

Perancangan Sistem Kontrol Tekanan Pada Reaktor Biogas Berbasis PID *Controller* dengan Ziegler-Nichols dan *Auto Tuning* PSO

Design of a Pressure Control System in Biogas Reactor Based on PID Controller with Ziegler-Nichols and Auto Tuning PSO

^{1,2,3}Arief Abdurrahman*), ¹Lilik Sutiarto, ¹Makhmudun Ainuri, ¹Mirwan Ushada, ³Md Parvez Islam

¹Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta 55281, Indonesia

²Departemen Teknik Instrumentasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya 60111, Indonesia

³Faculty of Agriculture, Ehime University, Matsuyama, Japan

*) *corresponding email: ariefabdurrahman@mail.ugm.ac.id*

Abstrak

Biogas merupakan sumber energi ramah lingkungan yang membantu mengurangi emisi gas rumah kaca dengan menghasilkan metana dari limbah organik atau biomassa. Namun, kualitas biogas sangat ditentukan oleh kandungan metana dan variabel tekanan yang mempengaruhi efisiensi dan keselamatan produksi biogas. Studi ini bertujuan untuk merancang sistem kontrol tekanan dan *monitoring* kadar gas metana pada reaktor biogas berbasis PID *Controller* dengan *Particle Swarm Optimization* (PSO). Pengujian dilakukan pada *plant* reaktor biogas tipe *fixed dome* di wilayah Jawa Timur, Indonesia. *Tuning* PID berbasis PSO ini akan dibandingkan hasilnya dengan dua metode *tuning* PID lainnya, yaitu *Trial-error* dan Ziegler-Nichols (ZN). Data nilai tekanan dan laju aliran biogas dari *plant* reaktor biogas dikumpulkan dan dilakukan pemodelan sistem sehingga menghasilkan fungsi transfer sistem. Selanjutnya dilakukan pengembangan algoritma PSO untuk optimasi parameter kontrol PID. Hasil studi ini menunjukkan bahwa metode *tuning* PID menggunakan PSO menghasilkan nilai *error steady state* sebesar 1.40%, *rise time* sebesar 0.09 s, *settling time* sebesar 2.1 s, *maximum overshoot* sebesar 0.986404, serta ITAE sebesar 0.0010801. Implementasi PID-PSO dapat meningkatkan performansi kontrol PID pada *rise time*, *settling time*, *maximum overshoot* dan ITAE dibandingkan *Trial-Error* dan ZN, sedangkan nilai *error steady state* pada *tuning* PID-PSO lebih tinggi daripada *tuning* menggunakan *Trial-Error* dan ZN.

Kata Kunci: PID Controller, Particle Swarm Optimization (PSO), kontrol tekanan, reaktor biogas.

Abstract

Biogas, an eco-friendly energy source, significantly reduces greenhouse gas emissions by converting organic waste or biomass into methane. However, the quality of biogas, primarily determined by methane content and pressure variables, directly impacts its efficiency and safety. This study, which aims to design a pressure control system and monitor methane gas levels in a biogas reactor using a PID Controller with Particle Swarm Optimization (PSO), provides crucial insights into improving biogas production efficiency and safety. Tests were conducted on a fixed dome-type biogas reactor in the East Java region, Indonesia. The PSO-based PID tuning was compared with two other PID tuning methods: Trial-error and Ziegler-Nichols (ZN). Data on pressure values and biogas flow rates from the biogas reactor were collected, and system modeling was carried out to produce a system transfer function. The PSO algorithm was developed to optimize PID control parameters. The results of this research demonstrate that the PID tuning method using PSO produces a stable state error value of 1.40%, rise time of 0.09 s, settling time of 2.1 s, maximum overshoot of 0.986404, and ITAE of 0.0010801. The implementation of PID-PSO can significantly enhance PID control performance in rise time, settling time, maximum overshoot, and ITAE compared to Trial-Error and ZN, while the stable state error value in PID-PSO tuning is higher than tuning using Trial-Error and ZN.

Keywords: PID Controller, Particle Swarm Optimization (PSO), pressure control, biogas reactor.

Makalah diterima [tanggal, bulan, tahun] – makalah direvisi [tanggal, bulan, tahun] – disetujui [tanggal, bulan, tahun]

Karya ini adalah naskah akses terbuka dengan lisensi [CC BY-SA](#).



1 Pendahuluan

Biogas merupakan sumber energi yang sangat bermanfaat bagi kelestarian lingkungan. Produksi biogas membantu mengurangi emisi gas rumah kaca dengan menangkap metana, gas rumah kaca yang kuat, dari sampah organik dan mengubahnya menjadi energi, sehingga mencegah pelepasannya ke atmosfer [1],[2].

Proses ini tidak hanya memitigasi perubahan iklim tetapi juga mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, yang merupakan kontributor utama emisi CO₂ [3]. Selain itu, produksi biogas dari limbah pertanian dan perkotaan dapat membantu pengelolaan limbah, mengurangi beban lingkungan dari tempat pembuangan sampah dan sistem pembuangan limbah [2]. Proses pencernaan anaerobik yang digunakan dalam produksi biogas juga menghasilkan produk sampingan yang dapat digunakan sebagai pupuk organik, meningkatkan kesehatan tanah dan mengurangi kebutuhan terhadap pupuk kimia. Selain itu, penerapan sistem biogas di peternakan telah menunjukkan penurunan substansial berbagai polutan, termasuk metana, sulfur oksida, nitrogen oksida, dan karbon monoksida, sehingga meningkatkan kualitas udara dan mengurangi risiko kesehatan. Desentralisasi produksi energi melalui biogas juga dapat meningkatkan keandalan sistem tenaga listrik, terutama di wilayah dengan infrastruktur energi yang tidak stabil, dan mengurangi beban pada sumber energi tradisional. Selain itu, manfaat ekonomi dari biogas, seperti pembangkit listrik dan panas, berkontribusi juga terhadap keberlanjutan usaha pertanian dan pembangunan pedesaan [4]. Secara keseluruhan, biogas berfungsi sebagai sumber energi berkelanjutan dan ramah lingkungan yang mengatasi pengelolaan limbah, mengurangi emisi gas rumah kaca dan mendukung tujuan energi baru terbarukan.

Biogas terdiri dari metana (CH₄), karbondioksida (CO₂), nitrogen (N₂), hidrogen (H₂), amonia (NH₃), dan hidrogen sulfida (H₂S). Gas metana merupakan indikator utama kualitas biogas karena kontribusinya yang signifikan terhadap kandungan energi dan efisiensi biogas sebagai sumber energi terbarukan. Kualitas biogas sangat ditentukan oleh kandungan metana di dalamnya, karena konsentrasi metana yang lebih tinggi menghasilkan nilai kalor yang lebih tinggi, sehingga biogas lebih efisien untuk produksi energi. Hasil spesifik biogas dan biometana juga merupakan metrik kinerja yang penting bagi pembangkit listrik tenaga biogas, dengan laju produksi metana menjadi faktor kunci dalam penilaian energi dan ekonomi fasilitas tersebut [5]. Investigasi eksperimental telah menunjukkan hubungan langsung antara kandungan metana dan suhu nyala api dengan persentase metana yang lebih tinggi menghasilkan suhu dan tegangan nyala api yang lebih tinggi, yang menunjukkan kualitas biogas yang lebih baik. Secara keseluruhan, peran metana sebagai komponen utama biogas telah menekankan pentingnya metana dalam menentukan kualitas dan efisiensi biogas sebagai sumber energi baru terbarukan.

