dari kecepatan angin. Menjaga daya rotor di batas desain saat kecepatan angin di atas kecepatan angin. Minimalkan beban mekanik turbin. Desain controller harus memperhitungkan efek pada beban, dan memastikan bahwa beban ekstrim tidak akan bisa dikontrol. Dengan adanya penambahan beban listrik oleh konsumen, maka pasokan listrik ke konsumen juga harus ditambah. Apabila pasokan listrik bertambah maka daya output yang dikeluarkan oleh generator juga harus bertambah. Apabila daya keluaran generator bertambah, kebutuhan akan bahan bakar akan meningkat dan akan berakibat biaya pengeluaran akan mahal.

Generator sinkron yang mempunyai magnet permanen atau biasa disebut dengan Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG). PMSG akan dikopel dengan turbin angin supaya dapat menghasilkan energi listrik, dengan demikian PMSG dapat mengurangi biaya pengeluaran yang mahal. PMSG mempunyai efisiensi yang kurang baik dalam menghasilkan energi listrik[1]. Hal ini disebabkan oleh kecepatan angin, pitch angle dan lainnya. Oleh karena itu, PMSG harus dikontrol agar menghasilkan energi listrik yang optimal. Pengontrolan PMSG bisa dilakukan dengan beberapa controller yaitu PID controller pada Maximum Power Point Tracking (MPPT), PID controller pada pitch angle[1]. Saat ini Artificial Intelligence (AI) sering digunakan untuk mengembangkan berbagai keilmuan[2][3]. AI sering dipakai dalam optimasi sistem kontrol diantaranya sebagai kontrol mikrohidro[4][5], sebagai kontrol kecepatan motor DC[6], control steer kendaraan[7][8], sebagai kontrol sudu turbin

angin [9]. Diantaranya juga menggunakan metode Ant Colony Optimization (ACO)[5], Firefly Algorithm (FA)[10], Bat Algorithm (BA)[11]. Sebelumnya telah diteliti dengan menggunakan Particle Swarm Optimization PSO[12][13], Imperialist Competitive Algorithm (ICA)[14] Maka pada penelitian ini digunakan kecerdasan buatan BA sebagai tuning PID Controller.

## II. MODEL TURBIN ANGIN

### A. Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)

Generator sinkron dengan magnet permanen atau biasa disebut dengan *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG), dapat dimodelkan dengan persamaan transformasi park. Persamaan didasarkan pada arus stator dan tegangan seperti persamaan 1,2.

$$v_{sd} = R_s i_d + \frac{d\lambda_d}{dt} - \omega_e \lambda_d \quad (1)$$

$$v_{sq} = R_s i_q + \frac{d\lambda_q}{dt} - \omega_e \lambda_q \quad (2)$$

Dimana :

$v_{sd}$  dan  $v_{sq}$  = tegangan stator

$i_d$  dan  $i_q$  = arus stator

$R_s$  = resistansi belitan stator

Fluks pada stator dapat dituliskan seperti persamaan 3,4.

$$\lambda_d = L_{sd} i_d + \lambda_m \quad (3)$$

$$\lambda_q = L_{sq} i_q \quad (4)$$

Dimana

$\lambda_m$  = fluks magnetik inti

$L_{sd}$  dan  $L_{sq}$  = induktansi belitan stator

Torsi elektrik dari PMSG dapat dituliskan seperti persamaan 5.

$$T_e = \frac{3}{2} p [\lambda_m i_q - (L_{sq} - L_{sd}) i_q i_d] \quad (5)$$

Dimana p adalah jumlah pasang kutub PMSG.

### B. Wind Turbine

#### 1) Aerodinamis Wind Turbine

*Aerodinamis Wind turbine* bisa merubah energi angin menjadi energi kinetik yang kemudian digunakan untuk mengoperasikan generator listrik[3]. Angin yang melewati turbin akan menghasilkan energi yang sama dengan energi yang transformasikan oleh tubin. Persamaan 6 merupakan persamaan dari energi kinetik.

$$U = \frac{1}{2} (\rho A x) V^2 \quad (6)$$

Dengan: U = energi kinetik (joule),  $\rho$ = intensitas udara ( $\text{kg/m}^3$ ), A= luas penampang ( $\text{m}^2$ ), x= ketebalan penampang (m), V = kecepatan angin (m/s), Kekuatan angin ( $P_w$ ) adalah turunan dari energi kinetik,

