



Sistem Pendukung Keputusan Berbasis *Interval Type-2 Fuzzy Sugeno* pada Kendali pH Air

Devan C. M. Wijaya*, Basuki Rahmat, Eva Y. Puspaningrum

*Informatika, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur,
Jl. Rungkut Madya No.1, Gn. Anyar, Kec. Gn. Anyar, Kota SBY, Jawa Timur 60294*

*Email Penulis Koresponden: mudrawijaya@gmail.com

Abstrak:

Kemampuan sistem *fuzzy* dalam menangani hal-hal yang bersifat ambiguitas tinggi, seperti perubahan ekstrim pada pH air sangat diperlukan di era modern saat ini. Sebab, tingginya ambiguitas dapat mengakibatkan alat pengendali pH tidak berfungsi dengan baik, sehingga akan berakibat fatal khususnya pada sektor pertanian. Tipe algoritma *fuzzy* sangat menentukan keberhasilan dalam penanganan ambiguitas. Berdasarkan permasalahan tersebut, penulis mengusulkan metode IT2FL Sugeno Orde-Nol untuk digunakan sebagai pembelajaran dalam sistem pengendalian pH air yang merupakan inovasi baru yang layak untuk diperdalam lagi kedepannya. *Fuzzy logic type-2* mempunyai empat tahapan dalam penyelesaiannya yaitu meliputi: fuzzifikasi, inferensi, reduksi tipe, dan defuzzifikasi. *Fuzzy* memiliki beberapa komponen penting didalamnya yang meliputi: variabel, himpunan, domain, fungsi keanggotaan, representasi kurva, dan operator. Adapun tujuan dari penelitian ini ialah untuk memberikan gambaran sederhana dalam menerapkan algoritma IT2FL Sugeno sebagai sarana pengembangan IPTEK dalam ranah teknologi pertanian. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa SPK 0 untuk aksi pH *up on*: 25 detik, SPK 1 untuk aksi pH *up on*: 10 detik, SPK 2 untuk aksi *all pH off*: 0 detik, SPK 3 untuk aksi pH *down on*: 10 detik, dan SPK 4 untuk aksi pH *down on*: 25 detik. Pengkategorian pH dibagi menjadi 5 macam yaitu: Asam Kuat (0-3), Asam Lemah (4-6), Netral (7), Basa Lemah (8-10), dan Basa Kuat (11-14). Berdasarkan hasil pengujian, sistem memenuhi syarat dan dinyatakan valid dengan standarisasi perhitungan pada sensor: akurasi rata-rata sebesar 91.8%; galat selisih rata-rata sebesar 0.6; dan juga galat sistematis rata-rata sebesar 8.2%.

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



Kata Kunci:

IT2FL;

Kendali pH;

Sugeno;

SPK;

Riwayat Artikel:

Diserahkan 8 Mei 2022

Direvisi 12 September 2022

Diterima 30 September 2022

Dipublikasi 26 Desember 2022

DOI:

10.22441/incomtech.v12i3.15453

1. PENDAHULUAN

Kemampuan sistem *fuzzy* dalam menangani hal-hal yang bersifat ambiguitas tinggi seperti perubahan ekstrem pada pH air sangat diperlukan di era modern saat ini. Sebab, tingginya ambiguitas dapat mengakibatkan alat pengendali pH tidak berfungsi dengan baik, sehingga akan berakibat fatal khususnya pada sektor pertanian. Tipe algoritma *fuzzy* sangat menentukan keberhasilan dalam penanganan ambiguitas. *Fuzzy logic type-1* pada umumnya lebih sering digunakan oleh para peneliti dalam menyelesaikan ambiguitas yang bersifat rendah, seperti penelitian yang telah dilakukan oleh Budiprayitno dkk pada tahun 2021 yang membuktikan bahwa algoritma *fuzzy logic type-1* mudah diterapkan namun juga terdapat beberapa kekurangan [1]. *Fuzzy* adalah suatu logika yang memiliki nilai kekaburan antara benar atau salah yang dapat menerjemahkan suatu besaran yang diekspresikan melalui *linguistic* [2]. Asal mula terciptanya logika *fuzzy* dimulai dari ide para ilmuwan asal Polandia (Jan Łukasiewicz, Alfred Tarski, dkk) pada tahun 1930-an. Mereka merumuskan sebuah pemikiran matematika berbasis logika cerdas yang dikenal sebagai logika *infinity* Łukasiewicz-Tarski. Logika tersebut memiliki 3 prinsip yaitu: logis, ontologis, dan psikologis [3, 4].

Kemudian istilah *fuzzy logic type-1* baru muncul pertama kali pada tahun 1965 dan disebarluaskan oleh Lotfi Aliasker Zadeh [5]. Lotfi Aliasker Zadeh merupakan seorang Guru Besar (Profesor Universitas Barkley, Amerika Serikat) yang menekuni penelitian di bidang keilmuan komputer. Logika *fuzzy* memiliki fundamental pemikiran yang mengarah ke suatu keputusan yang samar [6]. Logika *fuzzy* dipilih sebagai alternatif dari logika matematika yang lain, karena sistem *fuzzy* sangat mendukung pemikiran penggunaannya, fleksibel, toleran, mudah, sederhana, dan dapat mengekspresikan kinerja sistem dengan baik [7]. Seiring berjalannya waktu, pada tahun 1975, Prof. Lotfi Aliasker Zadeh memperkenalkan *fuzzy logic type-2* sebagai konsep *fuzzy* yang baru [8]. *Fuzzy logic type-2* pada dasarnya diciptakan untuk penyederhanaan SPK yang sudah ada di *fuzzy logic type-1*. *Fuzzy logic type-2* mulai populer semenjak teorinya diperjelas oleh Mendel dan Karnik pada tahun 1998 [9]. *Fuzzy logic type-2* dapat dimodelkan melalui metode *General FL-2*, *Interval FL-2*, dan *Quasi FL-2*.

