

# Pemodelan Dinamik Non-linear dan Analisis Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) Studi Kasus: PLTMH UMM

<sup>1</sup>Jannata Savira Transferano, <sup>2</sup>Ermanu Azizul Hakim, <sup>3</sup>Ilham Pakaya

<sup>1</sup> Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Malang, Malang

<sup>2</sup> Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Malang, Malang

<sup>3</sup> Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Malang, Malang

<sup>1</sup>jannata.transferano11@gmail.com, <sup>2</sup>ermanu.ahakim@gmail.com, <sup>3</sup>ilhampakaya@gmail.com

**Abstract** - In the power plant operation, one of which is the Micro Hydro Power Plant, the incoming energy of the plant needs to be balanced with the customer load. Sometimes, this balance can be disturbed, even if there are only very small changes happen. This occurrence is caused by sudden changes in customer load. If the system cannot be balanced, it may cause the generator rotation speed and the system voltage to turn aside from normal conditions so that the energy will be decreased. In this research, non-linear modeling of the Micro Hydro Power Plant system will be conducted, aiming to provide alternatives for handling the stabilization of the Micro Hydro Power Plant optimally in order to reduce the energy loss caused by load changes. Besides that, the effort to keep the electric power system stable was adding a Power System Stabilizer (PSS), which provided an additional signal for the generator's excitation system. PSO and GA methods were applied to improve PSS performance. The simulation conducted on MATLAB 2017B showed that the non-linear model of the power system produced generator rotation speeds with a quite better settling time with a value of 13.55s and overshoot 0.02298 compared to the linear model with settling time value 46s and overshoot 0.001636. Besides that, the addition of PSS had big influences in making the overshoot value smaller, and also, the overall PSS-PSO method showed better results than the PSS-GA method by showing that PSS-PSO produced overshoot 0.01036 with settling time 9.25s and PSS-GA produced overshoot 0.01397 with settling time 10.2s.

**Keywords** — *Micro Hydro Power Plant, Non-linear Model, System stability, PSS, PSS-PSO, PSS-GA*

**Abstrak**— Pada operasi pembangkit tenaga listrik salah satunya Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH), energi yang masuk pada pembangkit harus seimbang dengan beban pelanggan. Terkadang keseimbangan ini dapat terganggu walaupun terdapat perubahan yang sangat kecil. Hal ini diakibatkan oleh berubahnya beban pelanggan secara tiba-tiba. Jika sistem tidak dapat seimbang maka dapat mengakibatkan kecepatan putar generator dan tegangan sistem menyimpang dari kondisi normal sehingga energi akan berkurang. Dalam penelitian ini akan dilakukan pemodelan non-linear sistem tenaga listrik Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) yang bertujuan untuk memberikan alternatif bagi penanganan stabilisasi sistem tenaga listrik Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) secara optimal untuk mengurangi hilangnya energi yang diakibatkan oleh perubahan beban. Selain itu upaya untuk menjaga sistem tenaga listrik tetap stabil ialah dengan menambah Power System Stabilizer (PSS) yang menyediakan sinyal

tambahan bagi sistem eksitasi pada generator. Metode PSO dan GA digunakan untuk meningkatkan kinerja PSS. Simulasi yang dilakukan pada MATLAB 2017B menunjukkan bahwa model non-linear sistem tenaga listrik menghasilkan kecepatan putar rotor generator dengan settling time yang jauh lebih baik dengan waktu 13.55s dan overshoot 0.02298 dan model linear menghasilkan settling time dengan waktu 46s dengan overshoot sebesar 0.001636 dan penambahan PSS sangat berpengaruh untuk membuat nilai overshoot lebih kecil dan juga secara keseluruhan metode PSS-PSO menunjukkan hasil yang lebih baik daripada PSS-GA dengan menunjukkan dengan PSS-PSO menghasilkan overshoot 0.01036 dengan settling time 9.25s dan PSS-GA menghasilkan 0.01397 dengan settling time 10.2s .

