

SISTEM PINTU AIR OTOMATIS BERDASARKAN DEBIT AIR PADA INTAKE PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKROHIDRO

(AUTOMATIC WATER GATE SYTEM BASE ON WATER DEBIT OF MICROHYDRO POWER PLANT INTAKE)

Noer Hajas Dwiharnis¹, Porman Pangaribuan, M.T.², Agung Surya Wibowo, S.T., M.T.³

^{1,2,3}Prodi S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

¹noerhajasdwiharnis@student.telkomuniversity.ac.id, ²porpangrib@gmail.com,

³agungsw@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

pada potensi tenaga air yang melimpah, maka pembangkit listrik skala kecil mulai dikembangkan, salah satunya Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH). PLTMH merupakan salah satu energi alternatif yang dapat dikembangkan pada negara-negara yang memiliki sumber tenaga air yang tersebar luas, seperti Indonesia. Namun ada beberapa masalah yang menyebabkan PLTMH tidak dapat beroperasi secara maksimal, salah satu masalahnya adalah debit air yang mengalir dari bendungan ke *intake* terkadang tidak stabil karena faktor curah hujan yang tidak menentu.

Pintu air pada PLTMH selama ini masih menggunakan sistem manual dengan memanfaatkan operator (manusia), yang mana dalam hal ini terkadang terjadi kesalahan dalam pengambilan keputusan. Solusi penulis untuk masalah tersebut adalah dengan membuat sistem pintu air otomatis, sehingga ketika kondisi debit air pada *intake* berlebih atau kurang, maka pintu air ini dapat terbuka dan tertutup sesuai debit air yang dibutuhkan secara otomatis. Pengukuran debit air menggunakan *water flow sensor*, hasil dari pembacaan sensor akan diteruskan ke aktuator (motor DC) sebagai penggerak pintu. Pada tugas akhir ini penulis akan melakukan perancangan sistem pengendali pintu air dengan menggunakan metode *Fuzzy Logic*.

Berdasarkan data yang diperoleh dari penelitian yang telah dilakukan, sistem mengalami osilasi terhadap perubahan debit air, namun mampu mendekati nilai set point. Hal ini dilihat dari pengujian debit air pada set point 3 l/m respon sistem mengalami *steady state* dengan *range* debit air 2,92 l/m–2,95 l/m dan pengujian debit air pada set point 3,5 l/m respon sistem mengalami *steady state* dengan *range* debit air 3,44 l/m - 3,47 l/m

Kata Kunci : PLTMH, *Water Flow Sensor*, pintu air otomatis, *Fuzzy logic*

Abstract

With the current technological developments and the potential for electrical generator, especially in the water resources, small-scale power plants are being developed, one of it is the Micro Hydro Power Plant (PLTMH). PLTMH is the alternative electrical gainer that can be developed in countries that have wide-spread water resources, such as Indonesia. However, there are several problems that cause PLTMH to not be able to operate optimally, one of the problems is that the water flowing from the dam to the intake is sometimes unstable due to uncertain rainfall factors.

The sluice gate in many PLMH has still been using manual systems operation, it has a human to open or close it, which in this case sometimes makes mistakes in decision making. The author's solution to this problem is to create an automatic the sluice gate system, so that when the water discharge conditions at the excess intake or less, the sluice gate will open and close according to the required water discharge automatically. Measurement of water discharge using a water flow sensor, the result of reading the sensor will be forwarded to the actuator (DC motor) as the drive. In this final project the author will design the sluice gate control system using the Fuzzy Logic method.

Based on data that gained by the research, the system was oscillated. But, its approaching the set point value. Its seen when researcher test the water debit at 3l/m set point, the response of the system was steady state at water debits range 2.92l/m - 2.95l/m. And when the researcher test at 3.5l/m set point, the response of the system was steady state at water debits range 2.44l/m - 3.47l/m.

