

Matlab-Based Control Simulation For Increasing The Power Capacity Of Geothermal Power Plants

Simulasi Pengendalian Berbasis Matlab untuk Meningkatkan Kapasitas Daya Pembangkit Listrik Tenaga Geothermal

Parlin Siagian¹⁾; Hermansyah Alam²⁾; Randi Rian Putra³⁾; Munawar Sajali Tanjung⁴⁾

^{1,2,3,4)}Universitas Pembangunan Panca Budi Medan

²Email: ¹⁾ parlinsiagian@dosen.pancabudi.ac.id

How to Cite :

Siagian. P., Alam. H., Putra. R. R., Tanjung. M. S. (2025). Matlab-based Control Simulation for Increasing the Power Capacity of Geothermal Power Plants. Jurnal Media Computer Science, 4(1). Doi: <https://doi.org/10.37676/jmcs.v4i1>

ARTICLE HISTORY

Received [20 Desember 2024]

Revised [25 January 2025]

Accepted [30 January 2025]

KEYWORDS

Geothermal Power Plant (PLTP),
Renewable Energy, Mathematical
Model, PID Control, Matlab
Simulation.

This is an open access article under the
[CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license



ABSTRAK

Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) merupakan sumber energi terbarukan yang berpotensi besar untuk memenuhi kebutuhan listrik secara berkelanjutan dengan emisi karbon rendah. Penelitian ini bertujuan mengembangkan model matematis dan sistem kontrol berbasis Matlab untuk meningkatkan kapasitas daya PLTP. Model sistem meliputi dinamika reservoir, sumur produksi, turbin, dan generator dengan pengendalian menggunakan metode PID (Proportional-Integral-Derivative). Simulasi dilakukan untuk menguji respons sistem terhadap variasi beban listrik, temperatur reservoir, dan gangguan operasional. Hasil simulasi menunjukkan kontrol PID berhasil menjaga output daya listrik agar mendekati nilai referensi dengan respons yang cepat meskipun terdapat overshoot dan osilasi awal. Penyesuaian parameter PID direkomendasikan untuk mengurangi overshoot dan mempercepat stabilisasi output daya. Penelitian ini memberikan kontribusi dalam optimalisasi pengoperasian PLTP sehingga dapat meningkatkan efisiensi dan ketahanan energi nasional berbasis energi geothermal.

ABSTRACT

Geothermal Power Plant (PLTP) is a renewable energy source that has great potential to meet electricity needs in a sustainable manner with low carbon emissions. This research aims to develop mathematical models and Matlab-based control systems to increase the power capacity of geothermal power plants. The system model includes reservoir dynamics, production wells, turbines, and generators with control using the PID (Proportional-Integral-Derivative) method. Simulations were conducted to test the system response to variations in electrical load, reservoir temperature, and operational disturbances. The simulation results show that the PID control successfully maintains the electrical power output to be close to the reference value with a fast response despite the presence of overshoot and initial oscillation. Adjustment of PID parameters is recommended to reduce overshoot and accelerate stabilisation of power output. This research contributes to the optimisation of geothermal power plant operation so as to improve efficiency and national energy security based on geothermal energy.

PENDAHULUAN

Pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang sangat potensial untuk memenuhi kebutuhan listrik yang semakin meningkat secara global [1]. Energi panas bumi berasal dari panas alami dalam lapisan bumi yang dapat dimanfaatkan secara berkelanjutan untuk menghasilkan listrik dengan emisi gas rumah kaca yang jauh lebih rendah dibandingkan pembangkit berbasis bahan bakar fosil.

Panas bumi merupakan sumber energi yang tersedia terus menerus tanpa tergantung pada cuaca seperti energi surya atau angin [2]. Panas bumi (geothermal) merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki keunggulan utama, yaitu ketersediaannya yang kontinu dan tidak bergantung pada kondisi cuaca atau iklim. Berbeda dengan energi surya yang hanya dapat dimanfaatkan saat siang hari, atau energi angin yang bergantung pada kecepatan angin yang tidak selalu konsisten, sumber panas bumi menyediakan energi secara stabil sepanjang waktu [3]. Hal ini menjadikan pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) sebagai alternatif yang sangat menjanjikan dalam memenuhi kebutuhan listrik yang semakin meningkat, sekaligus mendukung upaya pengurangan emisi karbon dan transisi menuju energi bersih.

Melalui pemodelan yang akurat dan simulasi sistem pengendalian, diharapkan dapat diperoleh strategi optimal dalam mengatur variabel operasional seperti suhu, tekanan, dan aliran fluida panas bumi. Dengan demikian, pemanfaatan energi panas bumi tidak hanya ramah lingkungan tetapi juga ekonomis dan andal dalam jangka panjang

PLTP menghasilkan emisi gas rumah kaca yang sangat kecil, sehingga membantu mengurangi dampak perubahan iklim [4]. Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) dikenal sebagai salah satu sumber energi bersih yang menghasilkan emisi gas rumah kaca (GRK) jauh lebih rendah dibandingkan dengan pembangkit listrik konvensional berbasis bahan bakar fosil. Emisi GRK yang rendah ini membuat PLTP menjadi salah satu solusi strategis dalam upaya mitigasi perubahan iklim global. Dengan meningkatnya kesadaran dunia akan dampak buruk pemanasan global, pemanfaatan energi panas bumi sebagai sumber listrik terbarukan semakin mendesak untuk dikembangkan [5].

