

Desain Sistem Kontrol *Pitch Angle Wind Turbine Horizontal Axis* Menggunakan *Firefly Algorithm*

Muhammad Ruswandi Djalal¹, Andi Imran², dan Herlambang Setiadi³

¹Teknik Energi, State Polytechnic of Ujung Pandang

Jalan Perintis Kemerdekaan km.10, Makassar, 90245, Indonesia

²Teknik Elektro, Sepuluh Nopember Institute of Technology

Jalan Raya ITS, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya, 60111, Indonesia

³School of Information Technology & Electrical Engineering, The University of Queensland
Brisbane, Australia

wandi@poliupg.ac.id¹, andi.imran13@mhe.ee.its.ac.id², h.setiadi@uq.edu.au³

Abstrak— *Pitch variable-speed wind turbine* telah berkembang pesat dalam beberapa tahun terakhir. Ada dua strategi kontrol untuk mengontrol *variable* kecepatan pada *wind turbine*. Saat kecepatan angin rendah di bawah nilai rata-rata, pengatur kecepatan harus dapat mengatur kecepatan rotor secara terus-menerus untuk mempertahankan kecepatan pada sebuah *level*, yang memberikan koefisien daya maksimum, sehingga efisiensi turbin akan meningkat. Pengaturan *pitch angle* diperlukan dalam kondisi kecepatan angin diatas yang diinginkan. Perubahan kecil pada *pitch angle* dapat mempengaruhi *output* daya. *Pitch angle control* adalah salah satu cara untuk menyesuaikan torsi aerodinamik pada turbin angin saat kecepatan angin berada di atas nilai kecepatan dan beberapa *variable control* lainnya, seperti kecepatan angin, kecepatan generator, dan daya generator. Dalam makalah ini akan akan dirancang *variable control* untuk memaksimalkan energi dari turbin angin. Perancangan *variable control* ini menggunakan *PID controller*. *PID controller* (*Proporsional Integrator Diferensial*) merupakan sebuah alat untuk mengontrol sebuah sistem, *PID controller* ini digunakan untuk mengontrol *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG). Hasil penelitian menunjukkan bahwa menggunakan *PID controller* lebih stabil dan daya *output* lebih optimal.

Kata kunci— turbin angin, *pitch angle control*, *PID controller*

I. PENDAHULUAN

Seiring dengan kemajuan teknologi dan peningkatan jumlah penduduk maka kebutuhan akan energi listrik juga akan meningkat. Akibatnya beban listrik akan meningkat juga. Dengan adanya peningkatan beban listrik maka pasokan listrik ke konsumen juga dipengaruhi. Akibatnya apabila pasokan listrik bertambah maka daya *output* yang dikeluarkan oleh generator juga akan bertambah. Apabila daya keluaran generator bertambah, kebutuhan akan bahan bakar akan meningkat dan akan berakibat biaya pengeluaran akan mahal.

Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) merupakan generator sinkron yang mempunyai magnet permanen. PMSG ini akan dikopel dengan *turbine* angin agar menghasilkan energi listrik, sehingga dengan adanya PMSG dapat mengurangi biaya pengeluaran yang mahal. PMSG mempunyai efisiensi yang kurang optimal untuk menghasilkan daya listrik. Hal ini dipengaruhi oleh kecepatan angin, *pitch angle*, dan lain-lain. Oleh karena itu, PMSG perlu dikontrol untuk menghasilkan daya listrik yang optimal. Dalam mengontrol PMSG terdapat beberapa *controller* yaitu *PI controller* pada *pitch angle*, *PI controller* pada *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). Beberapa penelitian tentang optimasi kontrol pembangkit sudah banyak yang melakukan dan diantaranya banyak menggunakan metode cerdas untuk metode optimasi, diantaranya [1, 2].

