

Optimasi Kendali Ketinggian Air dengan Kontroler Fuzzy PID dalam Menghadapi Variabel Gangguan

FITRIA SURYATINI, HADI SUPRIYANTO*, ISMAIL ROKHIM, ABDUR ROHMAN HARITS MARTAWIREJA, AHMAD HUSEN

Jurusan Teknik Otomasi Manufaktur dan Mekatronika,
Politeknik Manufaktur Bandung, Indonesia

*Email korespondensi: hadi@ae.polman-bandung.ac.id

Received 21 Juli 2023 | *Revised* 16 Agustus 2023 | *Accepted* 10 September 2023

ABSTRAK

Kendali ketinggian air merupakan suatu sistem yang sering ditemukan di sebagian besar fasilitas industri. Kendali ketinggian air seringkali dihadapkan pada gangguan yang disebabkan perubahan aliran masuk serta perubahan laju pengeluaran air. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan kendali ketinggian air dalam sistem dengan kendali Fuzzy PID dalam menghadapi variasi gangguan berupa perubahan laju pengeluaran air, serta mengimplementasikan pada kontroler PLC. Penelitian ini melibatkan pengujian kendali Fuzzy PID dan kendali PID dengan metode tuning Ziegler-Nichols 1. Variasi gangguan berupa keluaran pompa DC yang bisa diatur kecepatannya dari Output DA PLC resolusi 0-6000 yang dikonversi menjadi 0-100%. Hasil penelitian menunjukkan Fuzzy PID dapat diimplementasikan pada PLC dengan hasil yang minim overshoot, settling time yang lebih pendek rata-rata 17.23 detik sedangkan PID rata-rata 78,4 detik dan terdapat overshoot. Namun, Fuzzy PID cenderung memiliki rise time lebih lambat 1-2 detik daripada kendali PID.

Kata kunci: PLC, Fuzzy PID, PID, Water Level, Ziegler-Nichols

ABSTRACT

Water level control is a system that is often found in most industrial facilities. Water level control is often faced with disturbances caused by changes in the inflow and changes in the rate of discharge of water. This study aims to improve the control of the water level in a system with Fuzzy PID control in dealing with variations in disturbances in the form of changes in the rate of water discharge, and to implement it on the PLC controller. This study involves testing Fuzzy PID control and PID control using the Ziegler-Nichols 1 tuning method. The disturbance variation is in the form of a speed-adjustable DC pump output from the PLC DA Output with a resolution of 0-6000 which is converted to 0-100%. The results showed that Fuzzy PID can be implemented on PLCs with minimal overshoot results, shorter settling time with an average of 17.23 seconds while the average PID is 78.4 seconds and there is overshoot. However, Fuzzy PID tends to have a slower rise time of 1-2 seconds than PID control.

Keywords: PLC, Fuzzy PID, PID, Water Level, Ziegler-Nichols

1. PENDAHULUAN

Kendali ketinggian air pada fasilitas industri merupakan aspek kritis yang mempengaruhi kinerja dan hasil Produksi **(Omar, 2021)**. Sistem kendali ini bertujuan untuk mempertahankan ketinggian air pada nilai yang diinginkan, sehingga menjaga stabilitas dan efisiensi operasi **(Putri, dkk, 2021)**.

Namun, dalam lingkungan industri, kendali ketinggian air seringkali dihadapkan pada tantangan gangguan yang disebabkan oleh perubahan aliran masuk, perubahan laju pengeluaran air. Variasi gangguan ini dapat memengaruhi respons sistem secara signifikan, menyebabkan ketidakstabilan atau kesalahan pengendalian **(Jadmiko, dkk, 2021)**. Oleh karena itu, penting untuk melakukan penelitian yang memfokuskan pada pengembangan metode kendali yang efektif untuk mengatasi variasi gangguan dalam sistem kendali ketinggian air. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan kestabilan, keakuratan, dan responsivitas kendali dalam menghadapi gangguan yang bervariasi. Dengan memahami fenomena umum dan tantangan yang dihadapi dalam kendali ketinggian air dengan variasi gangguan, penelitian ini akan memberikan kontribusi dalam pengembangan solusi yang lebih baik untuk mengoptimalkan kendali ketinggian air dalam lingkungan industri.

Terdapat banyak metode yang telah diajukan dalam penelitian sebelumnya untuk mengendalikan ketinggian cairan. Salah satu metode kendali seperti PID (Proportional-Integral-Derivative) untuk mengontrol ketinggian air, yang telah terbukti efektif dalam banyak aplikasi kendali **(Isdaryani, dkk, 2021)(Pujiati, dkk, 2021)(Hartanto, dkk, 2020)**. Pada penelitian **(Gani, dkk, 2019)** bahwa sekitar 90% di industri menggunakan pengontrol PID. Dari data tersebut menunjukkan bahwa kendali PID di industri masih banyak diandalkan. Namun di sisi lain, ada berbagai tantangan yang perlu dihadapi ketika merancang kontroler PID tersebut. Salah satu metode tuning PID yaitu Ziegler-Nichols, metode ini menggunakan respon sistem yang dihasilkan *plant* untuk tuning **(Putri, dkk, 2021)(Daful, 2018)**. Kekurangan metode ini yaitu dalam mendapatkan parameter yang cocok dengan sistem yang diinginkan terkadang mendapatkan hasil yang kurang sesuai, artinya perancang sistem kendali tidak bisa menentukan hasil respon atau performa yang diinginkan **(Hamdani, 2020)**. Metode lain untuk menentukan parameter PID yaitu menggunakan Logika *Fuzzy* yang berdasarkan *error* dan *delta error* yang dihasilkan suatu sistem. Dari hasil penelitian metode ini mampu memperbaiki performa PID konvensional. Dalam menghadapi variasi gangguan diantara kendali PID dan *Fuzzy Logic* (FL), PID seringkali menghasilkan performa yang kurang memuaskan, dengan *error* lumayan besar, terjadinya overshoot yang signifikan, dan kesulitan mencapai kondisi steady state namun memiliki respon lebih cepat dibanding FL, sedangkan FL memiliki kualitas yang baik dalam menghadapi gangguan yang dinamis, presisi yang lebih tinggi, minimnya overshoot namun respon sistem lebih lambat daripada PID **(Chen, 2021)**. Oleh karena itu, penelitian **(Efendi, dkk, 2019)** mengusulkan penggunaan metode kendali *Fuzzy* PID, yang menggabungkan logika *Fuzzy* dengan kendali PID. Metode ini dirancang untuk menentukan parameter PID yang optimal berdasarkan *error* dan *delta error* dengan logika *Fuzzy* sehingga mampu menghasilkan sistem yang optimal. Hasil penelitian **(Firza, dkk, 2019)** menunjukkan bahwa kendali *Fuzzy* PID mampu menghasilkan respons sistem yang lebih baik dalam menghadapi variasi gangguan dibandingkan dengan kendali PID konvensional. Penelitian lain tentang Kendali PID dengan PLC untuk ketinggian air yaitu pada **(Murdiyanto, dkk, 2021)** Hasilnya PID dapat beroperasi dengan baik. Penelitian lain tentang kendali ketinggian air dengan kendali *Fuzzy* untuk ketinggian air yaitu **(Ali, dkk, 2020)** menyebutkan bahwa kendali *Fuzzy* memiliki hasil yang lebih baik dibandingkan dengan PID konvensional. Dalam konteks ini, penelitian ini akan melengkapi penelitian terdahulu dengan menginvestigasi penggunaan kendali *Fuzzy* PID pada kendali ketinggian air dengan variasi