Oleh karena itu, penelitian mengenai pemodelan dan simulasi sistem pengendalian PLTP menggunakan tools seperti Matlab sangat penting. Pemodelan yang tepat akan membantu merancang strategi pengendalian yang dapat meningkatkan kapasitas daya, sekaligus menjaga kestabilan operasional dan keberlanjutan lingkungan [6]. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata dalam pengembangan teknologi pembangkit listrik yang ramah lingkungan dan ekonomis.

Pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) sebagai sumber energi domestik memiliki peranan strategis dalam mengurangi ketergantungan suatu negara pada impor bahan bakar fosil. Sebagai negara yang kaya akan sumber daya panas bumi, Indonesia memiliki potensi besar untuk mengembangkan PLTP sebagai alternatif utama dalam memenuhi kebutuhan listrik nasional secara mandiri dan berkelanjutan [7].

Pengembangan PLTP di Indonesia tidak hanya mampu menyediakan sumber energi yang ramah lingkungan, tetapi juga dapat mengurangi ketergantungan pada sumber energi fosil yang terbatas dan berkontribusi dalam pengurangan emisi gas rumah kaca [8]. Namun, untuk mewujudkan potensi tersebut secara optimal, diperlukan penelitian yang mendalam terkait pengelolaan dan pengendalian sistem pembangkit geothermal agar kapasitas daya listrik yang dihasilkan dapat ditingkatkan secara efisien dan stabil [9].

Dalam konteks ini, penggunaan metode pemodelan dan simulasi berbasis Matlab menjadi penting sebagai alat bantu untuk merancang sistem kontrol yang adaptif dan responsif terhadap perubahan kondisi reservoir panas bumi dan permintaan beban listrik [10]. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam meningkatkan performa PLTP sehingga pemanfaatan potensi geothermal di Indonesia dapat dioptimalkan demi mencapai ketahanan energi nasional dan keberlanjutan lingkungan.

Meskipun memiliki banyak keunggulan, PLTP menghadapi beberapa tantangan teknis dan operasional dalam mengoptimalkan kapasitas daya listrik yang dihasilkan, antara lain:

a. Variabilitas Sumber Panas

Temperatur dan tekanan reservoir panas bumi dapat berubah seiring waktu, mempengaruhi efisiensi dan output daya pembangkit.

b. Pengendalian Sistem Kompleks

Sistem pembangkit panas bumi terdiri dari berbagai komponen seperti sumur produksi, turbin, pompa, dan sistem kontrol yang harus diatur secara optimal agar kapasitas daya maksimal.

c. Kerusakan dan Penurunan Performa

Material dan peralatan dapat mengalami korosi dan scaling akibat sifat kimia cairan panas bumi, menyebabkan penurunan performa dan kapasitas.

d. Efisiensi Termal Terbatas

Efisiensi konversi panas menjadi listrik dipengaruhi oleh temperatur panas bumi (T) dan suhu lingkungan, sehingga memiliki batas yang rendah.

LANDASAN TEORI

Prinsip Dasar Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Geothermal

Energi geothermal adalah energi panas yang tersimpan di dalam bumi dan dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan. Panas bumi berasal dari aktivitas radioaktif di inti bumi serta panas sisa dari proses pembentukan bumi yang tersimpan dalam bentuk reservoir panas di bawah permukaan tanah [11]. Energi ini dapat digunakan langsung untuk pemanasan atau dikonversi menjadi energi listrik melalui pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP).

Pemanfaatan energi geothermal untuk pembangkit listrik melibatkan ekstraksi uap atau fluida panas dari reservoir bawah tanah yang kemudian digunakan untuk menggerakkan turbin dan generator listrik [12]. Sistem geothermal memiliki keunggulan berupa kontinuitas pasokan energi yang stabil, berbeda dengan energi terbarukan lain yang bersifat intermitten (seperti surya dan angin).

Komponen Utama Sistem Geothermal

Sistem pembangkit listrik tenaga panas bumi terdiri dari beberapa komponen utama yang saling berintegrasi, antara lain:[11][13]

a. Sumur Produksi (Production Well)

Sumur ini berfungsi untuk mengambil fluida panas bumi (air panas atau uap) dari reservoir bawah tanah ke permukaan.

b. Separator

Komponen ini memisahkan uap dari cairan panas bumi yang keluar dari sumur produksi. Uap yang terpisah kemudian diarahkan ke turbin.

c. Turbin

Turbin berfungsi mengubah energi kinetik uap panas bumi menjadi energi mekanik dengan memutar poros turbin.

d. Generator

Generator mengubah energi mekanik dari turbin menjadi energi listrik yang dapat disalurkan ke jaringan listrik.

e. Condenser

Setelah melewati turbin, uap yang sudah mengalami ekspansi didinginkan dan dikondensasikan kembali menjadi cairan.

f. Sumur Injeksi (Injection Well)

Cairan hasil kondensasi dialirkan kembali ke dalam reservoir melalui sumur injeksi untuk menjaga tekanan reservoir dan keberlanjutan sumber panas.

g. Sistem Kontrol dan Monitoring

Sistem ini mengatur operasi keseluruhan pembangkit, mulai dari pengaturan aliran fluida, suhu, tekanan, hingga keamanan sistem agar beroperasi secara optimal dan aman.

h. Dengan memahami konsep dasar dan komponen utama tersebut, pengembangan model pengendalian sistem geothermal dapat dirancang dengan tepat untuk mengoptimalkan kinerja pembangkit listrik tenaga panas bumi.

