

# Identifikasi Performa Algoritma Fuzzy Mamdani pada Internet of Thing Kendali Proses Koagulasi Pembuatan Tahu

Yovi Litanianda<sup>1)\*</sup>, David April Riyanto<sup>2)</sup>, Angga Prasetyo<sup>3)</sup>, Adi Fajaryanto Cobantoro<sup>4)</sup>, Ismail Abdurrozaq Zulkarnain<sup>5)</sup>

<sup>1)2)3)4)5)</sup>Universitas Muhammadiyah Ponorogo

Jl. Budi Utomo no. 10, Kabupaten Ponorogo, Indonesia

<sup>1)</sup>yovi@umpo.ac.id

<sup>2)</sup>davidpuntuk@gmail.com

<sup>3)</sup>angga\_raspi@umpo.ac.id

<sup>4)</sup>adifajaryanto@umpo.ac.id

<sup>5)</sup>ismail@umpo.ac.id

Article history:

Received 23 Des 2024;  
Revised 25 Des 2024;  
Accepted 26 Des 2024;  
Available online 27 Des 2024

Keywords:

Algoritma Fuzzy Mamdani  
Internet Of Thing  
Kendali Proses  
Koagulasi Tahu  
Pembuatan Tahu

Abstrak

Proses pembuatan tahu dilakukan dalam berapa tahapan. Tahapan terpenting dalam pembuatan tahu yakni terletak pada proses penggumpalan (koagulasi) sari kedelai yang telah direbus. Pada tahapan ini banyak faktor yang menentukan keberhasilannya, diantaranya suhu sari kedelai, PH cuka sebagai katalis reaksi koagulasi dan kecepatan pengadukan. Jika terjadi ketidaksesuaian salah satunya maka akan berakibat sari kedelai gagal menggumpal dan terbuang. Produksi tahu yang masih tradisional membuat pekerjaan ini masih mengandalkan keahlian pekerja senior yang terampil. Ketergantungan pada keterampilan pekerja akan menghambat keberlangsungan industri. Untuk mengatasi masalah tersebut, dicoba dikembangkan perangkat IoT yang mampu mengendalikan proses koagulasi pada pembuatan tahu. Sistem ini bekerja berdasarkan algoritma Fuzzy Mamdani yang akan mengolah input nilai suhu sari kedelai dan nilai PH cuka menjadi nilai PWM yang menjadi penentu kecepatan motor pengaduk larutan sari kedelai. Tingkat keberhasilan algoritma fuzzy menangani kondisi nyata yang bervariasi menjadi ukuran performanya. Pengujian dilakukan dengan skenario menguji langsung dengan kondisi nyata sari kedelai dan cuka untuk diketahui tingkat keberhasilannya dalam melakukan pengendalian proses koagulasi pembuatan tahu. Sebanyak 30 percobaan hasil pengadukan didapati keseluruhan proses dinyatakan berhasil menggumpalkan sari kedelai pada kecepatan motor bervariasi sesuai kendali algoritma Fuzzy mamdani berdasarkan kondisi pH cuka dan suhu sari kedelai. Oleh karena itu penelitian ini menyimpulkan bahwa performa Algoritma Fuzzy mamdani dalam mengendalikan proses koagulasi pembuatan tahu melalui cara mengatur kecepatan pengadukan sebesar 100%. Temuan ini menjadi bukti penguat yang bisa dijadikan dasar bagi para peneliti bahwa algoritma fuzzy sekali lagi berhasil dijadikan rule pengendalian sebuah proses dengan hasil yang meyakinkan.

## I. PENDAHULUAN

Tahu yang berbahan dasar kedelai yang banyak dikonsumsi di Indonesia. Tahu sebagai bahan makanan setengah matang dalam proses pembuatannya melalui banyak tahapan. Pembuatan Tahu terdiri dari 8 tahapan, dimulai dengan merendam kedelai yang telah dipilih dan dibersihkan ke dalam air dengan tujuan agar biji kedelai menjadi lunak. Setelah itu, kedelai ditumbuk atau digiling hingga halus seperti bubur. Selanjutnya bubur kedelai itu menjalani proses pengukusan atau perebusan hingga matang. Bubur kedelai yang telah matang ini kemudian disaring untuk dipisahkan antara sari kedelai dari ampasnya. Jika mau ampas kedelai ini bisa diproses menjadi bahan lain seperti tempe gembos. Proses berikutnya yaitu penggumpalan sari kedelai yang menggunakan bahan katalis berupa cuka agar terjadi reaksi koagulasi menghasilkan gumpalan-gumpalan sari tahu yang mengembang

\* Corresponding author

Proses penggumpalan atau koagulasi yang merupakan tahapan terpenting dalam produksi tahu dilakukan dengan cara mengaduk sari kedelai sambil ditambahkan cuka sebagai katalisator yang akan memecah molekul sari kedelai sambil diaduk sampai air menjadi terpisah dari padatan yang menggumpal. Sari kedelai yang telah menggumpal ini kemudian disaring dengan cara dipres dalam cetakan sehingga terpisah dari airnya. Sampai sini tahu sudah jadi, biasanya demi menambah estetika produk maka tahu itu kemudian dipotong menjadi bentuk blok-blok tahu padat. Pada tahap ini sebenarnya tahu sudah siap jual, tetapi jika ingin menjual sebagai tahu matang, maka dilakukan proses penggorengan.