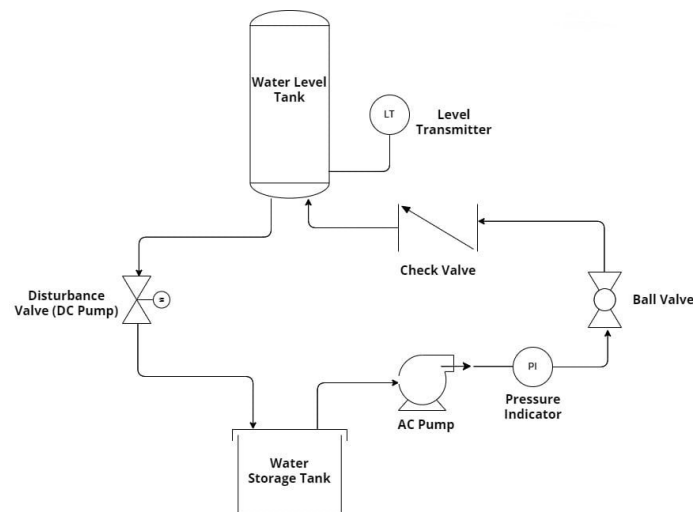
gangguan, serta menerapkan kendali tersebut pada PLC Omron CP1H sebagai platform implementasi.

Berdasarkan hasil studi literatur dari beberapa penelitian terdahulu maka tujuan penelitian ini yaitu menghadirkan keterbaruan dalam mengaplikasikan kendali *Fuzzy* PID pada sistem kendali ketinggian air dengan PLC Omron CP1H dengan variasi gangguan. Penggunaan kendali *Fuzzy* PID membawa keunggulan dalam menangani variasi gangguan yang bervariasi (**Tunjung, dkk, 2021**), sementara penggunaan PLC Omron CP1H sebagai platform implementasi memberikan keandalan dan kemampuan pemrosesan yang handal (**Pradibto & Adi, 2015**). Integrasi antara kendali *Fuzzy* PID dan PLC Omron CP1H memungkinkan pengendalian ketinggian air yang lebih adaptif dan responsif terhadap perubahan kondisi di lingkungan industri. Dengan demikian, penelitian ini membuka peluang untuk pengembangan sistem kendali ketinggian air yang lebih efisien, akurat, dan stabil dalam aplikasi industri. Keberhasilan pengaplikasian kendali *Fuzzy* PID pada PLC Omron CP1H juga memberikan kontribusi pada pengembangan teknologi kendali yang lebih maju dan terintegrasi, memperluas pemahaman dan pengetahuan di bidang kendali ketinggian air.

2. METODE

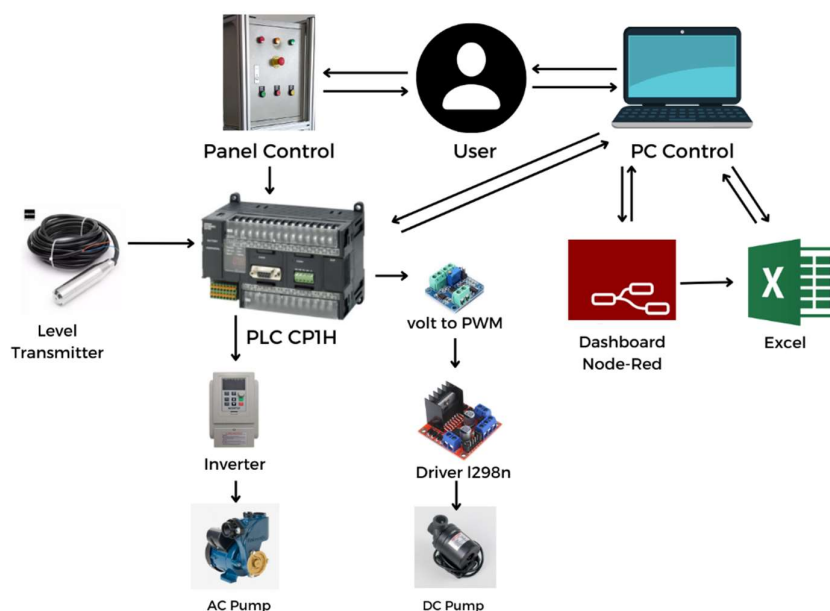
2.1 Perancangan Sistem

Diagram pada Gambar 1 merupakan gambaran P&ID (*Piping and Instrumentation Diagram*) pada penelitian ini yang dirancang dengan beberapa komponen yang terdiri dari PLC sebagai kontrolernya, pompa AC (*Alternating Current*) dan pompa DC (*Direct Current*) sebagai aktuator, dan level transmitter sebagai sensor untuk membaca ketinggian air. Media yang dipakai untuk mengukur ketinggian air pada penelitian ini yaitu menggunakan tangki yang bisa dimonitor ketinggian airnya menggunakan sensor level transmitter. Aktuator pompa AC digunakan untuk mengisi *Water Level Tank* dengan kecepatan yang bisa diatur menggunakan inverter. Pompa DC digunakan sebagai gangguan untuk menyimulasikan tangki bocor dengan kecepatan debit air keluar yang juga dapat diatur menggunakan driver motor; air yang keluar dari pompa dc akan masuk lagi ke *Water Storage Tank*. Kemudian ada *Check Valve* yang berfungsi sebagai pengaman agar air yang masuk dari inlet tidak keluar lagi. *Pressure indicator* digunakan untuk indikator tekanan yang dihasilkan pompa AC. *Ball Valve* berfungsi untuk membuka atau menutup aliran yang masuk ke tangki.