Pengendalian Sistem dalam Pembangkit Geothermal

Pengendalian sistem pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) sangat penting untuk menjaga kestabilan operasi, mengoptimalkan keluaran daya, serta memperpanjang umur reservoir panas bumi. Beberapa metode kontrol yang umum diterapkan dalam PLTP meliputi:[14]

a) Kontrol PID (Proportional-Integral-Derivative)

Metode kontrol PID adalah yang paling umum digunakan dalam sistem pengendalian industri, termasuk pada PLTP. Kontrol PID mengatur variabel proses seperti tekanan, suhu, dan aliran fluida dengan cara mengkombinasikan tiga aksi kontrol: proporsional, integral, dan derivatif.

b) Kontrol proporsional (P) merespon kesalahan saat ini secara langsung.

c) Kontrol integral (I) mengeliminasi kesalahan steady-state dengan memperhitungkan akumulasi kesalahan masa lalu.

d) Kontrol derivatif (D) merespon perubahan laju kesalahan untuk mengantisipasi perilaku sistem.

e) Pengaturan parameter PID secara optimal dapat menghasilkan respon sistem yang stabil dan cepat.

Penelitian mengenai pemodelan dan pengendalian pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) telah banyak dilakukan untuk meningkatkan efisiensi dan kapasitas daya. Berbagai pendekatan modeling dan teknik kontrol telah diterapkan untuk mengoptimalkan operasi sistem geothermal dalam kondisi dinamis dan lingkungan yang kompleks.

Beberapa studi menggunakan model matematis yang mengintegrasikan aspek termodinamika, hidrodinamika, dan mekanika fluida untuk menggambarkan perilaku reservoir dan sistem permukaan. Misalnya, penelitian dalam [16] menjelaskan model termodinamika PLTP yang komprehensif untuk analisis performa pembangkit panas bumi. Selain itu, pada penelitian [17], [18] mengembangkan model simulasi dinamis reservoir panas bumi menggunakan perangkat lunak Matlab/Simulink untuk memprediksi output energi dan perilaku tekanan reservoir secara real-time.

Dalam aspek kontrol, metode seperti PID, kontrol fuzzy, dan Model Predictive Control (MPC) telah diaplikasikan untuk mengatur variabel operasi seperti aliran fluida, tekanan, dan temperatur guna mempertahankan stabilitas daya keluaran. Sebagai contoh, studi oleh [19] mengimplementasikan kontrol PID adaptif untuk menjaga kestabilan output daya pada PLTP, menghasilkan peningkatan efisiensi hingga 10%. Sementara itu, [20] menggunakan pendekatan fuzzy logic untuk mengatasi ketidakpastian dalam parameter reservoir dan menghasilkan kontrol daya yang lebih responsif terhadap perubahan beban. Penelitian terbaru cenderung mengintegrasikan pemodelan dinamis dengan algoritma kontrol canggih untuk menciptakan sistem pengendalian otomatis yang optimal. Misalnya, penelitian oleh [21], [22] menggunakan simulasi Matlab/Simulink untuk mengembangkan sistem kontrol prediktif yang dapat menyesuaikan operasi PLTP secara adaptif berdasarkan data reservoir dan permintaan energi.

METODE PENELITIAN

Metodologi penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan menguji model matematis serta sistem kontrol untuk pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) menggunakan perangkat lunak Matlab. Sistem kontrol ini dirancang untuk mengatur variabel operasional seperti aliran fluida, tekanan, dan temperatur reservoir guna meningkatkan kapasitas daya pembangkit. Penelitian ini

melibatkan pembuatan model sistem pembangkit geothermal, implementasi algoritma kontrol PID, dan analisis performa sistem dalam berbagai kondisi operasional, seperti perubahan beban listrik, variasi temperatur reservoir, dan gangguan sistem.

Tahapan Penelitian

Desain Sistem Geothermal

Pada tahap ini, model pembangkit listrik tenaga panas bumi akan dibangun dengan memperhatikan komponen utama sistem geothermal, yaitu:

Reservoir Panas Bumi sebagai sumber energi termal.

1. Sumur Produksi untuk ekstraksi fluida panas bumi.
2. Turbin dan Generator untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik.
3. Sumur Injeksi untuk mengembalikan cairan ke reservoir.
4. Sistem Kontrol untuk mengatur aliran fluida, tekanan, dan temperatur agar daya listrik yang dihasilkan optimal.

Simulasi ini dilakukan menggunakan Simulink di Matlab untuk menggambarkan interaksi antar komponen serta dinamika sistem.

Model Matematis

Model matematis sistem PLTP dibangun dengan menggunakan persamaan diferensial yang menggambarkan aliran fluida, konversi energi, serta dinamika turbin. Persamaan yang digunakan meliputi:

1. Persamaan kontinuitas untuk aliran fluida.
2. Persamaan energi untuk aliran panas dan konversi energi termal menjadi energi listrik.
3. Model dinamis turbin untuk menggambarkan respon kecepatan turbin terhadap variasi beban.