**Kata Kunci** — *Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro, Model Non-linear, Stabilitas Sistem, Power System Stabilizer, PSS-PSO, PSS-GA*

## I. PENDAHULUAN

Indonesia memiliki sumber daya air yang dapat berasal dari berbagai tempat seperti sungai, sehingga dapat digunakan untuk energi alternatif untuk pembangkit listrik. Hal ini merupakan kesempatan untuk mengembangkan pembangkit listrik dengan skala kecil pada daerah yang belum terjangkau jaringan listrik PLN. Energi listrik skala kecil ini dapat disebut pembangkit listrik tenaga mikrohidro.

Pembangkit listrik tenaga mikrohidro merupakan pembangkit dengan skala kecil yang sangat berpotensi dibangun pada daerah-daerah yang dekat dengan aliran sungai. Sehingga daerah yang tidak terjangkau jaringan listrik PLN dapat memenuhi kebutuhan listrik sendiri. Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) adalah Pembangkit listrik skala kecil yang memanfaatkan tenaga air dengan memperhatikan ketinggian air dan debit air. Pada PLTMH perlu dilakukan pemodelan agar diketahui tanggapan dari transien keadaan mantap [1]. Pembangkit harus selalu dalam keadaan stabil saat terjadi lonjakan beban agar memiliki kehandalan sistem tenaga listrik. Sehingga dibutuhkan kontrol yang dapat menstabilkan kembali sistem yang disebut *Power System Stabilizer (PSS)*. PSS berfungsi meredam osilasi frekuensi pada generator akibat gangguan dan variasi beban pada sistem tenaga listrik.

Dari penelitian yang terdahulu berjudul *Nonlinear state space model identification of synchronous generators* menjelaskan tentang pemodelan generator dengan persamaan non-linear

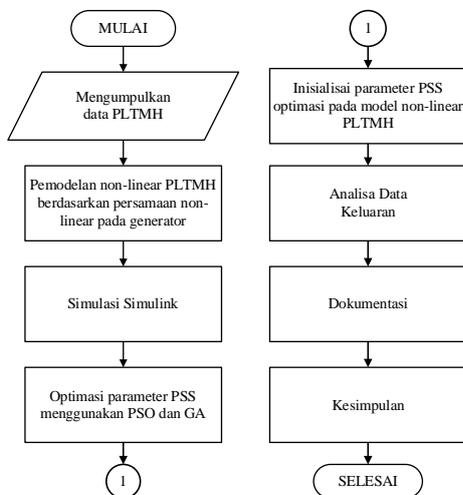
dengan pemberian input konstan, hasil simulasi menunjukkan bahwa pada saat pengukuran tidak ada noise dan respon model non-linear dengan simulasi sistem kurang lebih sama [2]. Sementara itu dari penelitian yang terdahulu dengan judul *Modeling and Simulation of Micro-Hydro power Plant Using MATLAB Simulink* memberikan pemodelan menggunakan turbin francis dengan kecepatan rotor sudah menghasilkan keadaan konstan, namun masih terdapat osilasi. Pada arus stator mengalami redaman di awal setelah itu mencapai keadaan konstan [3]. Pada penelitian yang terdahulu dengan judul *Model Linear Sistem Tenaga Listrik PLTMH UMM* sudah mencoba memodelkan dengan model linear yang dilakukan dengan mengukur parameter Penstock & Turbin, Sistem Eksitasi, Generator dan Beban yang kemudian disimulasikan dengan Simulink dengan pemberian beban yang bervariasi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa semua tanggapan perubahan kecepatan Generator pada sistem tenaga listrik PLTMH UMM beresilasi saat mendapat masukan unit step untuk berbagai kondisi beban [4].

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan masih banyak hal-hal yang perlu dianalisis mengenai pemodelan PLTMH agar sistem menjadi lebih stabil dengan menambahkan pemasangan *Power System Stabilizer (PSS)*.