Gambar 1. Piping and Instrumentation Diagram (P&ID)

Pada Gambar 2, penelitian ini dirancang dengan menggunakan kontroler PLC Omron CP1H untuk mengatur *input* analog dan digital, serta mengolah *output* analog dan digital. Node-RED berperan sebagai *Human Machine Interface* (HMI) dan proses akuisisi data, dengan menggunakan metode observasi terhadap respons sistem terhadap *input* dari *plant*.

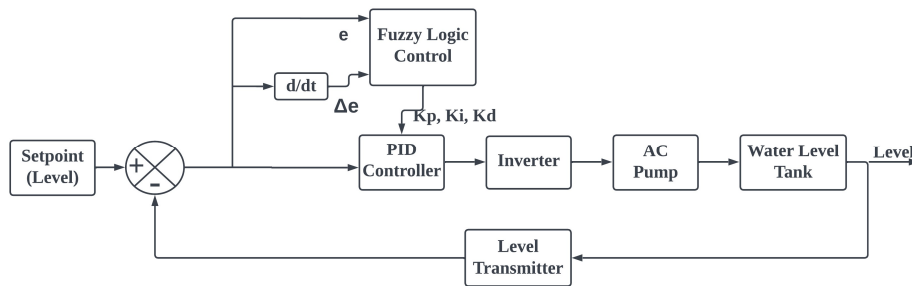


Gambar 2. Perancangan Sistem

Prinsip kerja yang tergambar pada Gambar 2 melibatkan berbagai komponen untuk mengontrol dan memantau tinggi air. Dashboard Node-RED SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) berfungsi sebagai antarmuka yang mengizinkan kontrol dan pemantauan. Kontrol ini mencakup operasi seperti *start*, *stop*, *drain*, *emergency*, *reset*, rekam ke excel, serta pengaturan nilai *setpoint* dan gangguan. Sementara itu, fitur pemantauan melibatkan animasi *plant*, indikator *gauge*, frekuensi, tekanan, serta gangguan. Grafik juga disediakan untuk melihat respons sistem. Sensor level transmitter memanfaatkan tekanan air dalam tangki untuk mengukur tinggi air. Selain pengendalian dan pemantauan melalui Node-RED, panel juga digunakan untuk mengontrol *plant*, terbatas pada fungsi *start*, *stop*, *drain*, *emergency*, dan *reset*. Fungsi pemantauan melalui panel terbatas pada lampu indikator berwarna: hijau (*start*), kuning (*standby* dan *drain*), merah (*emergency*).

2.2 Perancangan Kendali

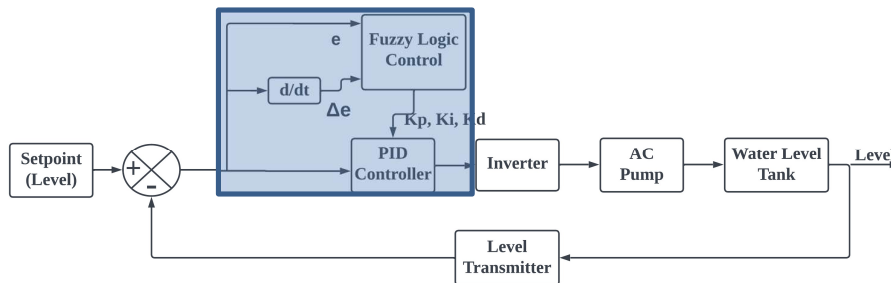
Sistem kendali yang digunakan pada pengendalian ketinggian air ini yaitu menggunakan *close loop control* dengan metode *Fuzzy PID* seperti pada Gambar 3. Pada *plant* ini, level (cm) digunakan sebagai *setpoint*. Sensor level transmitter berfungsi untuk mengukur ketinggian air pada tangki. Prinsip kerja sensor ini yaitu membaca tekanan hidrostatik fluida dalam tangki. Keluaran yang dihasilkan sensor berupa sinyal analog berupa arus 4-20 mA. Nilai tersebut kemudian dimasukkan dalam analog *input* pada PLC untuk diubah menjadi nilai ketinggian. Hasil yang didapat sensor akan menjadi *feedback* untuk dikomparasi dengan *setpoint*. Kemudian sistem *Fuzzy* akan menghitung nilai *error* dan *delta error* untuk menghasilkan keluaran berupa nilai K_p , K_i , dan K_d untuk parameter PID (Muhlasin, dkk, 2020). Kemudian kecepatan inverter akan menyesuaikan dengan Parameter PID yang baru.



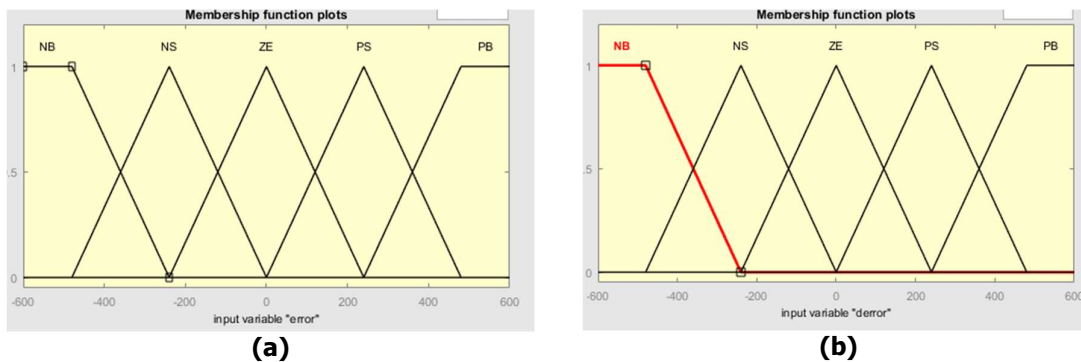
Gambar 3. Diagram Blok Kendali *Fuzzy* PID