Key words : PLTMH, *Water Flow Sensor*, the sluice gate, *Fuzzy logic*

1. Pendahuluan

PLTMH biasanya memanfaatkan aliran air sungai yang masuk melalui *intake*, namun volume air yang mengalir pada *intake* berubah-ubah tergantung dari perubahan tingkat air sungai yang dipengaruhi oleh curah hujan, oleh karena itu pintu *intake* harus di kontrol untuk menghindari jumlah debit air yang berlebih, tetapi pemanfaatan teknologi dibidang pengaturan pintu air pada PLTMH di Indonesia masih sangat minim digunakan. Pintu air yang terdapat pada PLTMH masih menggunakan cara manual dalam pengoperasiannya. Tentu saja hal ini tidak efektif, tidak efektif karena ketika pengoperasiannya masih manual (operator), kemungkinan terjadinya kesalahan sangatlah tinggi dan mengingat pintu air berperan penting sebagai pengatur aliran air pada PLTMH.

Dikarenakan fungsinya yang sangat vital, maka dibutuhkan respon yang cepat dan tingkat kesalahan yang rendah dalam pengoperasian pintu air ini, yang apabila dilakukan secara manual sangat sulit diterapkan. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, peneliti merancang sistem pintu air otomatis menggunakan metode *Fuzzy logic* dalam menentukan besaran pembukaan pintu air berdasarkan debit air yang mengalir pada *intake*, sistem pengukuran debit air ini menggunakan *water flow sensor*. Dengan sistem pintu air otomatis ini, diharapkan debit air yang mengalir pada *intake* lebih stabil dan faktor kelalaian manusia yang sering terjadi dapat dihindari.

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Pintu Intake pada PLTMH

Pintu air *intake* pada PLTMH digunakan untuk mengontrol air yang akan dialirkan ke saluran pembawa. Bagian ini dilengkapi dengan pintu yang dapat dibuka dan ditutup, sehingga besar kecilnya air yang mengalir dapat dikontrol dengan baik.

2.2 Debit Air

Debit air merupakan suatu besaran yang menyatakan banyaknya air yang mengalir dari suatu sumber persatuan waktu, biasanya diukur dalam satuan liter/detik. Pengukuran debit air merupakan hal yang penting agar dapat memenuhi kebutuhan air untuk pembangkit tenaga listrik, irigasi dan kebutuhan lainnya.

2.3 Sistem Kontrol

Dalam Perancangan sistem pintu air otomatis pada tugas akhir ini dikendalikan dengan menggunakan beberapa modul elektronik, yaitu *water flow sensor*, motor DC, *relay* dan Modul sensor kecepatan optocoupler dan rotary encoder disc yang diproses di arduino uno dengan menggunakan metode *Fuzzy logic* sebagai sistem kendali.

2.4 Metode Fuzzy Logic

Fuzzy secara bahasa memiliki arti samar, dengan kata lain logika *Fuzzy* adalah logika yang samar. Dimana pada logika *Fuzzy* kebenaran suatu nilai tidak dapat ditentukan secara jelas. Fungsi keanggotaan pada logika *Fuzzy* memiliki rentang nilai antara 0 sampai dengan 1. Rentang nilai ini menunjukkan kondisi dimana suatu nilai dapat bernilai salah dan benar secara bersamaan tergantung pada bobot keanggotaan yang dimilikinya[1].

Implementasi *fuzzy logic* terdapat 3 proses utama yaitu *fuzzification*, *Fuzzy Rule* dan Defuzzification. Pada logika *Fuzzy* menggunakan 3 parameter untuk membentuk keanggotaan dalam himpunannya. Berikut parameter pembentuk himpunan *Fuzzy logic* :

- Variabel Linguistik Variabel linguistik adalah Variabel yang berupa kalimat atau kata dan bukan berupa angka. Variabel linguistik kurang spesifik, tetapi lebih informatif.
- Derajat Keanggotaan Suatu kurva yang menunjukkan pemetaan titik-titik masukan data kepada nilai keanggotaannya yang mempunyai interval mulai 0 sampai 1.
- Fungsi Keanggotaan Hubungan-hubungan pemetaan masukan dan keluaran, kemudian digambarkan ke dalam grafik fungsi, yaitu ; linier naik, linier turun, kurva segitiga, kurva trapezium. Fungsi inilah yang disebut fungsi keanggotaan[2].