Model ini dirancang untuk dapat mensimulasikan perubahan daya listrik yang dihasilkan terhadap variasi temperatur reservoir dan beban.

Desain Kontrol Sistem

Sistem kontrol yang diterapkan untuk meningkatkan kapasitas daya adalah kontrol PID. Proses desain kontrol PID melibatkan:

1. Penentuan parameter K_p , K_i , dan K_d untuk mendapatkan respons sistem yang stabil dan cepat.
2. Pengaturan kontrol PID untuk mengatur variabel operasional, seperti aliran fluida, tekanan, dan temperatur reservoir, dengan tujuan mempertahankan daya listrik yang dihasilkan tetap optimal.
3. Penyesuaian parameter kontrol berdasarkan hasil simulasi untuk memperbaiki overshoot, waktu respons, dan efisiensi daya.

Simulasi Sistem Geothermal

Simulasi sistem geothermal dilakukan dalam beberapa skenario untuk menguji kinerja sistem dalam berbagai kondisi:

1. Perubahan Beban Listrik: Beban listrik yang berubah-ubah akan diuji untuk melihat seberapa baik kontrol PID dapat menyesuaikan output daya agar tetap stabil.
2. Variasi Temperatur Reservoir: Temperatur reservoir yang mengalami perubahan akan diuji untuk melihat dampaknya terhadap daya yang dihasilkan serta efektivitas kontrol PID dalam menyesuaikan operasi.
3. Gangguan Sistem: Gangguan pada sistem seperti perubahan tekanan atau penurunan efisiensi turbin akan diuji untuk mengevaluasi ketahanan sistem terhadap gangguan.

Simulasi dilakukan dengan membandingkan hasil yang diperoleh dengan data referensi atau literatur untuk validasi model.

Evaluasi Performa Sistem

Performa sistem dievaluasi berdasarkan beberapa parameter utama:

1. Waktu Respons: Waktu yang dibutuhkan sistem untuk mencapai nilai steady-state setelah perubahan beban atau gangguan.
2. Overshoot: Persentase perbedaan antara output daya maksimum yang tercapai dan daya referensi.
3. Efisiensi Daya: Rasio antara daya yang dihasilkan dan daya yang optimal atau target.
4. Analisis Sensitivitas: Pengaruh variasi parameter kontrol (seperti K_p , K_i , K_d) terhadap performa sistem, termasuk overshoot dan efisiensi daya.

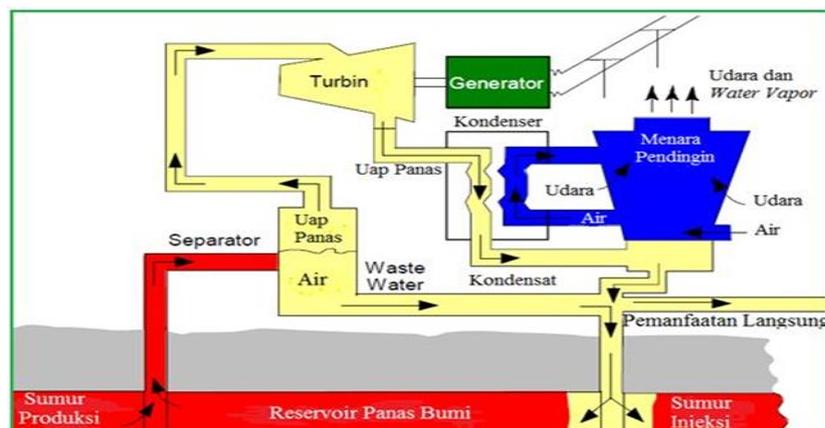
Optimasi Parameter Kontrol

Optimasi dilakukan untuk menemukan kombinasi parameter kontrol PID yang memberikan hasil terbaik dalam mengatur daya listrik. Proses optimasi ini melibatkan uji sensitivitas terhadap parameter PID untuk mencari nilai terbaik yang meminimalkan overshoot dan waktu respons. Penggunaan algoritma optimasi seperti *fminsearch* atau genetic algorithm (GA) untuk menemukan nilai optimal parameter kontrol.

- Desain Sistem

Gambaran skematik sistem geothermal yang akan dimodelkan.: Gambaran Skematik Sistem Geothermal yang Dimodelkan

- Sistem pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) yang akan dimodelkan biasanya terdiri dari beberapa komponen utama yang berinteraksi dalam suatu siklus tertutup. Skematik sederhana dari sistem geothermal tersebut dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 1. Siklus geothermal

Penjelasan Komponen Skematik:

1. Reservoir Panas Bumi
Sumber panas alami di dalam bumi yang menyediakan fluida panas (campuran uap dan air panas) melalui sumur produksi.
2. Sumur Produksi
Befungsi mengekstraksi fluida panas bumi dari reservoir ke permukaan untuk diproses lebih lanjut.
3. Separator
Memisahkan uap dari cairan panas bumi. Uap yang dihasilkan dialirkan menuju turbin, sedangkan cairan dialirkan kembali ke reservoir.
4. Turbin
Mengubah energi kinetik uap menjadi energi mekanik dengan memutar rotor turbin.
5. Generator Listrik
Mengkonversi energi mekanik dari turbin menjadi energi listrik.