General FL-2 ketika dalam menangani ketidakpastian, terdapat kerumitan komputasi yang tinggi sehingga jarang diminati oleh peneliti. Sedangkan *Interval FL-2* ketika dalam menangani ketidakpastian jauh lebih baik daripada *General FL-2*, dikarenakan komputasinya lebih mudah diterapkan, sehingga sangat sering dieksplorasi oleh peneliti [10]. *Quasi FL-2* ketika dalam menangani ketidakpastian jauh lebih baik daripada *General FL-2* maupun *Interval FL-2* [11], namun referensi yang ada sangat jarang ditemui karena tergolong model yang baru, sehingga tidak begitu disarankan bagi pemula. Metode yang paling umum dipakai dalam logika *fuzzy* adalah metode Tsukamoto, metode Mamdani, metode Sugeno dan metode Tahani [12]. *Fuzzy* memiliki beberapa komponen penting didalamnya yang meliputi variabel, himpunan, *domain*, fungsi keanggotaan, representasi kurva, dan *operator*. Variabel *fuzzy* merupakan *input* atau *output fuzzy* [3]. Himpunan *fuzzy* ialah kumpulan data berupa linguistik dan numeris [13]. Himpunan tegas adalah kumpulan data berupa nilai *crisp* (1 atau 0) [3]. Himpunan semesta merupakan *range* nilai pada *input* atau *output fuzzy* [9]. *Domain* adalah *range* nilai pada suatu himpunan *fuzzy* [3], [13]. Fungsi keanggotaan ialah pemetaan titik *input fuzzy* (UMF, FOU, LMF) pada kurva yang dipilih [14,15]. Representasi kurva merupakan pembentukan suatu batasan tertentu melalui fungsi keanggotaan yang menyerupai

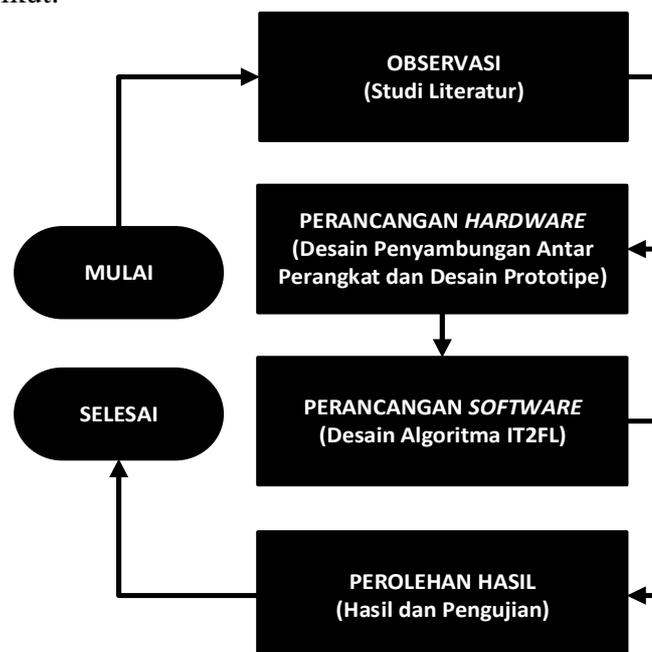
sebuah model, misalnya: linear, segitiga, trapesium, gaussian, dan lain sebagainya. *Operator* merupakan alat bantu perhitungan logika untuk mendapatkan hasil operasi, contohnya: AND, OR, dan NOT [16]. *Fuzzy logic type-2* mempunyai 4 tahapan dalam penyelesaiannya yaitu meliputi fuzzifikasi, inferensi, reduksi tipe, dan defuzzifikasi [17]. Adapun sistem *fuzzy* dapat diterapkan sebagai media prediksi atau kendali otomatis dengan memanfaatkan sistem pendukung keputusan.

Sistem Pendukung Keputusan (SPK) adalah sebuah sistem dengan penalaran yang sanggup mengerahkan suatu kemampuan dalam memecahkan suatu masalah yang ada secara semi terstruktur maupun tak terstruktur [18]. SPK yang ada saat ini sangat beraneka ragam penerapannya, misalnya *fuzzy* yang berfungsi sebagai pengendali pH air. pH air adalah indikator keasaman atau kebasaan suatu larutan yang terkandung di dalam air dengan skala yang berkisar antara 1 hingga 14 [19]. Pengkategorian pH dibagi menjadi 5 macam yaitu Asam Kuat (0-3), Asam Lemah (4-6), Netral (7), Basa Lemah (8-10), dan Basa Kuat (11-14) [20].

Pada penelitian ini, penulis mengusulkan metode IT2FL Sugeno Orde-Nol untuk digunakan sebagai pembelajaran dalam menangani tingginya ambiguitas pada sistem pengendalian pH air. Hal tersebut merupakan inovasi baru yang layak untuk diperdalam lagi kedepannya. Adapun tujuan dari penelitian ini ialah untuk memberikan gambaran sederhana dalam menerapkan algoritma IT2FL Sugeno sebagai sarana pengembangan IPTEK dalam ranah teknologi pertanian.

2. METODE

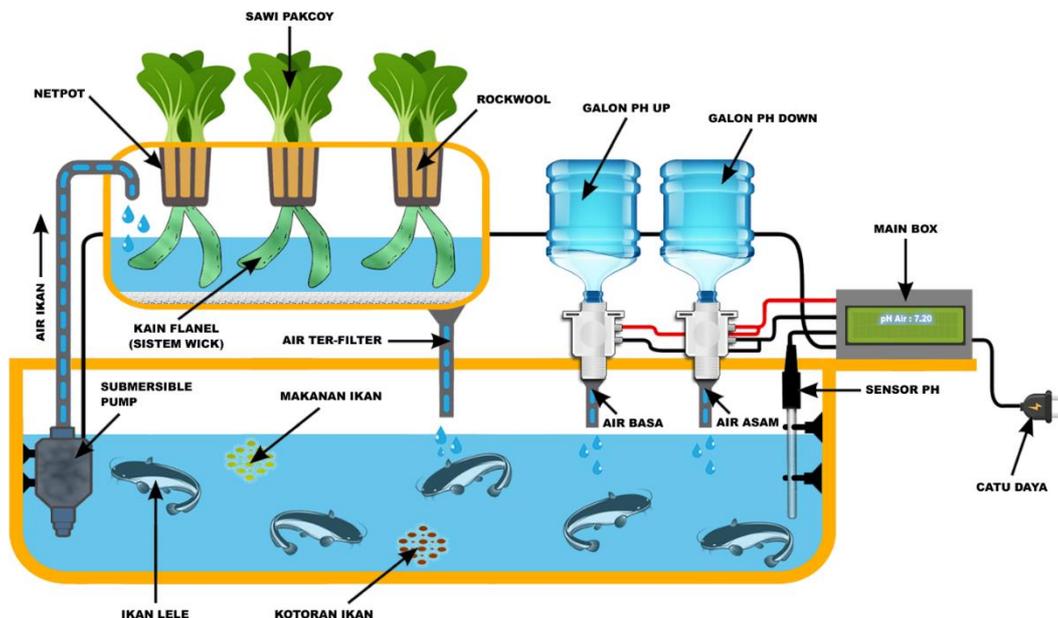
Penelitian ini bertipe kuantitatif eksperimen, yang mana pengolahan datanya didasari oleh adanya pendataan, perhitungan, dan juga pengujian terhadap instrumen yang dipakai, sehingga didapatkannya data evaluasi untuk penarikan kesimpulan. Adapun tahapan-tahapan yang ada pada penelitian ini direpresentasikan melalui *flowchart*. Hal tersebut dijelaskan secara eksplisit pada [Gambar 1](#) berikut.



