

Sistem Kontrol Tekanan Hidrogen Pada Fuel Cell Berbasis Arduino Uno Menggunakan Metode PID

Astrie Kusuma Dewi^{1*)}, Melinda Evanglin Hengkesa², Natasya Aisah Septiani³

^{1,2}Program Studi Teknik Instrumentasi Kilang, Politeknik Energi Dan Mineral Akamigas, Jl. Gajah Mada No. 38, Blora

³PT Multidaya Teknologi Nusantara, Jl. Malabar No.37, Bandung

*Penulis Korespondensi, e-mail: astrie.dewi@esdm.go.id

Received: 28/05/2026

Revised: 02/07/2025

Accepted: 14/07/2025

ABSTRAK

Penelitian ini menggunakan kontroler PID untuk mengatur tekanan hydrogen pada Fuel Cell. Pada sistem ini menggunakan sensor Pressure Transmitter, kontroler PID, dan control valve yang bekerja secara sinergis dalam loop kontrol. Pengujian dilakukan untuk memastikan fungsi setiap komponen dan stabilitas sistem saat mengalami gangguan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem dapat dengan cepat dan stabil mencapai set point tekanan yang diinginkan tanpa overshoot atau undershoot. Parameter penyetelan PID diperoleh menggunakan metode Ziegler-Nichols. Pengujian gangguan menunjukkan bahwa sistem dapat memperoleh kembali stabilitas dengan cepat. Analisis data menunjukkan keseragaman dalam waktu tunda (2 detik) dan waktu naik (2 detik), dengan sedikit variasi dalam waktu puncak dan waktu tenang. Secara keseluruhan, sistem kontrol yang diterapkan efektif dalam mengendalikan tekanan gas hidrogen pada fuel cell.

Kata Kunci: Fuel Cell, Arduino Uno, Pressure Transmitter

ABSTRACT

This research uses a PID controller to regulate hydrogen pressure in the Fuel Cell. This system uses a Pressure Transmitter sensor, PID controller, and control valve which work synergistically in the control loop. Testing is carried out to ensure the function of each component and system stability when experiencing disturbances. The test results show that the system can quickly and stably reach the desired pressure set point without overshoot or undershoot. PID tuning parameters are obtained using the Ziegler-Nichols method. Disturbance testing shows that the system can regain stability quickly. Data analysis showed uniformity in delay time (2 seconds) and rise time (2 seconds), with slight variations in peak and quiet times. Overall, the control system implemented is effective in controlling the hydrogen gas pressure in the fuel cell

Keywords: Fuel Cell, Arduino Uno, Pressure Transmitter

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi energi terbarukan saat ini semakin pesat salah satunya *fuel cell*. *Fuel cell* adalah suatu inovasi energy yang ramah lingkungan, aman, dengan tingkat kerapatan energy yang tinggi, suhu operasi yang rendah, daya yang kuat, serta efisiensi yang optimal. *Fuel cell* juga adalah pembangkit yang berupa sel bahan bakar yang menghasilkan listrik melalui proses elektrokimia dengan mengkombinasi gas hydrogen (H₂) dan oksigen (O₂). Perkembangan fuel cell sejak tahun 1839 oleh William R. Groove ("Gaseous voltaic battery") dan kini sedang dikembangkan di industry untuk mengatasi ketergantungan terhadap bahan bakarminyak yang semakin kritis. Jenis-jenis fuel cell dikenal dalam lima kategori yaitu alkaline fuel cell (AFC), phosphoric acid fuel cell (PAFC), mol-ten carbonate fuel cell (MCFC), solid oxide fuel cell (SOFC), polymer electrolyte fuel cell (PEFC). SPEC berbahan bakar hidrogen disebut proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) sedangkan yang berbahan bakar metanol disebut direct methanol fuel cell (DMFC)[1].



PEMFC sejauh ini merupakan teknologi sel bahan bakar yang paling menjanjikan karena rendahnya suhu operasi, kebisingan rendah, kemampuan start-up cepat, massa ringan dan kepadatan daya tinggi. PEMFC dikembangkan untuk digunakan pada pembangkit listrik terdistribusi kecil di rumah sakit, hotel, dan gedung perkantoran karena desainnya yang ringkas (1kW-5MW)[2].

Telah diakui secara luas bahwa PEMFC telah melewati tahap demonstrasi dan mencapai tahap Komersial awal di mana beberapa kendaraan sel bahan bakar dan konsep kendaraan telah diperkenalkan, dipamerkan dan diproduksi oleh beberapa produsen mobil terkemuka seperti Honda Clarity, dll[3]. Sel bahan bakar (fuel cell) adalah sebuah alat yang mirip dengan baterai. Perbedaannya, reaksi fuel cell yang dikonsumsi dapat diisi terus-menerus, sel bahan bakar memproduksi listrik dari penyediaan bahan bakar hidrogen dan oksigen sebagai pengikat gas buang. Hal ini berbeda dengan energi internal dari baterai. Sebagai tambahan, elektroda dalam baterai bereaksi dan berganti pada saat baterai diisi atau dibuang energinya, sedangkan elektroda fuelcell adalah katalitik dan relatif stabil[4].

Proses konversi energi pada fuel cell berlangsung secara reaksi elektrokimia yang tidak memerlukan proses pembakaran. Komponen di dalam fuel cell tidak mengalami pergerakan, sehingga tidak menimbulkan kebisingan dan kerugian akibat gesekan, sehingga efisiensinya lebih baik. Efisiensi peralatan fuel cell secara teoritis mencapai $\pm 83\%$. Komponen utama dari fuel cell peralatan adalah anoda, elektrolit dan katoda. Gas hidrogen dilewatkan pada anoda. Gas hidrogen dipecah menjadi atom hidrogen bermuatan positif (H^+ /proton) dan elektron bermuatan negatif(e^-). Elektron dialirkan ke luar melalui penghantar menuju beban yang ditunjukkan dengan lampu. Kemudian elektron mengalir menuju katoda. Di katoda elektron bertemu dengan oksigen atau udara. Oksigen dan elektron bereaksi membentuk ion oksigen bermuatan negatif (O^{2-}). Ion hidrogen positif (proton) dari anoda mengalir melalui elektrolit menuju katoda. Pada lapis batas (antar muka) elektrolit dan katoda, ion hidrogen positif (H^+) dan ion oksigen bermuatan negatif bereaksi membentuk uap air (H_2O)[5].