Selain kadar gas metana, ada faktor penting lainnya dalam produksi biogas, yaitu variabel tekanan. Variabel tekanan memiliki peranan penting dalam keselamatan produksi biogas, mempengaruhi efisiensi operasional dan risiko insiden berbahaya. Peningkatan tekanan dapat meningkatkan kualitas biogas melalui pengurangan fraksi CO₂, namun pada sisi yang lain juga menimbulkan masalah keamanan yang signifikan. Misalnya, tekanan tinggi dapat menyebabkan terbentuknya campuran yang mudah terbakar dan berpotensi menimbulkan ledakan, terutama karena adanya metana, yang merupakan komponen utama biogas [6]. Selain itu, autogenerasi tekanan biogas hingga 2.0 MPa telah terbukti mempengaruhi komposisi komunitas mikroba dan kinetika pemanfaatan substrat dengan peningkatan kadar pCO₂ yang menghambat konversi propionat dan produksi metana selanjutnya hingga 90% karena toksisitas CO₂ yang dapat dibalik [7]. Hambatan ini dapat menyebabkan inefisiensi operasional dan potensi risiko keselamatan jika tidak dikelola dengan baik. Selain itu, seringkali terjadi kecelakaan pada instalasi biogas, seperti kebakaran pada reaktor biogas, sering kali disebabkan oleh tingginya tekanan di dalam reaktor, kebocoran pada tangki penyimpanan dan terbentuknya campuran yang mudah terbakar pada saat operasi pemeliharaan [8]. Dalam upaya mitigasi risiko-risiko ini, penting untuk menerapkan standar keselamatan dan penilaian risiko yang baik, seperti pendekatan daftar Periksa, yang membantu mengevaluasi efektivitas langkah-langkah keselamatan dan memastikan pengelolaan instalasi biogas yang lebih aman [6]. Selain itu, gasometer bertekanan rendah lebih disukai di daerah pedesaan untuk menyimpan biogas dengan aman dan penggunaan alat bertekanan dikelola dengan hati-hati untuk menghindari terciptanya atmosfer bertekanan tinggi yang dapat menyebabkan kecelakaan. Sistem kontrol yang terintegrasi, seperti sistem manajemen kontrol cerdas jarak jauh pada variabel suhu dan tekanan dapat meningkatkan keselamatan dan efisiensi reaktor biogas dengan menyediakan pemantauan dan kontrol secara *real-time*, sehingga mengurangi risiko insiden terkait tekanan. Secara keseluruhan, mengelola variabel tekanan secara efektif sangat penting untuk pengoperasian fasilitas produksi biogas yang aman dan efisien.

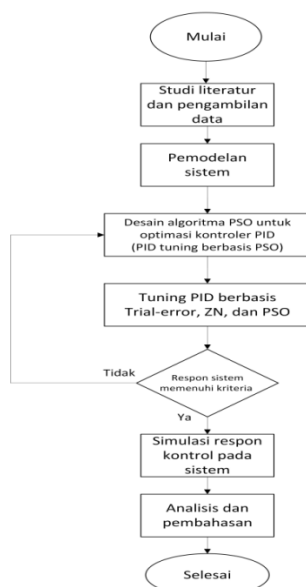
Pada implementasi reaktor biogas saat ini di Indonesia yang berjumlah sekitar 48.000 unit reaktor [9] secara umum masih menggunakan piranti manual untuk mengukur dan mengontrol tekanan dan kadar gas metana. Hal ini berdampak pada minimnya efektivitas dan efisiensi dalam pengoperasiannya, serta berpotensi menimbulkan bahaya apabila terjadi *over pressure* yang tidak teridentifikasi dengan baik, sehingga diperlukan sistem pengendalian dan *monitoring* yang terintegrasi agar operasional reaktor biogas dapat lebih aman dan efektif. Saat ini sudah terdapat reaktor biogas yang telah menggunakan sistem *monitoring* untuk melihat fluktuasi nilai pada parameter produksi biogas, salah satunya adalah mengontrol laju input pada reaktor biogas menggunakan *proportional integral* (PI) *Controller*. Pada PI *Controller* yang dikembangkan dapat mengurangi kapasitas penyimpanan gas yang diperlukan dalam reaktor sekitar 30% dibandingkan dengan

sistem konvensional atau manual, sehingga meningkatkan efisiensi dalam produksi biogas [10]. Sistem kontrol untuk tekanan pada reaktor biogas juga telah dilakukan berbasis solenoid valve dengan variasi *range* tekanan pada reaktor sebesar 0-10 psi, 0-6 psi dan 0-3 psi [11]. Pada beberapa penelitian tersebut, metode yang dilakukan masih menggunakan *PI Controller* dan menggunakan *solenoid valve* sebagai aktuator. Berdasarkan pada studi literatur tersebut, maka pada studi ini dirancang sistem kontrol tekanan pada *plant* reaktor biogas dari limbah biomassa pertanian berbasis *PID Controller* dengan variasi metode *tuning*, yaitu *Trial Error*, Ziegler-Nichols (ZN) dan *Particle Swarm Optimization* (PSO). Dalam rangka untuk menguji performansi PID-PSO ini, maka dilakukan *tuning* secara *Trial-error* dan Ziegler-Nichols, sehingga dapat dianalisis perbandingan hasil performansi PID dari ketiga metode *tuning* tersebut. Sistem ini terdiri dari sensor tekanan berupa DP sensor, sensor gas CH₄, mikrokontroler, *PID Controller*, aktuator berupa *control valve* dan *display monitoring*. Studi ini bertujuan untuk merancang sistem kontrol dan *monitoring* pada variabel tekanan serta menguji performansi sistem kontrol PID-PSO. Studi ini dilakukan di *plant* reaktor biogas wilayah Jawa Timur, Indonesia. Pengujian sistem pada studi ini terdiri dari pengujian karakteristik statik sensor dan pengujian performansi sistem kontrol PID pada masing-masing metode *tuning* yang digunakan. Pada studi ini, algoritma PSO digunakan untuk mengoptimalkan parameter PID (K_p , K_i , K_d) dengan menggunakan 30 partikel yang mewakili solusi potensial dalam ruang pencarian. Algoritma ini dijalankan hingga maksimum 300 iterasi, dengan setiap iterasi ditampilkan perkembangan optimasinya. Rentang nilai parameter PID dibatasi antara 0 hingga 100, membantu membatasi ruang pencarian dan eksplorasi solusi pada PSO. *Objective function* PSO pada studi ini adalah minimalisasi (nilai mendekati 0) pada *error steady state*, *maximum overshoot*, *settling time*, *rise time*, dan nilai >0 pada K_p , K_i , K_d . Melalui studi ini diharapkan sistem kontrol berbasis PID-PSO dapat membantu pengguna reaktor biogas untuk mengontrol tekanan serta mengukur kadar gas CH₄ yang ada di reaktor biogas dengan lebih efisien terutama untuk kepentingan keselamatan dan efektivitas operasional. Selain itu diharapkan sistem ini dapat diimplementasikan pada reaktor biogas yang ada, khususnya di Indonesia yang pada umumnya terdapat di area pertanian, peternakan atau pedesaan yang dibutuhkan operasional sistem yang relatif mudah dan efisien.

2 Metode

2.1 Perancangan Sistem

Pada studi ini dirancang sistem kontrol PID dan *monitoring* yang terintegrasi dari beberapa sensor, aktuator dan aplikasi *Internet of Things* (IoT) dengan dikendalikan oleh mikrokontroler Arduino. Diagram alir perancangan sistem pada studi ini terdapat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir perancangan sistem.

Gambar 1 mengilustrasikan diagram alir perancangan sistem. Perancangan sistem ini diawali dari studi literatur yang relevan terhadap pemahaman tentang sistem pada reaktor biogas dan kontroler, khususnya *PID Controller* dan metode *tuning* yang ada. Beberapa data kemudian dikumpulkan dalam bentuk parameter yang terkait dengan reaktor biogas, khususnya berfokus pada parameter tekanan dan laju aliran. Selanjutnya, pemodelan sistem dilakukan dengan *output* berupa fungsi transfer sistem. Setelah itu, dilakukan

pengembangan algoritma PSO untuk mengoptimalkan parameter PID atau pembuatan pengontrol PID-PSO yang mampu mengatur parameter tekanan pada reaktor biogas. Langkah selanjutnya dilakukan *tuning* parameter PID (K_p , K_i , K_d) dengan metode *Trial-error*, PSO, dan Ziegler Nichols pada model sistem yang diperoleh pada tahap sebelumnya menggunakan software MATLAB R2023b. Jika parameter PID yang dihasilkan dari PSO menunjukkan respon sistem yang memenuhi kriteria atau *objective function* PSO, yaitu minimalisasi (nilai mendekati 0) pada *error steady state*, *maximum overshoot*, *settling time*, *rise time* dan nilai >0 pada K_p , K_i , K_d , maka simulasi dilanjutkan. Jika PSO masih belum memenuhi *objective function*, maka kembali pada tahap desain algoritma PSO. Selanjutnya, pengujian desain algoritma pada sistem dengan *input step pada set point* sebesar 70 l/menit. Nilai set point ini didapatkan berdasarkan hasil percobaan di *plant* reaktor biogas. Lingkup kriteria mencakup kriteria kinerja sistem kontrol PID, khususnya nilai *error steady state*, *rise time*, *settling time*, *maximum overshoot* dan ITAE. Pada Tahap akhir dilakukan analisis dan pembahasan tentang hasil kinerja sistem kontrol yang dirancang pada sistem.