Gambar 1. *Flowchart* Tahapan Penelitian

	G	G		Hitam
Switch (Saklar)	V+	V+	PSU 12V 1A	Merah
	G	G		Hitam
Solenoid Valve	V+	NO	Relay 2 Channel	Oranye
	G	G		Hitam
Submersible Pump Aquarium	L	L	PSU 12V 1A	Merah
	N	N		Hitam
Arduino Uno	V+	V+	Switch (Saklar)	Merah
		G		Hitam
	5V	5V	NodeMCU32	Merah
	G	G	Baseboard	Hitam

Lalu, ada hal yang perlu dilakukan selanjutnya yaitu merancang desain prototipe. Desain prototipe mewakili dari beberapa komponen, yang kemudian dirakit menjadi satu kesatuan sistem yang dapat anda lihat pada [Gambar 3](#) berikut.



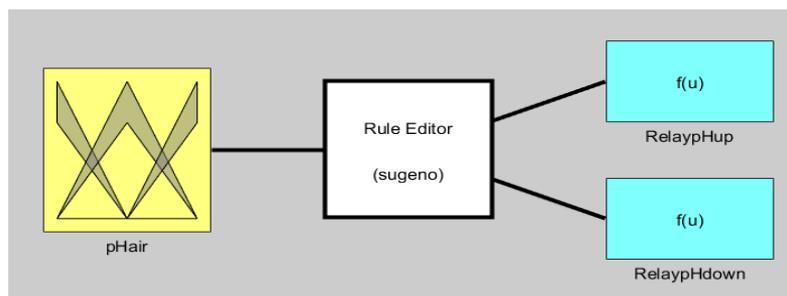
Gambar 3. Desain Prototipe

2.3. Perancangan Software

Tahapan perancangan *software* ini menjelaskan terkait cara merancang perangkat lunak (algoritma IT2FL Sugeno). Hal tersebut dapat dikerjakan melalui 4 proses yang dijelaskan sebagai berikut.

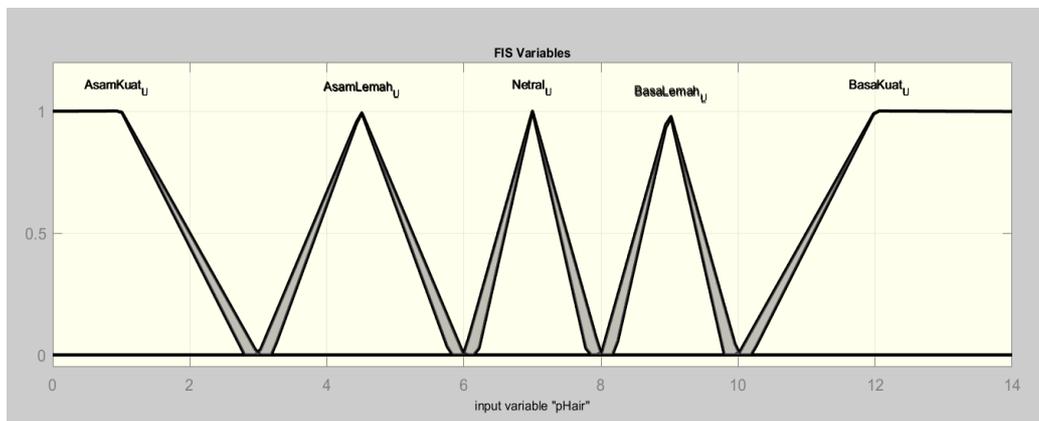
2.3.1. Fuzzifikasi

Tahapan fuzzifikasi ini, dalam proses pengerjaannya dapat memetakan *input crips* menjadi nilai keanggotaan linguistik (UMF dan LMF). Adapun model FIS (Fuzzy Inference System) yang digunakan oleh penulis yaitu SIMO (Single Input Multi Output) yang terlihat pada [Gambar 4](#) berikut.



Gambar 4. *Fuzzy Interface System*

Variabel *input* yang dipakai dalam penelitian ini hanya variabel pHair, sedangkan variabel *output* yang dipakai dalam penelitian ini ada dua yaitu variabel RelaypHup dan RelaypHdown. Adapun representasi kurva yang dipakai menggunakan kombinasi model linear dan segitiga. Gambar 5 menunjukkan FIS variabel *input* “pHair” yang diimplementasikan melalui fungsi-fungsi di bawah ini.



Gambar 5. *Variabel Input*

MF – Linear Turun : $\mu_{AsamKuat_U}[x]$

$$= \begin{cases} 1; x \leq 0 \\ \frac{3-x}{3-0}; 0 \leq x \leq 3 \\ 0; x \geq 3 \end{cases}$$

MF – Segitiga : $\mu_{AsamLemah_U}[x]$

$$= \begin{cases} 0; x \leq 3 \text{ atau } x \geq 6 \\ \frac{x-3}{4.5-3}; 3 \leq x \leq 4.5 \\ \frac{6-x}{6-4.5}; 4.5 \leq x \leq 6 \end{cases}$$

MF – Segitiga : $\mu_{Netral_U}[x]$

$$= \begin{cases} 0; x \leq 6 \text{ atau } x \geq 8 \\ \frac{x-6}{7-6}; 6 \leq x \leq 7 \\ \frac{8-x}{8-7}; 7 \leq x \leq 8 \end{cases}$$

MF – Linear Turun : $\mu_{AsamKuat_L}[x]$

$$= \begin{cases} 1; x \leq 0 \\ \frac{2.8-x}{2.8-0}; 0 \leq x \leq 2.8 \\ 0; x \geq 2.8 \end{cases}$$

MF – Segitiga : $\mu_{AsamLemah_L}[x]$

$$= \begin{cases} 0; x \leq 3.2 \text{ atau } x \geq 5.8 \\ \frac{x-3.2}{4.5-3.2}; 3.2 \leq x \leq 4.5 \\ \frac{5.8-x}{5.8-4.5}; 4.5 \leq x \leq 5.8 \end{cases}$$

MF – Segitiga : $\mu_{Netral_L}[x]$

$$= \begin{cases} 0; x \leq 6.2 \text{ atau } x \geq 7.8 \\ \frac{x-6.2}{7-6.2}; 6.2 \leq x \leq 7 \\ \frac{7.8-x}{7.8-7}; 7 \leq x \leq 7.8 \end{cases}$$