Beberapa keunggulan utama fuel cell dibandingkan pembangkit listrik konvensional yaitu Mempunyai efisiensi tinggi dari 40% sampai 60%, sedangkan untuk kogenerasi dapat mencapai 80%, tidak menimbulkan suara bising, konstruksinya modular sehingga fleksibel dalam menyesuaikan dengan sumber bahan bakar yang ada, mampu menanggapi dengan cepat terhadap perubahan bahan bakar atau oksigen.

Sistem energi hibrid menggunakan lebih dari satu sumber untuk menghasilkan listrik dan mendistribusikannya kepada pengguna akhir. Oleh karena itu dapat dikatakan potensi pemanfaatan mikrohidro di Indonesia berbanding lurus dengan potensi sistem energi hybrid terutamanya dalam produksi hydrogen yang kemudian dapat dikonveesi menjadi energi listrik melalui sistem Fuel Cell. Namun beberapa kekurangan dapat membatasi penggunaan aplikasi sel hydrogen sebagai bahan bakar. Fuel cell efisien tinggi menggunakan hydrogen murni tetapi, selama fungsi normal Fuel Cell, kelebihan kadar nitrogen dapat melintasi membran elektrolit, sehingga menipiskan konsentrasi hydrogen dalam kompartemen anoda, yang mengakibatkan penyebab utama ketidak efisienan energi tersebut pada perangkat Fuel Cell. Untuk itu harus dipastikan kerja Fuel Cell dapat membuat konsentrasi hydrogen setinggi mungkin (mendekati 100%). Selain itu terdapat kekurangan dari hydrogen adalah karakter eksplosifnya yang dalam perspektif keamanan dan alasan teknis sangat rentan yang mengakibatkan pemantauan hydrogen dalam aplikasi sel bahan bakar sangat penting[6].

2. METODE PENELITIAN

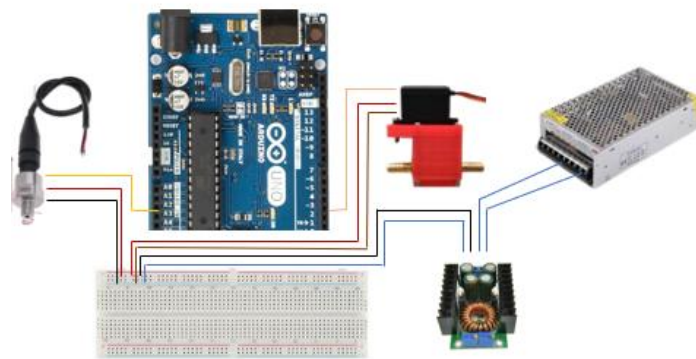
Metode penelitian ini merupakan cara kerja untuk mengumpulkan dan mengolah data yang ada sehingga menghasilkan data yang diharapkan dapat memecahkan permasalahan pada penelitian ini

2.1 Rancangan Hardware

Komponen mikrokontroler yang digunakan pada penelitian ini adalah Arduino board. Arduino Uno adalah sebuah board pengembangan elektronika berbasis mikrokontroler AVR ATmega328P. Board ini dirancang untuk memudahkan dari sensor atau pengguna, memproses data sesuai program yang diunggah, dan menghasilkan output seperti mengendalikan motor, lampu, atau berbagai perangkat lainnya. Arduino



Uno dilengkapi dengan berbagai pin input/output digital dan analog, serta mendukung komunikasi serial dan USB untuk pengaturan dan pemrograman[7]. Dengan kemudahan penggunaan dan dukungan IDE yang ramah pengguna, Arduino Uno cocok digunakan baik untuk pemula maupun pengembang yang berpengalaman dalam berbagai aplikasi seperti robotika, pengembangan berbagai proyek elektronika dengan kemampuan membaca input yang berfungsi sebagai kontroler utama dalam sistem. Arduino board akan memberikan perintah dan mengontrol komponen-komponen lain dalam rangkaian[8]. Komponen lain yang terlihat adalah sebuah servo motor, yang merupakan aktuator yang dapat digerakkan sesuai perintah dari Arduino[9]. Servo motor ini biasanya digunakan untuk mengontrol gerakan atau posisi suatu mekanisme. Untuk mendukung kinerja sistem, terdapat juga komponen catu daya yang berfungsi memberikan pasokan listrik ke seluruh rangkaian. Selain itu, terdapat sebuah step-down converter yang digunakan untuk menurunkan tegangan dari catu daya agar sesuai dengan kebutuhan komponen lain. Semua komponen-komponen ini dirangkai pada sebuah breadboard, yang memudahkan dalam melakukan konfigurasi dan pengujian rangkaian secara fleksibel. Konfigurasi ini menunjukkan sebuah sistem kontrol dasar yang menggunakan Arduino sebagai otak pengendali untuk mengontrol gerakan servo motor.