6. Sumur Injeksi

Mengalirkan kembali cairan panas bumi yang sudah didinginkan ke reservoir untuk menjaga tekanan dan keberlanjutan sumber panas bumi.

Pengembangan Model

Proses pembuatan model matematis dan kontrol sistem geothermal menggunakan Matlab:

Pendefinisian Sistem dan Parameter

1. Langkah awal dalam pembuatan model sistem geothermal adalah mendefinisikan ruang lingkup sistem dan parameter utama yang mempengaruhi proses. Parameter ini meliputi:
2. Temperatur dan tekanan reservoir
3. Laju aliran massa fluida panas bumi
4. Kapasitas panas spesifik fluida
5. Efisiensi komponen seperti turbin dan generator
6. Karakteristik termodinamika fluida (air, uap)
7. Informasi ini menjadi dasar untuk menyusun persamaan matematis yang merepresentasikan dinamika sistem.

Formulasi Model Matematis

Model matematis terdiri dari persamaan diferensial dan aljabar yang menggambarkan perubahan variabel utama sistem dari waktu ke waktu, seperti:

$$\begin{aligned}dM/dt &= m'_{in} - m'_{out} \\ dE/dt &= Q'_{in} - Q'_{out} + W' \\ J d\omega/dt &= T_m - T_{load}\end{aligned}$$

Dimana:

M= massa fluida

m = laju aliran fluida

E=energi dalam sistem

Q = laju perpindahan panas

W = daya mekanik

J = momen inersia turbin

ω = kecepatan sudut turbin

T_m, T_{load} = torsi motor dan beban

Persamaan kontinuitas massa untuk fluida panas bumi:

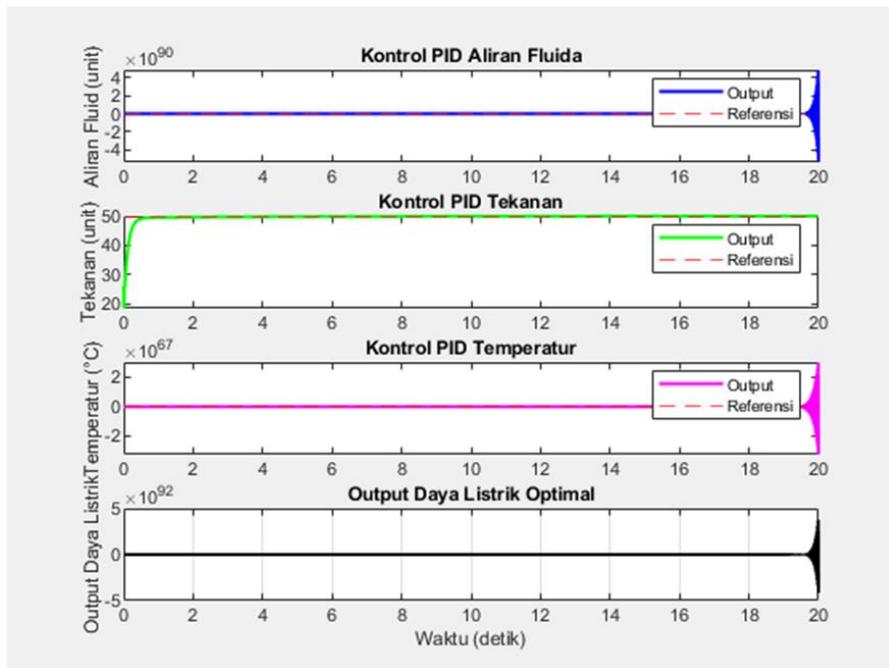
Persamaan ini disusun sedemikian rupa agar dapat diimplementasikan secara numerik dalam Matlab.

Implementasi Model di Matlab/Simulink

Simulink digunakan untuk membangun diagram blok yang merepresentasikan persamaan matematis tersebut. Komponen seperti integrator, gain, sumber sinyal, dan blok persamaan khusus digunakan untuk mensimulasikan perilaku sistem secara dinamis. Parameter dan kondisi awal dimasukkan sebagai variabel input agar model dapat diuji dengan berbagai skenario.

Perancangan Sistem Kontrol

Sistem kontrol dirancang untuk mengatur variabel operasional, seperti aliran fluida, tekanan, dan temperatur agar output daya listrik optimal. Kontrol PID sering diterapkan dengan tuning parameter proporsional, integral, dan derivatif menggunakan toolbox Matlab. Alternatif lain seperti kontrol fuzzy atau MPC juga dapat diimplementasikan untuk menangani nonlinearitas dan ketidakpastian.