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (7)$$

Daya mekanik dan torsi yang di transformasikan adalah seperti persamaan 8,9.

$$P_r = P_w C_p = \frac{1}{2} C_p (\beta, \lambda) \rho \pi R^2 V^3 \quad (8)$$

$$T_r = \frac{1}{2} C_T (\beta, \lambda) \rho \pi R^3 V^2 \quad (9)$$

Nilai  $C_p$  sangat nonlinear dan bervariasi pada kecepatan angin, kecepatan rotasi turbin, parameter blade turbin serta *pitch angle*. Hal ini dibatasi oleh batas Betz (59%).

$$\lambda = \frac{\omega R}{V} \quad (10)$$

Dengan:

$\lambda$  = ratio kecepatan

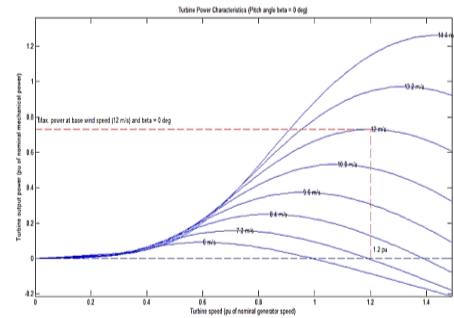
$\omega R$  = ratio antara kecepatan bujursangkar dari ujung turbin

V = kecepatan angin

$$C_p (\lambda, \beta) = \lambda C_t (\lambda, \beta) \quad (11)$$

Koefisien  $C_t$  merupakan fungsi yang sangat nonlinear dari rasio kecepatan tip, dan *blade pitch angle*  $\beta$ .

Karakteristik operasi dari variabel kecepatan *variable-pitch wind turbine* bisa digambarkan dari kurva daya, yang memberi perkiraan dari *output* daya sebagai fungsi dari kecepatan angin. Wilayah operasi *wind turbine* dapat digambarkan seperti gambar 1.



Gambar 1. Karakteristik wind turbine

Wilayah operasi *wind turbine* terdapat tiga titik yang berbeda :

1. *Cut-in wind speed*: kecepatan angin terendah dimana *wind turbine* mulai menghasilkan daya listrik.
2. *Rated wind speed*: kecepatan angin pada saat *wind turbine* menghasilkan daya listrik , yang biasanya merupakan daya maksimum dari *wind turbine*.
3. *Cut-out wind speed*: kecepatan angin yang dapat menghentikan dan mematikan *wind turbine* agar terlindung dari kerusakan mekanik.

#### C. Mode Operasi Turbin Angin

Ada tiga mode untuk mengontrol *variable-speed pitch* pada *wind turbine*. Pemilihan mode operasi tergantung pada kecepatan angin yang tersedia dan jumlah daya yang dibutuhkan untuk mensuplai beban. Tiga mode tersebut adalah:

1. *Maximum Power Point Tracking* : Mode yang digunakan untuk mengkonversikan daya maksimum dari angin, pada saat kecepatan angin rendah akan mengikuti nilai koefisien daya. Daya mekanik yang dikonversikan adalah:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A C_{p_{max}} V^3 \quad (12)$$

2. *Blade Pitch control* : mode ini dioperasikan ketika kecepatan angin diluar dari nilai rata-rata, dalam situasi ini torsi elektromagnetik tidak cukup untuk mengontrol kecepatan rotor dengan demikian generator akan *overload*. Untuk menghindari hal ini, konversi daya *wind turbine* harus dibatasidan ini dapat dilakukan dengan mengurangi koefisien daya ( $C_p$ ) dari *wind turbine*. Koefisien daya dapat dimanipulasi dengan memvariasikan *blade pitch angel* ( $\beta$ ).
3. *Power Regulation* : dengan semakin banyaknya daya angin yang masuk pada sistem. Pada pengoperasian *wind turbine* tidak mungkin untuk menjaga agar daya yang dihasilkan konstan. Oleh karena itu, pengaturan tegangan dan frekuensi diperlukan, agar daya listrik yang dihasilkan sesuai dengan permintaan beban[15].