Gambar 1. Rancangan Hardware Sistem Kontrol

2.2 Rancangan Software

Pada perancangan software menggunakan arduino uno, potongan program yang digunakan terlihat pada Gambar 2.

```
Arduino_PID_Pressure.ino
1 #include <Servo.h>
2
3 #define SERVO_PIN 3 //Servo di PIN 3
4
5 int pressure_T = A3; //Pressure Transmitter di PIN A3
6 float pressure_adc = 0; //Pressure adc
7 float pressure_val = 0; //Pressure Value
8
9
10 Servo valve;
11
12 //control
13 int setpoint;
14 int error;
15 int posError;
16 float integral;
17 float derivative;
18 float dt = 0.5; //500 milliseconds
19 int control;
20 int NI;
21
22 float Kp = 2;
23 float Ki = 2;
24 float Kd = 0.8;
25 int NI_m = 0;
26
27 //get Setting Parameter
28 String ln = "";
29
30 void setup() {
31   Serial.begin(9600);
32   valve.attach(SERVO_PIN); // attaches the servo on pin 18 to the servo object
33 }
```

Gambar 2. Listing Program

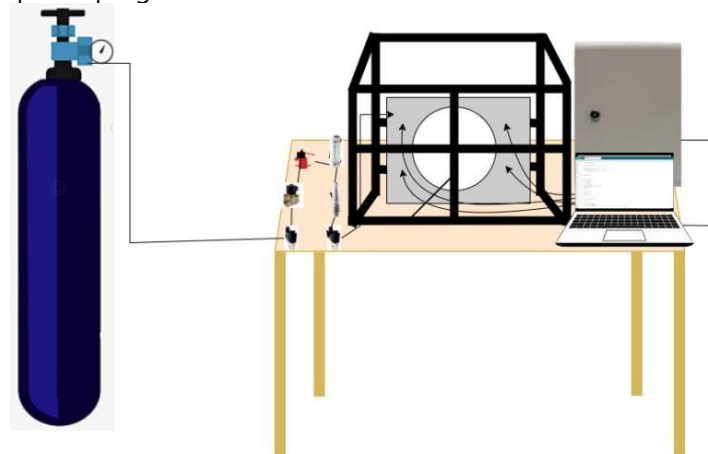
Pada potongan program di atas digunakan untuk mengontrol sistem yang terhubung ke sebuah servo motor dan sensor tekanan. Di awal kode, terdapat deklarasi library "Servo.h" yang digunakan untuk



mengendalikan servo motor. Kemudian, terdapat definisi pin servo yang akan dikendalikan, yaitu pin 3. Selanjutnya, terdapat deklarasi variabel-variabel yang digunakan dalam program, seperti "pressure_T" untuk membaca nilai sensor tekanan, serta variabel-variabel terkait kontrol PID seperti "setpoint", "error", "prevError", "integral", "derivative", dan "control". Dalam fungsi "setup()", program akan mengatur komunikasi serial dan menghubungkan servo motor ke pin yang telah ditetapkan sebelumnya. Pada bagian "loop()", program akan terus membaca nilai sensor tekanan, menghitung nilai error, dan menggunakan kontrol PID untuk menentukan posisi servo motor yang sesuai. Nilai-nilai parameter PID, seperti Kp, Ki, dan Kd, juga telah ditetapkan dalam kode program. Secara keseluruhan, kode program ini menunjukkan sebuah sistem kontrol berbasis Arduino yang menggunakan servo motor dan sensor tekanan, dengan menerapkan algoritma kontrol PID untuk menjaga nilai tekanan pada setpoint yang diinginkan.

2.3 Rancangan Prototype Alat keseluruhan

Pada Gambar 3 dijelaskan bahwa fuel cell merupakan alat utama dalam perancangan ini. Dengan tujuan untuk menghasilkan Listrik berbahan bakar hydrogen. Pertama-tama gas hidrogen akan dialirkan dari tabung hidrogen melalui pipa hidrogen. Pada pipa terdapat beberapa komponen pengontrol. Terdapat 2 buah selenoid valve on/off yang terpasang pada input pipa dan output pipa. Dan juga terdapat 1 buah servo valve yang difungsikan sebagai pengendali akhir yang mengontrol besar kecil aliran yang lewat. Setelah dari servo valve ada juga rotameter sebagai pengukur aliran gas yang lewat dan juga ada sensor Pressure Transmitter untuk mengukur tekanan sebelum masuk ke sistem utama. Pada sistem pengoperasian laptop digunakan untuk menampilkan program dari software Arduino ide ke hardware.



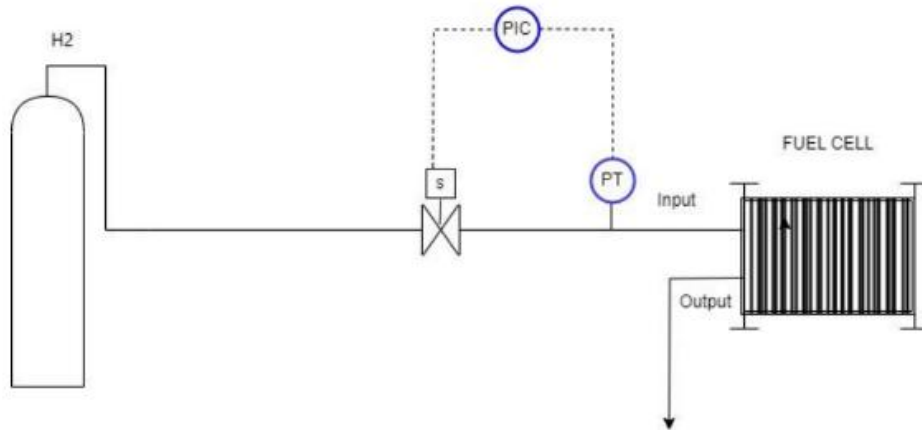
Gambar 3. Rancangan Prototipe Alat Keseluruhan

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Penelitian

Pada Gambar 4, dapat dilihat bahwa terdapat sebuah loop kontrol tekanan (feedback). Pada alur proses, system control tekanan hydrogen yang mengalir ke fuel cell terdiri beberapa komponen yang bekerja secara sinergis dalam sebuah loop pengontrolan. Pertama sensor Pressure Transmitter, fungsinya bertanggung jawab untuk mengukur tekanan hydrogen yang ada di dalam pipa setelah melewati servo valve, dan sebelum masuk ke fuel cell. Sensor ini akan terus-menerus membaca nilai tekanan hydrogen yang sebenarnya. Nilai tekanan yang diukur oleh PT dikirim dalam bentuk sinyal elektrik ke PIC untuk di analisis lebih lanjut. Kedua PIC adalah controller yang fungsinya menerima sinyal tekanan dari PT dan membandingkannya dengan nilai setpoint yang telah ditentukan sebelumnya. Jika terdapat perbedaan antara tekanan aktual (yang diukur oleh PT) dan tekanan setpoint, PIC akan menghitung koreksi yang diperlukan kemudian akan mengirim sinyal kontrol ke CV untuk menyesuaikan aliran hidrogen.