2.3 Perancangan *Fuzzy* PID

Sistem kontrol yang diilustrasikan dalam diagram pada Gambar 4 menggunakan kontroler PID sebagai kontroler utama. Namun, untuk mengoptimalkan kontroler PID, digunakan logika *Fuzzy* untuk membantu menentukan nilai konstanta *gain* untuk kontroler PID yang berdasarkan dari nilai *error* dan *delta error*, dengan fungsi keanggotaan yang terlihat pada Gambar 5 dan 6. Konstanta kontroler yang telah dioptimalkan kemudian ditambahkan ke konstanta PID untuk menangani nilai *error*. Ketika terjadi nilai *error*, konstanta PID akan melakukan penyesuaian sendiri (*self-tuning*) untuk mencapai konstanta yang optimal (Yahya, dkk, 2020). Penentuan konstanta PID ini dinyatakan sebagai P_b (Proportional band), T_i (Time integral) dan T_d (Time derivative), yang ditentukan menggunakan himpunan *Fuzzy* seperti yang terlihat pada Gambar 5, dan Gambar 6. Basis aturan yang dirancang mengacu pada (Pritandi, dkk, 2016) dengan penyesuaian nilai yang terlihat pada Tabel 1.

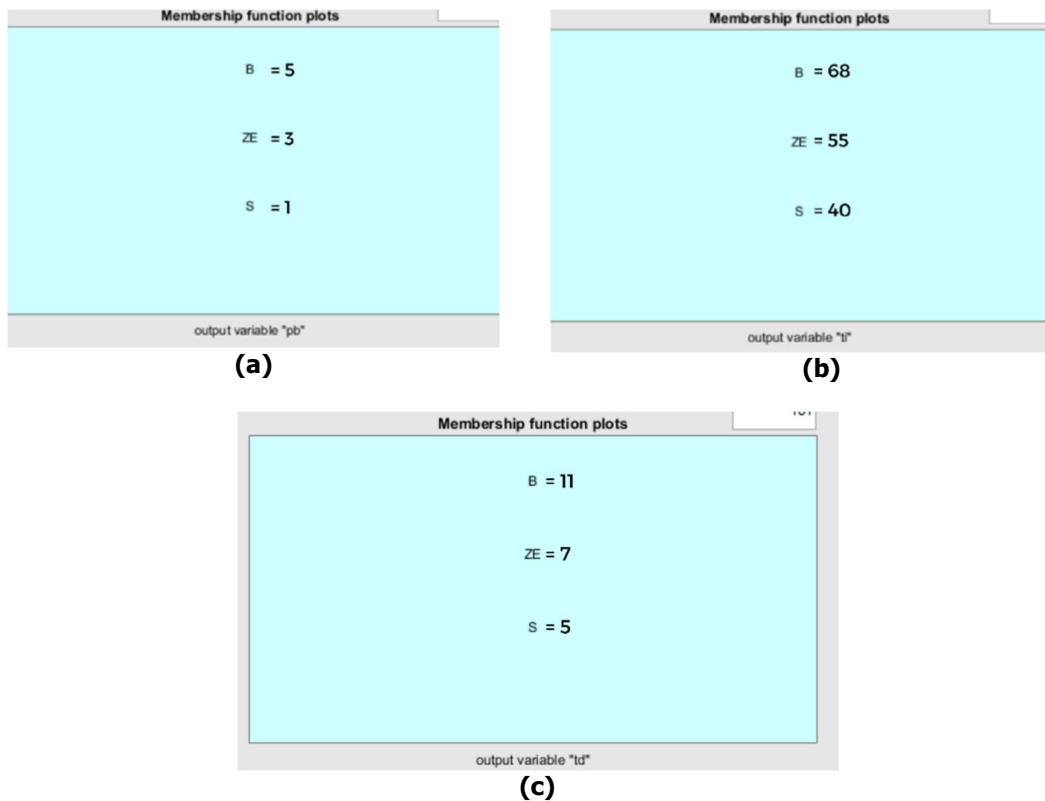


Gambar 4. Perancangan Kendali *Fuzzy* PID



Gambar 5. Perancangan *Membership Function Input* (a) *Input Error* (b) *Input Delta Error*

Optimasi Kendali Ketinggian Air dengan Kontroler Fuzzy PID dalam Menghadapi Variabel Gangguan



Gambar 6. Perancangan *Membership Function Output* (a) *Output Pb* (b) *Output Ti* (c) *Output Td*

Tabel 1 menunjukkan matriks keputusan yang digunakan (sistem inferensi *Fuzzy*) pada *self-tuning Fuzzy PID* (Yahya, dkk, 2020).

Tabel 1. *Rule Base*

Dkp Dki Dkd		Delta error				
		NB	NS	ZE	PS	PB
Error	NB	S	B	B	B	B
		B	S	S	S	ZE
		B	ZE	ZE	ZE	B
	NS	S	B	B	B	B
		B	S	S	ZE	S
		ZE	ZE	ZE	B	B
	ZE	S	B	ZE	B	B
		S	B	ZE	B	S
		ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
	PS	S	B	ZE	B	B
		S	ZE	S	S	B
		B	ZE	ZE	B	ZE
	PB	S	B	ZE	B	B
		ZE	S	S	S	B
		B	ZE	B	ZE	ZE

Tabel 2 merupakan hasil percobaan dari desain *Fuzzy Logic* yang dibuat menggunakan MATLAB *Fuzzy Logic Toolbox* yang dibandingkan keluarannya dengan di PLC menggunakan *function block diagram* dengan *structure text*.