Proses produksi tahu di Kecamatan Purwantoro, Wonogiri Purwantoro masih tradisional yang mengandalkan kepiawaian pekerjanya untuk melakukan semua tahapan produksi tahu. Pada tahapan penggumpalan pada umumnya hanya bisa dilakukan oleh pekerja senior yang berpengalaman [1], [2] karena jika proses ini gagal, maka sari kedelai yang sudah direbus akan terbuang tanpa bisa diproses lagi [3]. Pekerja senior yang berpengalaman secara terampil mengamati perubahan pada sari kedelai yang diaduk menggunakan satu tangan sedang tangan lainnya menambahkan cuka. Banyaknya cuka yang ditambahkan menyesuaikan dengan suhu sari kedelai dan karakteristik cuka yang digunakan. Selain kejelian mata pekerja itu dalam mengidentifikasi penampakan sari kedelai yang diproses, hanya pengalamanlah yang bisa dijadikan dasar menentukan takaran cuka. Selain itu, sesekali kecepatan pengadukan juga disesuaikan demi memastikan keberhasilan reaksi koagulasi. Rumitnya proses penggumpala ini menjadikan ketergantungan pada pekerja senior yang bisa berefek menghambat proses produksi karena jika pekerja itu berhalangan maka proses produksi terpaksa dibatalkan [4], [5], [6]. Mengganti dengan pekerja lain bukanlah solusi, karena banyak faktor yang mempengaruhi keberhasilan proses ini. Kesesuaian takaran cuka yang dipengaruhi oleh kadar keasaman cuka yang bervariasi, kecepatan pengadukan yang memperhatikan kondisi suhu sari kedelai akan sangat menentukan keberhasilan proses koagulasi. Keterampilan ini membutuhkan banyak pengalaman dan insting yang tajam pekerja yang sulit untuk dibuat.

Pemasalahan itu mendorong untuk dilakukannya penelitian ini dengan memanfaatkan teknologi Internet of Things (IoT) untuk mengendalikan proses koagulasi tahu. Perangkat Iot itu akan dipasang algoritma fuzzy Mamdani yang akan mengatur kecepatan pengadukan berdasarkan variabel suhu sari kedelai dan kadar asam cuka untuk memastikan proses koagulasi berhasil. Algoritma fuzzy inilah yang mengolah hasil pengukuran variabel untuk menentukan kecepatan pengadukan sesuai [7], [8], [9]. Performa dari penerapan algoritma Fuzzy Mamdani inilah yang ingin diidentifikasi dalam penelitian ini karena pada beberapa penelitian terdahulu [10], [11], [12] algoritma Fuzzy terbukti berhasil melakukan pengendalian proses. Pertanyaan seberapa tingkat keberhasilan algoritma fuzzy dalam melakukan pengendalian proses koagulasi pada tahap pembuatan tahu dengan cara mengatur kecepatan pengadukan itulah akan diketahui dari penelitian ini.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

Tahu berasal dari China, di mana kata "tahu" disebut "tao ho" atau "takwa," yang memiliki arti kacang kedelai yang dihancurkan menjadi bubur [13]. Proses mendapatkan padatan tahu dilakukan dengan melibatkan reaksi koagulasi dan flokulasi. Reaksi Koagulasi menggunakan ion berlawanan yang akan merusak kestabilan ion dalam cairan koloid sari kedelai hingga membentuk mikroflok. Mikroflok ini kemudian bergabung menjadi gumpalan (makroflok) melalui reaksi Flokulasi yang diendapkan dengan pengadukan lambat [14].

Penelitian ini menggunakan metode inferensi Fuzzy Mamdani, yang merupakan bagian terpenting dalam sistem kontrol fuzzy. Metode ini merumuskan pemetaan dari input ke output menggunakan logika fuzzy dan aturan "IF...THEN". Prosesnya melibatkan fuzzifikasi input, evaluasi aturan, agregasi, dan defuzzifikasi output. Metode ini umumnya digunakan dalam aplikasi kontrol yang memerlukan keputusan berdasarkan aturan linguistik dan logika fuzzy [15].