Pada artikel ini akan dibahas tentang *PID controller* untuk mengontrol *pitch angle*. *PID controller* akan mengontrol *pitch angle* untuk dapat menghasilkan daya *output* PMSG optimal. Aplikasi *PID* dalam mengontrol *pitch angle wind turbine* sudah banyak dilakukan sebelumnya, diantaranya [3-7], namun diantaranya masih menggunakan metode yang konvensional. Oleh karena itu pada penelitian ini akan diusulkan salah satu metode optimasi parameter *PID* untuk *control pitch angle wind turbine* menggunakan metode algoritma kunang-kunang (*firefly*).

Arikel ini terdiri dari pendahuluan, *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG), model *wind turbine*, *PID controller*, pembahasan dan analisa, serta kesimpulan.

II. PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR (PMSG)

Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) merupakan generator sinkron yang mempunyai magnet permanen. PMSG dapat dimodelkan dengan persamaan transformasi *park*. Persamaan didasarkan pada arus stator dan tegangan seperti persamaan 1 dan 2.

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

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

Keterangan :

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 dan 4.

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

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

Keterangan :

λ_m = fluks magnetik inti

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

Torsi elektrik dari PMSG dapat dituliskan seperti persamaan 5.

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

Dimana p adalah jumlah pasang kutub PMSG.

III. MODEL WIND TURBINE

A. Aerodinamis Wind Turbine

Wind turbine dapat merubah energi angin menjadi energi kinetik yang kemudian digunakan untuk mengoperasikan generator listrik [3]. Angin yang melewati turbin akan kehilangan energi yang sama dengan energi yang diekstraksikan oleh turbin. Persamaan 6 merupakan persamaan dari energi kinetik.

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

Keterangan :

U = energi kinetik (joule)

ρ = intensitas udara (kg/m^3)

A = luas penampang (m^2)

x = ketebalan penampang (m)

V^2 = 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 ekstraksi adalah seperti persamaan 8 dan 9.

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

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

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%).

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

Keterangan :

λ = *ratio* kecepatan

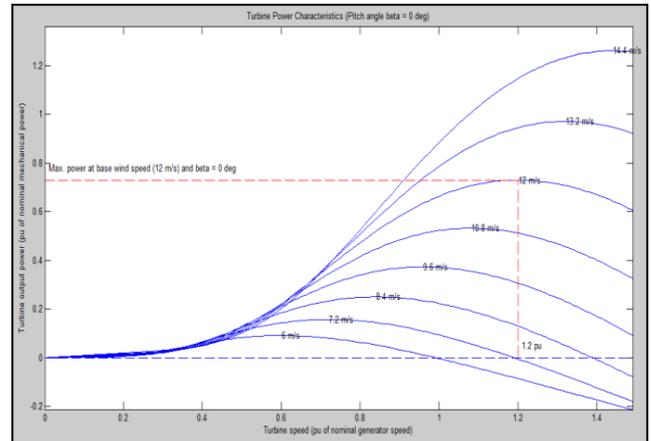
ωR = *ratio* antara kecepatan bujursangkar dari ujung turbin

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* β .

Wilayah 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.

B. 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 seperti persamaan 12.

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

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 dibatasi dan ini dapat dilakukan dengan mengurangi koefisien daya (C_p) dari *wind turbine*. Koefisien daya dapat dimanipulasi dengan memvariasikan *blade pitch angle* (β).
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.

IV. PID CONTROLLER

Suatu sistem tidak dapat diubah, sehingga kontroler dibutuhkan untuk melakukan perubahan melalui sub sistem. Salah satu fungsi dari kontroler adalah mereduksi sinyal kesalahan, yaitu perbedaan antara sinyal setting dan sinyal aktual dari sistem. Tujuan dari sistem kontrol adalah untuk mendapatkan sinyal aktual yang diinginkan sesuai dengan sinyal *setting*. Semakin cepat reaksi sistem mengikuti sinyal aktual dan semakin kecil kesalahan yang terjadi, semakin baik kinerja sistem kontrol yang diterapkan. Salah satu kontroler yang dapat digunakan adalah *PID controller*.

Dalam *PID controller* terdapat parameter-parameter yang harus ditentukan. Parameter-parameter tersebut adalah K_p , τ_i , dan τ_d . Dimana K_p merupakan komponen dari kontroler Proporsional, τ_i merupakan komponen dari kontroler integrator, dan τ_d merupakan komponen dari kontroler diferensial [4].