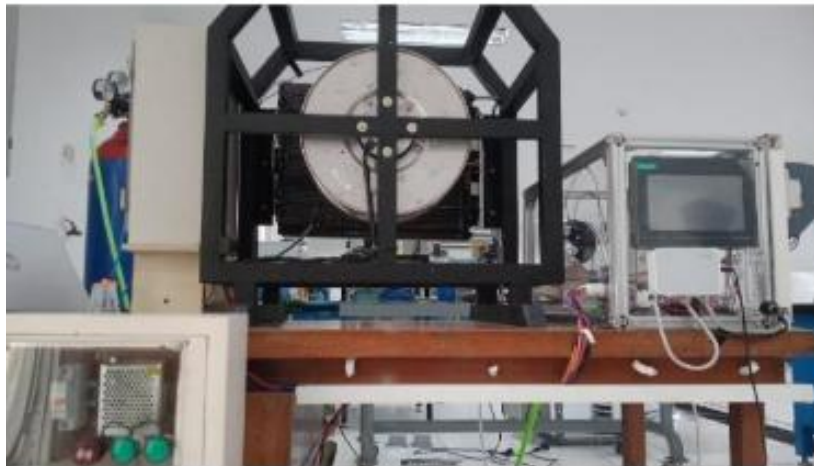




Gambar 4. P&ID Pengendalian Tekanan

Dengan sinyal yang dikirim oleh PIC mengintrusikan control valve untuk membuka lebih sesuai dengan kebutuhan untuk mencapai nilai tekanan yang diinginkan. Fungsi control valve yaitu komponen aktuator yang mengatur laju aliran gas hidrogen berdasarkan sinyal kontrol yang diterimanya dari PIC. Posisi katub dapat bisa diubah untuk menambah atau mengurangi aliran hydrogen sesuai dengan instruksi dari PIC, sehingga menyesuaikan aliran sehingga takan di dalam pipa sesuai dengan setpoint yang diinginkan.

Gambar 5 merupakan hasil implementasi rancang bangun pengendalian tekanan gas hidrogen pada pipa menggunakan PID Controller. Alat ini digunakan sebagai sarana pengamatan PID control pada pengendalian tekanan gas hidrogen. Alat ini terdiri dari 2 buah solenoid valve, 1 buah servo valve DC, 1 buah rotemeter, dan 1 buah sensor Pressure Transmitter, dan ada beberapa komponen pembantu lainnya. Solenoid valve memfunyai fungsi on/off untuk membuka atau menutup aliran yang masuk maupun yang keluar. Aliran hydrogen yang dialirkan terlebih dahulu di ukur oleh sensor Pressure Transmitter. Setelah dilakukan pengukuran aliran tersebut dikendalikan oleh Arduino melalui bukaan dari servo valve. Setelah dilakukan pengendalian aliran tersebut akan masuk ke fuel cell. Sensor dan servo valve mendapat tegangan dari power supply.



Gambar 5. Prototype Alat Keseluruhan

3.2 Pengujian

Tujuan pengujian ini dilakukan agar dapat mengetahui hasil dari rancangan hardware dan software yang telah dibuat. Adapun pengujian yang dilakukan yaitu:



3.2.1 Pengujian Sensor Pressure Transmitter WTP 83G

Pengujian sensor Pressure Transmitter WTP 83G dilakukan dengan tujuan untuk memastikan bahwa sensor berfungsi sesuai dengan spesifikasi yang diharapkan dan memenuhi standar kinerja yang diperlukan dalam pengaplikasian. Seperti terlihat pada Tabel I di bawah ini.

TABEL I.: Hasil Pengujian Semsor Pressure Transmitter

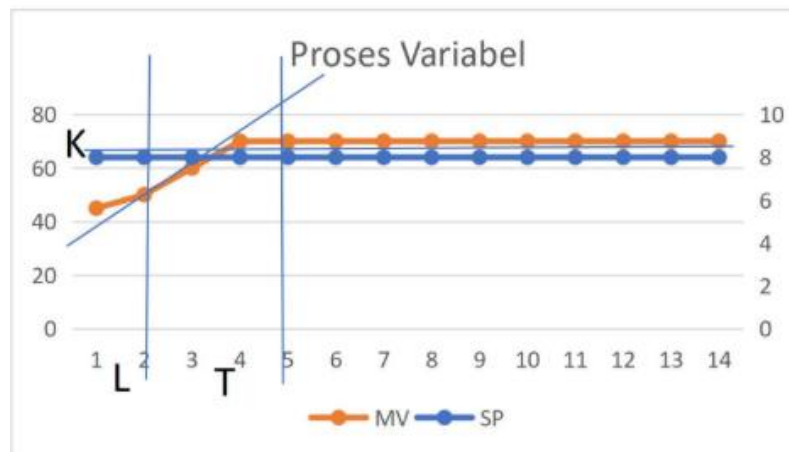
Tekanan yang Diberikan (psi)	Tegangan Keluaran diharapkan (V)	Tegangan Keluaran Terukur (V)	Deviasi (V)
0	0.5	0.52	+0.02
15	2.5	2.48	-0.02
30	4.5	4.47	-0.03

Hasil pengujian sensor WTP 83G menunjukkan bahwa sensor memberikan respon yang stabil terhadap tekanan yang diberikan dalam rentang 0 hingga 30 psi. tegangan keluaran yang terukur cenderung sedikit berbeda dari nilai teoritis yang diharapkan, dengan deviasi antara +0,02 hingga -0,03. Meskipun deviasi ini kecil, hal ini perlu diperhatikan untuk aplikasi yang mengharuskan tingkat akurasi yang tinggi. Secara keseluruhan sensor ini dapat diandalkan untuk mengukur tekanan dengan akurasi yang memadai sesuai dengan spesifikasi alat.