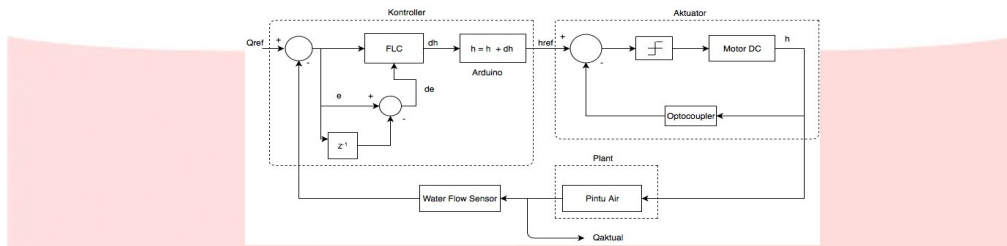
3. Perancangan Sistem

Perancangan sistem ini akan dibuat sebuah pintu air otomatis berdasarkan debit air dengan menggunakan metode *fuzzy logic*. Perancangan sistem ini dibagi menjadi tiga bagian yaitu desain sistem, perangkat keras dan perancangan perangkat lunak.

3.1 Desain Sistem

Desain umum sistem pada perancang ini merupakan hasil perhitungan dari *water flow sensor* yang akan diproses oleh arduino uno kemudian data tersebut akan diproses menggunakan metode logika *Fuzzy*. Nilai dari logika *Fuzzy* yang akan menentukan besaran tinggi buka dan tutup pintu air dengan menggunakan

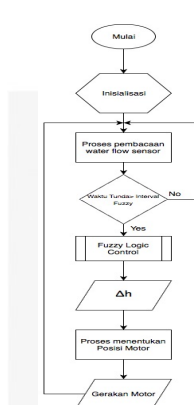
motor DC, serta digunakan sensor kecepatan optocoupler dengan prinsip kerja seperti rotary encoder yang berfungsi sebagai kontrol posisi ketinggian pintu air apakah sudah sesuai yang diinginkan atau tidak. Keluaran dari sensor kecepatan optocoupler akan menjadi *feedback* ke arduino uno, sehingga arduino uno dapat mengatur arah gerakan motor DC, yaitu berputar searah jarum jam maupun berlawanan arah jarum jam (pintu terbuka atau tertutup). Berikut Diagram Blok pada gambar 3.1 dari sistem yang dirancang



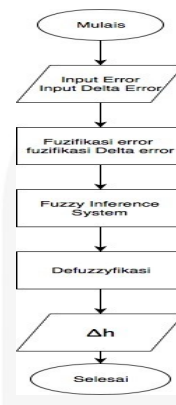
Gambar 3.1 Diagram Blok Sistem

3.2 Desain Perangkat Lunak

Perangkat lunak yang digunakan pada penelitian ini adalah Arduino IDE atau *open-source arduino software*. *Software* ini digunakan untuk menulis kode pada modul mikrokontroler arduino uno. Kode yang ditulis berperan sebagai *processor* dari alat uji yang akan dirancang. Data keluaran dari output dibaca oleh mikrokontroler kemudin diolah dengan menggunakan bahasa pemrograman. Logika dasar dari program arduino uno penelitian ini ditujukan pada diagram alir perangkat lunak sebagai berikut :