Logika fuzzy cocok untuk diterapkan pada sistem yang tidak linier yang dipengaruhi kondisi lingkungan [16]. Berdasarkan informasi itulah kemudian sistem dalam penelitian ini akan menggunakan algoritma Fuzzy sebagai kendalanya karena kondisi proses produksi tahu dan nilai variabel yang ada bukanlah sebuah proses yang linier. Metode logika fuzzy memiliki keuntungan dalam proses penalaran bahasa tanpa memerlukan persamaan matematika objek yang dikendalikan sehingga mampu menghasilkan kendali kecepatan putaran motor untuk mesin pengaduk bahan pertanian dengan kinerja baik tanpa lonjakan arus listrik, dan overshoot [17]. [6]. Berdasarkan referensi tersebut maka pilihan menggunakan metode logika fuzzy dirasa tepat.

Sedangkan perangkat yang digunakan untuk mengukur variabel yang akan menjadi input dari logika fuzzy didasarkan pada hasil pembacaan sensor dengan cara kerja yang sesuai. Diantaranya berupa sensor PH yaitu perangkat yang mengukur tingkat keasaman atau kebasahan suatu larutan. Sensor ini terdiri dari elektroda pH yang mendeteksi ion hidrogen dalam larutan dan mengubahnya menjadi sinyal listrik. Hasil pengukuran pH digunakan untuk memantau dan mengontrol proses dalam berbagai aplikasi, seperti dalam industri makanan, pengolahan air, dan penelitian laboratorium. Sensor pH penting untuk memastikan kualitas dan konsistensi produk serta menjaga kondisi lingkungan yang optimal [19]. Sensor DS18B20 merupakan sensor suhu digital yang menggunakan antarmuka 1-Wire untuk mengukur suhu dengan akurasi tinggi. Sensor ini dapat mengukur suhu dalam rentang -55°C hingga +125°C dengan resolusi hingga 12-bit. DS18B20 mengirimkan data suhu dalam format digital

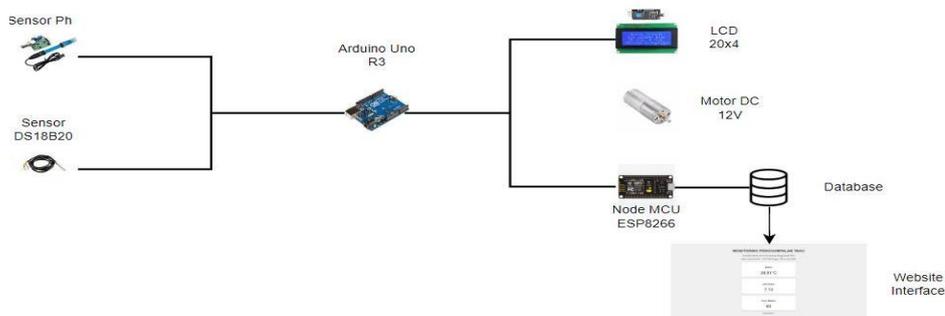
langsung, sehingga mudah diintegrasikan dengan mikrokontroler seperti Arduino. Sensor ini sering digunakan dalam aplikasi seperti monitoring suhu lingkungan dan sistem kontrol suhu [20].

Output dari hasil logika fuzzy berupa nilai PWM (Pulse Width Modulation) yaitu salah satu cara pengendalian daya dengan mengatur lebar pulsa sinyal, sehingga dapat mengontrol kecepatan motor. PWM memungkinkan pengaturan dilakukan secara efisien dan presisi tanpa banyak kehilangan energi [21].

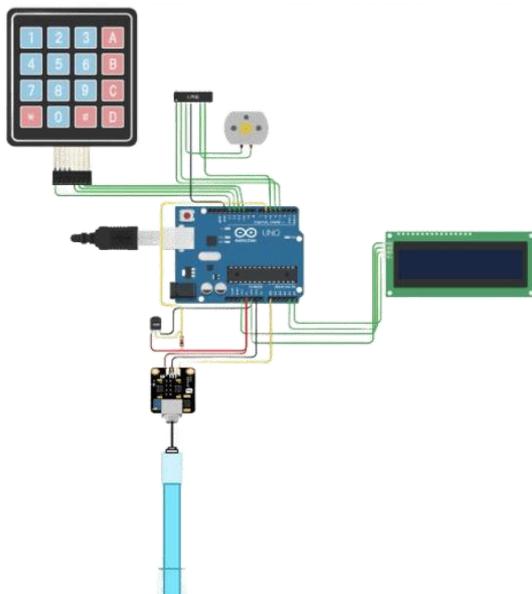
Kesesuaian teori dari penelitian terdahulu di atas menjadi dasar desain sistem yang dipakai dalam penelitian ini, karena ada perbedaan objek yang diteliti, maka masih perlu pembuktian apakah konsep dalam penelitian ini akan mendapatkan hasil yang positif dengan cara mencoba langsung dalam proses nyata.