3.2.2 Bump Test pada proses tekanan

Pada tahap ini dilakukan pengujian bump test dengan memberikan perubahan pada bukaan servo valve dalam kondisi manual. Setiap perubahan pada bukaan valve akan mempengaruhi tekanan di dalam pipa dalam selang waktu tertentu. Dari pengujian bump test data yang dihasilkan akan dihitung menggunakan rumus L (waktu tunda) dan T (konstantan waktu) Ziegler Nichols berdasarkan table 2.

Bump test dilakukan pada kondisi awal dengan bukaan valve 45% dan PV yang dihasilkan dengan kondisi stabil 5 psi. kemudian dilakukan perubahan pada bukaan valve sebesar 70%, dan PV yang dihasilkan dalam kondisi stabil 8 psi.



Gambar 6. Grafik hasil bump test

Dari grafik pada Gambar 6 di atas, berikut keterangan untuk garis biru yang di berikan symbol L, T, dan K adalah:

- L = garis yang menentukan titik Dimana terjadi waktu tunda (L), yaitu lama waktu yang di perlukan saat terjadi perubahan
- T = garis yang menentukan titik Dimana terjadi constantan waktu(T), yaitu waktu yang diperlukan untuk system merespon perubahan.



- K = garis kestabilan pada proses

Sedangkan garis yang memotong adalah Garis singgung yang menentukan titik belok saat system merespon. Setelah dilakukan bump test, maka diperoleh beberapa parameter respon proses berikut:

$$MV0 = 45\%; PV0 = 5 \text{ psi}$$

$$MV0 = 70\%; PV0 = 8 \text{ psi}$$

$$T = 5$$

$$L = 2$$

3.2.3 Tuning Ziegler Nichols

Selanjutnya dilakukan perhitungan nilai PID controller berdasarkan hasil bump test. Pengontrolan PID terdiri dari P (Proportional), I (Integral), dan D (Derivative) yang secara keseluruhan bertujuan untuk mempercepat respon sistem dan menghasilkan respon sistem yang terbaik[10]. Kontrol PID Ziegler Nichols adalah Metode yang menawarkan pendekatan yang lebih cepat dalam menentukan parameter PID yang optimal melalui proses tuning yang efisien[11]. Dengan menerapkan PID ZN 1, dapat menghasilkan respons kontrol yang lebih responsif dan akurat, mempercepat penyesuaian operasional, dan secara signifikan meningkatkan efisiensi energi[12].

- Konstanta Proporsional

$$K_p = 1,2 \times T/L$$

$$K_p = 1,2 \times 5/2$$

$$\mathbf{K_p = 2}$$

- Konstanta Integral

$$T_i = 2 \times L$$

$$T_i = 2 \times 2$$

$$\mathbf{T_i = 4}$$

- Konstanta Derivative

$$T_d = 0,5 \times L$$

$$T_d = 0,5 \times 2$$

$$\mathbf{T_d = 1}$$

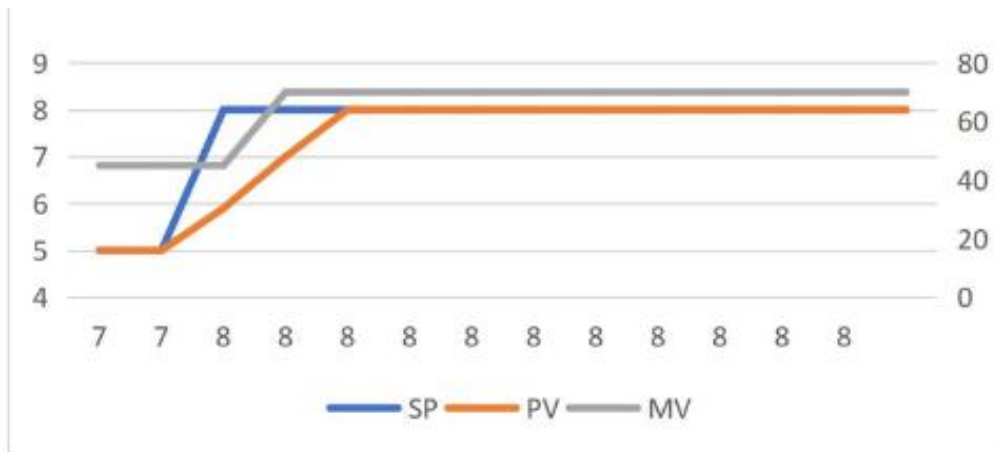
3.2.4 Uji kestabilan dengan nilai setpoint

Untuk percobaan dengan metode Ziegles Nichols, dapat dilakukan dengan menggunakan nilai tuning yang diperoleh dari hasil bump test, yaitu $K_p = 2$, $K_i = 4$, $K_d = 1$. Dan pada percobaan ini dilakukan pengujian pada controller agar memastikan system telah berjalan dengan baik. Sebab itu pada pengujian ini dilakukan perubahan pada setpoint untuk melihat respon pengendalian tekanan didalam pipa.