Gambar 3.2 Diagram Alir Utama



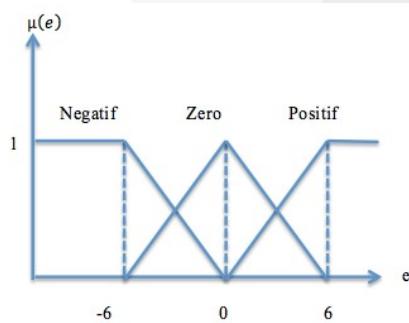
Gambar 3.3 Diagram Alir Fuzzy Logic

3.3 Perancangan Logika Fuzzy

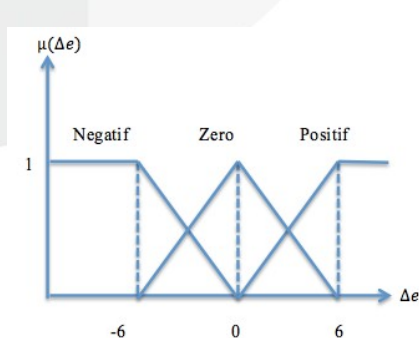
Metode utama dalam sistem ini adalah logika fuzzy. Pada sistem ini terdapat dua *input* dari data debit air, *input* tersebut adalah nilai *error* dan *delta error* . *Output* dari hasil pemrosesan logika fuzzy berupa ketinggian dari pintu air. Sistem yang menggunakan logika fuzzy sebagai metode utamanya akan memiliki beberapa proses yang saling berkaitan. Berikut penjelan dari tiap proses pada metode logika fuzzy.

- Fuzzifikasi

Sistem ini memiliki 2 masukan dari 1 data debit air dari hasil pengukuran menggunakan *water flow sensor*. Masukan tersebut adalah data berupa nilai *error* dan nilai *delta error*, dari dua masukan tersebut dibuatlah fungsi keanggotaan dengan variabel linguistik. Terdapat 6 nilai linguistik, yakni 3 untuk *input error* (Negatif, Zero, Positif) dan 3 untuk *input delta error* (Negatif, Zero, Positif) dengan fungsi keanggotaan segitiga dan trapesium. Berikut proses fuzzifikasi tersebut :

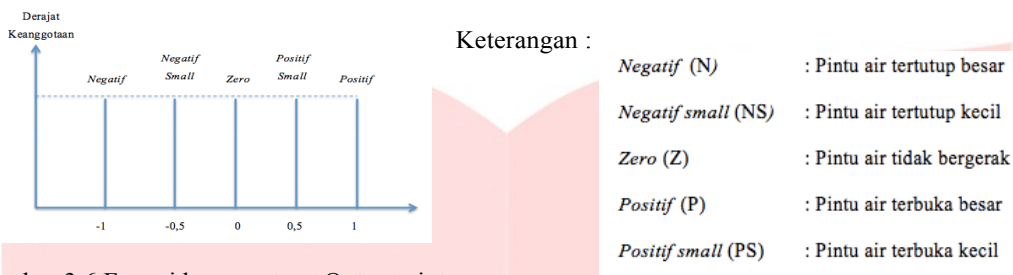


Gambar 3.4 Masukkan Error



Gambar 3.5 Masukkan Delta Error

Pada output sistem digunakan model sugeno yang memiliki fungsi *output singel tone*. Bentuk dengan derajat keanggotaan satu pada suatu nilai crisp tunggal dan nilai nol pada suatu nilai crisp lainnya. Keluaran dari hasil fuzzy memiliki 5 nilai linguistik yaitu *Negatif small* (NS), *Negatif* (N), *Zero* (Z), *Positif small* (PS), *Positif* (P).