### III. METODE

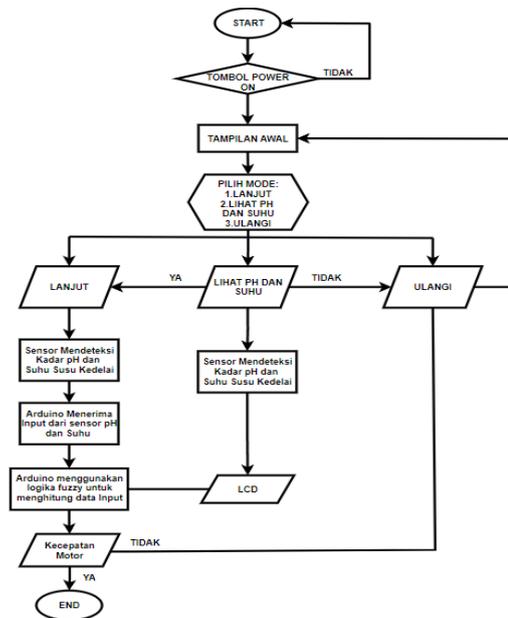
Kendali proses koagulasi sari kedelai pada produksi tahu ini dibangun menggunakan beberapa komponen fisik sistem yang terintegrasi dengan mikrokontroler Arduino Uno yang akan dipasang algoritma Fuzzy Mamdani. Pertama-tama dirancang desain sistem pengendalian seperti pada gambar 1, yang terdiri dari beberapa komponen utama: sensor pH, sensor suhu DS18B20, mikrokontroler Arduino Uno, motor DC, I2C LCD display, dan modul komunikasi IoT. Konsep sistem sebagai berikut, sensor pH akan mengukur tingkat keasaman Cuka, sedangkan sensor suhu DS18B20 digunakan untuk mengukur suhu sari kedelai. Nilai hasil pembacaan dua sensor ini akan dikirim ke mikrokontroler yang menjalankan algoritma Fuzzy Mamdani untuk menentukan kecepatan motor DC pengaduk. Kecepatan pengadukan ditentukan dari sinyal PWM yang dibangkitkan mikrokontroler berdasarkan algoritma Fuzzy. Dari desain ini kemudian dikembangkan menjadi diagram koneksi yang ditunjukkan oleh gambar 2. Pada gambar ini hubungan antar komponen terlihat jelas hingga ke penggunaan masing-masing pin yang dibutuhkan untuk menjamin interkoneksi antar perangkat.



Gambar 1 Desain Sistem



Gambar 2 Diagram koneksi



Gambar 3 Alur kerja Sistem

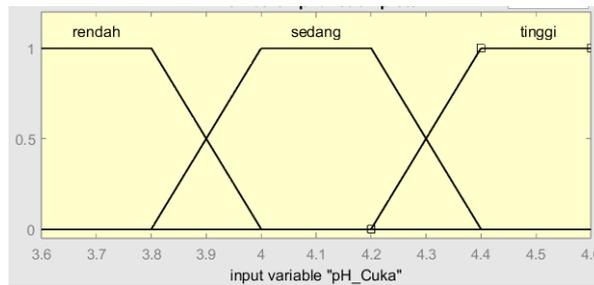
Setelah konsep sistem dijabarkan dalam bentuk desain sistem dan wiring koneksi sudah dirancang, maka berikutnya perlu dibuat alur kerja sistem yang direncanakan seperti terlihat pada gambar 3. Alur dimulai dari menyalakan power, kemudian terdapat tampilan awal program, setelah itu ada 3 pilihan mode: ketika kita memilih tombol 1 itu adalah proses pengadukan otomatis yang mana dilakukan input data kadar pH dan suhu. Setelah

input masuk, proses dilanjutkan ke Arduino UNO yang telah dikonfigurasi dengan logika fuzzy. Selanjutnya, LCD akan menampilkan informasi mengenai Suhu dan Kadar pH. Kemudian Kecepatan Motor DC berdasarkan perhitungan logika fuzzy terhadap Kadar pH dan Suhu. Setelah itu, Motor DC akan bergerak sesuai instruksi dari Arduino UNO dan dengan durasi putaran yang telah ditentukan. Selanjutnya tombol 2 merupakan tombol untuk mengetahui kadar asam cuka. Yang terakhir tombol 3 digunakan untuk melakukan perulangan proses kerja mesin dari awal.