Gambar 2. Kontrol PID Pada Geothermal Plant

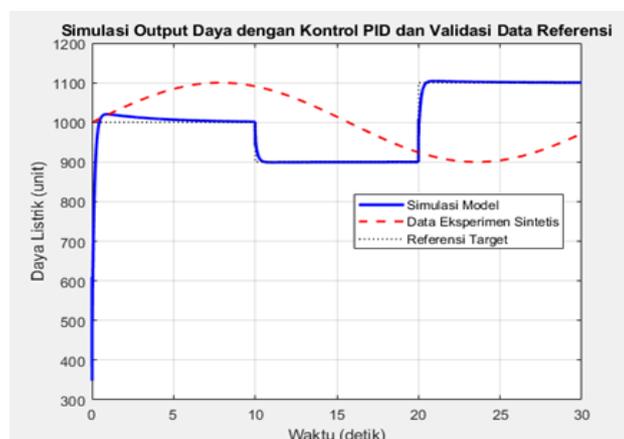
Simulasi dan Validasi

Model diuji dengan menjalankan simulasi dalam berbagai kondisi operasi, seperti perubahan beban listrik, variasi temperatur reservoir, dan gangguan sistem. Hasil simulasi dibandingkan dengan data eksperimen atau literatur untuk validasi model. Parameter kontrol disesuaikan berdasarkan hasil simulasi untuk mendapatkan respon sistem yang stabil dan optimal.

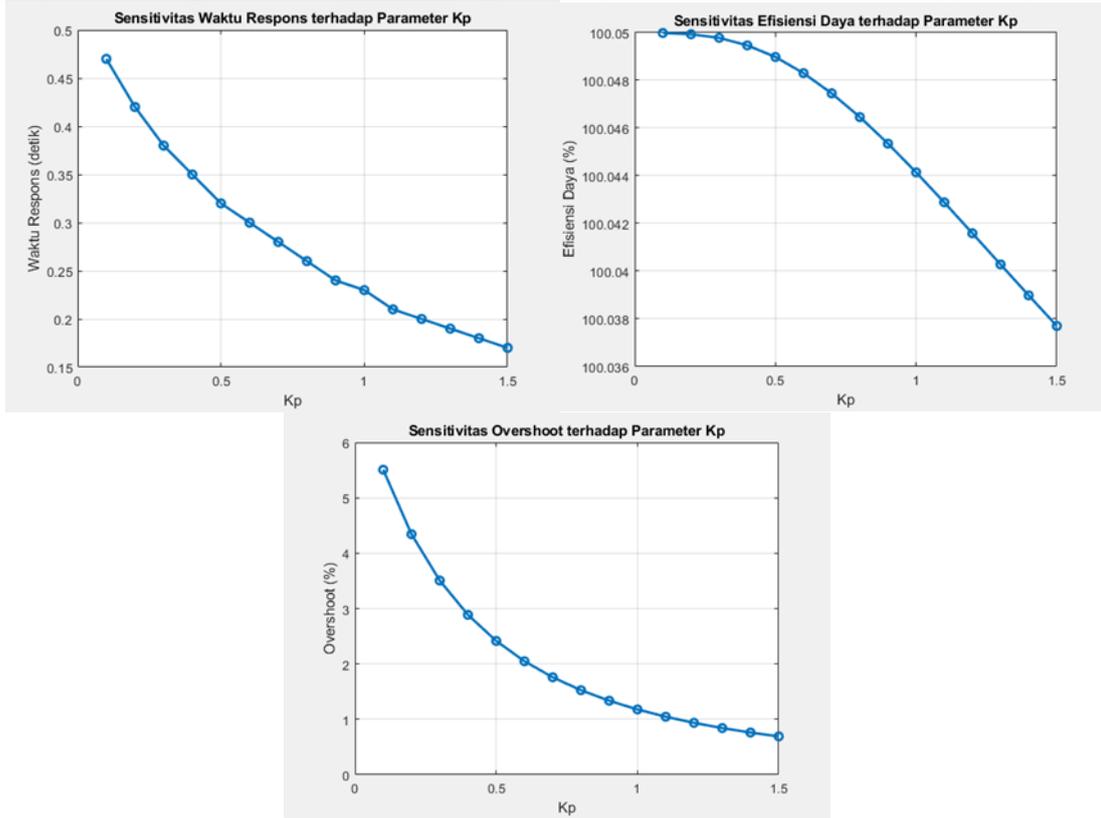
Control PID berhasil menjaga output daya mengikuti perubahan target secara cukup baik, meskipun ada perbedaan dengan data eksperimen sintesis yang menunjukkan fluktuasi lebih besar. Ada respons cepat pada perubahan target di detik ke-10 dan ke-20, walaupun terjadi overshoot dan undershoot. Grafik menunjukkan validasi simulasi model dengan data referensi target, tetapi data eksperimen sintesis memiliki variasi yang lebih tinggi.

Analisis dan Optimasi

Setelah model dan kontrol terimplementasi, analisis dilakukan untuk mengevaluasi performa sistem, seperti waktu respons, overshoot, dan efisiensi daya. Matlab mendukung analisis sensitivitas dan optimasi parameter untuk meningkatkan performa sistem secara keseluruhan.