Gambar 3.6 Fungsi keanggotaan Output pintu

• Rule Inference

Pada *rule inference*, terjadi proses pengolahan data masukan fuzzyfikasi dengan hasil keluaran yang dikehendaki berdasarkan aturan-aturan tertentu. Aturan tersebut yang akan menentukan respon dari sistem. Berikut rules untuk pengaturan pengambilan keputusan :

E/DE	N	Z	P
N	N	NS	P
Z	N	Z	P
P	N	PS	p

Gambar 3.7 Rules

• Defuzzyfikasi

Langkah terakhir dari proses logika fuzzy adalah defuzzyfikasi, yakni pemetaan nilai-nilai *output* fuzzy yang dihasilkan pada tahap *rule inference* ke nilai keluaran kuantitatif. Keluaran dari proses defuzzyfikasi adalah delta h (dh) yang nantinya nilai tersebut akan diakumulasikan dengan ketinggian pintu saat ini sehingga dapat menjadi nilai ketinggian pintu yang baru. Untuk menentukan nilai delta h pada proses defuzzifikasi digunakan metode centroid. Pada metode ini penetapan nilai crisp dengan cara mengambil titik pusat daerah fuzzy dengan cara menghitung z akhir dengan merata-rata semua z berbobot. Berikut adalah rumus metode centroid:

$$\text{Delta H} = \frac{\sum_{i=1}^n (\mu_i \cdot k_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_i}$$

Keterangan:

- n = banyaknya data.
- i = variable penghitung
- μ = nilai keanggotaan.
- K = nilai *fuzzy rule*.

4. Pengujian dan Analisis

Pada bab ini akan dibahas mengenai pengujian dan analisa terhadap realisasi alat berdasarkan perencanaan sistem yang telah dibahas pada bab sebelumnya. Pengujian ini terbagi 2 tahap. Tahap pertama dilakukan pengujian tingkat akurasi pada sub sistem yaitu sitem sensor dan sistem aktuator terhadap plant. Tahap kedua pengujian secara menyeluruh pada sistem yang saling terintegrasi. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui keandalan sistem yang telah dibuat.

4.1 Pengujian Pengukuran debit air

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui akurasi sensor debit abit air. Pengujian ini dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran debit air secara manual dengan pengukuran debit air menggunakan *water flow sensor*. Pengujian ini dilakukan pada prototype dengan waktu yang sama

4.1.1 Pengukuran debit air perhitungan manual

Tabel 4.1 Percobaan Perhitungan Manual

Percobaan	Volume (l)	Time (s)
1	0,78	10,22
2	0,8	10.32
3	0,81	10.26
4	0,74	10.32
5	0,79	10.27
6	0,79	10.25
7	0,8	10.33
8	0,81	10.3
9	0,75	10.23
10	0,81	10.22
11	0,75	10.22
12	0,81	10.34
13	0,78	10.27
14	0,76	10.24
15	0,75	10.35
16	0,8	10.25
17	0,78	10.28
18	0,82	10.36
19	0,81	10.27
20	0,76	10.22
21	0,81	10.25
22	0,78	10.29
23	0,79	10.25
24	0,82	10.32
25	0,77	10.24
26	0,79	10.22
27	0,74	10.19
28	0,76	10.21
29	0,81	10.24
30	0,8	10.34
Rata-rata	0,7857	9.942
Standar Deviasi	0,0243	1.766

Pada Tabel 4.1 merupakan hasil percobaan pengukuran debit air secara manual yang dilakukan sebanyak 5 kali percobaan dalam waktu 10s dengan menggunakan stopwatch untuk mengisi sebuah gelas ukur. Untuk melakukan perhitungan digunakan rumus dibawah ini :

$$Q = \frac{v}{t} = \frac{0,7857 \text{ l}}{9,942 \text{ s}} = 0,07902 \text{ l/s} = 4,7417 \text{ l/m}$$

Dimana .