MF – Segitiga : $\mu_{BasaLemah_U}[x]$

$$= \begin{cases} 0; x \leq 8 \text{ atau } x \geq 10 \\ \frac{x-8}{9-8}; 8 \leq x \leq 9 \\ \frac{10-x}{10-9}; 9 \leq x \leq 10 \end{cases}$$

MF – Linear Naik : $\mu_{BasaKuat_U}[x]$

$$= \begin{cases} 0; x \leq 10 \\ \frac{x-10}{14-10}; 10 \leq x \leq 14 \\ 1; x \geq 14 \end{cases}$$

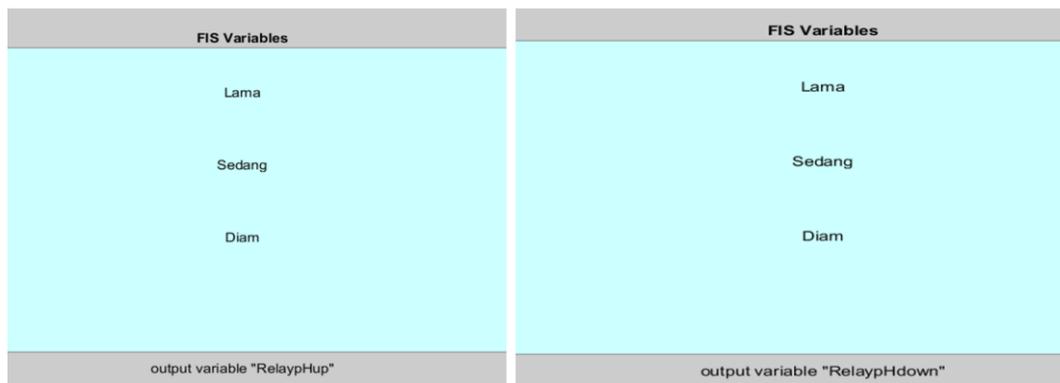
MF – Segitiga : $\mu_{BasaLemah_L}[x]$

$$= \begin{cases} 0; x \leq 8.2 \text{ atau } x \geq 9.8 \\ \frac{x-8.2}{9-8.2}; 8.2 \leq x \leq 9 \\ \frac{9.8-x}{9.8-9}; 9 \leq x \leq 9.8 \end{cases}$$

MF – Linear Naik : $\mu_{BasaKuat_L}[x]$

$$= \begin{cases} 0; x \leq 10.2 \\ \frac{x-10.2}{14-10.2}; 10.2 \leq x \leq 14 \\ 1; x \geq 14 \end{cases}$$

Gambar 6 menunjukkan FIS Variabel *output* “RelaypHup dan RelaypHdown”. Adapun durasi waktu pada variabel ini terbagi menjadi 3 bagian yaitu nol (0) detik untuk himpunan “Diam”, sepuluh (10) detik untuk himpunan “Sedang”, dan dua puluh lima (25) detik untuk himpunan “Lama”.



Gambar 6. Variabel *Output*

2.3.2. Inferensi

Tahapan inferensi ini, dalam proses pengerjaannya dapat memetakan basis aturan logika pada bagian anteseden dan konsekuen yang diwakili oleh keanggotaan *upper* dan keanggotaan *lower*. Proposisi pada basis aturan terbagi menjadi 2 macam yaitu tunggal dan majemuk. Proposisi tunggal biasanya menggunakan penalaran monoton yang hanya mengambil nilai yang berhubungan dengan anteseden sebagai keluaran.

Sedangkan Proposisi majemuk biasanya menggunakan penalaran implikasi dan agregasi untuk mendapatkan nilai α -predikat sebagai keluaran. Inferensi dalam penelitian ini menggunakan metode Sugeno dengan Orde-Nol yang dapat anda ketahui seperti yang dijelaskan pada pernyataan berikut.

[R-0] : **IF** pHair is AsamKuat **THEN** RelaypHup=25 **AND** RelaypHdown=0.

[R-1] : **IF** pHair is AsamLemah **THEN** RelaypHup=10 **AND** RelaypHdown=0.

[R-2] : **IF** pHair is Netral **THEN** RelaypHup=0 **AND** RelaypHdown=0.

[R-3] : **IF** pHair is BasaLemah **THEN** RelaypHup=0 **AND** RelaypHdown =10.

[R-4] : **IF** pHair is BasaKuat **THEN** RelaypHup=0 **AND** RelaypHdown=25.

Tahapan inferensi ini, dalam pengambilan keputusan pada sistem didasari oleh ketetapan-ketetapan berikut ini :

1. $Y_{cos} = \mathbf{nol (0)}$, maka RelaypHup : **ON lama** dan RelaypHdown : **OFF**.
2. $Y_{cos} = \mathbf{satu (1)}$, maka RelaypHup : **ON sedang** dan RelaypHdown : **OFF**.
3. $Y_{cos} = \mathbf{dua (2)}$, maka RelaypHup : **OFF** dan RelaypHdown : **OFF**.
4. $Y_{cos} = \mathbf{tiga (3)}$, maka RelaypHup : **OFF** dan RelaypHdown : **ON sedang**.
5. $Y_{cos} = \mathbf{empat (4)}$, maka RelaypHup : **OFF** dan RelaypHdown : **ON lama**.

2.3.3. Reduksi Tipe

Tahapan reduksi tipe ini, dalam proses pengerjaannya dapat mengubah tipe *fuzzy* dari dua (2) ke satu (1). Reduksi tipe yang dipakai oleh penulis yaitu berjenis *Center of Set*. Adapun rumus dalam penggunaan *Center of Set Type-reduction* secara umum dapat anda lihat pada Persamaan 1 berikut.

$$Y_l = \left(\frac{\sum_{i=1}^L Y^i \underline{\mu}_B^i + \sum_{i=L+1}^C Y^i \underline{\mu}_B^i}{\sum_{i=L+1}^C \underline{\mu}_B^i + \sum_{i=1}^L \underline{\mu}_B^i} \right), Y_r = \left(\frac{\sum_{i=R+1}^C Y^i \overline{\mu}_B^i + \sum_{i=1}^R Y^i \overline{\mu}_B^i}{\sum_{i=1}^R \overline{\mu}_B^i + \sum_{i=R+1}^C \overline{\mu}_B^i} \right) \tag{1}$$

2.3.4. Defuzzifikasi

Tahapan defuzzifikasi ini, dalam proses pengerjaannya dapat mengolah data dengan cara merata-rata interval kiri (y_l) dan kanan (y_r), sehingga mendapatkan hasil berupa nilai *crisp (ouput fuzzy)*. Adapun rumus dalam penggunaan Defuzzifikasi IT2FL secara umum dapat anda lihat pada Persamaan 2 berikut.

$$Y_{cos} = \frac{Y_l + Y_r}{2} \tag{2}$$

2.4. Perolehan Hasil

Tahapan ini dibagi menjadi 2 bagian yaitu hasil dan pengujian. Hasil dalam penelitian ini cenderung direpresentasikan ke dalam bentuk gambar dan narasi, sedangkan pengujian dapat diterapkan ke dalam bentuk skenario percobaan. Hal tersebut bertujuan untuk mengetahui tingkat validitas suatu sistem, agar dapat dikatakan layak pakai atau tidak layak pakai. Adapun pengukuran akurasi dapat menggunakan rumus yang tertera pada Persamaan 3 berikut.

$$A_k = \left(1 - \left| \frac{X - X_i}{X_i} \right| \right) \times 100\% \tag{3}$$

Kemudian pengukuran galat selisih dapat memakai rumus yang ditunjukkan pada Persamaan 4 berikut.