Rule variabel perlu didefinisikan terlebih dahulu sebelum merancang fuzzy mamdani yang akan menjadi pengontrol. Langkah pertama yaitu mendefinisikan rule variabel input yang meliputi variabel Ph cuka dan suhu sari kedelai. pH cuka yang berada pada rentang 3.3 sampai 4.9 kemudian dibagi menjadi 3 himpunan fuzzy yaitu: Rendah: (3.3 - 4.0), Sedang: (3.8 - 4.4), Tinggi: (4.2 - 4.9). masing masing himpunan itu kemudian akan beranggotakan seperti ini, Rendah: (3.3, 3.6, 3.8, 4.0), Sedang: (3.8, 4.0, 4.2, 4.4), Tinggi: (4.2, 4.4, 4.6, 4.9) dengan bentuk keanggotaan berupa trapezium. Sederhananya rule untuk variabel pH cuka dapat dilihat di tabel 1. Rule fuzzy ini jika dibuat grafik akan seperti gambar 4

TABEL 1  
TABEL RULE PH

PH	IF
Rendah	jika $x \leq 3.3$
	jika $3.3 < x \leq 3.6$
	Jika $3.6 < x \leq 3.8$
	Jika $3.8 < x \leq 4.0$
	Jika $x > 4.0$
Sedang	jika $x \leq 3.8$
	jika $3.8 < x \leq 4.0$
	Jika $4.0 < x \leq 4.2$
	Jika $4.2 < x \leq 4.4$
	Jika $x > 4.4$
Tinggi	jika $x \leq 4.2$
	jika $4.2 < x \leq 4.4$
	Jika $4.4 < x \leq 4.6$
	Jika $4.6 < x \leq 4.9$
	Jika $x > 4.9$

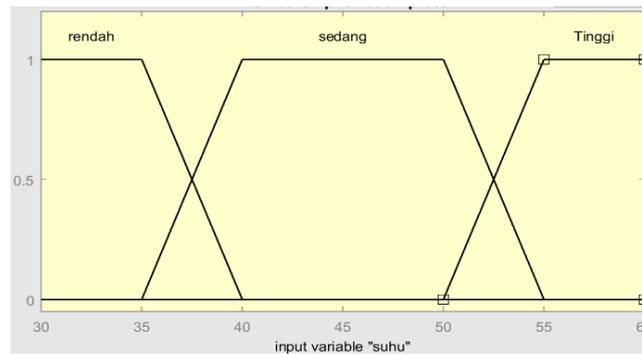


Gambar 4 Grafik kurva pH Cuka

Rule variabel input ke dua yang perlu didefinisikan yaitu, suhu sari kedelai. Suhu sari kedelai berada pada rentang nilai: 30 – 60 °C. sedangkan himpunan Fuzzynya menjadi Rendah: 30 – 40 °C, Tinggi: 50 - 60 °C. berdasarkan himpunan ini fungsi keanggotaan ditentukan seperti berikut: Rendah: (20,30,35,40) °C, Sedang: (35,40,50,55) °C, Tinggi: (50,55,60,70) °C dengan kesemua fungsi keanggotaan berbentuk Trapezium. Hasil penentuan rule keanggotaan variabel suhu sari kedelai dapat dilihat pada tabel 2 sedangkan grafik keanggotaannya dapat dilihat pada gambar 5.

Tabel 2  
Tabel Rule Suhu Sari kedelai

Suhu	IF
Rendah	jika $x \leq 20$
	jika $20 < x \leq 30$
	Jika $30 < x \leq 35$
	Jika $35 < x \leq 40$
	Jika $x > 40$
Sedang	jika $x \leq 35$
	jika $35 < x \leq 40$
	Jika $40 < x \leq 50$
	Jika $50 < x \leq 55$
	Jika $x > 55$
Tinggi	jika $x \leq 50$
	jika $50 < x \leq 55$
	Jika $55 < x \leq 60$
	Jika $60 < x \leq 70$
	Jika $x > 70$



Gambar 5 Grafik kurva Suhu Sari Kedelai

Tahap selanjutnya setelah rule variabel input ditentukan yaitu menentukan aturan fuzzy yang cocok. Untuk menentukan aturan-aturan Fuzzy yang menghubungkan Input (pH Cuka dan Suhu sari kedelai) dengan Output (Kecepatan motor pengaduk).Aturan-aturan ini bisa nya dibuat berdasarkan pengalaman dan ar an dari pekerja senior yang berpengalaman menangani proses koagulasi pembuatan tahu. Berikut beberapa aturan Fuzzy yang diperoleh :

- Jika pH cuka Rendah DAN suhu sari kedelai Rendah, maka kecepatan pengadukan Cepat.
- Jika pH cuka Rendah DAN suhu sari kedelai Sedang, maka kecepatan pengadukan Sedang.
- Jika pH cuka Rendah DAN suhu sari kedelai Tinggi, maka kecepatan pengadukan Lambat.
- Jika pH cuka Sedang DAN suhu sari kedelai Rendah, maka kecepatan pengadukan Cepat.
- Jika pH cuka Sedang DAN suhu sari kedelai Sedang, maka kecepatan pengadukan Sedang.
- Jika pH cuka Sedang DAN suhu sari kedelai Tinggi, maka kecepatan pengadukan Lambat.
- Jika pH cuka Tinggi DAN suhu sari kedelai Rendah, maka kecepatan pengadukan Sedang.
- Jika pH cuka Tinggi DAN suhu sari kedelai Sedang, maka kecepatan pengadukan Lambat.
- Jika pH cuka Tinggi DAN suhu sari kedelai Tinggi, maka kecepatan pengadukan Lambat.