Q : Debit air (l/m)

V : Volume (l)

T : waktu (m)

Dari hasil perhitungan secara manual didapat nilai acuan debit air adalah 4,7417 l/m

4.1.2 . Pengukuran Debit Air *Water Flow Sensor*

Tabel 4.2 Percobaan menggunakan water flow sensor

Percobaan	Debit (l/m)
1	4,663695652
2	4,664130435
3	4,600217391

4	4,616521739
5	4,568913043
6	4,594782609
7	4,64826087
8	4,649130435
9	4,66326087
10	4,699347826
11	4,693043478
12	4,626304348
13	4,66326087
14	4,677826087
15	4,586956522
16	4,623043478
17	4,613478261
18	4,677826087
19	4,519130435
20	4,621956522
21	4,630652174
22	4,584782609
23	4,599782609
24	4,646086957
25	4,626304348
26	4,608695652
27	4,660652174
28	4,660652174
29	4,629347826
30	4,631086957
Rata-rata	4,6316
Standar Deviasi	0,0385

Pada Tabel 4.2 merupakan hasil pengukuran debit air dengan menggunakan *water flow sensor* sebanyak 30 kali dalam waktu 10 s. Rata-rata debit yang didapatkan adalah 4,6316 l/m dengan standar deviasi 0,0385. Setelah mendapatkan hasil dari kedua percobaan dilakukan perhitungan nilai akurasi untuk mengetahui nilai toleransi pada *water flow sensor*. Nilai akurasi dapat dihitung menggunakan rumus berikut :

$$\begin{aligned} \text{Akurasi} &= \frac{\text{Hasil pengukuran sensor}}{\text{Hasil pengukuran manual}} \times 100\% \\ &= \frac{4,6316}{4,7417} \times 100\% = 97\% \end{aligned}$$

Jadi nilai toleransi pada *water flow sensor* adalah 3%

4.2 Pengujian Sistem Aktuator Pada Pintu Air

Pengujian ini dilakukan dengan cara memprogram pada Arduino Uno menggunakan software Arduino IDE untuk menggerakkan motor sesuai ketinggian pintu yang diinginkan. Berikut hasil pengujian dari sistem aktuator.

Tabel 4.3 Pengujian Ketinggian Pintu Air

Percobaan ke-	Arduino (cm)	Manual (cm)	Derajat Tujuan (°)	Derajat Tercapai (°)	Error	Percent Error
PENGUJIAN MEMBUKA PINTU AIR						
1	0,5	0,491	1775	1764	0,009	1,8
2	1	0,921	3550	3546	0,079	7,9
3	1,5	1,493	5325	5310	0,007	0,466
4	2	1,993	7100	7092	0,007	0,35
5	2,5	2,471	8875	7092	0,029	1,16
6	3	2,953	10650	10638	0,047	1,566
7	3,5	3,493	12425	12420	0,007	0,2

8	4	3,961	14200	14184	0,039	0,975
9	4,5	4,467	15975	15966	0,033	0,733
10	5	4,916	17750	17730	0,084	1,68
11	5,5	5,483	19525	19512	0,017	0,309
12	6	5,953	21300	21294	0,047	0,783
13	6,5	6,485	23075	23058	0,015	0,230
14	7	6,928	24850	24840	0,072	1,028
PENGUJIAN MENUTUP PINTU AIR						
15	6,5	6,494	23075	23094	0,006	0,092
16	6	5,957	21300	21312	0,043	0,716
17	5,5	5,492	19525	19530	0,008	0,145
18	5	4,912	17750	17766	0,088	1,76
19	4,5	4,484	15975	15984	0,016	0,355
20	4	3,991	14200	14220	0,009	0,225
21	4,5	4,473	12425	12438	1,027	0,355
22	3	2,982	10650	10656	0,018	0,6
23	2,5	2,411	8875	8892	0,089	3,56
24	2	1,972	7100	7110	0,028	1,4
25	1,5	1,424	5325	5328	0,076	5,066
26	1	0,981	3550	3564	0,019	1,9
27	0,5	0,494	1775	1782	0,006	1,2
BUKA PINTU PENGUJIAN MEMBUKA PINTU AIR						
28	1,3	1,259	4615	4608	0,041	3,153
29	2,3	2,276	8165	8154	0,024	1,043
30	3,3	3,281	11715	11700	0,019	0,575
31	4,7	4,683	16685	16668	0,017	0,361
32	5,3	5,272	18815	18810	0,028	0,528
Rata – Rata Percent Error						1,32%
Akurasi						98,67%