## II. METODE PENELITIAN

### A. Metode

Dalam merancang suatu pemodelan harus dipahami karakteristik objek atau plant yang akan di modelkan, sehingga perancang dapat menentukan pemodelan dari plant tersebut. Oleh karena itu perlu dibuat alir pengerjaan pada penelitian yang akan dibuat. Tujuan penelitian ini adalah untuk mendapatkan alternatif dalam penanganan stabilitas sistem tenaga listrik PLTMH UMM untuk mengurangi kehilangan energi. Di bawah ini merupakan diagram alir proses pemodelan dan simulasi sistem PLTMH yang seperti diperlihatkan oleh gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Pemodelan dan Simulasi

Dari gambar 1 dapat dilihat bahwa penelitian ini dimulai dengan mengumpulkan data parameter pada PLTMH UMM, kemudian akan dibuat model non-linear pada Simulink berdasarkan persamaan non-linear generator. Langkah selanjutnya adalah simulasi model yang telah dibuat dan melakukan optimasi parameter PSS menggunakan PSO dan GA. Parameter yang dioptimasi adalah  $K_e, T_1, T_2, T_3,$  dan  $T_4$ . Setelah didapatkan parameter PSS, kemudian nilai tersebut dimasukkan ke dalam program MATLAB. Selanjutnya adalah menganalisa hasil Simulink yang dijalankan.

### B. Pemodelan Non-linear Generator

Penelitian ini akan dilakukan pemodelan non-linear pada *Single Machine Infinite Bus (SMIB)* yang salah satunya adalah pemodelan generator. Pemodelan generator sangat diperlukan untuk menganalisis perubahan kecepatan rotor pada generator. Pemodelan non-linear PLTMH akan dibuat berdasarkan persamaan matematika non-linear yang terlihat pada persamaan 1 sampai persamaan 6 sebagai berikut [2]:

$$\dot{\delta} = \omega \quad (1)$$

$$\omega = \frac{1}{J} (T_m - T_e - D\omega) \quad (2)$$

$$e'q = \frac{1}{T'_{do}} (E_{FD} - e'q - (x_d - x'_d)i_d) \quad (3)$$

dengan

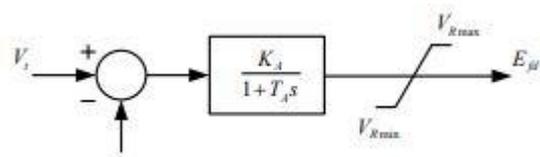
$$i_d = \frac{e'q - V \cos \delta}{x'_d} \quad (4)$$

$$i_q = \frac{V \sin \delta}{x_q} \quad (5)$$

$$T_e = P_e \cong \frac{V}{x'_d} e'q \sin(\delta) + \frac{V^2}{2} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x'_d} \right) \sin(2\delta) \quad (6)$$

### C. Pemodelan Sistem Eksitasi

Sistem eksitasi merupakan bagian sistem dengan eksiter yang dapat mengatur variable output generator, seperti tegangan, arus, dan faktor daya [5]. Sistem eksitasi pada generator merupakan salah satu komponen penting karena akan memberikan suplai arus DC untuk penguatan pada generator listrik. Gambar 2 berikut menunjukkan pemodelan sistem eksitasi yang digunakan dengan  $K_A$  sebagai parameter penguatan, dan  $T_A$  konstanta waktu.

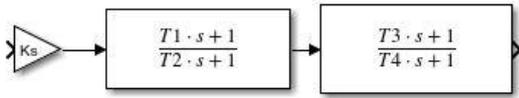


Gambar 2. Blok Diagram Sistem Eksitasi

### D. Pemodelan Power System Stabilizer (PSS)

PSS adalah peralatan yang dapat membuat sinyal control yang diumpan balikkan (*feedback*) pada sistem eksitasi. Input PSS adalah sinyal *error* yang berupa perubahan kecepatan rotor sedangkan output PSS adalah sinyal tegangan yang memiliki fungsi untuk sinyal control pada sistem eksitasi [6]. PSS

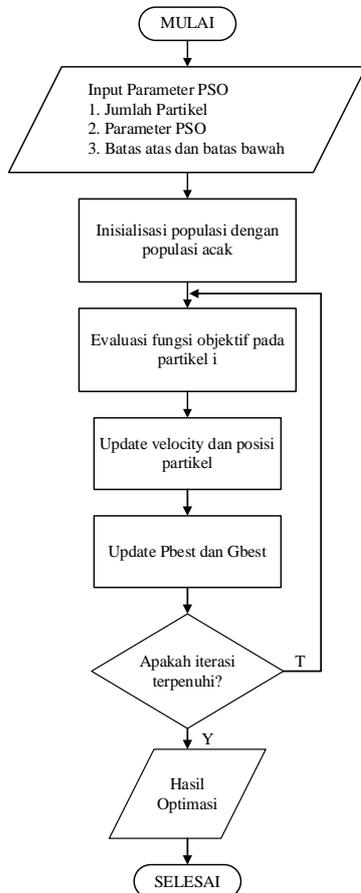
berfungsi untuk menambah batas kestabilan kerja eksitasi rotor generator sinkron [7]. Gambar 3 berikut adalah gambar model PSS konvensional yang digunakan.