Aturan-aturan tersebut mencerminkan logika umum bahwa kecepatan pengadukan akan bervariasi tergantung pada kondisi pH cuka dan suhu sari kedelai. Berdasarkan aturan itu kemudian dilakukan proses defuzzifikasi dengan melakukan perhitungan hasil atau gabungan aturan agar nilai kecepatan adukan sesuai ketentuan, aturan defuzzifikasi seperti berikut:

- Rendah :  $lowSpeed = \min(pH_{Rendah}, Suhu_{Rendah}) \times 120$
- Sedang:  $mediumSpeed = \min(pH_{Sedang}, Suhu_{Sedang}) \times 100$
- Tinggi :  $highSpeed = \min(pH_{Tinggi}, Suhu_{Tinggi}) \times 85$

Ini adalah proses defuzzifikasi yang menentukan kecepatan rendah, sedang, dan tinggi. Pertama, dilakukan penentuan nilai keanggotaan dari variabel input pH (pH Rendah, pH Sedang, pH Tinggi) dan variabel input suhu (Suhu Rendah, Suhu Sedang, dan Suhu Tinggi). Setelah itu, diambil nilai minimum dari kedua nilai keanggotaan tersebut menggunakan fungsi minimum (min()). Nilai minimum tersebut kemudian dikalikan dengan faktor skala rendah, sedang, dan tinggi. Hal ini bertujuan untuk menentukan seberapa besar dampak kombinasi nilai keanggotaan tersebut terhadap kecepatan pengaduk rendah, sedang, dan Tinggi. Setelah itu dilakukan pembulatan hasil perhitungan dari proses di atas menjadi rumus berikut

$$\frac{lowSpeed * 120 + mediumSpeed * 100 + highSpeed * 84.5}{lowSpeed + mediumSpeed + highSpeed} = hasil$$

Langkah akhir dalam membentuk algoritma fuzzy ini yaitu melakukan Proses Inferensi Fuzzy dengan menghitung Nilai dari 2 inputan (nilai pH dan suhu sari kedelai) untuk menentukan hasil kecepatan adukan.

- Fuzzy Input :
- Nilai pH : 4.2
- Nilai Suhu sari Kedelai: 45

Dari Tabel Keanggotaan, terdapat nilai keanggotaan untuk masing-masing himpunan Fuzzy pada Variabel input:

- pH Cuka :
- Rendah :  $\mu(pH\_cuka\_rendah) = 0$
- Sedang :  $\mu(pH\_cuka\_sedang) = 1$
- Tingg :  $\mu(pH\_cuka\_tinggi) = 0$
- Suhu Sari Kedelai:
- Rendah :  $\mu(pH\_cuka\_rendah) = 0$
- Sedang :  $\mu(pH\_cuka\_sedang) = 1$

Tinggi :  $\mu(\text{pH\_cuka\_tinggi}) = 0$

Aturan Fuzzy

Jika pH cuka sedang DAN suhu sari kedelai sedang, maka kecepatan pengadukan sedang.

Defuzzifikasi

Rendah :  $\text{lowSpeed} = \min(0, 0) \times 120 = 0$

Sedang :  $\text{mediumSpeed} = \min(1, 1) \times 100 = 100$

Tinggi :  $\text{highSpeed} = \min(0, 1) \times 84.5 = 0$

Bagian akhir dari penelitian ini yaitu melakukan pengujian agar diperoleh data yang mengindikasikan performa dari algoritma Fuzzy mamdani dalam mengendalikan proses koagulasi pembautan tahu. Pengujian dalam penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahap yaitu dimulai dari pengujian pembacaan sensor, baik pH maupun Suhu. Pengujian sensor ini dimaksudkan untuk memastikan sensor mampu bekerja normal. Pengujian yang kedua yaitu menguji kerja logika fuzzy dengan cara mensimulasikan dengan inputan yang bervariasi dan diamati nilai output yang dihasilkan pin output mikrokontroler. Dilakukannya pengujian fuzzy dimaksudkan agar diperoleh kepastian bahwa logika fuzzy yang dibangun telah benar.