- **Percobaan 1 dengan nilai setpoint 5 ke 8 psi**

Pada percobaan ini dilakukan dengan nilai setpoint awal 5 psi diubah menjadi 10 psi. Kemudian dilakukan pengamatan pada perubahan tekanan yang akan terjadi. grafik perubahan dapat dilihat pada Gambar 6.





Gambar 7. Grafik Percobaan 1

Dari pengamatan perubahan tekanan yang dilihat pada Gambar 7 dengan perubahan grafik dalam waktu 60 detik menghasilkan tekanan yang mencapai setpoint yaitu 8 psi. Oleh sebab itu proses dikatakan stabil karena tekanan dapat mencapai set point dalam waktu yang cepat tanpa overshoot. Respon perubahan tekanan dapat dilihat pada Tabel II berikut.

TABEL II. Respon untuk Percobaan 1

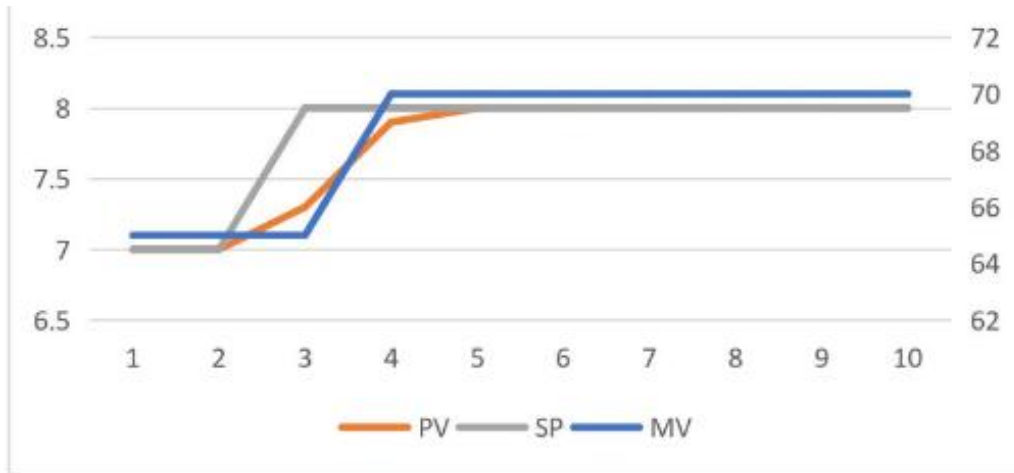
Parameter	Nilai
<i>Delay Time</i>	2 s
<i>Rise Time</i>	2 s
<i>Peak Time</i>	5 s
<i>Settling Time</i>	6 s
<i>Overshoot</i>	0 s

Pada percobaan ini, setpoint awalnya ditetapkan pada 5 psi dan kemudian diubah menjadi 8 psi. Pengamatan terhadap perubahan tekanan menunjukkan bahwa tekanan dengan cepat mencapai setpoint yang baru dalam waktu 60 detik. Grafik kestabilan yang dihasilkan memperlihatkan bahwa proses kontrol berjalan dengan baik tanpa adanya underhoot dan overshoot, yang berarti bahwa nilai tekanan tidak pernah turun di bawah setpoint selama proses berlangsung. Oleh karena itu, proses ini dikatakan stabil karena tekanan dapat mencapai setpoint dalam waktu singkat dan mempertahankan kestabilan tanpa fluktuasi yang signifikan.

➤ **Percobaan II dengan setpoint 7 ke 8 psi**

Pada percobaan ini dilakukan dengan nilai setpoint yang awalnya 6 psi diubah menjadi 8 psi. Kemudian dilakukan pengamatan pada perubahan tekanan yang akan terjadi. Grafik kestabilan dapat dilihat pada Gambar 8. Dari pengamatan perubahan tekanan yang dilihat pada Gambar 8 dengan perubahan grafik dalam waktu 60 detik menghasilkan tekanan yang mencapai setpoint yaitu 8 psi. Oleh sebab itu proses dikatakan stabil karena tekanan dapat mencapai set point dalam waktu yang cepat dengan tidak ada undershoot. Respon perubahan tekanan dapat dilihat pada table 4 berikut





Gambar 8. Grafik Percobaan 2

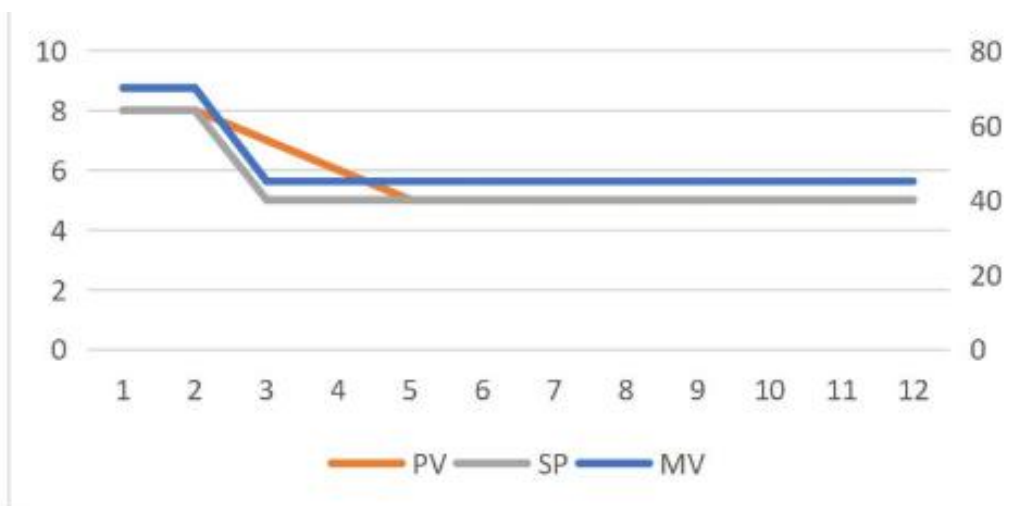
Percobaan kedua dilakukan dengan setpoint awal 7 psi, yang kemudian dinaikkan menjadi 8 psi. Dari hasil pengamatan grafik PV, terlihat bahwa perubahan setpoint dari 7 ke 8 psi juga menghasilkan respons yang cepat dan stabil. Dengan demikian, percobaan ini juga menunjukkan bahwa sistem kontrol dapat mencapai kestabilan dengan cepat tanpa ada overshoot.