Gambar 3. Daya Output Karena Kontrol PID

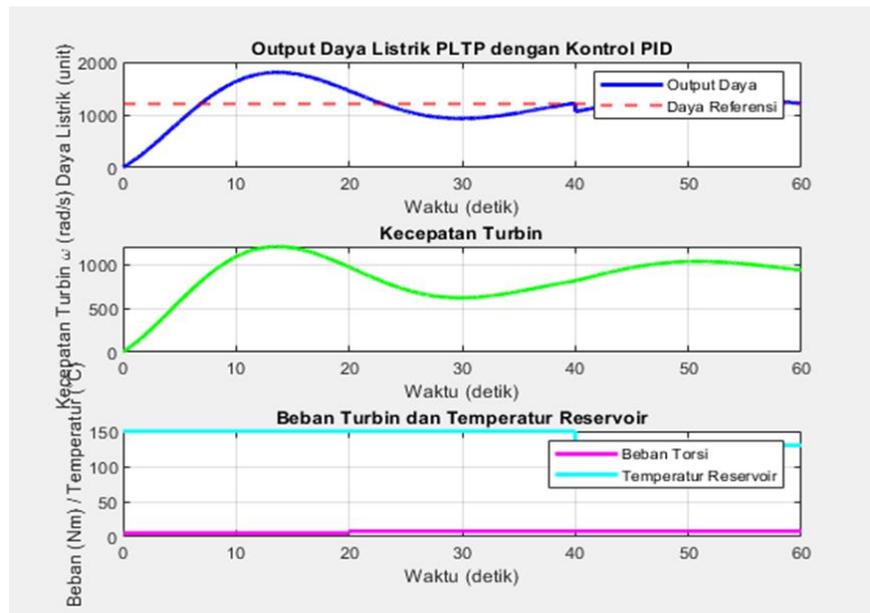


Gambar 4. Grafik Respon Parameter Kontrol Kp Terhadap Keluaran

Dengan pendekatan ini, model matematis yang akurat dan sistem kontrol yang efektif dapat dikembangkan menggunakan Matlab/Simulink, sehingga mampu meningkatkan efisiensi dan kapasitas pembangkit listrik tenaga panas bumi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil



Gambar 5. Grafik Kontrol Pembangkit Geothermal

Analisis Pengendalian

Evaluasi performa sistem sebelum dan sesudah penerapan kontrol Matlab.

Diskusi

Kesimpulan Umum:

- Sistem PLTP dengan kontrol PID berhasil mengatur output daya listrik agar mendekati daya referensi meskipun terdapat overshoot dan osilasi awal.
- Dinamika kecepatan turbin sejalan dengan perubahan output daya, menunjukkan interaksi antara kontrol listrik dan mekanik.
- Beban torsi dan temperatur reservoir yang stabil menandakan bahwa faktor mekanik dan termal tidak menjadi variabel yang berubah signifikan dalam simulasi ini, sehingga fokus kontrol terpusat pada pengaturan daya dan kecepatan turbin.
- Kendala dan Solusi

Berikut rekomendasi penyempurnaan parameter PID agar sistem output daya PLTP:

Tujuan penyempurnaan:

- Mengurangi overshoot (output daya terlalu tinggi di awal)
- Mempercepat waktu settling time (waktu hingga output stabil mendekati referensi)
- Mengurangi osilasi (output jadi lebih stabil)

Rekomendasi Penyesuaian Parameter PID

Parameter	Fungsi	Rekomendasi Perubahan	Alasan
Kp (Proporsional)	Mengatur respons langsung terhadap error	Turunkan sedikit, misal dari 0.6 jadi 0.4-0.5	Kp besar sering menyebabkan overshoot tinggi
Ki (Integral)	Mengeliminasi error steady-state	Tetap atau sedikit diturunkan, misal dari 0.3 jadi 0.2-0.25	Ki terlalu besar bisa memicu osilasi dan integrator windup
Kd (Derivative)	Meredam perubahan error (mengurangi osilasi)	Naikkan dari 0.05 jadi 0.08-0.1	Kd lebih besar membantu meredam overshoot dan osilasi

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengembangkan model matematis dan sistem kontrol berbasis Matlab untuk pembangkit listrik tenaga panas bumi. Sistem kontrol PID yang diterapkan mampu mengatur output daya listrik mendekati daya referensi secara efektif dengan respons dinamis yang baik. Meskipun terjadi overshoot dan osilasi pada awal simulasi, penyesuaian parameter PID seperti penurunan Kp dan Ki serta peningkatan Kd dapat meningkatkan stabilitas dan mengurangi fluktuasi output daya.

Dinamika kecepatan turbin mengikuti perubahan output daya, sementara beban torsi dan temperatur reservoir tetap stabil selama simulasi. Dengan demikian, pengendalian sistem PLTP menggunakan metode PID terbukti efektif dalam meningkatkan kapasitas daya dan menjaga kestabilan operasi pembangkit panas bumi. Rekomendasi penyempurnaan parameter kontrol diharapkan dapat diaplikasikan untuk optimasi lebih lanjut dalam pengoperasian PLTP secara nyata.