Proses pengujian terakhir yaitu pengujian sistem untuk mengetahui performa penggunaan algoritma Fuzzy mamdani dalam mengendalikan proses koagulasi pembautan tahu. Pengujian dilakukan dengan menggunakan kondisi nyata (sari kedelai, dan cuka yang digunakan di pabrik tahu) dan dengan kondisi motor pengaduk yang telah terpasang. Pengujian dilakukan dengan berbagai variasi kadar pH cuka dan suhu sari kedelai untuk mengamati respon sistem dalam menentukan kecepatan adukan. Pada pengujian ini akan diamati berapa banyak percobaan yang menghasilkan sari kedelai berhasil di koagulasi. Informasi ini akan menjadi dasar menentukan performa sistem.

#### IV. HASIL

Pengujian pertama yaitu pengujian respon sensor suhu ditunjukkan pada tabel 3 berikut ini. Pada pengujian ini pembacaan suhu oleh sensor akan dibandingkan dengan termometer. Selisih pembacaan akan dianggap error. Dari 10 kali pengujian, diperoleh rata-rata error pembacaan sensor sebesar 0,01 %.

TABEL 3  
 HASIL UJI SENSOR SUHU

No	Suhu Thermometer(°C)	Suhu Sensor (°C)	Error (%)
1.	33,3	33,1	0,2
2.	32,9	33,88	0,1
3.	33,8	33,70	0,1
4.	33,7	33,65	0,1
5.	33,6	33,50	0,1
6.	33,5	33,44	0,1
7.	33,4	33,31	0,1
8.	33,3	33,25	0,1
9.	33,2	33,15	0,1
10.	33,1	33,06	0,1
Rata-rata Error			0,01

Pengujian selanjutnya yaitu pengujian pembacaan sensor pH diperoleh hasil seperti yang ditunjukkan pada tabel 4. Pengujian dilakukan dengan cara membandingkan pembacaan sensor dengan nilai cairan buffer yang telah memiliki standarisasi pH. Pada penelitian ini digunakan 2 cairan buffer dengan pH berbeda yaitu 4,01 dan 6,86. Hasil pengujian sebanyak 18 kali diperoleh rata-rata error pembacaan sensor sebesar 4,4%.

Sebelum menguji sistem secara keseluruhan, maka dilakukan uji logika fuzzy yang dibuat terlebih dahulu dan hasilnya seperti yang ditunjukkan tabel 5. Pada pengujian ini dilakukan simulasi dengan memasukkan beberapa nilai input suhu dan pH untuk diamati nilai output fuzzynya dalam bentuk PWM dalam satuan volt serta nilai kecepatan motor pengaduk yang terukur.

TABEL 4  
 HASIL UJI SENSOR PH

Percobaan ke	PH larutan buffer	pH pembacaan	error (%)
1		3,79	5
2		3,89	3
3		3,86	4
4	4,01	3,86	4
5		3,66	9
6		3,82	5
7		3,89	3

8		3,82	5
9		3,92	2
10		6,39	7
11		6,72	2
12		6,65	3
13		6,59	4
14	6,86	6,30	8
15		6,72	2
16		6,33	8
17		6,62	3
18		6,65	3
Rata rata error			4,4%

TABEL 5  
 HASIL PENGUJIAN FUZZY

No.	Nilai input PH	Nilai input Suhu (°C)	Fuzzy (Volt)	Hasil Speed Motor (RPM)
1.	6.39	27.88 C	4.20 V	51
2.	6.32	27.81 C	4.15 V	50
3.	5.95	39.25 C	4.85 V	59
4.	6.21	39.25 C	5.13 V	64
5.	6.10	39.19 C	4.96 V	61
6.	6.28	39.25 C	5.20 V	65
7.	6.39	39.19 C	5.28 V	66
8.	6.61	39.19 C	5.46 V	69
9.	6.25	37.06 C	4.96 V	61
10.	6.47	37.00 C	5.13 V	64
11.	5.77	37.00 C	4.60 V	56
12.	6.14	37.00 C	4.85 V	59
13.	6.47	37.00 C	5.13 V	64
14.	6.54	36.94 C	5.20 V	65
15.	5.70	34.19 C	4.40 V	54
16.	3.94	35.06 C	2.80 V	37
17.	4.52	35.06 C	4.15 V	50
18.	4.11	35.06 C	3.50 V	42
19.	4.29	35.06 C	4.00 V	47
20.	4.17	35.06 C	3.74 V	44
21.	4.43	35.06 C	4.15 V	50
22.	4.11	35.06 C	3.50 V	42
23.	4.02	33.81 C	3.00 V	38
24.	4.40	33.75 C	4.10 V	48
25.	4.43	33.81 C	4.10 V	48
26.	4.29	33.75 C	4.00 V	47
27.	4.38	33.75 C	4.10 V	48
28.	4.17	33.69 C	3.74 V	44
29.	4.32	33.75 C	4.00 V	47
30.	4.14	32.88 C	3.55 V	43

Pengujian implementasi alat secara langsung dalam memproses koagulasi sari kedelai dengan skala laboratorium dilakukan dengan cara memproses larutan sari kedelai secara langsung dan menggunakan cuka sesuai proses asli di pabrik. Pada pengujian ini diamati dari setiap percobaan, jika kondisi sari kedelai setelah proseskoagulasi tampak seperti gambar 6, maka proses dinyatakan berhasil, jika tidak maka proses dinyatakan gagal.