### III. METODE PENELITIAN

#### A. Motor DC

Sebuah motor listrik mengubah energi listrik menjadi energi mekanik dengan menggunakan berinteraksi medan magnet. Motor listrik yang digunakan untuk berbagai operasi perumahan, komersial, dan industri. Gulungan motor DC shunt terdiri dari medan shunt dihubungkan secara paralel dengan armature. Medan shunt memiliki ketahanan yang lebih tinggi dan arus yang lebih rendah dibandingkan dengan medan shunt seri. Akibatnya, motor ini memiliki kecepatan dan kontrol posisi yang sangat baik[10][16]. Oleh karena itu DC shunt motor biasanya digunakan aplikasi yang membutuhkan tenaga kuda lima kali atau lebih. Persamaan menggambarkan perilaku dinamis dari motor DC berdasarkan diagram skematik diberikan oleh persamaan berikut;

$$V_a = R_a \cdot i_a(t) + L_a \cdot \frac{di_a(t)}{dt} + e_b(t) \quad (13)$$

$$e_b(t) = K_b \cdot w(t) \quad (14)$$

$$T_m(t) = K_T \cdot i_a(t) \quad (15)$$

$$T_m(t) = J_m \cdot \frac{dw(t)}{dt} + B_m \cdot w(t) \quad (16)$$

Dengan;  $V_a$  = Angker tegangan (V),  $R_a$  = resistansi angker ( $\Omega$ ),  $L_a$  = induktansi angker (H),  $i_a$  = arus dinamo (A),  $E_b$  = back emf (V),  $w$  = kecepatan sudut (rad / s),  $T_m$  = torsi motor (Nm),  $\theta$  = posisi sudut dari poros rotor (rad),  $J_m$  = rotor inersia (kg),  $B_m$  = koefisien gesekan viskos (Nms / rad),  $K_T$  = konstanta torsi (Nm / A),  $K_b$  = konstanta back emf (Vs / rad).

#### B. PID Controller

Kontrol PID adalah sistem kontrol gabungan antara kontrol proporsional, integral, dan turunan (derivative). Pada metode ini, penalaan dilakukan dalam kalang tertutup dimana masukan referensi yang digunakan adalah fungsi tangga (step) [17][18][6]. Pengendali pada metode ini hanya pengendali proporsional.  $K_p$ , dinaikkan dari 0 hingga nilai kritis  $K_p$ , sehingga diperoleh keluaran yang terus-menerus berosilasi dengan amplitudo yang sama[19][20]. Nilai kritis  $K_p$  ini disebut sebagai ultimated gain. Nilai ultimated period,  $T_u$ ,

diperoleh setelah keluaran sistem mencapai kondisi yang terus menerus berosilasi[10][12].

#### C. Bat Algorithm (BA)

Berdasarkan persamaan konsep ekolokasi dari kelelawar pada pembahasan sebelumnya maka berikut ini akan di berkikan suatu pseudocode dari algoritma kelelawar yang dikembangkan oleh Yang[21] dapat dilihat pada gambar 2:

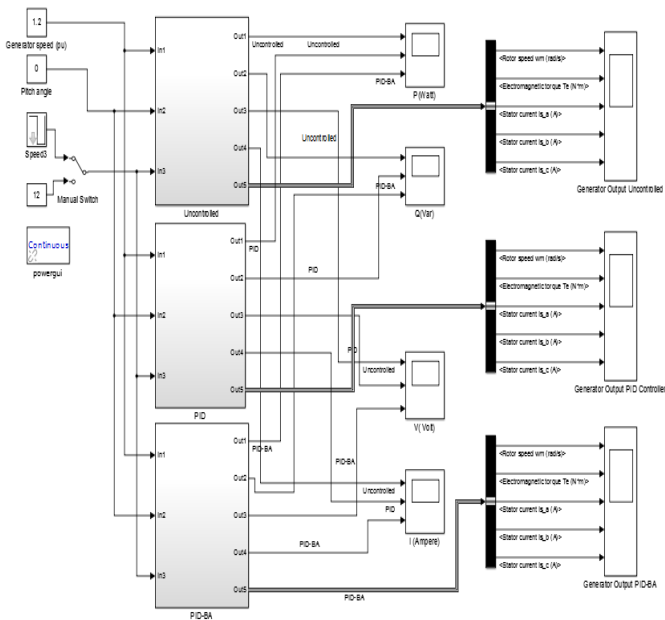
```

Fungsi objektif f(x), x = (x1, ..., xd)T
Inisiasi populasi kelelawar xi, (i = 1,2, ..., n) dan vi
Definisikan frekuensi fi pada xi
Inisiasi laju emisi gelombang ri dan tingkat kekerasan Ai
while (t < iterasi maksimum)
    Bangkitkan solusi baru dengan mengatur frekuensi
    Perbaharui kecepatan dan lokas
        if (rand > ri)
            pilih solusi diantara solusi terbaik
            bangkitkan solusi lokal diantara solusi terbaik
        end
        if (rand < Ai & f(xi) < f(x*))
            terima solusi yang baru
            perbaharui ri dan Ai
        end
    Urutkan setiap kelelawar dan pilih x* yang baru
End
    
```