Penalaan parameter kontroler PID (*Proporsional Integral Diferensial*) selalu didasari atas tinjauan terhadap karakteristik yang diatur (*plant*). Dengan demikian betapapun rumitnya suatu *plant*, perilaku *plant* tersebut harus diketahui terlebih dahulu sebelum penalaan parameter PID itu dilakukan. Karena penyusunan model matematik *plant* tidak mudah, maka dikembangkan suatu metode eksperimental. Metode ini didasarkan pada reaksi *plant* yang dikenai suatu perubahan. Dua metode pendekatan eksperimen adalah *Ziegler-Nichols* dan metode *Quarter decay*.

$$K_p = \frac{1}{\tau K} \quad (13)$$

$$\tau_i = \tau \quad (14)$$

$$Gain = \frac{q}{\tau_i} \quad (15)$$

Pada sistem terdapat beberapa orde yaitu sistem orde 1, orde 2, dan orde lebih dari 2. Pada sistem tersebut terdapat parameter-parameter di setiap ordenya. Untuk orde 1 terdapat parameter seperti persamaan 7. Untuk parameter orde 2 atau lebih terdapat parameter seperti persamaan 8.

Parameter: K, τ

$$\frac{K}{\tau s + 1} \quad (16)$$

Parameter: K, ζ, ω_n

$$\frac{K}{\frac{1}{\omega_n^2} s^2 + \frac{2\zeta}{\omega_n} s + 1} \quad (17)$$

Setiap kekurangan dan kelebihan dari masing-masing kontroler P, I, dan D dapat saling menutupi dengan menggabungkan ketiganya secara paralel menjadi kontroler proposional integral diferensial (*PID controller*). Elemen-elemen kontroler P, I, dan D masing-masing secara keseluruhan bertujuan untuk mempercepat reaksi sebuah sistem, menghilangkan *offset* dan menghasilkan perubahan awal yang besar [4]. Gambar 2 merupakan blok diagram *PID controller*.

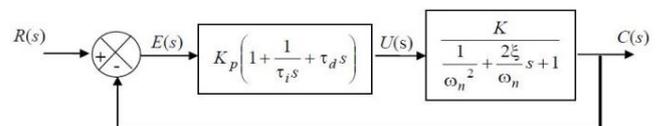
Berikut ini merupakan langkah-langkah untuk mendesain *PID controller* :

1. Menentukan fungsi alih dari *plant*
2. Menentukan spesifikasi performansi respon orde yang diinginkan
3. Menentukan K_p, τ_i, τ_d

$$\tau_i = \frac{2\zeta}{\omega_n} \quad (18)$$

$$\tau_d = \frac{1}{2\zeta\omega_n} \quad (19)$$

$$K_p = \frac{2\zeta}{\tau \cdot \omega_n \cdot K} \quad (20)$$



Gambar 2. Blok diagram *PID controller* [4]

V. HASIL DAN ANALISA

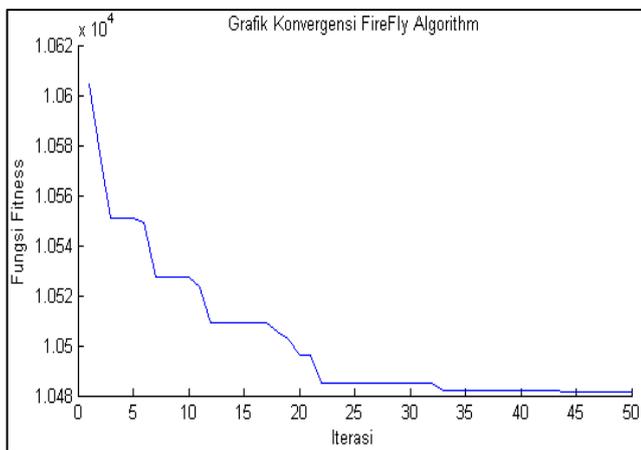
Desain *control pitch angle wind turbine* menggunakan beberapa *set point*, yaitu 10, 20, dan 40. *Controller* yang digunakan menggunakan *Proportional Integral Derivative (PID)* yang *dituning* menggunakan algoritma cerdas *firefly* algoritim.