Tabel 4.3 merupakan hasil pengukuran ketinggian pintu air secara manual dan menggunakan arduino, pengujian ini dilakukan dengan cara memberi perintah kepada motor agar bergerak sesuai ketinggian yang diinginkan, kemudian hasil dari ketinggian dari arduino dibandingkan dengan pengukuran ketinggian pintu secara manual menggunakan penggaris. Algoritma perhitungan sistem aktuator ini adalah sebagai berikut :

$$\text{Derajat Tercapai} = FK \times P$$

Dimana :

$$\text{Derajat Tercapai} = \text{Output Ketinggian pintu}$$

$$FK = \text{Faktor koreksi (335}^\circ/\text{mm)}$$

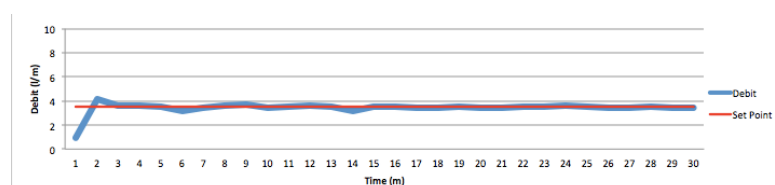
$$P = \text{perintah ketinggian pintu}$$

Dari Tabel 4.3 dapat dilihat hasil pengujian dari kalibrasi sistem aktuator, didapatkan nilai rata-rata dari percent error sebesar 1,32% dengan nilai error terbesar yang didapat yaitu 0,089. Nilai *percent error* tersebut didapatkan dari $(\text{Nilai Error} / \text{alat ukur}) * 100\%$. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan nilai akurasi adalah 98,67% $(100 - \text{rata-rata percent error})$.

4.3 Pengujian Sistem Kontrol Keseluruhan

Pengujian menggunakan Logika fuzzy ini dilakukan dengan cara menentukan ketinggian air yang sesuai untuk *set point* yang diinginkan, kemudian motor akan bergerak membuka ataupun menutup sesuai dengan output dari sistem logika fuzzy yang dibuat. Pengujian ini dilakukan dengan 2 set point yaitu 3 liter/menit dan 3,5 liter/menit.

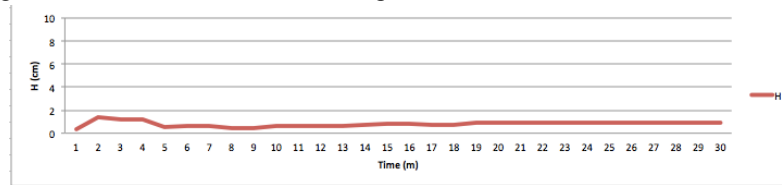
- Percobaan 1 : Set Point 3,5 l/m



Gambar 4.1 Grafik Data Debit Air Pada Set Poin 3,5 l/m

Berdasarkan *control* fuzzy yang dilakukan diperoleh data sesuai grafik diatas. Terlihat bahwa karakteristik sistem ini mengalami osilasi, hal ini terjadi karena keluaran debit air yang berubah-ubah. Dengan

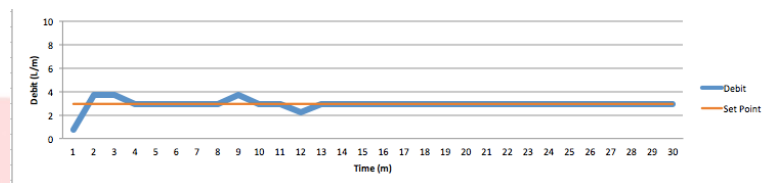
perubahan tersebut terlihat *maximum overshoot* terjadi pada menit ke-2 dengan besar *maximum persen overshoot* 20,28%. Pada menit ke-2 debit air mencapai 4,15 l/m dan mulai mengalami *steady state* setelah 26 menit dengan range debit 3,44 l/m - 3,47 l/m saat respon telah masuk $\pm 2\%$ dari keadaan *steady state*.