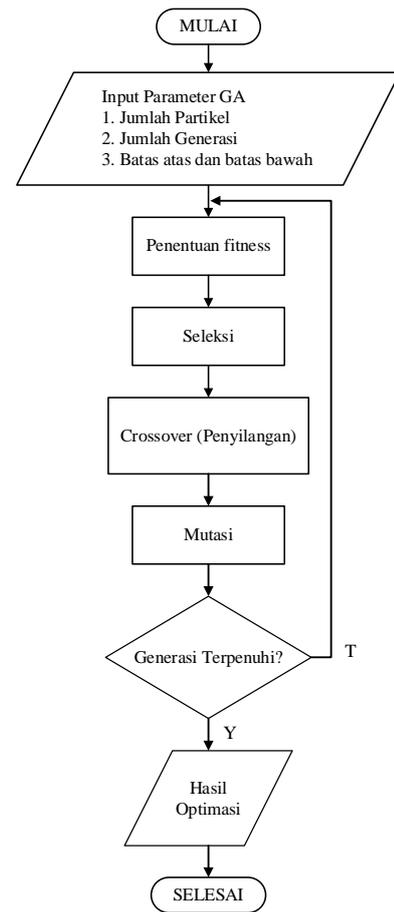
Gambar 3. Blok Diagram PSS

**E. Optimasi Power System Stabilizer (PSS) menggunakan Particle Swarm Optimization (PSO) dan Genetic Algorithm (GA)**

Metode optimasi yang digunakan pada penelitian ini adalah Particle Swarm Optimization (PSO) dan Genetic Algorithm (GA) untuk mendapatkan nilai  $K_s$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ , dan  $T_4$ . Nantinya hasil optimasi kedua algoritma akan dibandingkan dan dicari yang terbaik. Flowchart algoritma PSO dan GA dapat terlihat pada gambar 4 dan gambar 5 sebagai berikut:



Gambar 4. Diagram Alur Algoritma PSO



Gambar 5. Diagram Alur Algoritma GA

**F. Fungsi Tujuan**

Pada penelitian ini untuk mendapatkan hasil optimasi terbaik digunakan perhitungan *Integral of time multiplied by squared error* (ITSE) untuk menghitung nilai error dengan meminimalkan fungsi *fitness*. ITSE memiliki kriteria yaitu berfokus pada waktu penetapan oleh karena itu kriteria ini sering digunakan pada sistem yang membutuhkan waktu penetapan yang cepat. Persamaan ITSE ditunjukkan pada persamaan 5 berikut [8]:

$$ITSE = \int_0^{\infty} t\{e(t)\}^2 dt \tag{7}$$

Pada parameter PSS juga dilakukan pembatasan agar nilai tidak menyimpang jauh dari yang diinginkan sebagai berikut:

$$K_s^{min} \leq K_s \leq K_s^{max}$$

$$T_1^{min} \leq T_1 \leq T_1^{max}$$

$$T_2^{min} \leq T_2 \leq T_2^{max}$$

$$T_3^{min} \leq T_3 \leq T_3^{max}$$

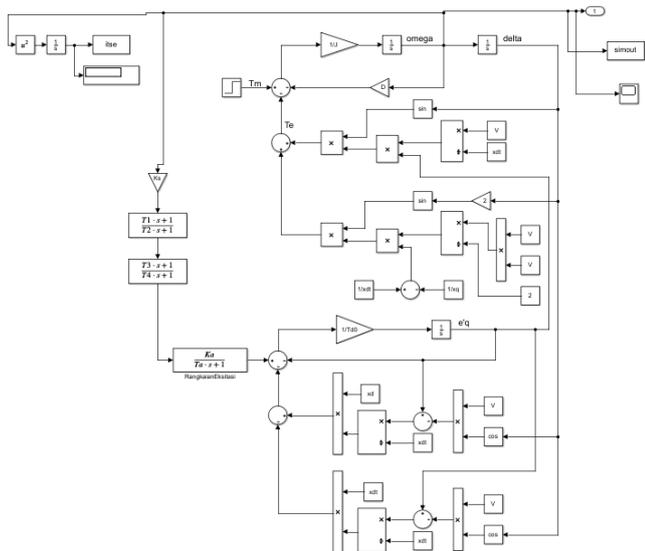
$$T_4^{min} \leq T_4 \leq T_4^{max}$$

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dibahas hasil dan analisis dari pengujian sistem berdasarkan pemodelan non-linear yang telah dibuat. Pengujian ini untuk mengetahui respon frekuensi pada model non-linear PLTMH tanpa PSS, PSS-PSO, dan PSS-GA.

A. Pemodelan Non-linear pada PLTMH

Dari persamaan non-linear generator yang terlihat pada persamaan 1 sampai persamaan 6 yang telah dijabarkan diatas maka dapat dibentuk model non-linear generator *Single Machine Infinite Bus* (SMIB). Pemodelan ini akan mengamati perubahan kecepatan putar rotor generator, nantinya perubahan ini akan dianggap sebagai sinyal *error* yang akan menjadi input untuk PSS untuk menghasilkan sinyal tambahan untuk eksitasi. Pemodelan dilakukan pada Simulink MATLAB 2017b dan model dapat terlihat seperti pada gambar 6.



Gambar 6. Model Non-linear Sistem Tenaga Listrik PLTMH UMM

Tabel 1. Parameter Generator PLTMH UMM (UC1274F)

| No | Parameter         | Nilai     |
|----|-------------------|-----------|
| 1  | Rating Daya (KVA) | 160       |
| 2  | Faktor Daya       | 0.8       |
| 3  | Frekuensi (Hz)    | 50        |
| 4  | Speed (RPM)       | 1500      |
| 5  | H                 | 4 detik   |
| 6  | $T_{do}'$         | 0.9 detik |
| 7  | $X_d'$            | 2.24      |
| 8  | $X_d''$           | 0.19      |
| 9  | $X_q$             | 1.38      |

Tabel 2. Sistem Eksitasi (SX460 AVR Standart)

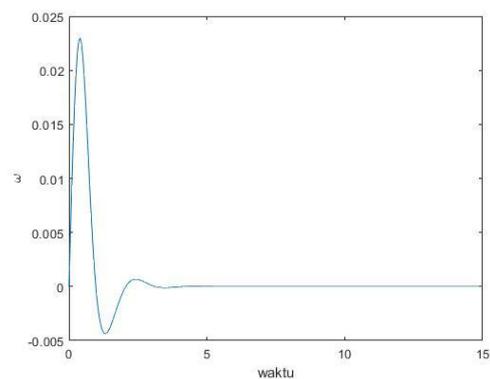
| No | Parameter | Nilai        |
|----|-----------|--------------|
| 1  | $K_A$     | 1/10/100/400 |
| 2  | $T_A$     | 0.004        |

Tabel 3. Saluran Transmisi

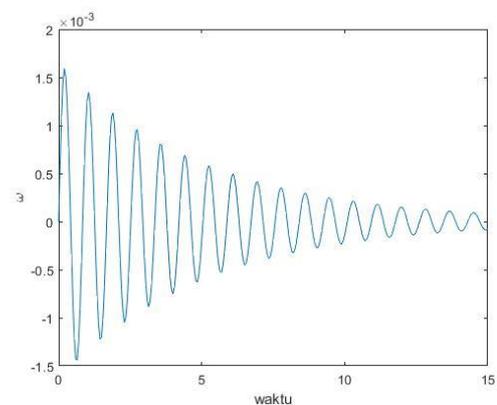
| No | Parameter | Nilai |
|----|-----------|-------|
| 1  | $X_e$     | 0.156 |
| 2  | $R_e$     | 0.176 |