TABEL III.: Respon untuk Percobaan 2

Parameter	Nilai
<i>Delay Time</i>	2 s
<i>Rise Time</i>	2 s
<i>Peak Time</i>	4 s
<i>Settling Time</i>	5 s

➤ **Percobaan III dengan setpoint 8 ke 5 psi**

Percobaan ini dilakukan dengan menaikan nilai setpoint dari 8 ke 5 psi. kemudian melakukan pengamatan pada perubahan tekanan. Grafik dapat dilihat pada Gambar 9. dibawah ini.



Gambar 9. Grafik Percobaan 3



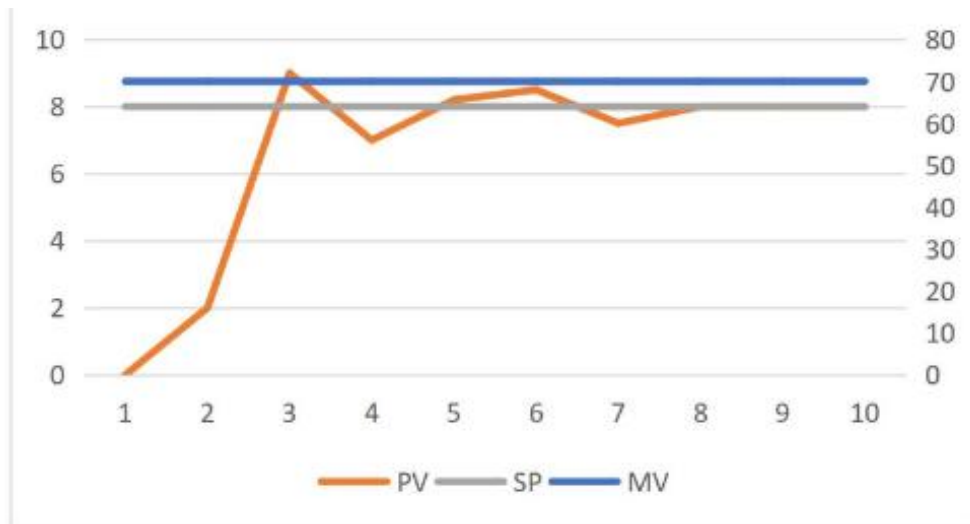
Dari pengamatan tekanan yang dihasilkan pada grafik dengan nilai setpoint yang diubah dari 8 ke 5 psi dengan tekanan yang dihasilkan mencapai setpoint. Maka Pada percobaan ketiga, setpoint yang di berikan yaitu dari 8 ke 5 psi. dengan pengamatan pada tekanan yang dihasilkan mencapai setpoint. Maka proses dikatakan stabil. Tanpa adanya undershoot dan juga overshoot. Secara keseluruhan, dari ketiga percobaan ini dapat disimpulkan bahwa sistem kontrol yang digunakan mampu mencapai setpoint yang diinginkan dengan cepat dan stabil.

TABEL IV: Respon untuk Percobaan 3

Parameter	Nilai
<i>Delay Time</i>	2 s
<i>Rise Time</i>	2 s
<i>Peak Time</i>	1 s
<i>Settling Time</i>	5 s

3.2.5 Uji kestabilan saat memberikan gangguan

Percobaan ini dilakukan dengan menaikkan nilai setpoint dari 8 ke 5 psi. kemudian melakukan pengamatan pada perubahan tekanan. Grafik dapat dilihat pada Gambar 10. dibawah ini.



Gambar 10. Grafik Uji Kestabilan terhadap Gangguan

Proses pengujian sistem dengan memberikan gangguan dapat menghasilkan grafik seperti pada Gambar 10 diatas. Berdasarkan grafik dapat diketahui bahwa respon yang di hasilkan stabil pada 8 detik setelah diberikan gangguan. Respon diberikan sistem mengatasi gangguan dengan membuka valve seperempat dari kondisi normal.

3.3 Analisis Data

Delay time adalah waktu yang dibutuhkan sistem untuk pertama kali mencapai 50% dari nilai akhirnya, yang konsisten di ketiga tabel (2 s), menunjukkan kesamaan dalam waktu tunda dalam merespons perubahan input. Rise time adalah waktu yang dibutuhkan sistem untuk naik dari 10% ke 90% dari nilai akhirnya, juga konsisten di ketiga tabel (2 s), menunjukkan keseragaman dalam waktu yang dibutuhkan untuk sebagian besar dari nilai akhir. Peak time, yang merupakan waktu yang dibutuhkan sistem untuk mencapai nilai puncaknya, bervariasi. Tabel V berikut merupakan tabel perbandingan, hasil dari 3x percobaan:

TABEL V: Perbandingan hasil Percobaan 1, 2 dan 3

Parameter	Percobaan 1	Percobaan 2	Percobaan 3	Keterangan
<i>Delay Time</i>	2 s	2 s	2 s	Konsisten



Parameter	Percobaan 1	Percobaan 2	Percobaan 3	Keterangan
<i>Rise Time</i>	2 s	2 s	2 s	Konsisten
<i>Peak Time</i>	5 s	4 s	1 s	Percobaan 3 paling cepat
<i>Settling Time</i>	6 s	5 s	5 s	Percobaan 1 paling lama