1) Untuk *set point* 10

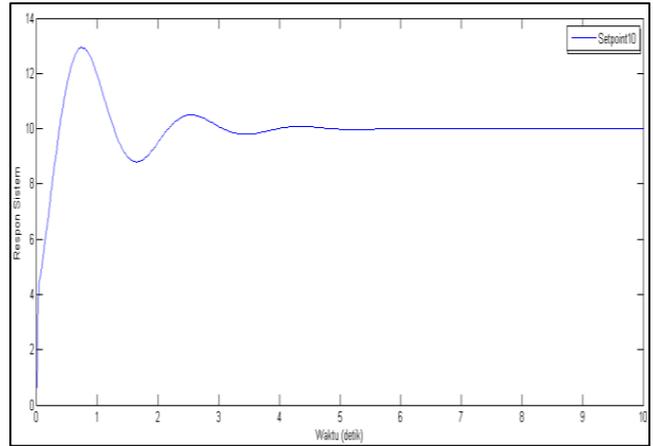
Tabel I menunjukkan hasil optimasi parameter PID untuk *set point* 10. Gambar 3 menunjukkan grafik konvergensi algoritma *firefly* dalam mencari nilai optimal PID. Dari grafik konvergensi, algoritma menemukan nilai optimal pada iterasi ke 35, dengan nilai *fitness function* sebesar $1,0481e+04$. Parameter PID masing-masing $K_p = 0,5009$, $K_i = 3,4890$, dan $K_d = 0,0999$. Gambar 4 menunjukkan respon *control pitch angle* setelah dioptimasi menggunakan algoritma *firefly*, terlihat respon osilasi yang didapat yaitu sebesar 12,93.

TABEL I. HASIL OPTIMASI PARAMETER PID UNTUK SET POINT 10

nbest =	0.5009	3.4890	0.0999
Lightbest =	1.0481e+04		
kp =	0.5009		
ki =	3.4890		
kd =	0.0999		
>> ITAE	1.0772e+04		



Gambar 3. Grafik konvergensi *firefly* untuk *set point* 10



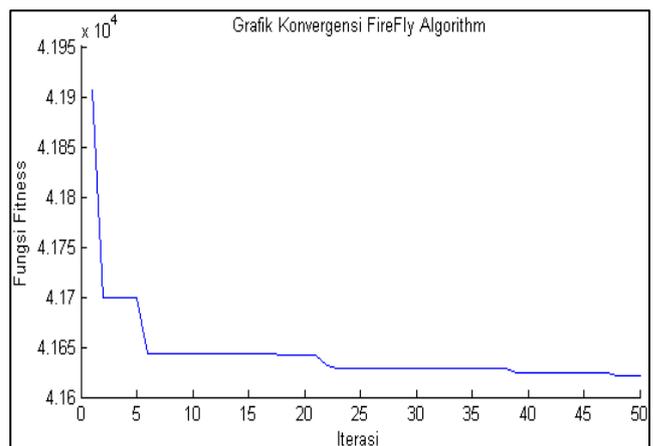
Gambar 4. Respon kecepatan *wind turbine* untuk *set point* 10