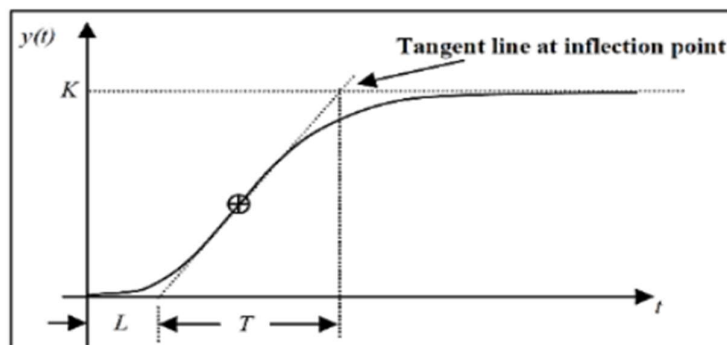
Tabel 2. Perbandingan Keluaran PLC Dan MATLAB

No	Error	Derror	PLC			Matlab			Average Error (%)		
			Pb	Ti	Td	Pb	Ti	Td	Pb	Ti	Td
1	0,00	4,00	3,04	55,09	7,01	3,03	55,20	7,00	0,33	0,20	0,14
2	4,00	1,00	3,01	54,80	7,01	3,01	54,80	7,00	0,00	0,00	0,14
3	5,00	2,00	3,03	54,70	7,03	3,02	54,80	7,00	0,33	0,18	0,43
4	-2,00	-1,00	3,70	50,90	7,30	3,02	54,90	7,00	18,38	7,86	4,11
5	0,00	3,00	3,00	58,60	5,60	3,03	55,20	7,00	1,00	5,80	25,00
6	0,00	0,00	3,50	57,70	7,00	3,00	55,00	7,00	14,29	4,68	0,00
7	-2,00	3,00	3,75	47,40	7,57	3,04	55,00	7,00	18,93	16,03	7,53
8	2,00	2,00	3,03	54,80	7,03	3,02	55,00	7,00	0,33	0,36	0,43
9	-3,00	0,00	3,50	57,70	7,00	3,03	54,80	7,00	13,43	5,03	0,00
10	-2,00	-4,00	3,78	45,04	7,60	3,05	55,10	7,00	19,31	22,34	7,89
MAPE									8,63	6,25	4,57

Dari hasil Tabel 2 menunjukkan bahwa pembuatan *Block Fuzzy* pada PLC CP1H dapat diaplikasikan dan memiliki rata – rata error Pb 8,63, Ti 6,25, Td 4,57. Dengan membandingkan keluaran dari PLC dengan simulasi di MATLAB.

2.4 Perancangan Tuning Metode Ziegler Nichols (ZN) 1

Metode penyetelan PID menggunakan metode Ziegler-Nichols (ZN) adalah suatu pendekatan untuk menentukan parameter kendali PID dengan melakukan eksperimen respon *plant* terhadap masukan unit-step. Dalam eksperimen ini, masukan unit-step akan menghasilkan kurva S yang ditunjukkan dalam Gambar 7.



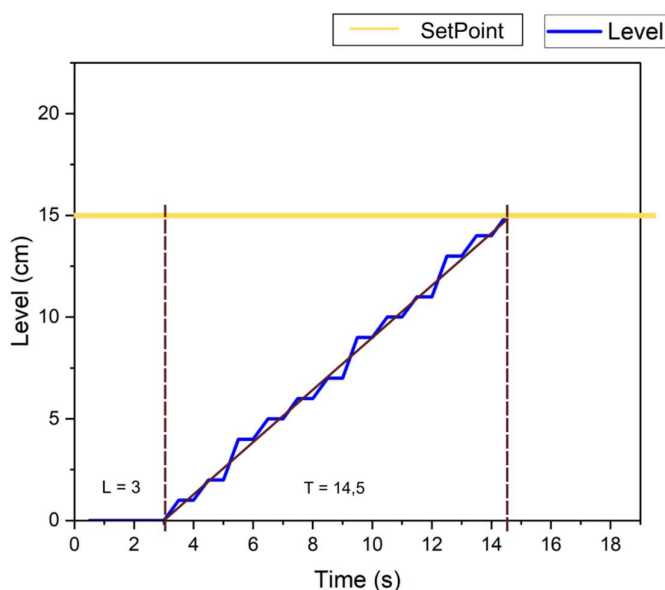
Gambar 7. Kurva Reaksi Ziegler-Nichols (Supriyanto, dkk, 2022)

Kurva yang memiliki bentuk S memiliki karakteristik yang ditentukan oleh dua parameter, yaitu waktu tunda L dan konstanta waktu T . Untuk mendapatkan kedua parameter tersebut, dapat menggambar garis tangensial pada titik infleksi kurva S untuk mendapatkan perpotongan garis tangensial dengan garis waktu dan garis $y(t) = K$. Setelah itu, nilai parameter K_p , T_i , dan T_d dapat ditentukan dengan menggunakan rumus yang terdapat pada Tabel 3, dengan memasukkan nilai L dan T ke dalam rumus tersebut (Supriyanto, dkk, 2022).

Tabel 3. Metode Tuning ZN 1

Type of controller	Kp	Ti	Td
P	T/L	<i>infinity</i>	0
PI	$0,9 T/L$	$L/0,3$	0
PID	$1,2 T/L$	$2 L$	$0,5 L$

Gambar 8 merupakan dilakukan hasil tuning menggunakan ZN 1 pada *plant* kendali ketinggian air dengan *setpoint* 15 cm dan menggunakan *output* frekuensi 50 Hz seperti pada Gambar 8. metode tuning ini menggunakan respon *open loop*, sehingga diperoleh nilai K sebesar 15, L sebesar 3, dan T sebesar 15. Kemudian nilai tersebut dimasukkan ke dalam persamaan yang ditunjukkan pada Tabel 3, lalu hasil persamaan tersebut ditunjukkan pada Tabel 4.