Waktu puncak (Peak Time) pada masing-masing percobaan memiliki nilai yang berbeda yaitu sebesar, 5s, 4 s, dan 1 s, dimana, peak time untuk percobaan ke-3 merupakan paling cepat, sehingga dapat menunjukkan perbedaan mencapai dalam respons sistem atau jenis kontrol yang digunakan. Settling time adalah waktu yang dibutuhkan sistem untuk berada dan tetap dalam batas toleransi tertentu dari nilai akhir, Percobaan ke-2 dan Percobaan ke-3 menunjukkan waktu pengendapan sebesar 5 s, sementara pada Percobaan pertama menunjukkan 6 s, yang mungkin menunjukkan adanya perbedaan dalam stabilitas atau karakteristik sistem lainnya. . Kesimpulannya, delay time dan rise time konsisten dari ketiga tabel hasil percobaan di atas, menunjukkan keseragaman dalam waktu awal dan kecepatan respon sistem. Namun, peak time dan settling time menunjukkan variasi, yang dapat diakibatkan oleh perbedaan dalam desain atau parameter sistem.

4. KESIMPULAN

Pengambilan data dilakukan secara manual dengan mengukur tegangan keluran pada fuel cell saat beroperasi menggunakan multimeter, pengambilan data yang dilakukan selama 15 menit dengan kondisi running dengan tekanan supply sebesar 8 psi dan mampu memberikan keluaran tegangan awal 75. volt dan akan stabil pada 63 volt, dalam jangka waktu 15 menit. Dari hasil penelitian yang dilakukan dapat disimpulkan bahwa dengan sistem kontrol tekanan yang efektif dan aman, fuel cell dapat beroperasi dengan stabil. Kontrol tekanan ini juga dapat mencegah terjadinya resiko berbahaya yang dapat menyebabkan ledakan. Jadi secara umum sistem control PID bekerja cukup baik karena delay time dan rise time selalu sama yaitu 2 detik, yang menunjukkan bahwa sistem memiliki respon stabil dan konsisten. Selain itu, dengan menjaga tekanan yang stabil memungkinkan pengoperasian fuel cell berjalan secara efektif dan menghasilkan output yang diinginkan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. RAMADHAN, A. SUBIANTORO, J. T. WIJAYA, and S. SYAMAUN, "Optimasi Kinerja Fuel Cell pada Sistem Kereta Hibrida menggunakan Metode External Energy Maximization Strategy," *ELKOMIKA J. Tek. Energi Elektr. Tek. Telekomun. Tek. Elektron.*, vol. 11, no. 2, p. 537, 2023, doi: 10.26760/elkomika.v11i2.537.
- [2] W. R. W. Daud, R. E. Rosli, E. H. Majlan, S. A. A. Hamid, R. Mohamed, and T. Husaini, "PEM fuel cell system control: A review," *Renew. Energy*, vol. 113, pp. 620–638, 2017, doi: 10.1016/j.renene.2017.06.027.
- [3] J. C. Kurnia, B. A. Chaedir, A. P. Sasmito, and T. Shamim, "Progress on open cathode proton exchange membrane fuel cell: Performance, designs, challenges and future directions," *Appl. Energy*, vol. 283, no. December 2020, p. 116359, 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.116359.
- [4] I. A. Safitri, B. Rudiyanto, A. Nursalim, and B. Hariono, "Uji Kinerja Smart Gried Fuel Cell Tipe Proton Exchange Membran (PEM) Dengan Penambahan Hidrogen," *J. Ilm. Inov.*, vol. 16, no. 1, 2016, doi: 10.25047/jii.v16i1.2.
- [5] Sulistyono dan Darjat, "Kajian Fuel Cell (Sel Bahan Bakar) dari Tinjauan Material dan Daya Keluaran," *Proceeding Semin. Nas. Tah. Tek. Mesin XV (SNTTM XV)*, no. Snttm Xv, pp. 652–657, 2016.
- [6] Erdiansyah, "Tinjauan Produksi Hidrogen Dan Optimasi Fuel Cell Dalam Hydro-Power Plant," vol. 15, no. 1, pp. 25–31, 2021.
- [7] S. A. Nugroho, I. K. D. Suryawan, and I. N. K. Wardana, "Penerapan Mikrokontroler Sebagai Sistem Kendali Perangkat Listrik Berbasis Android," *Eksplora Inform.*, vol. 4, no. 2, pp. 135–144, 2015, [Online]. Available: <https://eksplora.stikom-bali.ac.id/index.php/eksplora/article/view/60/46>
- [8] M. Fauzi, M. Luqman, and Y. Yulianto, "Rancang Bangun Modul Control SPWM Berbasis Arduino Uno," *J. Elektron. dan Otomasi Ind.*, vol. 8, no. 1, p. 92, 2021, doi: 10.33795/elk.v8i1.232.
- [9] A. dian sukowati Sukowati, "Sistem Kendali PID Aplikasi Mini Plant Water Flow Berbasis Arduino," *J. Elektron. dan*



Otomasi Ind., vol. 10, no. 3, pp. 471–478, 2023, doi: 10.33795/elkolind.v10i3.3677.

- [10] K. F. Akbar, E. S. Budi, and Y. Yulianto, "Kontrol PID Pada Steam Mini Plant Boiler Menggunakan PLC dan HMI," *J. Elektron. dan Otomasi Ind.*, vol. 7, no. 3, p. 2, 2021, doi: 10.33795/elkolind.v7i3.201.
- [11] N. R. Ramadhan, "Simulasi Kontrol PID Ziegler-Nichols pada Sistem Penghancuran Batu dengan Motor Induksi 3 Fasa 20HP," *J. Elektron. dan Otomasi Ind.*, vol. 11, no. 1, pp. 227–237, 2024, doi: 10.33795/elkolind.v11i1.5146.
- [12] V. V. Patel, "Ziegler-Nichols Tuning Method: Understanding the PID Controller," *Resonance*, vol. 25, no. 10, pp. 1385–1397, 2020, doi: 10.1007/s12045-020-1058-z.