Metode *Trial-error* pada PID merupakan pendekatan eksperimental untuk menentukan parameter K_p , K_i , K_d yang optimal untuk sistem kontrol. Pada metode ini, dilakukan iterasi berulang dengan menguji berbagai kombinasi nilai K_p , K_i , K_d , dan kemudian mengevaluasi respons sistem untuk setiap kombinasi tersebut. Pada pengujian dengan metode *Trial-error*, dilakukan *Trial-error* pada beberapa *input* nilai K_p , K_i , dan K_d . Pada metode *tuning Trial-error* di studi ini, fungsi transfer sistem dinamis didefinisikan, kemudian variabel untuk menyimpan performa terbaik diinisialisasi. Rentang nilai untuk parameter K_p , K_i , dan K_d ditentukan, dan terdapat *loop* yang digunakan untuk mencoba setiap kombinasi parameter tersebut. Pada setiap iterasi, sebuah PID controller dibentuk dan simulasi *step response* dilakukan untuk menghitung metrik performa seperti *error steady-state*, *maximum overshoot*, *settling time* dan *rise time*. Metrik *error steady-state* digunakan sebagai kriteria performa yang ingin diminimalkan dan jika kombinasi parameter lebih baik dari yang sebelumnya, maka kombinasi ini disimpan sebagai yang terbaik. Setelah semua kombinasi diuji, parameter PID terbaik ditampilkan dan sistem tertutup dengan parameter ini disimulasikan ulang untuk menampilkan hasil metrik performa terbaik.

Metode *tuning* PID dengan Ziegler-Nichols adalah metode yang relatif banyak digunakan untuk *setting* pengontrol PID dalam berbagai aplikasi industri dan komersial untuk mencapai kinerja sistem yang optimal, efektif dan efisien [12]. Metode Ziegler-Nichols dikenal karena kesederhanaan dan efektivitasnya, namun terkadang dapat menghasilkan kinerja yang kurang optimal dengan *overshoot* dan osilasi [13]. Metode Ziegler-Nichols melibatkan dua pendekatan utama: metode pertama yaitu pembacaan respon *plant* dengan cara memberikan input step. Respons *plant* yang diperoleh secara eksperimen terhadap *input step* akan menghasilkan kurva berbentuk S yang memiliki karakteristik dengan dua buah konstanta yaitu L (waktu tunda) dan T (konstanta waktu). Setelah mendapatkan kedua parameter waktu tunda dan konstanta waktu, maka dapat menghitung parameter K_p , T_i , dan T_d . Metode Ziegler Nichols yang kedua adalah menggunakan K_p dengan sistem *close loop*. Penentuan nilai K_p digunakan untuk mengatur respons sistem agar mendapatkan nilai osilasi yang tetap dengan menjauhi nilai nol. Cara ini dilakukan dengan menentukan nilai K_u , yaitu K_p dari nilai nol ke suatu nilai kritis K_u sehingga diperoleh respon sistem osilasi berkesinambungan. Berdasarkan hasil osilasi tersebut maka diperoleh nilai *ultimate gain* (K_u) dan *ultimate period* (P_u), yang kemudian digunakan untuk menghitung parameter PID [14].

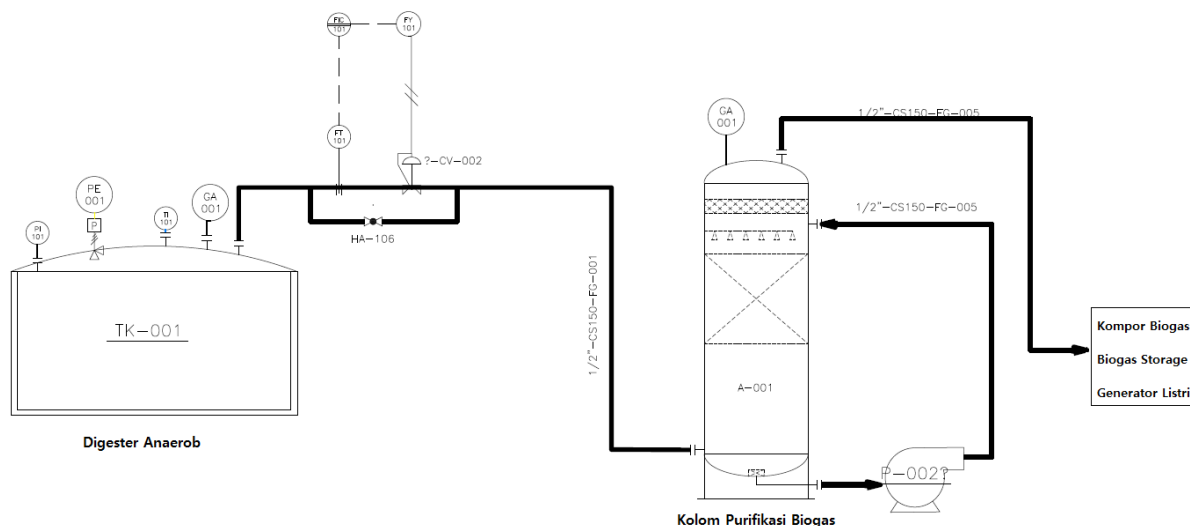
Tabel 1. Perhitungan Parameter K_p , T_i , dan T_d Ziegler-Nichols Metode 2 [14]

Tipe Kontroler	K_p	T_i	T_d
P	$0.5 K_u$	∞	0
PI	$0.45 K_u$	$0.083 P_u$	0
PID	$0.6 K_u$	$0.5 P_u$	$0.125 P_u$

Penentuan nilai K_u dan P_u untuk mendapatkan K_p , K_i , dan K_d pada studi ini di MATLAB R2023b dimulai dengan menginisialisasi K_p pada nilai kecil, sementara K_i dan K_d diatur ke nilai nol. Sistem *closed loop* kemudian disimulasikan menggunakan *step response* dengan K_p yang dinaikkan secara bertahap hingga sistem mulai berosilasi secara kontinu, yang menandakan nilai K_u telah ditemukan. Setelah K_u ditentukan, P_u diukur dari periode osilasi penuh pada grafik respons sistem. Setelah K_u dan P_u yang sudah diketahui, nilai K_p , K_i , dan K_d dihitung menggunakan rumus Ziegler-Nichols pada tabel 1 dengan $K_i = \frac{K_p}{T_i}$ dan $K_d = K_p \cdot T_d$. Selanjutnya, nilai K_p , K_i , dan K_d ini digunakan untuk melakukan simulasi PID yang mengevaluasi kinerja sistem berdasarkan metrik seperti *steady-state error*, *maximum overshoot*, *settling time*, dan *rise time*, yang kemudian divisualisasikan dalam grafik.

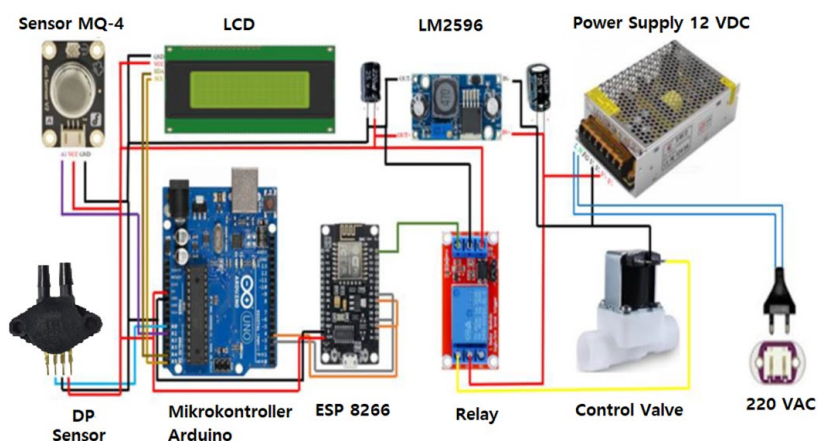
2.2 Perancangan Perangkat Keras

Pada tahapan perancangan perangkat keras dimulai dari pembuatan *Piping and Instrumentation Diagram* (P&ID), kemudian dibuat jalur perpipaian pada reaktor biogas. Reaktor biogas pada studi ini adalah digester anaerob tipe *fixed dome* dengan ukuran 8 m³ yang bahan baku biogas adalah kotoran sapi dan limbah jerami padi. P&ID dari sistem *monitoring* kadar gas CH₄ dan pengendalian tekanan pada studi ini dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. P&ID sistem *monitoring* kadar gas CH₄ dan pengendalian tekanan.