B. Pengujian Model Non-linear PLTMH tanpa Penambahan PSS

Hasil pengujian pertama model non-linear generator dilakukan tanpa adanya penambahan *Power System Stabilizer* (PSS). Dapat dilihat bahwa model non-linear generator masih menghasilkan *overshoot* yang cukup tinggi dibandingkan dengan model linear, namun osilasi yang lebih kecil dan cepat dibandingkan dengan model linear sistem tenaga listrik. Penambahan PSS diharapkan dapat meredam osilasi. Hasil pengujian perbandingan model non-linear dan linear dapat terlihat pada gambar 7 dan gambar 8 berikut:



Gambar 7. Tanggapan perubahan kecepatan putar rotor generator pada model non-linear PLTMH UMM tanpa PSS

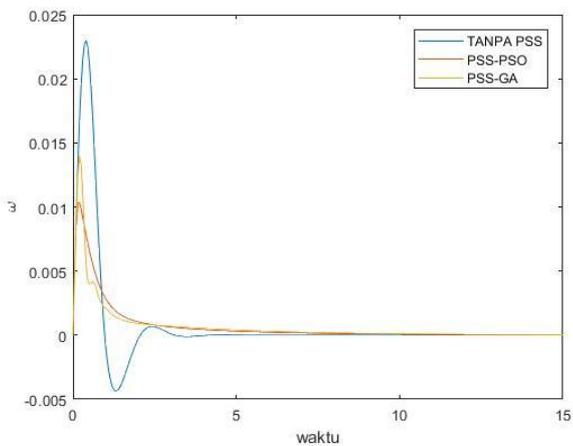


Gambar 8. Tanggapan perubahan kecepatan putar rotor generator pada model linear PLTMH UMM tanpa PSS

Pada Gambar 7 dapat dilihat dari hasil pengujian model non-linear PLTMH UMM tanpa menggunakan PSS diatas menghasilkan nilai *overshoot* yang masih tinggi yaitu sebesar 0.02298 pada detik ke 0.4 dengan *settling time* bernilai 13.55 detik dan pada Gambar 8 dapat dilihat dari hasil pengujian model linear PLTMH UMM tanpa menggunakan PSS diatas menghasilkan tanggapan yang beresilasi sinusoida walaupun memiliki nilai *overshoot* yang lebih kecil dari model non-linear yaitu sebesar 0.001636 pada detik ke 2 dan *settling time* 46 detik. Sehingga dapat dilihat bahwa model non-linear PLTMH lebih baik pada nilai *settling time*.

C. Pengujian Model Non-linear PLTMH dengan Penambahan PSS tertala PSO dan GA

Pengujiann berikutnya dilakukan dengan menambahkan *Power System Stabilizer* (PSS) pada model non-linear generator. Untuk mendapatkan parameter PSS yang optimal sehingga dilakukan optimasi menggunakan PSO dan GA yang kemudian hasilnya akan dibandingkan. Hasil simulasi perubahan kecepatan rotor generator pada keseluruhan model non-linear baik dengan penambahan *Power System Stabilizer* (PSS) ataupun tidak dengan penambahan PSS dapat terlihat seperti gambar 9 berikut:



Gambar 9. Hasil perbandingan Tanggapan perubahan kecepatan putar rotor generator pada model linear PLTMH UMM Tanpa PSS, PSS-PSO, dan PSS-GA.

Pada gambar 9 didapatkan didapatkan hasil tanggapan kecepatan putar rotor, dimana pada saat sistem tanpa menggunakan PSS menghasilkan *overshoot* yang besar yaitu 0.02298 sedangkan dengan menggunakan PSS tertala PSO menghasilkan *overshoot* yang lebih kecil yaitu sebesar 0.01036 dibandingkan PSS tertala GA yang menghasilkan nilai *overshoot* sebesar 0.01397. Setelah dilakukan optimasi menggunakan kedua metode, maka diperoleh parameter yang optimal pada PSS seperti terlihat pada tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan parameter PSS

| Optimasi | Ks     | T1    | T2    | T3     | T4    |
|----------|--------|-------|-------|--------|-------|
| PSO      | 20     | 1     | 0.01  | 0.2604 | 1     |
| GA       | 19.989 | 0.528 | 0.198 | 0.418  | 0.999 |