2) Untuk *set point* 20

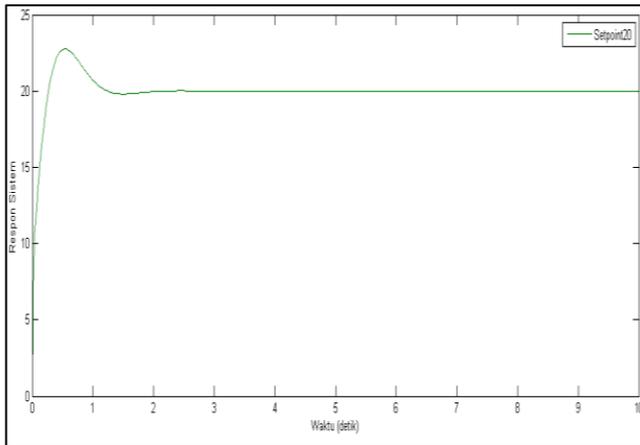
Tabel II menunjukkan hasil optimasi parameter PID untuk *set point* 20. Gambar 5 menunjukkan grafik konvergensi algoritma *firefly* dalam mencari nilai optimal PID. Dari grafik konvergensi, algoritma menemukan nilai optimal pada iterasi ke 40, dengan nilai *fitness function* sebesar $4,1621e+04$. Parameter PID masing-masing $K_p = 1,4129$, $K_i = 4,7265$, dan $K_d = 0,1000$. Gambar 6 menunjukkan respon control *pitch angle* setelah dioptimasi menggunakan algoritma *firefly*, terlihat respon osilasi yang didapat yaitu sebesar 22,75.

TABEL II. HASIL OPTIMASI PARAMETER PID UNTUK SET POINT 20

nbest =	1.4129	4.7265	0.1000
Lightbest =	4.1621e+04		
kp =	1.4129		
ki =	4.7265		
kd =	0.1000		



Gambar 5. Grafik konvergensi *firefly* untuk *set point* 20



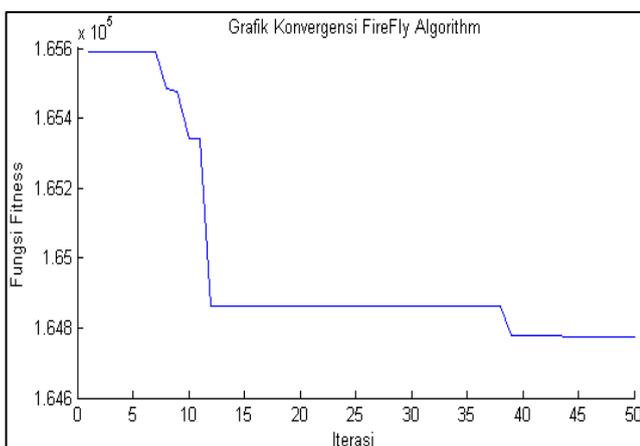
Gambar 6. Respon kecepatan *wind turbine* untuk *set point* 10

3) Untuk *set point* 40

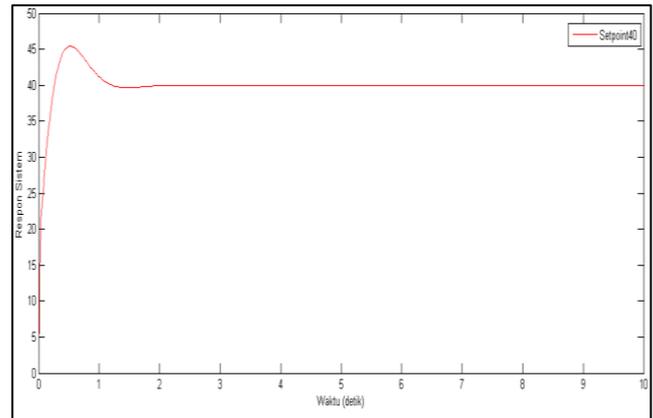
Tabel III menunjukkan hasil optimasi parameter PID untuk *set point* 40. Gambar 7 menunjukkan grafik konvergensi algoritma *firefly* dalam mencari nilai optimal PID. Dari grafik konvergensi, algoritma menemukan nilai optimal pada iterasi ke 40, dengan nilai *fitness function* sebesar $1,6478e+05$. Parameter PID masing-masing $K_p = 1,4836$, $K_i = 4,9901$, $K_d = 0,0999$. Gambar 8 menunjukkan respon *control pitch angle* setelah dioptimasi menggunakan algoritma *firefly*, terlihat respon osilasi yang didapat yaitu sebesar 45,39.