Pada studi ini biogas yang diproduksi oleh digester anaerob akan diukur tekanan dan kadar gas CH₄. Tekanan biogas akan diatur oleh *control valve* dan nilai kadar gas CH₄ akan dilakukan *monitoring* sebelum masuk ke dalam kolom purifikasi biogas. *Monitoring* kadar gas CH₄ ini dilakukan untuk memastikan bahwa laju aliran yang berada di sistem perpipaian adalah didominasi gas CH₄, bukan kebocoran gas yang lain. Fungsi dari *monitoring* kadar gas CH₄ ini adalah untuk mengetahui berapa nilai laju produksi biogas yang dihasilkan oleh digester anaerob. Biogas kemudian masuk di kolom purifikasi biogas untuk mereduksi gas polutan agar kualitas biogas meningkat. Biogas hasil purifikasi biogas akan digunakan sebagai bahan bakar pada kompor biogas, disimpan di dalam biogas storage dan sebagai bahan bakar pada generator listrik biogas. Pada studi ini yang akan dianalisis adalah laju aliran dan tekanan yang terdapat pada area reaktor biogas. Selanjutnya dibuat *wiring diagram* untuk sistem ini yang terdapat pada Gambar 3.



Gambar 3. *Wiring diagram* sistem.

Pada Gambar 3, sensor merk Hanwei tipe MQ-4 dilengkapi dengan 3 pin yaitu VCC, GND, dan pin *output* yang dihubungkan ke pin A1 Arduino. Selanjutnya sensor merk NXP tipe MPX5700AP memiliki 6 pin, VCC, GND dan pin keluaran terhubung ke pin A0 Arduino. Semua sensor yang digunakan telah dikalibrasi pada awal instalasi. Sistem ini memanfaatkan modul I2C, pembacaan data sensor ditransmisikan dan ditampilkan pada LCD melalui pin SDA dan SCL. Selain itu, informasi diteruskan ke aplikasi Blynk melalui nodemcu ESP8266. Komunikasi serial antara ESP8266 dan Arduino Uno melibatkan pin RX (*receiver*) dan TX (*transceiver*) untuk

memudahkan pengunggahan kode pada Arduino. Modul relay dengan tipe Pico Relay B digunakan untuk mengaktifkan solenoid valve dengan pin *input* terpasang ke pin DO ESP8266 dan pin NO terhubung ke *control valve*. *Power supply* 12 VDC dan konverter *buck* LM2596 yang digunakan untuk menurunkan *power supply* menjadi 5V untuk komponen lainnya.

2.3 Perancangan PID Controller

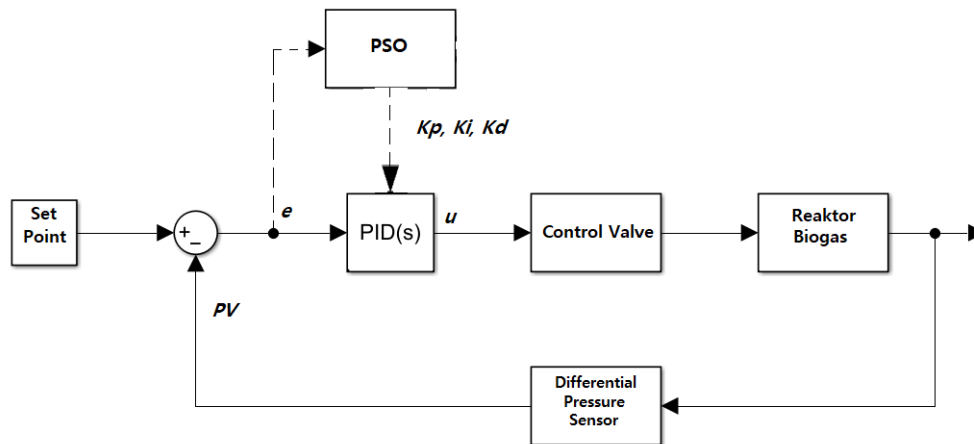
Pengontrol PID menggunakan mekanisme umpan balik, dimana *input* ke pengontrol adalah sinyal *error*. Sinyal *error* mewakili perbedaan antara *set point*, yang merupakan *output* atau nilai referensi yang diinginkan dan *output* terukur aktual. Persamaan PID Controller ditunjukkan pada persamaan (1) [14].

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

Di mana $e(t)$ merupakan sinyal *input* dan $u(t)$ merupakan sinyal *output*. Berdasarkan persamaan (1), maka fungsi transfer pada PID Controller sesuai dengan persamaan (2).

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2)$$

Pada persamaan 1, K_p ditetapkan sebagai konstanta proporsional, T_i dilambangkan sebagai konstanta waktu integral dan T_d ditetapkan sebagai konstanta waktu diferensial. Peran ketiga komponen ini digambarkan sebagai berikut yaitu elemen proporsional menandakan sinyal *error* $e(t)$ dalam sistem kontrol proporsional. Setelah mendeteksi sinyal $e(t)$, pengontrol PID segera memulai respons kontrol untuk mengurangi *error*. Integral digunakan untuk menghilangkan kesalahan statis dan meningkatkan stabilitas sistem. Komponen diferensial menangkap variasi dalam sinyal *error*, memperkenalkan sinyal korektif sebelum amplifikasi *error* yang signifikan dan mempercepat respons sistem untuk meminimalkan penundaan. Maka dari itu, desain pengontrol PID memerlukan spesifikasi dan konfigurasi dengan tiga parameter PID (K_p , K_i , K_d). Pada studi ini, *Particle Swarm Optimization* diimplementasikan untuk mencari parameter PID yang optimal. Diagram blok sistem kontrol digambarkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Diagram blok sistem kontrol PSO-PID.

2.4 Perancangan Algoritma Particle Swarm Optimization (PSO)

Particle Swarm Optimization (PSO) merupakan strategi optimasi secara stokastik yang dipengaruhi oleh tindakan kolektif burung yang berkelompok. Setiap elemen dalam algoritma melambangkan solusi potensial dalam area eksplorasi. Kecepatan entitas di area tersebut memberikan wawasan tentang pergerakan terarah mereka di dalam ruang sekaligus memiliki kemampuan untuk mempertahankan nilai optimal lokal dan global [15]. Dalam algoritma PSO, populasi partikel mencari solusi. Setiap partikel mewakili posisi atau solusi terhadap suatu masalah. Populasi dihasilkan secara acak dalam batas yang ditentukan. Saat setiap partikel melintasi ruang pencarian, maka partikel menyesuaikan posisinya untuk menemukan solusi lokal dan global terbaik. Hal ini memungkinkan pertukaran informasi antar partikel, sehingga menghasilkan proses pencarian yang efektif. Pencarian berlanjut untuk sejumlah iterasi tertentu, mengevaluasi kinerja setiap solusi dengan *fitness function* yang dituju adalah minimalisasi nilai *error steady state*, *maximum overshoot*, *settling time* dan *rise time*.

Setiap partikel individu dianggap sebagai entitas tunggal dalam ranah spasial. Keadaan partikel tersebut dalam ruang pencarian bergantung pada dua variabel utama: lokasi spesifik partikel dan laju gerak yang sesuai. Persamaan (3) dan (4) adalah model matematika yang menggambarkan posisi dan kecepatan partikel yang tepat dalam dimensi spasial yang ditentukan [16].

$$uX_i(t) = x_{i1}(t), x_{i2}(t), \dots, x_{iN}(t) \quad (3)$$

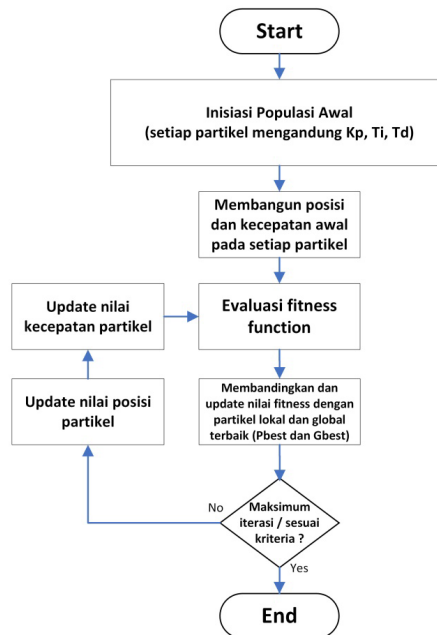
$$V_i(t) = v_{i1}(t), v_{i2}(t), \dots, v_{iN}(t) \quad (4)$$

Variabel X mewakili lokasi spasial partikel, sedangkan V menunjukkan kecepatan partikel; i singkatan dari indeks partikel, iterasi i , dan N menandakan ukuran populasi. Pada tahap selanjutnya ditunjukkan model matematika dengan persamaan (5) dan (6) yang menjelaskan proses memperbarui keadaan partikel.

$$V_i(t) = V_i(t-1) + c_1 r_1 (X_i^L - X_i(t-1)) + c_2 r_2 (X^G - X_i(t-1)) \quad (5)$$

$$X_i(t) = V_i(t) + X_i(t-1) \quad (6)$$

Di mana $X_i^L = x_{i1}^L, x_{i2}^L, \dots, x_{iN}^L$ mewakili partikel lokal terbaik - i . Sedangkan $X^G = x_{i1}^G, x_{i2}^G, \dots, x_{iN}^G$ mewakili global best dari seluruh populasi. Di sini, c_1 dan c_2 menunjukkan konstanta yang dicirikan oleh nilai positif, diakui sebagai faktor pembelajaran, sedangkan r_1 dan r_2 mencakup angka acak dalam kisaran 0 hingga 1. Persamaan (5) secara efektif digunakan untuk menghitung kecepatan partikel yang diperbarui, dengan mempertimbangkan kecepatan sebelumnya, kedekatan dengan posisi optimal partikel (*local best*), dan kedekatan dengan posisi optimal dalam seluruh kelompok partikel (*global best*). Selanjutnya, partikel mengalami gerakan menuju posisi baru seperti yang ditentukan oleh persamaan (6).