Gambar 8. Tuning ZN 1

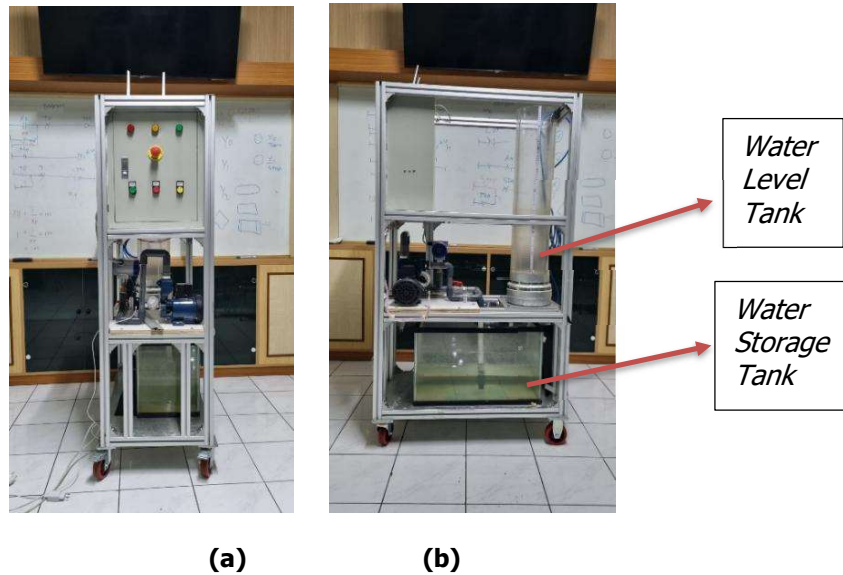
Tabel 4. Hasil Tuning Kendali PID Dengan ZN 1

Type of controller	Kp	Ti	Td
P	4,83	<i>infinity</i>	0
PI	4,347	6,66	0
PID	5,796	6	1,5

Maka hasil dari tuning PID berdasarkan Tabel 4 menggunakan metode ZN 1 ini, mendapatkan nilai konstanta Kp 5,796, Ti 6, dan Td 1,5. Hasil tuning tersebut digunakan sebagai pembandingan dengan kendali metode *Fuzzy* PID.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

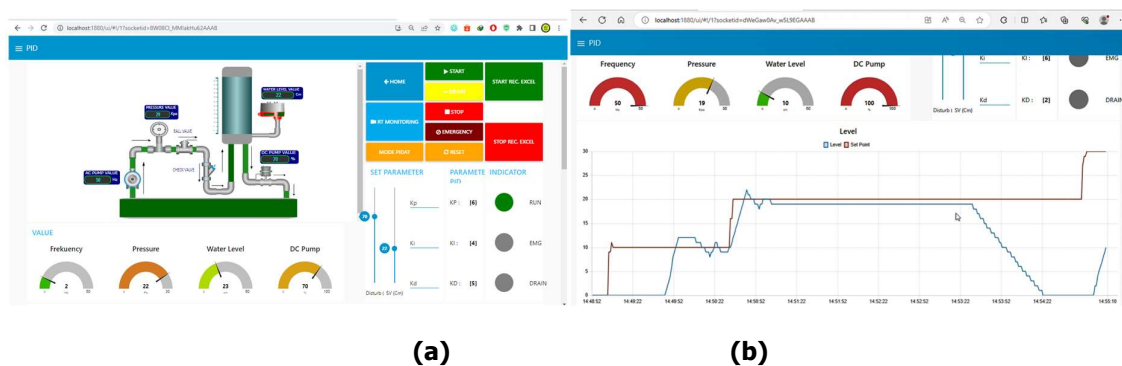
Pada Gambar 9 merupakan hasil dari pembuatan *plant* kendali ketinggian air. Alat ini merupakan prototipe sistem kendali ketinggian air pada dunia industri. Pengujian pada Penelitian ini dilakukan dengan metode kuantitatif.



Gambar 9. Water Level Plant (a) Tampak Depan (b) Tampak Samping

3.1 Hasil Pembuatan SCADA pada Node-RED

Gambar 10 merupakan tampilan *dashboard* SCADA yang dibuat menggunakan Node-RED. Pada *dashboard* ini bisa melakukan monitoring, kontroling, dan *logging* data ke excel. Untuk kontroling nya terdapat tombol *start* untuk memulai sistem. Tombol *drain* akan mengaktifkan pompa DC untuk menjadi sebuah gangguan pada sistem. Tombol *stop* untuk menghentikan sistem di tempat terakhir aktif. Tombol *emergency* untuk menghentikan sistem apabila terjadi kesalahan. Tombol *reset* untuk menonaktifkan tombol *emergency* setelah diaktifkan.



Gambar 10. Dashboard SCADA (a) Kontrol Dan Monitoring (b) Grafik Respon Sistem

3.2 Pengujian Sensor Level

Pengujian ini dilakukan untuk mengukur nilai keakuratan dari pembacaan sensor level yang dihasilkan, pengukuran dilakukan dari ketinggian air di tangki 0 – 60 cm, Tabel 5 merupakan hasil pengukuran yang dilakukan. Pembacaan sensor level di PLC OMRON CP1H nilainya berubah – ubah.

Tabel 5. Pengujian Sensor Level

Real (cm)	PLC		Average	Error Absolute (%)
	Min value	Max value		
10	10,5	10,7	10,6	6
20	20,6	20,8	20,7	3,5
30	30,5	30,7	30,6	2
40	40,7	40,9	40,8	2
50	50,7	50,9	50,8	1,6
60	60,7	61	60,85	1,4
MAPE (Mean Absolute Percentage Error)				2,75

3.3 Pengujian Aliran Masuk dan keluar

Pengujian ini dilakukan untuk mengukur debit air yang masuk menggunakan pompa AC dan keluar menggunakan pompa DC pada *Water Level Tank* seperti pada Gambar 1. Pengujian ini menggunakan *output* Digital to Analog (DA) PLC dengan resolusi digital 0-6000. Pada Tabel 6 Pengujian Pompa DC, penulis mengkonversi dari resolusi digital 0-6000 DA menjadi persentase gangguan 0-100% untuk mengatur kecepatan pompa DC yang berfungsi sebagai simulasi variasi gangguan. Begitu juga pada Tabel 7, penulis mengkonversi dari nilai resolusi digital 0-6000 menjadi nilai frekuensi 0-50 Hz.