DAFTAR PUSTAKA

- L. Faridah, M. A. Risnandar, and R. Nurdiansyah, "Analysis of Renewable Energy Potential for Sustainable Tourism Development in Cipanas Galunggung Geothermal Area , Tasikmalaya Regency , Indonesia," vol. 7, no. 2, pp. 109–114.
- C. M. Nkinyam, C. O. Ujah, C. O. Asadu, and D. V. V. Kallon, "Exploring geothermal energy as a sustainable source of energy: A systemic review," *Unconv. Resour.*, vol. 6, no. July 2024, p. 100149, 2025, doi: 10.1016/j.uncred.2025.100149.
- S. Asiaban et al., *Wind and solar intermittency and the associated integration challenges: A comprehensive review including the status in the belgian power system*, vol. 14, no. 9. 2021. doi: 10.3390/en14092630.
- M. O'Sullivan, M. Gravatt, J. Popineau, J. O'Sullivan, W. Mannington, and J. McDowell, "Carbon Dioxide Emissions from Geothermal Power Plants," *Renew. Energy*, vol. 175, May 2021, doi: 10.1016/j.renene.2021.05.021.
- P. Siagian, "Wind {Resource} for {Electrical} {Energy} of {Tourism} and {Micro} {Small} and {Medium} {Enterprises} ({MSMEs}) in {Coastal} {Areas} {After} the {COVID}-19 {Pandemic}," *Adpebi Int. J. Multidiscip. Sci.*, vol. 1, no. 1, pp. 175–186, 2022, [Online]. Available: <https://journal.adpebi.com/index.php/AIJMS/article/view/272>
- P. Siagian, "Pembangkit Geothermal."
- P. Siagian, Hamdani, and M. E. Dalimunthe, "Application of Savonius Type Turbine Technology for the Conversion of Low Speed Wind Into Small Electrical Energy Source," *J. Appl. Eng. Technol. Sci.*, vol. 3, no. 2, pp. 190–197, 2022, doi: 10.37385/jaets.v3i2.813.
- P. Siagian, H. Alam, R. R. Putra, and M. M. S. Tanjung, "Matlab-Based Modeling and Simulation of Temperature and Pressure Parameter Settings for Geothermal Power Plants," *Instal J. Komput.*, vol. 16, no. 3, pp. 314–321, 2024.
- Hamdani, Z. Tharo, and S. Anisah, "Perbandingan Performansi Pembangkit Listrik Tenaga Surya Antara Daerah Pegunungan Dengan Daerah Pesisir," *Semnastek Uisu*, pp. 189–193, 2019.
- R. A. Frasasti, P. Siagian, and H. Alam, "Desain Energy Storage System Untuk Terminal Charging Kendaraan Listrik Berdasarkan Intensitas Cahaya Matahari Sepanjang Hari," vol. IX, no. 2, pp. 8798–8804, 2024.
- T. Sharmin, N. R. Khan, M. S. Akram, and M. M. Ehsan, "A State-of-the-Art Review on Geothermal Energy Extraction, Utilization, and Improvement Strategies: Conventional, Hybridized, and Enhanced Geothermal Systems," *Int. J. Thermofluids*, vol. 18, no. March 2023, p. 100323, 2023, doi: 10.1016/j.ijft.2023.100323.
- V. Khare, C. Khare, S. Nema, and P. Baredar, "Chapter 1 - Introduction to Energy Sources," V. Khare, C. Khare, S. Nema, and P. B. T.-T. E. S. Baredar, Eds., Elsevier, 2019, pp. 1–39. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814881-5.00001-6>.
- M. J. Barasa Kabeyi and O. A. Olanrewaju, "Geothermal wellhead technology power plants in grid electricity generation: A review," *Energy Strateg. Rev.*, vol. 39, p. 100735, 2022, doi: 10.1016/j.esr.2021.100735.
- S. Aryza, M. Irwanto, Z. Lubis, A. P. U. Siahaan, R. Rahim, and M. Furqan, "A Novelty Design of Minimization of Electrical Losses in A Vector Controlled Induction Machine Drive," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 300, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/300/1/012067.
- Z. Tharo, E. Syahputra, and R. Mulyadi, "Analysis of Saving Electrical Load Costs With a Hybrid Source of Pln-Plts 500 Wp," *J. Appl. Eng. Technol. Sci.*, vol. 4, no. 1, pp. 235–243, 2022, doi: 10.37385/jaets.v4i1.1024.
- A. F. Altun and M. Kilic, "Thermodynamic performance evaluation of a geothermal ORC power plant," *Renew. Energy*, vol. 148, pp. 261–274, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.034>.
- J. Kullick and C. M. Hackl, "Dynamic modeling and simulation of deep geothermal electric submersible pumping systems," *Energies*, vol. 10, no. 10, 2017, doi: 10.3390/en10101659.

- C. R. Costea, S. Dale, D. Zmaranda, and H. Silaghi, "MATLAB-SIMULINK modeling for the Well Station of a Geothermal power Plant," 2017 14th Int. Conf. Eng. Mod. Electr. Syst. EMES 2017, no. June 2018, pp. 172–175, 2017, doi: 10.1109/EMES.2017.7980407.
- Based on AMESim and PSO-Optimized Fuzzy-PID," pp. 1–23, 2025.
- M. Khalil and S. A. Sheikh, "Advancing Green Energy Integration in Power Systems for Enhanced Sustainability: A Review," IEEE Access, vol. 12, no. September, pp. 151669–151692, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3472843.
- M. F. Belazreg, K. Halbaoui, M. H. Boulheouchat, and D. Boukhetala, "Modelling, simulation and control of hybrid system integrating logic, dynamics, and constraints using hybrid automaton, APROS and mixed integer quadratic optimization algorithm," Proc. 2016 8th Int. Conf. Model. Identif. Control. ICMIC 2016, no. November, pp. 634–642, 2017, doi: 10.1109/ICMIC.2016.7804189.
- H. H. Tang and N. S. Ahmad, "Fuzzy logic approach for controlling uncertain and nonlinear systems: a comprehensive review of applications and advances," Syst. Sci. Control Eng., vol. 12, no. 1, 2024, doi: 10.1080/21642583.2024.2394429.