Gambar 5. Diagram alir algoritma PSO.

Langkah pertama adalah inisiasi populasi awal sebanyak 30 partikel. Setiap partikel memiliki kecepatan awal dan posisi awal yang akan mengarahkannya dalam pencarian solusi. Kecepatan akan mengontrol seberapa jauh partikel bergerak setiap iterasi, sedangkan posisi merepresentasikan nilai-nilai K_p , K_i , dan K_d . Selanjutnya dilakukan evaluasi partikel berupa menghitung nilai fungsi tujuan untuk setiap partikel dalam populasi menggunakan nilai K_p , K_i , dan K_d yang mereka miliki. Setelah itu dilakukan proses *update Personal Best* ($pBest$), yaitu menyimpan nilai terbaik yang pernah dicapai oleh setiap partikel berdasarkan hasil evaluasi fungsi tujuan mereka. Selanjutnya adalah *update Global Best* ($gBest$), yaitu menentukan partikel dengan nilai fungsi tujuan terbaik di antara semua partikel dalam populasi ($gBest$). Kemudian dilakukan *update* kecepatan dan posisi dengan menggunakan rumus PSO untuk menghitung dan memperbarui kecepatan dan posisi setiap partikel berdasarkan $pBest$ dan $gBest$. Langkah berikutnya adalah dilakukan iterasi maksimal sebanyak 300. Setelah iterasi selesai, partikel dengan $gBest$ akan memberikan nilai K_p , K_i , dan K_d yang optimal sesuai dengan *objective function* yang ditentukan, yaitu minimalisasi (nilai mendekati 0) pada *error steady state*, *maximum overshoot*, *settling time*, *rise time*, dan nilai >0 pada K_p , K_i , K_d . Selanjutnya dilakukan pengujian performa sistem kontrol PID menggunakan parameter yang dihasilkan oleh *tuning* PSO, ZN dan *Trial-Error*.

Algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) dan metode Ziegler-Nichols (ZN) berbeda secara signifikan dalam pendekatannya pada *setting* pengontrol PID. Metode ZN merupakan pendekatan klasik yang menyediakan seperangkat aturan heuristik untuk menentukan parameter PID berdasarkan respon langkah sistem atau respon frekuensi, yang dapat dilakukan secara langsung namun seringkali *fitness function* menghasilkan kinerja suboptimal, terutama pada sistem yang kompleks atau nonlinier [17] [18]. Sebaliknya, algoritma PSO adalah teknik optimasi metaheuristik yang terinspirasi oleh perilaku sosial kawanan burung atau kawanan ikan, yang mencari parameter PID optimal dengan secara berulang meningkatkan kandidat solusi sehubungan dengan *fitness function* yang ditentukan. Hal ini memungkinkan PSO untuk menangani masalah optimasi yang lebih luas, termasuk masalah nonlinier dan *multiple local optima*, yang mungkin sulit diatasi oleh metode ZN [19]. Misalnya dalam konteks penyetelan pengontrol PID untuk kontrol frekuensi beban pada sistem tenaga dengan sumber energi terbarukan, PSO telah terbukti menghasilkan waktu penyelesaian yang lebih singkat dan penyimpangan frekuensi yang lebih kecil dibandingkan dengan metode tradisional [20]. Selain itu, varian lanjutan dari PSO, seperti *Multi-Particle Swarm Optimization* (MPSO), semakin menyempurnakan proses pencarian dengan menjelajahi beberapa titik dalam ruang pencarian secara bersamaan, sehingga mengurangi risiko terjebak dalam local optima, yang merupakan masalah umum pada metode PSO dan ZN standar. Selain itu, ketika diterapkan pada aplikasi spesifik seperti mengendalikan suhu dalam *Continuous Stirred Tank Reactor* (CSTR), pengontrol PID yang disetel dengan PSO telah menunjukkan kinerja yang unggul dalam hal pengurangan *maximum overshoot* dan *rise time* yang lebih cepat dibandingkan dengan pengontrol PID dengan *tuning* ZN [19]. Demikian pula, algoritma optimasi alternatif seperti *Archimedes Optimization Algorithm* (AOA) dan *Dispersive Flies Optimization* (DFO) juga mengungguli ZN dan PSO dalam skenario tertentu, yang menunjukkan berkembangnya lanskap teknik *tuning* PID [18]. Secara keseluruhan, meskipun metode ZN menawarkan kesederhanaan dan kemudahan penggunaan, PSO dan variannya memberikan pendekatan yang lebih kuat dan fleksibel untuk penyetelan PID, terutama dalam sistem yang kompleks dan dinamis.

Pada studi ini, algoritma PSO digunakan untuk mengoptimalkan parameter PID (K_p , K_i , K_d) dengan menggunakan 30 partikel yang mewakili solusi potensial dalam ruang pencarian. Algoritma ini dijalankan hingga maksimum 300 iterasi dengan setiap iterasi ditampilkan perkembangan optimasinya. Rentang nilai parameter PID dibatasi antara 0 hingga 100, membantu membatasi ruang pencarian dan eksplorasi solusi pada PSO. Opsi PSO diatur untuk menjalankan algoritma secara non-paralel, dengan ukuran *swarm* sesuai jumlah partikel dan iterasi yang telah ditetapkan. *Objective function* pada studi ini adalah minimalisasi (nilai mendekati 0) pada *error steady state*, *maximum overshoot*, *settling time*, *rise time* dan nilai >0 pada K_p , K_i , K_d .

2.5 Fungsi Transfer Sistem

Sistem pengendalian pada proses berupa tekanan yang diukur oleh DP sensor, kemudian variabel yang dimanipulasi adalah laju aliran biogas yang diatur oleh *control valve* yang dikendalikan oleh *PID Controller* dengan *set point* yang telah ditentukan. *PID Controller* mengambil sinyal umpan balik dari DP Sensor dan *set point*, kemudian menghitung sinyal kontrol untuk mengatur *control valve*. *Control valve* sebagai aktuator akan menyesuaikan laju aliran dalam sistem sesuai sinyal dari *PID Controller* dan memiliki fungsi transfer sesuai persamaan (7) [21].

$$\frac{m_b(s)}{U(s)} = \frac{K_{tot}}{s^2 + \tau_v s + 1} \quad (7)$$

Control valve memiliki laju aliran biogas maksimal yang masuk sebesar 70 l/s dengan karakteristik *control valve* berupa *Time Constant control valve* sebesar 1.612 s; $m_b(s)$ adalah laju aliran biogas yang termanipulasi (kg/s); $U(s)$ merupakan sinyal masukan ke *control valve* (Amp), K_{tot} adalah *gain total control valve* dan τ_v adalah *time constant* pada *control valve* (s). Hasil eksperimen yang dilakukan pada sensor menghasilkan nilai span pressure I/P sebesar 53.347 kg/s dan span input sinyal sebesar 1.0-0.2, sehingga persamaan (8) untuk K_{tot} [22].

$$\left. \begin{aligned} K_{tot} &= K_{\frac{I}{P}} \cdot K_{actuator} \\ K_{\frac{I}{P}} &= \frac{Span\ pressure\ I/P}{Span\ input\ signal\ of\ control} \\ K_{tot} &= \frac{53.347 \frac{kg}{s}}{(1.0 - 0.2) \frac{kgf}{cm^2}} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\tau_{cv} = T_v(\Delta V + R_v) \quad (9)$$

Dengan ΔV = fraksi massa perubahan *control valve* ($\frac{m_{bmax}-m_{bmin}}{m_{bmax}}$); R_v = perbandingan *time constant inherent* dengan *time stroke*; $R_v = 0.03$ untuk jenis aktuatur *diaphragm* dan $R_v=0.3$ untuk jenis aktuatur piston.

$$T_v = \frac{Y_c}{C_v} \quad (10)$$

Di mana Y_c adalah faktor *stroking time valve* sebesar 0.676 dan C_v adalah koefisien *control valve* sebesar 0.39 [22], maka:

$$\tau_{cv} = \frac{0.676}{0.39} \left[\left(\frac{53.437 - 5.437}{53.437} \right) + 0.03 \right] = 1.61s \quad (11)$$

Selanjutnya fungsi transfer dari aliran biogas adalah [23]:

$$TF_{FB} = \frac{K_q}{\tau_{FB}s + 1} \quad (12)$$

Di mana K_q adalah *gain* dari sistem aliran dan τ_{FB} adalah konstanta waktu aliran biogas.