Gambar 2. Pseudocode Bat Algorithm

### IV. ANALISA DAN PEMBAHASAN

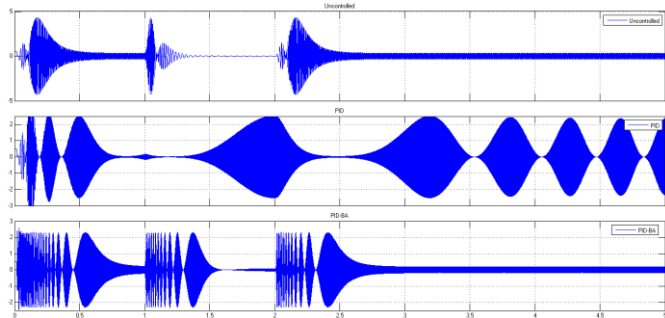
Pada sistem wind turbine, mempunyai input generator speed, pitch angle, wind speed. Parameter Turbin: Nominal mechanical Output power = 200 (W), Base Power of the electrical generator = 200/0,9 (VA), Base wind speed = 12 (m/s), Maximum Power at base wind speed = 0,73 (pu), Base rotation speed = 1.2 (pu), dan Pitch angle beta = 0 (deg). Desain tanpa kontrol, PID kontrol, PID-Auto, dan PDI-BA dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 3. Wind Turbine System

Hasil simulasi dari *wind turbine* oleh tanpa control (atas) dan PID controller (tengah), dan PID-BA (bawah) dapat dilihat pada gambar 4,5,6, dan 7. Nilai perioda dasar pada PID,  $T_u = 3$ , dan penguatan dasar  $K_u = 14.4$ , digunakan untuk menentukan konstanta-konstanta  $K_p = 3K_u/5 = 8.64$ ,  $K_i = T_u/2 = 1.5$  dan  $K_d = 3T_u/25 = 0.36$ .

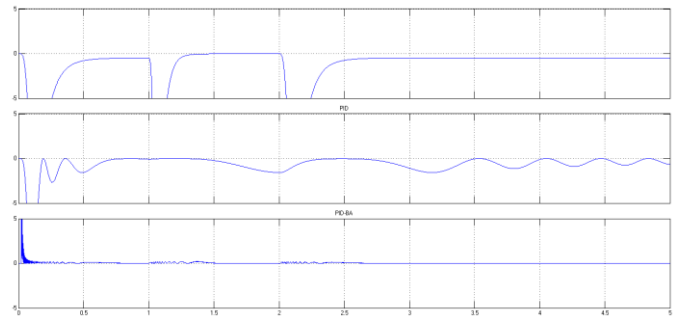
Hasil output Daya Aktif (P) dalam satuan Watt dapat dilihat pada gambar 4. berikut ini:



Gambar 4. Hasil simulasi Daya P (Watt) pada Turbin Angin

Gambar diatas menunjukkan rata-rata daya aktif pada uncontrolled paling kecil dan tidak stabil, yaitu 0,3305 Watt dengan frekuensi 10/ms. Untuk Tanpa kontroller menunjukkan 0,642 Watt dengan frekuensi 16/ms. PID menunjukkan 1,4984 Watt dengan frekuensi 20/ms. Untuk model PID-BA menunjukkan 2,621 Watt dengan frekuensi 174/ms.