TABEL III. HASIL OPTIMASI PARAMETER PID UNTUK SET POINT 40

nbest =	1.4836	4.9901	0.0999
Lightbest =	1.6478e+05		
kp =	1.4836		
ki =	4.9901		
kd =	0.0999		
>> ITAE	1.6821e+05		

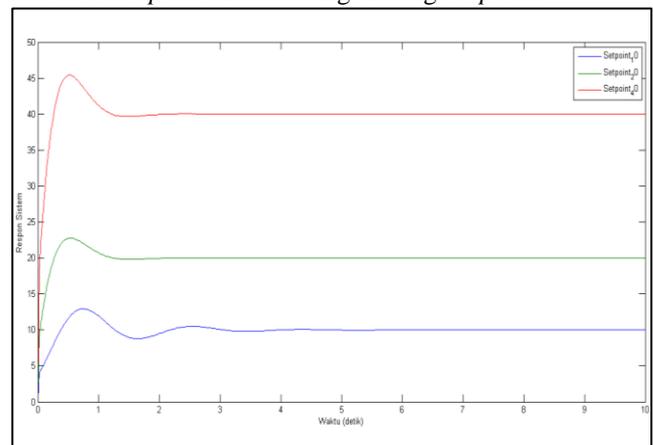


Gambar 7. Grafik konvergensi *firefly* untuk *set point* 40



Gambar 8. Respon kecepatan *wind turbine* untuk *set point* 10

Gambar 9 dan Tabel IV merangkum respon dan *overshoot* *wind turbine speed* untuk masing-masing *set point*.



Gambar 9. Respon kecepatan *wind turbine* untuk *set point* 10, 20, dan 40

TABEL IV. OVERTHOOT WIND TURBINE SPEED

Parameter	Set Point 10	Set Point 20	Set Point 40
Overshoot	0 & 12,93	0 & 22,75	0 & 45,39

VI. KESIMPULAN

PID *controller* yang diusulkan untuk mengontrol *pitch angle wind turbine*. Dari hasil simulasi didapatkan bahwa dengan penambahan PID *controller* yang parameternya dioptimasi menggunakan algoritma cerdas *firefly*, didapatkan respon kecepatan *turbine* angin yang baik dengan respon yang sangat cepat sesuai dengan *set point* yang diinginkan. *Overshoot* untuk masing-masing respon 12,93 untuk *set point* 10, 22,75 untuk *set point* 20, dan 45,39 untuk *set point* 40. Parameter $K_p = 0,5009$, $K_i = 3,4890$, dan $K_d = 0,0999$ untuk *set point* 10, $K_p = 1,4129$, $K_i = 4,7265$, dan $K_d = 0,1000$ untuk *set point* 20, dan $K_p = 1,4836$, $K_i = 4,9901$, dan $K_d = 0,0999$ untuk *set point* 40.

REFERENSI

- [1] M. R. Djalal, D. Ajiatmo, and I. Robandi, "Frequency Control Pltmh Dengan Capacitive Energy Storage Menggunakan Cuckoo Search Algorithm."
- [2] M. Fadaee and M. Radzi, "Multi-objective optimization of a stand-alone hybrid renewable energy system by using evolutionary algorithms: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 3364-3369, 2012.
- [3] B. Boukhezzar, L. Lupu, H. Siguerdidjane, and M. Hand, "Multivariable control strategy for variable speed, variable pitch wind turbines," *Renewable Energy*, vol. 32, pp. 1273-1287, 2007.
- [4] C. Jauch, S. M. Islam, P. Sørensen, and B. B. Jensen, "Design of a wind turbine pitch angle controller for power system stabilisation," *Renewable energy*, vol. 32, pp. 2334-2349, 2007.
- [5] A. Hwas and R. Katebi, "Wind turbine control using PI pitch angle controller," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 45, pp. 241-246, 2012.
- [6] E. Bossanyi, "The design of closed loop controllers for wind turbines," *Wind energy*, vol. 3, pp. 149-163, 2000.
- [7] E. Van der Hooft and T. Van Engelen, "Estimated wind speed feed forward control for wind turbine operation optimisation," in *European wind energy conference*, 2004.