Fungsi transfer reaktor biogas sebagai berikut [23]:

$$TF_{RB} = \frac{K_r}{(\tau_{RB1}s + 1)(\tau_{RB2}s + 1)} \quad (13)$$

Di mana K_r adalah *gain* dari reaktor biogas dan τ_{RB1}, τ_{RB2} adalah konstanta waktu reaktor biogas, sehingga fungsi transfernya adalah:

$$TF_{CV} = \frac{3.334}{s^2 + s + 1} \quad (14)$$

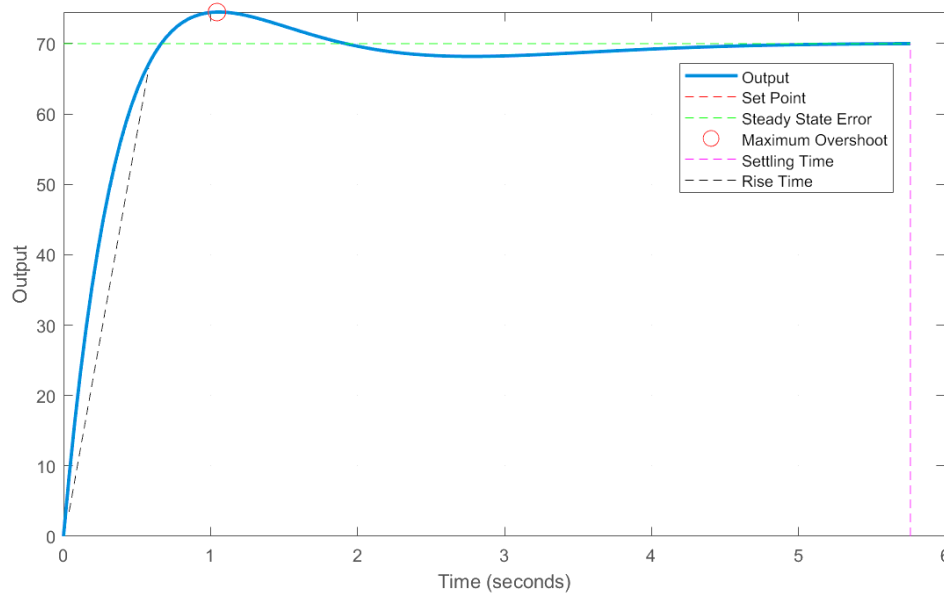
Pada tahap awal dilakukan pengujian sinyal uji *step* untuk mengetahui validasi model matematis. Selanjutnya dibuat model simulasi yang dilakukan di MATLAB R2023b dan di-*running* dengan *input* nilai K_p, K_i, K_d dari hasil *tuning* dengan 3 metode (PSO, ZN, *trial-error*).

3 Hasil dan Diskusi

Pada studi ini, dilakukan beberapa pengujian *tuning* dalam parameter *PID Controller*. Proses pengujian *tuning PID Controller* menggunakan tiga metode, yaitu metode *Trial-error*, Ziegler-Nichols dan PSO.

3.1 Metode *Trial-error*

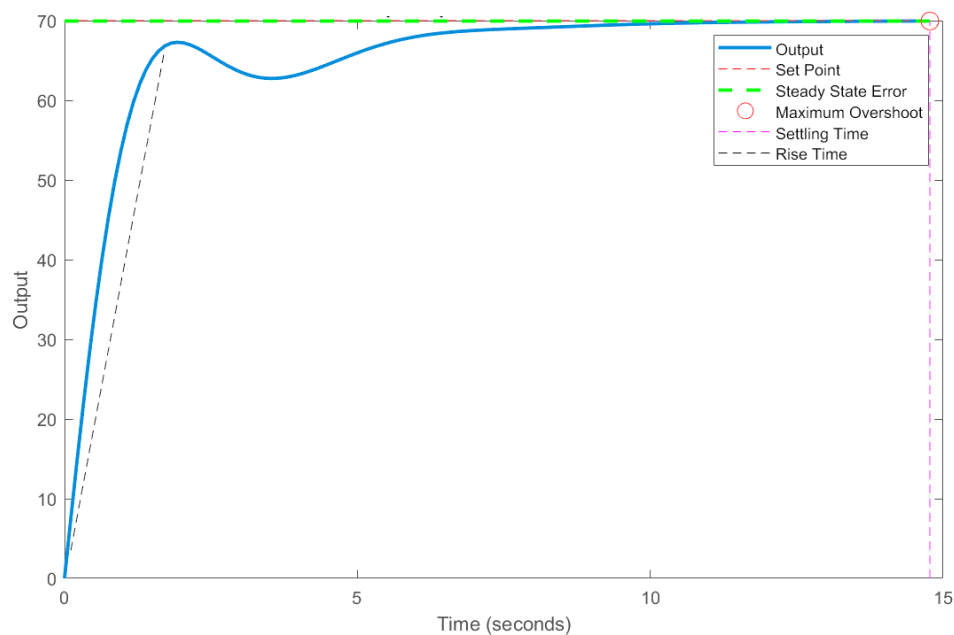
Pada simulasi metode *Trial-error* didapatkan nilai $K_p=1.77$, $K_i=1.33$ dan $K_d=1$. Setelah *running* dilakukan, maka diperoleh grafik seperti pada Gambar 6. Pada metode ini dihasilkan nilai *error steady state* sebesar 0.000227 yang mengindikasikan bahwa sistem hampir mencapai nilai *set point* yang diinginkan secara sempurna setelah mencapai kestabilan, kemudian *rise time* sebesar 0.5412 s yang menunjukkan bahwa sistem responsif kurang dari 1 detik dalam mencapai nilai *set point* setelah perubahan *input* diberikan, *settling time* sebesar 5.7608 s yang menunjukkan waktu batas toleransi setelah respons yang stabil tercapai, serta *maximum overshoot* sebesar 6.4141% yang merepresentasikan respon awal sistem melewati *set point* sebelum akhirnya stabil. Pada metode ini menghasilkan *Best Fitness Value* (ITAE) sebesar 0.02968 dan *Standard Deviation* pada ITAE sebesar 0.21914.