Dari kesimpulan hasil simulasi keseluruhan model non-linear dan melihat pada gambar 9 maka akan didapatkan nilai *overshoot* dan *settling time* masing-masing model seperti terlihat pada tabel 5 sebagai berikut:

Tabel 5. Perbandingan Resepon Overshoot dan Settling Time ada Kecepatan Putar Rotor Generator dengan PSS

| Model     | Overshoot | Settling Time |
|-----------|-----------|---------------|
| Tanpa PSS | 0.02298   | 13.55s        |
| PSS-PSO   | 0.01036   | 9.25s         |
| PSS-GA    | 0.01397   | 10.2s         |

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian pemodelan non-linear dan analisis PLTMH dapat disimpulkan bahwa pada hasil pengujian model non-linear PLTMH menghasilkan *overshoot* yang lebih besar daripada model linear PLTMH namun menghasilkan kecepatan putar rotor generator yang lebih baik dari segi *settling time* kemudian respon kecepatan putar rotor generator pada model non-linear menghasilkan *overshoot* yang lebih kecil dengan penambahan *Power System Stabilizer* (PSS).

Lampiran A. Daftar Simbol

- $\delta$  = Sudut rotor
- $\omega$  = Kecepatan rotor
- $T_m$  = Torsi mekanik
- $T_e$  = Torsi Elektrik
- J, D = Rotor Inersia dan Damping factor
- P, Q = Tegangan aktif dan tegangan pasif
- $e'q$  = Tegangan internal transien jangkar
- $T'_{do}$  = Konstanta waktu transien
- $I_d, I_q$  = Arus stator sumbu langsung dan quadrature
- V = Tegangan infinit bus
- $x_d$  = Reaktansi sumbu langsung
- $x'_d$  = Reaktansi transien sumbu langsung
- $x_q$  = Reaktansi sumbu quadrature

V. DAFTAR PUSTAKA

[1] I. Rachmawati, "Pemodelan Sistem Dinamik PLTMH Sengkaling Universitas Muhammadiyah Malang," Universitas Muhammadiyah Malang, 2014.

[2] M. Dehghani and S. K. Y. Nikraves, "Nonlinear state space model identification of synchronous generators," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 78, no. 5,

- 
- [3] pp. 926–940, 2008, doi: 10.1016/j.epsr.2007.07.001.  
A. A. Usman and R. A. Abdulkadir, “Modeling and Simulation of Micro Hydro Power Plant Using Matlab Simulink,” in *2nd International Conference on Science, Technology, and Management*, 2015, pp. 1121–1133.
- [4] E. A. Hakim and N. Kasan, “Model Linear Sistem Tenaga Listrik PLTMH UMM,” pp. 50–57, 2016.
- [5] M. R. Djalal, H. Nawir, S. Sonong, and M. Marhatang, “Desain Optimal Power Sistem Stabilizer Pada Unit Pembangkit Bakaru Berbasis Ant Colony Optimization,” *Transmisi*, vol. 21, no. 3, p. 70, 2019, doi: 10.14710/transmisi.21.3.70-78.
- [6] P. P. Surya and D. Irawan, “Kecerdasan Buatan Berbasis Particle Swarm Optimization, Ant Colony Optimization dan Firefly Algorithm Untuk Meredam Osilasi Gangguan Pada Sistem Pembangkit Listrik,” vol. 8, no. 3, pp. 200–205, 2017.
- [7] I. A. Permana, I. N. Suweden, W. A. Wijaya, J. T. Elektro, F. Teknik, and U. Udayana, “Analisis Penggunaan Power System Stabilizer ( PSS ) Dalam Perbaikan Stabilitas Transien Generator Sinkron,” vol. 2, no. 1, pp. 24–29, 2015.
- [8] A. Khuriati R.S., “Identifikasi dan Perancangan Pengendali PID Menggunakan Penduga ARX Sistem Pemanas Udara (Halaman 1 s.d. 5),” *J. Fis. Indones.*, vol. 17, no. 51, pp. 1–5, 2014, doi: 10.22146/jfi.24424.