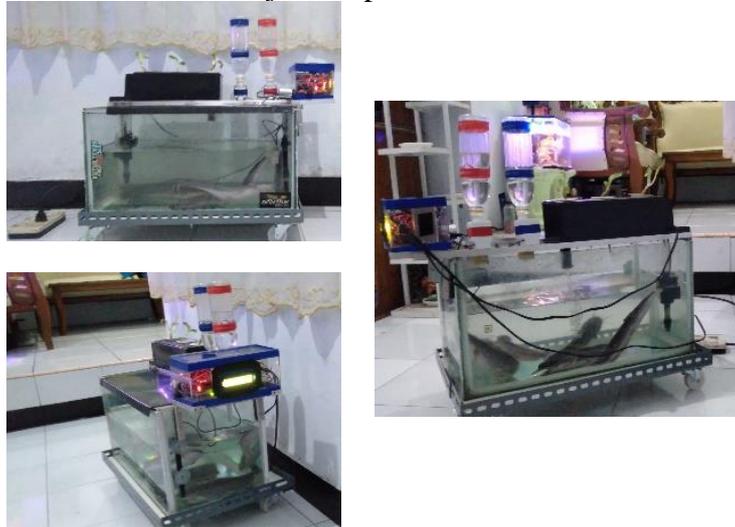
$$Error = |X - X_i| \tag{4}$$

Lalu yang terakhir, pengukuran galat sistematis dapat menggunakan rumus yang tertera pada Persamaan 5 berikut.

$$\%Error = \left(\left| \frac{X - X_i}{X} \right| \right) \times 100\% \tag{5}$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan rancangan yang telah dibuat, dihasilkanlah sebuah prototipe. Hal tersebut secara keseluruhan ditunjukkan pada [Gambar 7](#) berikut.



Gambar 7. Tampilan Prototipe

Mengenai implementasi dari bagian fuzzifikasi dapat anda lihat pada *source code* di bawah ini.

```
void fuzz_it2f1() {
  MF_AsamKuat(); //Memanggil Method MF Asam Kuat - Linear Turun
  MF_AsamLemah(); //Memanggil Method MF Asam Lemah - Segitiga
  MF_Neutral(); //Memanggil Method MF Netral - Segitiga
  MF_BasaLemah(); //Memanggil Method MF Basa Lemah - Segitiga
  MF_BasaKuat(); //Memanggil Method MF Basa Kuat - Linear Naik
}
```

Mengenai implementasi dari bagian inferensi dapat anda lihat pada *source code* di bawah ini.

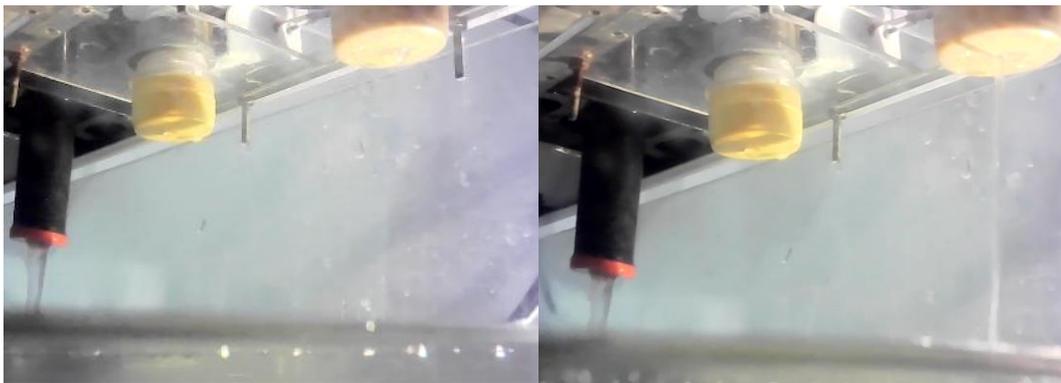
```
void infer_it2f1() {
  //Proposisi Tunggal Upper
  μUMF[0]=AK_U;μUMF[1]=AL_U;μUMF[2]=N_U;μUMF[3]=BL_U;μUMF[4]=BK_U;
  //Proposisi Tunggal Lower
  μLMF[0]=AK_L;μLMF[1]=AL_L;μLMF[2]=N_L;μLMF[3]=BL_L;μLMF[4]=BK_L;
  //Pengambilan Keputusan yang ditentukan
  kep[0] = 0; //untuk : ON Relay pH Up Lama (25 detik)
  kep[1] = 1; //untuk : ON Relay pH Up Sedang (10 detik)
  kep[2] = 2; //untuk : OFF semua Relay pH (0 detik)
  kep[3] = 3; //untuk : ON Relay pH Down Sedang (10 detik)
  kep[4] = 4; //untuk : ON Relay pH Down Lama (25 detik)
}
```

Mengenai implementasi dari bagian reduksi tipe dan defuzzifikasi dapat anda lihat pada *source code* di bawah ini.

```
void redukdefuzz_it2f1(){
    //Menjumlah total array yang ada pada MF-Upper dan MF-Lower
    Tarray1 = sizeof(μUMF) / sizeof(int);
    Tarray2 = sizeof(μLMF) / sizeof(int);
    for(i=0; i<Tarray1; i++){ //Perhitungan himpunan atas
        ΣyiμUMF += kep[i] * μUMF[i]; ΣμUMF += μUMF[i]; yi += kep[i];
    }
    for(i=0; i<Tarray2; i++){ //Perhitungan himpunan bawah
        ΣyiμLMF += kep[i] * μLMF[i]; ΣμLMF += μLMF[i]; yi += kep[i];
    }
    //Perhitungan reduksi tipe
    yl = ((ΣyiμUMF + ΣyiμLMF)/(ΣμLMF + ΣμUMF)); //Interval kiri
    yr = ((ΣyiμLMF + ΣyiμUMF)/(ΣμUMF + ΣμLMF)); //Interval kanan
    //Perhitungan defuzzifikasi
    ycos = floor((yl + yr)/2);
    //Nilai crisp berdasarkan pengambilan keputusan
    if(ycos == 0)    {  pH_up_onlm(); } //SPK 0
    else if(ycos == 1){  pH_up_onsd(); } //SPK 1
    else if(ycos == 2){  all_pH_off(); } //SPK 2
    else if(ycos == 3){  pH_down_onsd(); } //SPK 3
    else if(ycos == 4){  pH_down_onlm(); } //SPK 4
}

```

Adapun sampel uji coba yang didapatkan oleh penulis, berasal dari hasil implementasi *source code* di atas. Hal tersebut dapat ditunjukkan pada [Gambar 8](#).