Gambar 6. Respon sistem kontrol PID dengan *Trial-error*

3.2 Metode Ziegler-Nichols

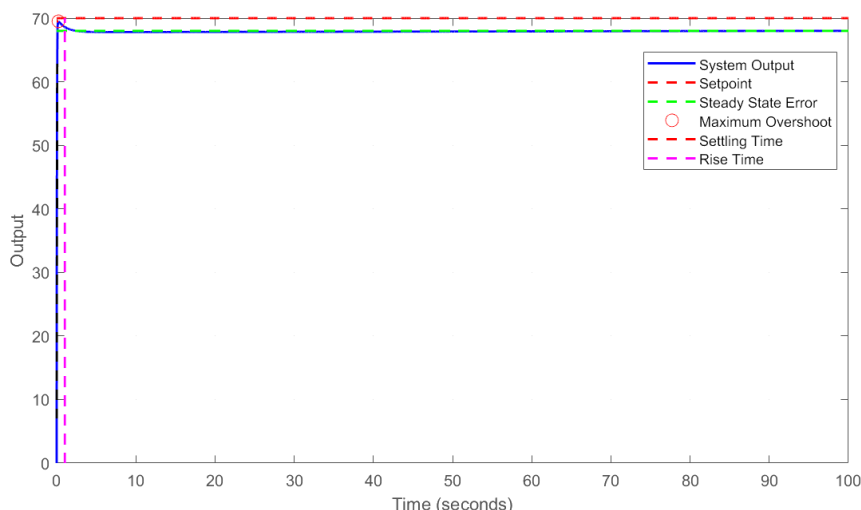
Pada simulasi metode *tuning* Ziegler-Nichols didapatkan nilai $K_p = 0.6$, $K_i = 0.3$ dan $K_d = 0.3$. Setelah *running* dilakukan, maka diperoleh grafik seperti pada Gambar 7. Pada metode ini dihasilkan nilai *error steady state* sebesar 0.0503 yang mengindikasikan bahwa sistem hampir mencapai nilai *set point* yang diinginkan secara sempurna setelah mencapai kestabilan, kemudian *rise time* sebesar 1.6057 s yang menunjukkan bahwa sistem responsif kurang dari 2 detik dalam mencapai nilai *set point* setelah perubahan *input* diberikan, *settling time* sebesar 14.7726 s yang menunjukkan waktu batas toleransi setelah respons yang stabil tercapai, serta *maximum overshoot* sebesar -0.0718 % yang merepresentasikan bahwa respons sistem hampir tidak melewati nilai *set point* (bahkan sedikit di bawah *set point*, seperti yang diindikasikan oleh nilai negatif). Hal ini mengindikasikan bahwa sistem stabil dan tidak menunjukkan *overshoot* yang signifikan. Pada metode ini menghasilkan *Best Fitness Value* (ITAE) sebesar 0.000885 dan *Standard Deviation* pada ITAE sebesar 0.8357.



Gambar 7. Respon sistem kontrol PID dengan *tuning* Ziegler-Nichols

3.3 Metode PSO

Pada simulasi metode *tuning* PSO didapatkan nilai hasil optimasi terbaik pada nilai $K_p = 13.6628$, $K_i = 0.01$, dan $K_d = 8.5542$. Setelah *running* dilakukan, maka diperoleh grafik seperti pada Gambar 8. Pada metode ini dihasilkan nilai *error steady state* sebesar 1.40 yang mengindikasikan bahwa sistem hampir mencapai nilai *set point* yang diinginkan secara sempurna setelah mencapai kestabilan, kemudian *rise time* sebesar 0.09 s yang menunjukkan bahwa sistem responsif kurang dari 0.5 detik dalam mencapai nilai *set point* setelah perubahan *input* diberikan, *settling time* sebesar 2.1 s yang menunjukkan waktu batas toleransi setelah respons yang stabil tercapai, serta *maximum overshoot* sebesar 0.986404% yang merepresentasikan respons awal sistem melewati *set point* sebelum akhirnya stabil. Pada hasil yang diberikan, optimasi dalam algoritma PSO berjalan selama 67 iterasi dan *objective function* telah dievaluasi sebanyak 2040 kali selama proses optimasi. Pada metode *tuning* dengan PSO ini menghasilkan *Best Fitness Value* (ITAE) sebesar 0.001080 dan *Standard Deviation* pada ITAE sebesar 2.2243.



Gambar 8. Respon sistem kontrol PID dengan *tuning* PSO

Tabel 2 menunjukkan perbandingan respon dari 3 metode untuk *tuning* PID pada pengendalian *control valve* di studi ini.

Tabel 2. Ringkasan perbandingan hasil performansi sistem

Tuning Kontroller PID	Parameter PID			Performansi Sistem Kontrol PID				ITAE	
	K_p	K_i	K_d	Error Steady State (%)	Rise Time (s)	Settling Time (s)	Maximum Overshoot (%)	Best Fitness Value (ITAE)	Standard Deviation
Trial-error	1.77	1.33	1	0.000227	0.5412	5.7608	6.4141	0.02968	0.2191
PID - ZN	0.6	0.3	0.3	0.0503	1.6057	14.7726	0	0.000885	0.8357
PID - PSO	13.6628	0.01	8.5542	1.4000	0.09	2.1	0.9864	0.001080	2.2243

Pada tabel 2 dapat dilihat bahwa setiap metode memiliki kelebihan dan kekurangan dalam menentukan parameter PID yang optimal. Metode *Trial-error* memberikan keseimbangan yang baik dengan nilai *error steady state* yang sangat kecil namun membutuhkan lebih banyak iterasi dan waktu untuk mencapai kestabilan sistem yang diindikasikan melalui nilai *settling time*. Metode Ziegler-Nichols memberikan nilai *error steady state* yang lebih baik dari *Trial-Error* namun memerlukan lebih lama dalam *rise time* dan *settling time*. Metode PSO menghasilkan respon *error steady state* yang terbesar, namun nilai *rise time* dan *settling time* yang lebih cepat diantara yang lain. Pada tabel 1 juga disebutkan hasil nilai *Integral of Time-weighted Absolute Error* (ITAE) yang merupakan kriteria performa yang sering digunakan dalam desain dan *tuning* PID controller. Fungsi utama dari ITAE adalah untuk mengukur kualitas respon sistem kendali dengan memberikan bobot lebih besar pada kesalahan yang terjadi pada waktu yang lebih lama. Beberapa fungsi dari penggunaan ITAE dalam PID controller adalah membantu mengurangi *overshoot* dalam respon sistem, karena kesalahan yang terjadi setelah waktu awal diberikan bobot lebih besar, desain dengan ITAE cenderung menghasilkan sistem

yang lebih stabil dan memiliki lebih sedikit *overshoot*, meningkatkan transien respons serta memberikan keseimbangan antara kecepatan respons dan stabilitas sistem. Pada nilai *Error Steady State*, metode *Trial-error* menghasilkan *error steady state* terkecil (0.000227%), metode PID-ZN menghasilkan *error steady state* yang lebih besar (0.0503%) dibandingkan *Trial-error*, metode PID-PSO memiliki *error steady state* terbesar (1.40%).

Selanjutnya, pada nilai *Rise Time*, metode PID-PSO memiliki *rise time* tercepat (0.09 s), metode *Trial-error* berada di tengah (0.5412 s), dan metode PID-ZN memiliki *rise time* terlama (1.6057 s). Pada nilai *Settling Time*, metode PID-PSO memiliki *settling time* tercepat (2.1 s), metode *Trial-error* di tengah (5.7608 s) dan metode PID-ZN memiliki *settling time* terlama (14.7726 s). Pada nilai *Maximum Overshoot*, metode PID-ZN menunjukkan *overshoot* negatif (*undershoot*), sebesar -0.0718%, sedangkan metode PID-PSO menunjukkan nilai *maximum overshoot* sebesar 0.986404% dan metode *Trial-error* memiliki *overshoot* tertinggi sebesar 6.4141%. Pada nilai ITAE, metode PID-ZN memiliki nilai ITAE terbaik (0.000885) dengan *standard deviation* sebesar 0.8357, sedangkan metode PID-PSO dan *Trial-error* memiliki nilai ITAE yang lebih besar masing-masing 0.001080 dan 0.02968, dengan nilai *standard deviation* paling besar pada PID-PSO sebesar 2.2243.

4 Kesimpulan

Setelah dilakukan studi dan pengujian, maka dapat disimpulkan beberapa hal, antara lain: algoritma PSO telah memenuhi *objective function* dalam *tuning* parameter PID, yaitu minimalisasi (nilai mendekati 0) pada *error steady state*, *maximum overshoot*, *settling time*, *rise time*, dan nilai >0 pada K_p , K_i , K_d . *Tuning* parameter pengontrol PID menggunakan metode PSO memperoleh hasil berupa nilai $K_p = 13.6628$; $K_i = 0.01$ dan $K_d = 8.5542$ dengan nilai *Error steady state* sebesar 1.40 %, nilai *rise time* sebesar 0.09, nilai *settling time* sebesar 2.1 s dan *maximum overshoot* sebesar 0.986404. Pada hasil ITAE terbaik secara berurutan terdapat pada *tuning* PID-ZN sebesar 0.000885, PID-PSO sebesar 0.0010801 dan *Trial-Error* sebesar 0.02968. Berdasarkan hasil performansi ketiga metode yang ada, metode *Trial-error* menunjukkan performansi berupa *error steady state* terkecil namun *overshoot* yang paling tinggi diantara yang lain, PID-ZN memiliki performansi ITAE terbaik namun dengan *rise time* dan *settling time* yang lebih lama, serta *error steady state* yang lebih besar dibandingkan *Trial-error*, PID-PSO menghasilkan *rise time* dan *settling time* yang tercepat dengan *overshoot* yang minimal, namun memiliki *error steady state* yang terbesar di antara ketiga metode. Secara keseluruhan, setiap metode *tuning* memiliki keunggulan untuk 2 parameter performansi PID yang ada, antara lain : *Trial-error* memiliki keunggulan pada aspek *error steady state* dan *standard deviation*; PID-ZN memiliki keunggulan pada aspek *maximum overshoot* dan ITAE; serta PID-PSO memiliki keunggulan pada aspek *rise time* dan *settling time*. Pada studi ini masih ada beberapa keterbatasan dalam hal pemasangan *hardware* secara terintegrasi dengan komponen lain seperti *biogas station* dan generator listrik. Sistem kontrol PID yang telah dirancang dalam studi ini diharapkan mampu untuk mengontrol tekanan yang ada di reaktor biogas sehingga berpotensi meningkatkan aspek keselamatan kerja pada instalasi reaktor biogas. Perlu ada kajian yang lebih mendalam lagi tentang *Safety Integrity Level* pada reaktor biogas ini agar analisis terhadap sistem kontrol yang dirancang atau dipasang pada *plant* reaktor biogas dapat lebih komprehensif dan terintegrasi, terutama pada sistem utilisasi biogas.