Tabel 6. Pengujian Pompa DC

DC Pump			
Out DA PLC	Percentage Disturbance (%)	Voltage (Volt)	Debit (cm ³ /s)
6000	100	7,04	0,33
5000	70	5,88	0,20
4500	50	5,82	0,16

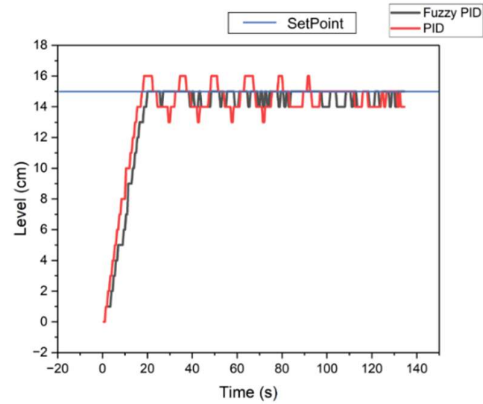
Tabel 7. Pengujian Pompa AC

Pompa AC			
Out DA PLC	Frequency (Hz)	Voltage (Volt)	Debit (cm ³ /s)
6000	50	220	1.12
4800	40	220	0.89
3600	30	220	0.67

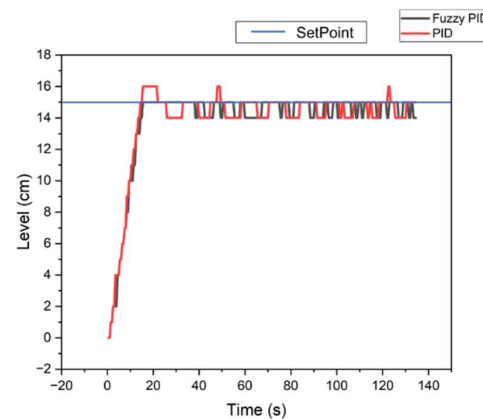
Disturbance dengan debit air 0,33 cm³/s pada Tabel 6 merupakan keluaran debit maksimal yang bisa dihasilkan dari spek pompa DC yang digunakan. Namun pada realitanya untuk *disturbance* debit air nya bisa lebih besar. Meski begitu sistem ini masih bisa mengatasi apabila terdapat *disturbance* yang lebih besar, tergantung dari spek pompa yang digunakan.

3.4 Pengujian Kendali *Fuzzy* PID dengan PID

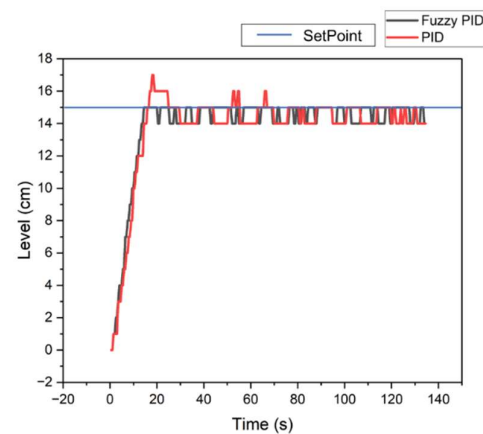
Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui respon sistem yang dihasilkan dengan gangguan yang bervariasi yaitu dengan persentase 100%, 70%, dan 50%, dengan *setpoint* 15 cm, dengan masing-masing 3 kali percobaan. Sehingga bisa diketahui mana kendali yang optimal antara *Fuzzy* PID dan PID.



(a)



(b)



(c)

Gambar 11. Grafik Respon Sistem (a) *Disturbance* 100%, (b) *Disturbance* 70% (c) *Disturbance* 50%

Hasil pengujian sistem kendali dari perbandingan *Fuzzy* PID dan PID pada gangguan yang bervariasi seperti pada Gambar 11 dilakukan dengan masing-masing pengujian 3 kali pada setiap gangguan 50%, 70% dan 100%. Tabel 8, 9, 10, merupakan tabel analisa respon sistem yang diberikan yaitu dengan beberapa variasi gangguan:

1. *disturbance* 100%;

Tabel 8. Pengujian Pada *Disturbance* 100%

Test	Tuning Ziegler Nichols 1				
	Error Steady State	Rise Time (s)	Settling Time (s)	Overshoot (%)	Oscillation
1	0%	14,5	100	Yes (6,67)	Yes
2	0%	15	107	Yes (6,67)	Yes
3	0%	14,5	97	Yes (6,67)	Yes
Average	0%	14,6	101,3	6,67	Yes

Test	Self Tuning <i>Fuzzy</i> PID				
	Error Steady State	Rise Time (s)	Settling Time (s)	Overshoot (%)	Oscillation
1	0%	15,5	19	No	Yes
2	0%	15,5	17	No	Yes
3	0%	16,5	20	No	Yes
Average	0%	15,83	18,6	No	Yes

2. *disturbance* 70%;

Tabel 9. Pengujian Pada *Disturbance* 70%

Test	Tuning Ziegler Nichols 1				
	Error Steady State	Rise Time (s)	Settling Time (s)	Overshoot (%)	Oscillation
1	0%	12,5	58	Yes (6,67)	Yes
2	0%	12,5	58,5	Yes (6,67)	Yes
3	0%	13,5	46	Yes (14)	Yes
Average	0%	12,8	54,1	9,06	Yes

Test	Self Tuning <i>Fuzzy</i> PID				
	Error Steady State	Rise Time (s)	Settling Time (s)	Overshoot (%)	Oscillation
1	0%	13,5	19,5	No	Yes
2	0%	12,5	16	No	Yes
3	0%	14,5	17	No	Yes
Average	0%	13,5	17,5	No	Yes

3. *disturbance* 50%.**Tabel 10. Pengujian Pada *Disturbance* 50%**

Test	Tuning Ziegler Nichols 1				
	Error Steady State	Rise Time (s)	Settling Time (s)	Overshoot (%)	Oscillation
1	0%	13	76	Yes (14)	Yes
2	0%	12	106	Yes (14)	Yes
3	0%	13	58	Yes (14)	Yes
Average	0%	12,6	80	14	Yes

Test	Self Tuning <i>Fuzzy</i> PID				
	Error Steady State	Rise Time (s)	Settling Time (s)	Overshoot (%)	Oscillation
1	0%	13,5	14,5	No	Yes
2	0%	14,5	18	No	Yes
3	0%	13	14,5	No	Yes
Average	0%	13,6	15,6	No	Yes

Berdasarkan hasil pengujian Tabel 8, 9, 10 dengan berbagai variabel gangguan, diketahui bahwa kendali *Fuzzy* PID mampu mengatasi gangguan dan menjaga stabilitas sistem dengan memiliki rata-rata *settling time* yang lebih cepat 17.23 daripada kendali PID 70-90 detik dan minimnya *overshoot* sedangkan PID memiliki *overshoot*. Tapi *Fuzzy* PID memiliki *rise time* yang lebih lambat 1-2 detik daripada PID. Seperti yang (Efendi, dkk, 2019) ungkapkan dalam penelitiannya.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa penggunaan kendali *Fuzzy* PID pada PLC untuk mengoptimalkan kendali ketinggian air dalam menghadapi variabel gangguan memiliki beberapa keunggulan. Dalam perbandingan antara kendali *Fuzzy* PID dengan kendali PID, kendali *Fuzzy* PID dapat menghasilkan *Settling time* yang lebih cepat rata – rata 17.23 detik daripada kendali PID rata – rata 78,4 detik, Namun *Fuzzy* PID cenderung memiliki *rise time* lebih lambat 1-2 detik daripada kendali PID. Dari hal tersebut *Fuzzy* PID menunjukkan kemampuannya dalam mencapai kestabilan sistem secara efisien.