Gambar 8. Sampel Uji Coba

Pengujian sistem pada sesi *monitoring* dilakukan untuk mengetahui tingkat akurasi, galat selisih, dan galat sistematis yang ada pada sensor pH. Hal tersebut dilakukan secara manual dan otomatis dengan mengambil beberapa sampel data sebanyak 25 yang dapat anda ketahui pada [Tabel 2](#) berikut.

Tabel 2. *Monitoring pH*

Uji	Waktu	pH Meter (X)	pH Prototype (X_i)	Error	%Error	Akurasi
1	Minggu, 03-04-2022	8.39	8.80	0.41	4.88%	96%
2	Minggu, 03-04-2022	8.39	8.80	0.41	4.88%	96%
3	Minggu, 03-04-2022	8.39	9.61	1.22	14.54%	88%
4	Minggu, 03-04-2022	8.39	7.61	0.78	9.29%	90%
5	Minggu, 03-04-2022	8.39	7.71	0.68	8.10%	92%
6	Minggu, 03-04-2022	8.40	8.80	0.4	4.76%	96%
7	Minggu, 03-04-2022	8.40	8.94	0.54	6.42%	94%
8	Minggu, 03-04-2022	8.40	7.57	0.83	9.88%	90%
9	Minggu, 03-04-2022	8.40	7.95	0.45	5.35%	95%
10	Minggu, 03-04-2022	8.40	8.80	0.4	4.76%	96%
11	Minggu, 03-04-2022	8.38	8.80	0.42	5.01%	96%
12	Minggu, 03-04-2022	8.38	7.95	0.43	5.13%	95%
13	Minggu, 03-04-2022	8.38	8.94	0.56	6.68%	94%
14	Minggu, 03-04-2022	8.38	7.17	1.21	14.43%	84%
15	Minggu, 03-04-2022	8.38	9.89	1.51	18.01%	85%
16	Minggu, 03-04-2022	8.30	9.11	0.81	9.75%	92%
17	Minggu, 03-04-2022	8.30	7.01	1.29	15.54%	82%
18	Minggu, 03-04-2022	8.30	6.18	2.12	25.54%	66%
19	Minggu, 03-04-2022	8.30	8.45	0.15	1.80%	99%
20	Minggu, 03-04-2022	8.30	7.71	0.59	7.10%	93%
21	Minggu, 03-04-2022	8.35	8.08	0.27	3.23%	97%
22	Minggu, 03-04-2022	8.35	7.82	0.53	6.34%	94%
23	Minggu, 03-04-2022	8.35	8.12	0.23	2.75%	98%
24	Minggu, 03-04-2022	8.35	8.25	0.1	1.19%	99%
25	Minggu, 03-04-2022	8.35	7.40	0.95	11.37%	88%
Nilai perhitungan rata-rata				0.6	8.2%	91.8%

Selain itu, dalam pengujian sistem juga harus mengecek kembali logika IT2FL Sugeno yang telah diterapkan melalui *serial monitor* di aplikasi Arduino IDE. Adapun pengujian pH air dengan pengaruh asam kuat, maka hasil yang diperoleh seperti yang ditunjukkan pada [Gambar 9](#) berikut.

```

[Interval Type 2 Fuzzy Logic]
proses fuzzifikasi :

Deteksi pH: 2.17
Nilai AK-Upper: 0.28 , Nilai AK-Lower: 0.23
Nilai AL-Upper: 0.00 , Nilai AL-Lower: 0.00
Nilai N-Upper: 0.00 , Nilai N-Lower: 0.00
Nilai BL-Upper: 0.00 , Nilai BL-Lower: 0.00
Nilai BK-Upper: 0.00 , Nilai BK-Lower: 0.00

proses inferensi :
AK-Upper terkecil = 0.28 , AK-Lower terkecil = 0.23
AL-Upper terkecil = 0.00 , AL-Lower terkecil = 0.00
N-Upper terkecil = 0.00 , N-Lower terkecil = 0.00
BL-Upper terkecil = 0.00 , BL-Lower terkecil = 0.00
BK-Upper terkecil = 0.00 , BK-Lower terkecil = 0.00

proses reduksi tipe & defuzzifikasi :
yl = (0.00 + 0.00) / (0.23 + 0.28) = 0.00
yr = (0.00 + 0.00) / (0.28 + 0.23) = 0.00
ycos = (0.00 + 0.00) / 2 = 0
  
```

Gambar 9. Pengecekan Logika IT2FL Sugeno (SPK: 0)

Adapun pengujian pH air dengan pengaruh asam lemah, maka hasil yang diperoleh seperti yang ditunjukkan pada [Gambar 10](#) berikut.

```

[Interval Type 2 Fuzzy Logic]
proses fuzzifikasi :

Deteksi pH: 3.84
Nilai AK-Upper: 0.00 , Nilai AK-Lower: 0.00
Nilai AL-Upper: 0.56 , Nilai AL-Lower: 0.49
Nilai N-Upper: 0.00 , Nilai N-Lower: 0.00
Nilai BL-Upper: 0.00 , Nilai BL-Lower: 0.00
Nilai BK-Upper: 0.00 , Nilai BK-Lower: 0.00

proses inferensi :
AK-Upper terkecil = 0.00 , AK-Lower terkecil = 0.00
AL-Upper terkecil = 0.56 , AL-Lower terkecil = 0.49
N-Upper terkecil = 0.00 , N-Lower terkecil = 0.00
BL-Upper terkecil = 0.00 , BL-Lower terkecil = 0.00
BK-Upper terkecil = 0.00 , BK-Lower terkecil = 0.00

proses reduksi tipe & defuzzifikasi :
yl = (0.56 + 0.49) / (0.49 + 0.56) = 1.00
yr = (0.49 + 0.56) / (0.56 + 0.49) = 1.00
ycos = (1.00 + 1.00) / 2 = 1
  