Ucapan Terima kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Gadjah Mada atas dukungan teknis, dana, bahan dan peralatan yang diperlukan untuk validasi percobaan. Penulis juga ingin mengucapkan terima kasih kepada Universitas Gadjah Mada atas pendanaan dengan Hibah Rekognisi Tugas Akhir Universitas Gadjah Mada nomor 5075/UNI.P.II/Dit-Lit/PT.01.01/2023; *Faculty of Agriculture, Ehime University*, Jepang; Departemen Teknik Instrumentasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia. Penulis juga sangat berterima kasih atas dukungan dari Japan Student Services Organization (JASSO) untuk Program Doktor SUIJI dan *The United Graduate School of Agricultural Sciences (UGAS) Ehime University* Jepang selama studi ini.

Referensi

- [1] I. Cevrim and A. M. Caner, "Analysis of Biogas Sources in the Context of Renewable Energy; Erzurum Province as an Example," *Polish J. Environ. Stud.*, vol. 32, no. 4, pp. 3053–3062, 2023, doi: 10.15244/pjoes/162671.
- [2] I. Muhibbu-din, G. Adebayo, S. Odedele, and O. O. Ajibulu, "Review on Environmental Effect of Biogas Production," *Malaysian J. Appl. Sci.*, vol. 6, no. 2, pp. 93–104, 2021, doi:

- 10.37231/myjas.2021.6.2.290.
- [3] Z. Rogala, M. Stanclik, D. Łuszkiewicz, and Z. Malecha, "Perspectives for the Use of Biogas and Biomethane in the Context of the Green Energy Transformation on the Example of an EU Country," *Energies*, vol. 16, no. 4, 2023, doi: 10.3390/en16041911.
- [4] M. F. Shih, C. H. Lay, C. Y. Lin, and S. H. Chang, "Exploring the environmental and economic potential for biogas production from swine manure wastewater by life cycle assessment," *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 25, no. 2, pp. 451–464, 2023, doi: 10.1007/s10098-021-02157-1.
- [5] G. Golub, S. Kukharets, O. Zavadzka, and O. Marus, "Determination of the rate of organic biomass decomposition in biogas reactors with periodic loading," *Int. J. Renew. Energy Res.*, vol. 9, no. 4, pp. 1741–1750, 2019, doi: 10.20508/ijrer.v9i4.10163.g7777.
- [6] B. P. and R. Laur, "Biogas Production Plants: A Methodological Approach for Occupational Health and Safety Improvement," *Intech*, vol. 11, no. tourism, p. 13, 2016, [Online]. Available: <https://www.intechopen.com/books/advanced-biometric-technologies/liveness-detection-in-biometrics>
- [7] R. E. F. Lindeboom, S. G. Shin, J. Weijma, J. B. Van Lier, and C. M. Plugge, "Piezo-tolerant natural gas-producing microbes under accumulating pCO₂," *Biotechnol. Biofuels*, vol. 9, no. 1, pp. 1–19, 2016, doi: 10.1186/s13068-016-0634-7.
- [8] V. Torretta, S. Copelli, S. Contini, and E. C. Rada, "Safety and reliability in biogas plants," *Saf. Secur. Eng. VI*, vol. 1, pp. 227–238, 2015, doi: 10.2495/safe150201.
- [9] J. N. M. Tan-Soetedjo, "Manure Waste Management to Produce and Utilize Biogas Efficiently and Effectively in a Smart Eco-Social Village in Bandung," *Asia Pacific J. Manag. Educ.*, vol. 5, no. 3, pp. 58–71, 2022, doi: 10.32535/apjme.v5i3.1907.
- [10] N. Raeyatdoost, R. Eccleston, and C. Wolf, "Flexible Methane Production Using a Proportional Integral Controller with Simulation-Based Soft Sensor," no. 1, pp. 75–83, 2020, doi: 10.1002/ceat.201900401.
- [11] F. R. Silmi, M. R. Kirom, and A. Qurthobi, "Analysis of the Influence of Internal Pressure Control to the Total Gas Production in Anaerobic Digester," *Procedia Eng.*, vol. 170, pp. 467–472, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.03.075.
- [12] R. Afrawira, R. Fajar Gumilang, S. Amalia, and S. Bandri, "Analisa Perbandingan Pengendali PID pada Motor DC Menggunakan Metode Ziegler-Nichols dan Trial and Error," *Ranah Res. J. Multidiscip. Res. Dev.*, vol. 5, no. 3, pp. 210–218, 2023, doi: 10.38035/rrij.v5i3.758.
- [13] P. Bistak, M. Huba, and D. Vrancic, "IPDT Model-Based Ziegler – Nichols Tuning Generalized to," pp. 1–28, 2023.
- [14] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, Fifth. New Jersey: Prentice Hall Boston Columbus, 2010.
- [15] L. Y. Jun et al., "Modeling and optimization by particle swarm embedded neural network for adsorption of methylene blue by jicama peroxidase immobilized on buckypaper/polyvinyl alcohol membrane," *Environ. Res.*, vol. 183, no. October 2019, p. 109158, 2020, doi: 10.1016/j.envres.2020.109158.
- [16] R. Kennedy, J. and Eberhart, "Particle Swarm Optimization," *Proc. IEEE Int. Conf. Neural Networks*, vol. 4, pp. 1942–1948, 1995, doi: 10.1007/978-3-031-17922-8_4.
- [17] P. Shi, Jianchuan, and Xianyu, "PID parameter tuning based on improved particle swarm optimization algorithm," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2493, no. 1, 2023, doi: 10.1088/1742-6596/2493/1/012005.
- [18] B. B. Acharya, S. Dhakal, A. Bhattarai, and N. Bhattarai, "Pid speed control of dc motor using meta-heuristic algorithms," *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 12, no. 2, pp. 822–831, 2021, doi: 10.11591/ijpeds.v12.i2.pp822-831.
- [19] S. Chaturvedi, N. Kumar, and R. Kumar, "A PSO-optimized novel PID neural network model for temperature control of jacketed CSTR: design, simulation, and a comparative study," *Soft Comput.*, vol. 28, no. 6, pp. 4759–4773, 2024, doi: 10.1007/s00500-023-09138-0.
- [20] Y. O. M. Sekyere, F. B. Effah, and P. Y. Okyere, "Optimal Tuning of PID Controllers for LFC in Renewable Energy Source Integrated Power Systems Using an Improved PSO," *J. Electron. Electr. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 65–83, 2024, doi: 10.37256/jeee.3120243869.
- [21] S. H. Nagarsheth, U. Pandya, and H. J. Nagarsheth, "Control Analysis Using Tuning Methods for a Designed , Developed and Modeled Cross Flow Water Tube Heat Exchanger," *Int. J. Mech. Mechatronics Eng.*, vol. 8, no. 12, pp. 1945–1950, 2014, [Online]. Available: <https://waset.org/publications/10000270/control-analysis-using-tuning-methods-for-a-designed-developed-and-modeled-cross-flow-water-tube-heat-exchanger>
- [22] A. S. A. K. Firmansyah, "Desain Pengendalian Ketinggian Air Dan Temperatur Uap Dalam Steam Drum Boiler Menggunakan Discrete Fractional Order PID (FOPID) CONTROLLER," Tugas Akhir, Matematika FMIPA, ITS, Surabaya, 2015, p. 121 [Online]. Available: <http://repository.its.ac.id/70858/>
- [23] L. A. Putra, B. Huber, and M. Gaderer, "Real-world application of a discrete feedback control system for flexible biogas production," *Adv. Model. Simul. Eng. Sci.*, vol. 10, no. 1, 2023, doi: 10.1186/s40323-023-00251-1.