DAFTAR RUJUKAN

- Ali, M. A., Hussein, A., & Salman, T. M. (2020). Implementation of Intelligent Industrial Controller Based On Fuzzy Logic and PLC. *Al-Qadisiyah Journal for Engineering Sciences*, 13, 55–60
- Chen, L. (2021). Principle and Simulation PID Controller of Liquid Level System. *Journal of Physics: Conference Series*, (pp. 0–9).
- Daful, A. G. (2018). Comparative study of PID tuning methods for processes with large & small delay times. *2018 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences, ASET 2018*, (pp. 1–7).
- Efendi, Y. (2019). Desain dan Verifikasi Kontrol Cascade Pengendali Suhu Berbasis Fuzzy-PID

- dan PI pada Heat Exchanger. *JTEV (Jurnal Teknik Elektro Dan Vokasional)*, 5(1.1), 107-113.
- Firza, M., Perdana, A., Kholis, N., & Suprianto, B. (2019). Simulasi Sistem Monitor Ketinggian Air Pada Bendungan Air Dengan Fuzzy-PID Menggunakan Matlab. *Jurnal Teknik Elektro*, 11(1), 56–62.
- Gani, M. M., Islam, M. S., & Ullah, M. A. (2019). Optimal PID tuning for controlling the temperature of electric furnace by genetic algorithm. *SN Applied Sciences*, 1(8), 1–8.
- Hamdani, C. N. (2020). Perancangan Sistem Kontrol Level Nonlinier Menggunakan Fuzzy-PID Supervision. *INOVTEK - Seri Elektro*, 2(1), 10-18. <https://doi.org/10.35314/ise.v2i1.1269>
- Hartanto, A., & K, K. (2020). Analisa Pressure dan Level pada CE33 Electronic Process Control Berbasis PID. *Journal of Applied Sciences, Electrical Engineering and Computer Technology*, 1(2), 13–18.
- Isdaryani, F., Hesya, M. F. V., & Feriyonika, F. (2021). Sintesis Kendali PID Digital dengan Diskritisasi Langsung dan Backward Difference. *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, 9(2), 467-481.
- Jadmiko, S. W., Suyitno, L. A., Lukman, F. M., & Gibran, B. T. G. (2021). Aplikasi Kendali PID pada Simulator Water Level Control Berbasis TK-Series Controller. *JTERA : Jurnal Teknologi Rekayasa*, 6(1), 155-162.
- Muhlasin, Budiman, Ali, M., Parwanti, A., Firdaus, A. A., & Iswinarti. (2020). Optimization of Water Level Control Systems Using ANFIS and Fuzzy-PID Model. *International Conference on Vocational Education and Electrical Engineering: Strengthening the Framework of Society 5.0 through Innovations in Education, Electrical, Engineering and Informatics Engineering, ICVEE 2020*.
- Murdiyanto, A., & Supriadi, D. (2021). Perancangan Pengembangan Pid Kontrol Pada Monitoring Pengendalian Ketinggian Air Berbasis Plc Cp1E-Na20Dr-a. *Tedc*, 15(3), 224–225.
- Omar, F. A. (2021). Performance Comparison of Pid Controller and Fuzzy Logic Controller for Water Level Control With Applying Time Delay. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 8055, 858–871.
- Pradibto, T. R., & Adi, K. (2015). Otomasi Sistem Destilasi Menggunakan Plc Omron Cp1H Dan Kontrol Suhu Dengan Kendali Auto Tuning Pid Dalam Penampil Scada. *Youngster Physics Journal*, 4(4), 311–316.
- Pritandi, D. A., Susila, J., & Iskandar, E. (2016). Perancangan Kontroler PID- Fuzzy untuk

- Sistem Pengaturan Cascade Level dan Flow pada Basic Process Rig 38-100. *Jurnal Teknik ITS*, 5(2), 54-60.
- Pujiati, T., & Risfendra, R. (2021). Penerapan Kontroler PID Pada Sistem Kendali Level cairan Dengan Metode Ziegler-Nichols Berbasis Arduino. *JTEIN: Jurnal Teknik Elektro Indonesia*, 2(1), 55–60.
- Putri, H. O. W., Susila, J., & Kindhi, B. Al. (2021). Sistem Pengaturan Level pada Water Treatment Plant dengan Kontroler PID dan Monitoring Konsumsi Air Menggunakan Tampilan Situs Web. *Jurnal Teknik ITS*, 10(2), A379-A385.
- Putri, T. W. O., Mowaviq, M. I., & Hajar, I. (2021). Rancang Bangun Sistem Kendali Level Air Berbasis Programmable Logic Controller dan Human Machine Interface. *Kilat*, 10(2), 272–279.
- Supriyanto, H., Suryatini, F., Rohman, A., Martawireja, H., & Rudiansyah, H. (2022). Implementasi Kontroler Pid Dengan Metode Tuning Ziegler- Nichols Dan Cohen-Coon Pada Sistem Scada Kendali Level Air. *JTT : Jurnal Teknologi Terapan*, 8(2), 149-157.
- Tunjung, D., Prajitno, P., & Handoko, D. (2021). Temperature and water level control system in water thermal mixing process using adaptive fuzzy PID controller. *Journal of Physics: Conference Series*, (pp. 1-7).
- Yahya, S., Al Tahtawi, A. R., Wijayanto, K., & Faizah, B. A. (2020). Liquid Flow Control Design Based on PID-Fuzzy Controller with anti-Windup Compensator. *7th International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering, ICITACEE 2020 - Proceedings*, (pp. 7–12).