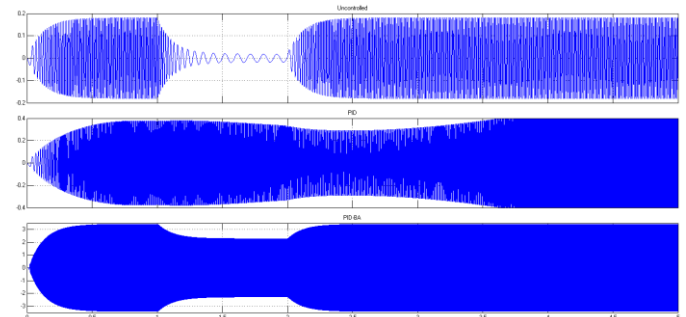
Hasil output Daya Reaktif (Q) dalam satuan Var dapat dilihat pada gambar 5. berikut ini



Gambar 5. Hasil simulasi Daya Q (VAR) pada Turbin Angin

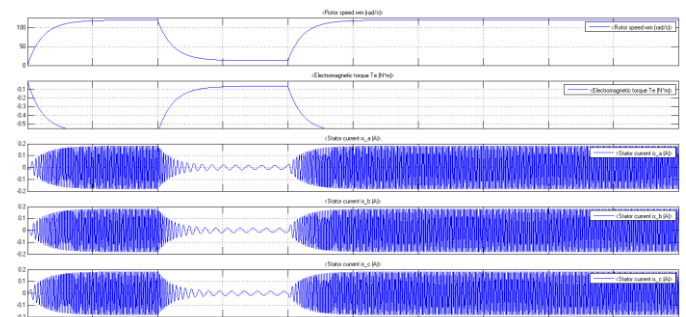
Gambar menunjukkan rata-rata daya reaktif model uncontrolled adalah paling besar dan tidak stabil, yaitu -14,31 Var dengan frekuensi 10/ms. Untuk PID menunjukkan -1,5798 Var dengan frekuensi 20/ms. Untuk model PID-BA yaitu -0,12323 Var dengan frekuensi 180/ms.

Hasil output arus dalam satuan ampere dapat dilihat pada gambar 6. berikut ini:

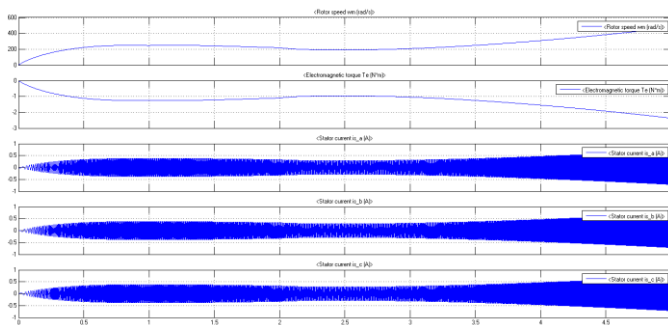


Gambar 6. Hasil simulasi Arus (A) pada Turbin Angin

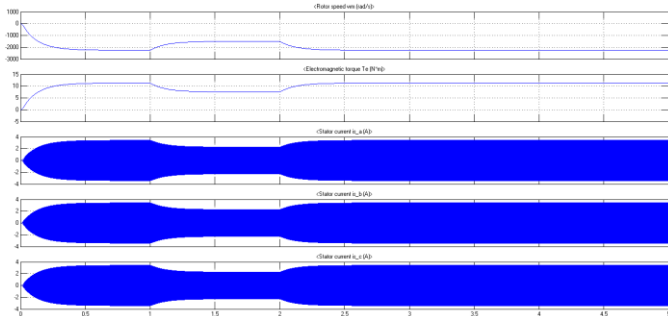
Hasil Output Generator dari wind turbine yang dikontrol oleh PID-BA dan PID Ziegler-Nichols, ditunjukkan pada gambar 10 dan 11. Pada gambar terlihat bahwa daya output generator pada kontrol PID-BA jika dibandingkan dengan kontrol PID dan tanpa controller adalah lebih besar dan lebih stabil.



Gambar 7. Generator Output tanpa kontroler



Gambar 8. Generator Output PID kontroler



Gambar 9. Generator Output PDI-BA kontroler

## V. KESIMPULAN

Dari hasil simulasi didapatkan bahwa sistem yang ditunjukkan oleh kontroler PID-BA lebih baik daripada kontroler PID dan tanpa kontroler. Daya output lebih besar dan lebih stabil, tegangan lebih stabil, arus lebih besar dan stabil, Didapatkan daya *output* pada sistem lebih optimal dan lebih stabil.

## VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Ali, Soedibyo, and I. Robandi, "Desain Pitch Angle Controller Turbin Angin Dengan Permanent Magnetic Synchronous Generator (PMSG) Menggunakan Imperialist Competitive Algorithm (ICA)," in *SENTIA-2015, Polinema, Malang*, 2015, pp. B128–B131.
- [2] M. Ali and F. Hunaini, "Optimisasi Steering Control Mobil Listrik Menggunakan Metode Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)," *J. Intake J. ....*, pp. 16–32, 2015, [Online]. Available: <https://ejournal.ft-undar.ac.id/index.php/intake/article/view/84>
- [3] M. R. Djalal, M. Ali, H. Nurohmah, and D. Ajiatmo, "Aplikasi Algoritma Differential Evolution untuk Desain Optimal Load Frequency Control pada Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid Angin dan Diesel," *J. Teknol. Inf. dan Ilmu Komput.*, vol. 5, no. 5, p. 511, 2018, doi: 10.25126/jtiik.201855430.
- [4] M. Ali, M. R. Djalal, M. Fakhrurozi, Kadaryono, Budiman, and D. Ajiatmo, "Optimal Design Capacitive Energy Storage (CES) for Load Frequency Control in Micro Hydro Power Plant Using Flower Pollination Algorithm," in *2018 Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar (EECCIS)*, Oct. 2018, pp. 21–26. doi: 10.1109/EECCIS.2018.8692997.
- [5] M. Arrohman, R. Fajardika, M. Muhlasin, and M. Ali, "Optimasi Frekuensi Kontrol pada Sistem Hybrid Wind-Diesel Menggunakan PID Kontroler Berbasis ACO dan MFA," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 9, no. 1, pp. 65–68, May 2018, doi: 10.21776/ub.jrm.2018.009.01.10.
- [6] M. Ali and M. Muhlasin, "Auto-Tuning Method for Designing Matlab DC Motor Speed Control With PID (Proportional Integral Derivative)," *ADRI Int. J. Sci. Eng. Technol.*, vol. 1, no. 2, pp. 5–8, 2017, [Online]. Available: <https://index.pkp.sfu.ca/index.php/record/view/856960>
- [7] M. Ali, F. Hunaini, I. Robandi, and N. Sutantra, "Optimization of active steering control on vehicle with steer by wire system using Imperialist Competitive Algorithm (ICA)," in *2015 3rd International Conference on Information and Communication Technology (ICoICT)*, May 2015, pp. 500–503. doi: 10.1109/ICoICT.2015.7231475.
- [8] D. H. Kusuma, M. Ali, and N. Sutantra, "The comparison of optimization for active steering control on vehicle using PID controller based on artificial intelligence techniques," in *2016 International Seminar on Application for Technology of Information and Communication (ISEMANTIC)*, Aug. 2016, pp. 18–22. doi: 10.1109/ISEMANTIC.2016.7873803.
- [9] M. Ali, Soedibyo, and I. Robandi, "Desain Pitch Angle Controller Turbin Angin Dengan Permanent Magnetic Synchronous Generator (PMSG) Menggunakan Imperialist Competitive Algorithm (ICA)," *SENTIA-2015, Polinema, Malang*, vol. 7, pp. B128–B131, 2015, [Online]. Available: <http://sentia.polinema.ac.id/index.php/SENTIA2015/article/view/186>
- [10] M. Ali, "Kontrol Kecepatan Motor DC Menggunakan PID Kontroler Yang Dituning Dengan Firefly Algorithm," *Intake J. Penelit. Ilmu Tek. Dan Terap.*, vol. 3, no. 2, pp. 1–10, 2012, doi: <https://doi.org/10.32492/jintake.v3i2.45>.
- [11] Y. G. Hartlambang, H. Nurohmah, and M. Ali, "Optimasi Kecepatan Motor DC Menggunakan Algoritma Kelelawar (Bat Algorithm)," in *SEMANTIKOM 2017, Universitas Madura*, 2017, pp. 1–8. [Online]. Available:

- [http://semantikom.unira.ac.id/2017/SEMANTIKOM\\_2017\\_paper\\_2.pdf](http://semantikom.unira.ac.id/2017/SEMANTIKOM_2017_paper_2.pdf)
- [12] M. Ali, I. Umami, and H. Sopian, "Particle Swarm Optimization (PSO) Sebagai Tuning PID Kontroler Untuk Kecepatan Motor DC," *Intake J. Penelit. Ilmu Tek. Dan Terap.*, vol. 7, no. 1, pp. 10–20, 2016, doi: <https://doi.org/10.32492/jintake.v7i1.47>.
- [13] M. M. Sabir and T. Ali, "Optimal PID controller design through swarm intelligence algorithms for sun tracking system," *Appl. Math. Comput.*, vol. 274, pp. 690–699, 2016, doi: [10.1016/j.amc.2015.11.036](https://doi.org/10.1016/j.amc.2015.11.036).
- [14] M. F. Rachman, S. Muttaqin, and M. Ali, "Penggunaan Metode Imperialist Competitive Algorithm (ICA) untuk kontrol Frekuensi pada Wind-Turbine dan Hybrid Wind-Diesel," in *SAINTEK II-2017, UB, Malang*, 2017, pp. 99–102. [Online]. Available: <http://saintek.ub.ac.id/prosiding/e19.pdf>
- [15] H. Nurohmah, M. Ali, and M. R. B. Djalal, "Desain Frekuensi Kontrol pada Hibrid Wind-Diesel Dengan PID-Imperialist Competitive Algorithm (ICA)," *Intake J. Penelit. Ilmu Tek. Dan Terap.*, vol. 6, no. 2, pp. 35–42, 2015, [Online]. Available: <http://repository.poliupg.ac.id/646/>
- [16] G. Y. Hartlambang, M. Ali, and A. Raikhani, "Unjuk Kerja Kecerdasan Buatan (Artificial Intelligence) Dalam Mengoptimalkan Kecepatan Motor Dc Dengan Menggunakan Metode Imperialist Competitive Algorithm (ICA)," *Intake J. Penelit. Ilmu Tek. Dan Terap.*, vol. 6, no. 1, pp. 51–67, 2015, doi: <https://doi.org/10.32492/jintake.v6i1.48>.
- [17] M. Ali, A. N. Afandi, A. Parwati, R. Hidayat, and C. Hasyim, "DESIGN OF WATER LEVEL CONTROL SYSTEMS USING PID AND ANFIS BASED ON FIREFLY ALGORITHM," *JEEMECS (Journal Electr. Eng. Mechatron. Comput. Sci.)*, vol. 2, no. 1, Feb. 2019, doi: [10.26905/jeemeecs.v2i1.2804](https://doi.org/10.26905/jeemeecs.v2i1.2804).
- [18] Kadaryono, Rukslin, M. Ali, Askan, A. Parwanti, and I. Cahyono, "Comparison of LFC Optimization on Micro-hydro using PID, CES, and SMES based Firefly Algorithm," in *2018 5th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI)*, Oct. 2018, pp. 204–209. doi: [10.1109/EECSI.2018.8752733](https://doi.org/10.1109/EECSI.2018.8752733).
- [19] M. Ali, A. Raikhani, B. Budiman, and H. Sopian, "Algoritma Persaingan Imperialis Sebagai Optimasi Kontroler PID dan ANFIS Pada Mesin Sinkron Magnet Permanen (Imperialist Competitive Algorithm As PID Optimization and ANFIS Controller at Permanent Magnet Synchronous Machine)," *JEEE-U (Journal Electr. Electron. Eng.)*, vol. 3, no. 1, p. 57, Apr. 2019, doi: [10.21070/jeee-u.v3i1.2023](https://doi.org/10.21070/jeee-u.v3i1.2023).
- [20] M. N. Masrukhan, M. P. Mulyo, D. Ajiatmo, and M. Ali, "Optimasi Kecepatan Motor DC Menggunakan Pid Dengan Tuning Ant Colony Optimization (ACO) Controller," in *SENTIA-2016, Polinema, Malang*, 2016, pp. B49–B52. [Online]. Available: <http://sentia.polinema.ac.id/index.php/SENTIA2016/article/view/76>
- [21] X.-S. Yang, "Bat Algorithms," in *Nature-Inspired Optimization Algorithms*, Elsevier, 2014, pp. 141–154. doi: [10.1016/B978-0-12-416743-8.00010-5](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-416743-8.00010-5).