```

Gambar 10. Pengecekan Logika IT2FL Sugeno (SPK: 1)

Adapun pengujian pH air dengan pengaruh netral, maka hasil yang diperoleh seperti yang ditunjukkan pada [Gambar 11](#) berikut.

```

[Interval Type 2 Fuzzy Logic]
proses fuzzifikasi :

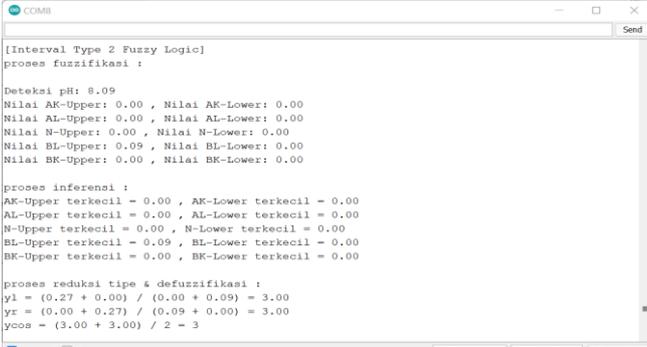
Deteksi pH: 7.88
Nilai AK-Upper: 0.00 , Nilai AK-Lower: 0.00
Nilai AL-Upper: 0.00 , Nilai AL-Lower: 0.00
Nilai N-Upper: 0.12 , Nilai N-Lower: 0.00
Nilai BL-Upper: 0.00 , Nilai BL-Lower: 0.00
Nilai BK-Upper: 0.00 , Nilai BK-Lower: 0.00

proses inferensi :
AK-Upper terkecil = 0.00 , AK-Lower terkecil = 0.00
AL-Upper terkecil = 0.00 , AL-Lower terkecil = 0.00
N-Upper terkecil = 0.12 , N-Lower terkecil = 0.00
BL-Upper terkecil = 0.00 , BL-Lower terkecil = 0.00
BK-Upper terkecil = 0.00 , BK-Lower terkecil = 0.00

proses reduksi tipe & defuzzifikasi :
yl = (0.23 + 0.00) / (0.00 + 0.12) = 2.00
yr = (0.00 + 0.23) / (0.12 + 0.00) = 2.00
ycos = (2.00 + 2.00) / 2 = 2
  
```

Gambar 11. Pengecekan Logika IT2FL Sugeno (SPK: 2)

Adapun pengujian pH air dengan pengaruh basa lemah, maka hasil yang diperoleh seperti yang ditunjukkan pada Gambar 12 berikut.



```

[Interval Type 2 Fuzzy Logic]
proses fuzzifikasi :

Deteksi pH: 8.09
Nilai AK-Upper: 0.00 , Nilai AK-Lower: 0.00
Nilai AL-Upper: 0.00 , Nilai AL-Lower: 0.00
Nilai N-Upper: 0.00 , Nilai N-Lower: 0.00
Nilai BL-Upper: 0.09 , Nilai BL-Lower: 0.00
Nilai BK-Upper: 0.00 , Nilai BK-Lower: 0.00

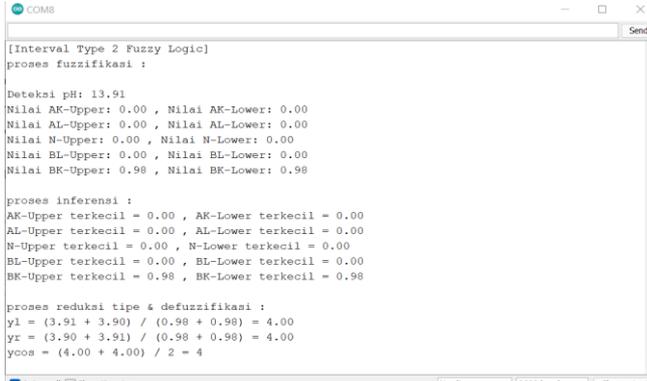
proses inferensi :
AK-Upper terkecil = 0.00 , AK-Lower terkecil = 0.00
AL-Upper terkecil = 0.00 , AL-Lower terkecil = 0.00
N-Upper terkecil = 0.00 , N-Lower terkecil = 0.00
BL-Upper terkecil = 0.09 , BL-Lower terkecil = 0.00
BK-Upper terkecil = 0.00 , BK-Lower terkecil = 0.00

proses reduksi tipe & defuzzifikasi :
yl = (0.27 + 0.00) / (0.00 + 0.09) = 3.00
yr = (0.00 + 0.27) / (0.09 + 0.00) = 3.00
ycoo = (3.00 + 3.00) / 2 = 3

```

Gambar 12. Pengecekan Logika IT2FL Sugeno (SPK: 3)

Adapun pengujian pH air dengan pengaruh basa kuat, maka hasil yang diperoleh seperti yang ditunjukkan pada Gambar 13 berikut.



```

[Interval Type 2 Fuzzy Logic]
proses fuzzifikasi :

Deteksi pH: 13.91
Nilai AK-Upper: 0.00 , Nilai AK-Lower: 0.00
Nilai AL-Upper: 0.00 , Nilai AL-Lower: 0.00
Nilai N-Upper: 0.00 , Nilai N-Lower: 0.00
Nilai BL-Upper: 0.00 , Nilai BL-Lower: 0.00
Nilai BK-Upper: 0.98 , Nilai BK-Lower: 0.98

proses inferensi :
AK-Upper terkecil = 0.00 , AK-Lower terkecil = 0.00
AL-Upper terkecil = 0.00 , AL-Lower terkecil = 0.00
N-Upper terkecil = 0.00 , N-Lower terkecil = 0.00
BL-Upper terkecil = 0.00 , BL-Lower terkecil = 0.00
BK-Upper terkecil = 0.98 , BK-Lower terkecil = 0.98

proses reduksi tipe & defuzzifikasi :
yl = (3.91 + 3.90) / (0.98 + 0.98) = 4.00
yr = (3.90 + 3.91) / (0.98 + 0.98) = 4.00
ycoo = (4.00 + 4.00) / 2 = 4

```

Gambar 13. Pengecekan Logika IT2FL Sugeno (SPK: 4)

Setelah melakukan pengujian, maka didapatkan beberapa evaluasi yang perlu disampaikan, yaitu : sistem ini membutuhkan suplai listrik dan internet untuk beroperasi; akurasi sistem tidak hanya bergantung pada algoritma IT2FL Sugeno namun juga bergantung pada sensor pH; kalibrasi pada sensor dapat dilakukan sewaktu-waktu jika dirasa perlu; algoritma IT2FL Sugeno terbukti sangat handal dalam menangani ketidakpastian yang tinggi; sistem pendukung keputusan yang ditanam pada algoritma IT2FL Sugeno dapat berfungsi dengan baik.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan oleh penulis, menunjukkan bahwa penerapan IT2FL dapat berfungsi dengan baik terutama dalam otomatisasi kendali pH (*ON-OFF* pH *up* maupun pH *down*). SPK 0 untuk aksi pH *up on*: 25 detik, SPK 1 untuk aksi pH *up on*: 10 detik, SPK 2 untuk aksi *all pH off*: 0 detik, SPK 3 untuk aksi pH *down on*: 10 detik, dan SPK 4 untuk aksi pH *down on*: 25 detik. Menurut hasil pengujian, sistem telah dinyatakan valid dengan perhitungan akurasi rata-rata sebesar 91.8%, galat selisih rata-rata sebesar 0.6, dan galat sistematis rata-rata sebesar 8.2%.