Gambar 4.2 Ketinggian Pintu Air pada Set Point 3,5 l/m

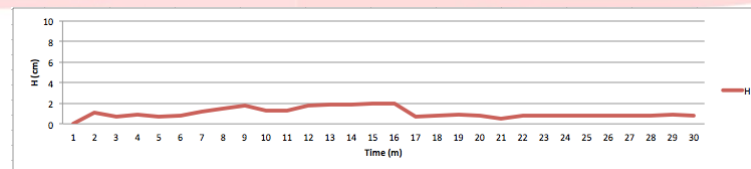
Berdasarkan Grafik pada gambar 4.2 Terlihat bahwa respon ketinggian pintu untuk mencapai *set point* 3,5 liter/menit berkisar antara 0,32 cm – 1,39 cm.

• Percobaan 2 : Set Point 3 liter/menit



Gambar 4.3 Grafik Data Debit pada Set Point 3 l/m

Berdasarkan kontrol fuzzy yang dilakukan diperoleh data grafik debit seperti pada Gambar IV-2. Terlihat pada menit ke-2 terjadi maksimum overshoot dengan besar *maximum percent overshoot* 25,76% pada debit air mencapai 3,71 l/m kemudian sistem mengalami *steady state* setelah 26 menit dengan range debit air 2,92 l/m – 2,95 l/m saat respon sistem telah masuk $\pm 2\%$ dari keadaan *steady state*.



Gambar 4.4 Grafik Data Ketinggian Pintu Air pada Set Point 3 l/m

Berdasarkan Grafik pada gambar IV-3 Terlihat bahwa respon ketinggian pintu untuk mencapai *set point* 3 liter/menit berkisar antara 0,69 cm – 1,99 cm.

5 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dari dari pengujian dan analisis yang telah dilakukan, maka didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut :

- Sistem berjalan sesuai target yaitu pintu akan membuka dan menutup berdasarkan debit air. Hal ini dilihat dari kemampuan sistem dalam membuka pintu air saat debit kurang dari set point dan menutup pintu air saat keadaan debit lebih dari set point.
- Akurasi dari *water flow sensor* mencapai 97%, namun hasil pembacaan sensor berubah-ubah hal ini dikarenakan kurangnya kerapatan air yang mengalir pada sensor.
- Penerapan *fuzzy logic* pada sistem ini cukup baik, hal ini dilihat dari hasil pengujian debit air pada *set point* 3,5 l/m dan 3 l/m besar *maximum percent overshoot* yang diperoleh tidak lebih dari 25,76% dan respon sistem mampu mendekati nilai *set point* pada saat mengalami *steady state* dengan range debit 3,44 l/m - 3,47 l/m pada pengujian 3,5 l/m dan range debit 2,92 l/m - 2,95 l/m pada pengujian 3 l/m saat respon sistem telah masuk $\pm 2\%$ dari keadaan *steady state*.

6 Daftar Pustaka

- [1] L. T. Herfitra, P. Pangaribuan, and R. Nugraha, "Perancangan Smart Trolley Menggunakan sensor IMU (INERTIAL MEASUREMENT UNIT) Berbasis Fuzzy Logic." Tugas Akhir, Universitas Telkom, Bandung, 2017.
- [2] D. S. Purba, P. Pangaribuan, and A. S. Wibowo, "Pengendalian Suhu Air Berdasarkan Durasi Pemanasan Menggunakan Fuzzy Logic dan PI controller," 2018.