REFERENSI

- [1] A. S. Putra, S. Budiprayitno, and L. P. Rahayu, "Perancangan Sistem Kontrol pH dan Suhu Air Menggunakan Metode Fuzzy dan Terintegrasi dengan Internet of Things (IoT) pada Budidaya Ikan Hias," *J. Tek. ITS*, vol. 10, no. 02, pp. 444–449, 2021, doi: 10.12962/j23373539.v10i2.74902.
- [2] H. Nasution, "Implementasi Logika Fuzzy pada Sistem Kecerdasan Buatan," *ELKHA J. Tek. Elektro*, vol. 4, no. 2, 2012, doi:10.26418/elkha.v4i2.512.
- [3] G. P. N. Hakim, D. Septiyana, A. Firdausi, F. R. I. Mariati, and S. Budiyanto, *SISTEM FUZZY: Panduan Lengkap Aplikatif*. Yogyakarta: Penerbit ANDI, 2021.
- [4] J. Woleński, "Logical Ideas of Jan Łukasiewicz," *Stud. Humana*, vol. 8, no. 2, 2019, doi: 10.2478/sh-2019-0011.
- [5] D. Vinsensia, "Prestasi Penerapan Fuzzy Mamdani dalam Penentuan Prestasi Belajar Siswa Study Kasus: SMk Negeri 1 Sergai," *Sink. J. dan Penelit. Tek. Inform.*, vol. 2, no. 2, pp. 47–51, 2018.
- [6] A. K. Nisa, M. Abdy, and A. Zaki, "Penerapan Fuzzy Logic untuk Menentukan Minuman Susu Kemasan Terbaik dalam Pengoptimalan Gizi," *J. Math. Comput. Stat.*, vol. 3, no. 1, 2020, doi: 10.35580/jmathcos.v3i1.19902.
- [7] D. Vinsensia and Y. Utami, "Penerapan Fuzzy Inference System (FIS) Metode Mamdani dalam Pemilihan Jurusan Perguruan Tinggi," *Publ. J. Penelit. Tek. Inform.*, vol. 2, no. 2, 2018.
- [8] A. M. Sajiah and N. A. Setiawan, "Interval Type-2 Fuzzy Logic System untuk Diagnosis Coronary Artery Disease," *Commun. Sci. Technol.*, vol. 1, no. 2, pp. 13–19, 2016, doi: 10.21924/cst.1.2.2016.26.
- [9] J. Al-Kausar and A. S. Handayani, "Perbandingan Type-1 Fuzzy Logic System (T1FLS) dan Interval Type-2 Fuzzy Logic System (IT2FLS) pada Mobile Robot," *Annu. Res. Semin.*, vol. 4, no. 1, 2018.
- [10] H. Humaira, "Fuzzy Tipe-2 Mamdani untuk Mendukung Pengambilan Keputusan," *J. TEKNOIF*, vol. 2, no. 1, pp. 47–55, 2014, doi: 10.21063/jtif.2014.V2.1.47-55.
- [11] L. F. Albarracin and M. A. Melgarejo, "An approach for channel equalization using quasi type-2 fuzzy systems," *2010 Annual Meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society*, 2010, pp. 1-5, doi: 10.1109/NAFIPS.2010.5548203.
- [12] A. Sianipar and K. Handoko, "Implementasi Fuzzy Logic untuk Sortasi Buah Tomat Secara Otomatis," *J. Comasie*, vol. 03, no. 02, 2020.
- [13] N. R. Khoirun, "Metode Fuzzy Time Series Model Chen dan Heuristic Pada Peramalan Indeks Harga Saham Gabungan (IHSG)," Universitas Muhammadiyah Semarang, 2021.
- [14] Z. Zuhri, "Pengembangan Tipe 2 Fuzzy Sliding Mode Control (T2FSMC) pada Kontrol Posisi Panel Surya dengan Optimasi Gain Scale Factor Menggunakan Firefly Algorithm," ITS (Institut Teknologi Sepuluh Nopember), 2018.
- [15] R. Ekawati, "Analisis Fluktuasi Jumlah Produksi Gula Tebu Perbandingan Bertahap Triangular Fuzzy Inference System," *J. Ind. Serv.*, vol. 7, no. 1, 2021.
- [16] A. W. Syahroni and S. Rachmatullah, "Sistem Pendukung Keputusan Pemilihan Laptop pada Toko Online dengan Metode Fuzzy Tahani," *Sinkron*, vol. 3, no. 1, 2018.
- [17] A. Meylani and A. S. Handayani, "Perbandingan Kinerja Sistem Logika Fuzzy Tipe-1 dan Interval Tipe-2 pada Aplikasi Mobile Robot," *Comput. Sci. ICT*, vol. 3, no. 1, pp. 209–214, 2017.
- [18] D. W. Wibowo, M. Mentari, A. D. Chandra, A. A. Kuddah, and R. wahyu Putra, "Sistem Pendukung Keputusan Berbasis Web Rekomendasi Pekerjaan Bagi Lulusan JTI Polinema Dengan Metode SAW," *JASIEK (Jurnal Apl. Sains, Informasi, Elektron. dan Komputer)*, vol. 2, no. 1, 2020, doi: 10.26905/jasiek.v2i1.3724.
- [19] J. Karangin, B. Sugeng, and S. Sulardi, "Uji Keasaman Air dengan Alat Sensor pH Di STT Migas Balikpapan," *J. Kacapuri J. Keilmuan Tek. Sipil*, vol. 2, no. 1, 2019, doi: 10.31602/jk.v2i1.2065.
- [20] D. C. M. W. Wijaya, "Kendali dan Monitoring pH Air Akuaponik Berbasis IoT Dengan Metode Fuzzy Type-2," UPN "Veteran" Jawa Timur, 2022.