Gambar 6 Sari Kedelai Berhasil Dikoagulasi

Pengujian implementasi dilakukan sebanyak 30 kali seperti yang ada di tabel 6. Pada Tabel 6 ini selain kita bisa mengetahui keberhasilan percobaan koagulasi, kita juga bisa melihat nilai kadar pH cuka, suhu sari kedelai, dan kecepatan motor pengaduk yang memberi gambaran kondisi sebenarnya saat percobaan dilakukan.

TABEL 6  
 HASIL PENGUJIAN ALAT PENGADUK OTOMATIS

No.	Kadar pH Cuka	Suhu Sari Kedelai	Kecepatan Motor	Keterangan
1.	3.44	44.75	120	Berhasil
2.	4.20	44.81	100	Berhasil
3.	4.32	44.50	100	Berhasil
4.	4.58	45.80	100	Berhasil
5.	3.6	45.25	100	Berhasil
6.	4.11	45.44	100	Berhasil
7.	4.50	44.06	100	Berhasil
8.	4.14	44.44	100	Berhasil
9.	3.70	46.56	120	Berhasil
10.	3.67	43.56	120	Berhasil
11.	3.99	45.06	100	Berhasil
12.	4.52	45.00	100	Berhasil
13.	3.76	42.88	120	Berhasil
14.	4.14	43.00	100	Berhasil
15.	4.43	44.31	100	Berhasil
16.	4.49	43.00	100	Berhasil
17.	4.40	43.31	100	Berhasil
18.	3.80	49.19	120	Berhasil
19.	3.94	48.63	100	Berhasil
20.	4.02	48.56	100	Berhasil
21.	4.43	47.69	100	Berhasil
22.	4.46	47.00	100	Berhasil
23.	4.11	45.88	100	Berhasil
24.	4.29	45.19	100	Berhasil
25.	4.26	45.00	100	Berhasil
26.	4.32	44.13	100	Berhasil
27.	3.88	43.44	100	Berhasil
28.	4.26	43.50	100	Berhasil
29.	4.23	42.63	100	Berhasil
30.	4.11	46.38	100	Berhasil

## V. PEMBAHASAN

Hasil Pengujian algoritma Fuzzy yang terpasang di mikrokontroler ditunjukkan pada tabel 4. Dari tabel ini diketahui bahwa kecepatan motor pengaduk akan disesuaikan berdasarkan nilai Fuzzy yang dihitung dari nilai PH cuka dan nilai suhu sari kedelai yang bervariasi. Hasil ini mengindikasikan bahwa algoritma Fuzzy mampu melakukan pengendalian kecepatan motor pengaduk dengan cara mengatur nilai output fuzzy sebagai bentuk PWM yang akan menentukan kecepatan putar motor pengaduk [18]. Hasil percobaan ini hanya bisa menjadi bukti bahwa algoritma Fuzzy sudah bekerja dengan baik dan sesuai perencanaan, namun belum dapat dijadikan dasar menilai keberhasilan algoritma fuzzy karena belum diuji pada pengendalian proses koagulasi pembuatan tahu secara nyata.

Tahapan akhir dari pengujian yaitu pengujian kinerja alat keseluruhan sebagai bentuk pengujian algoritma fuzzy pada kondisi nyata, Pada pengujian ini, semua komponen alat sudah selesai dirakit dan telah dipasang pada mekanik alat yang sudah dibuat. Hasilnya ditampilkan pada tabel 5. Tabel ini menunjukkan berbagai kondisi nyata kombinasi kadar PH cuka, suhu sari kedelai, dan kecepatan motor pengaduk, serta status keberhasilan dari setiap percobaan. Pada pengujian kinerja alat menunjukkan bahwa algoritma Fuzzy bekerja dengan baik dalam merespon berbagai kondisi kadar PH cuka dan suhu sari kedelai dengan selalu menyesuaikan kecepatan motor pengaduk. Variasi kadar PH cuka yang berkisar antara 3.44 hingga 4.58 dan suhu sari kedelai yang berkisar antara 42.88 hingga 46.56 derajat Celsius direspon oleh algoritma Fuzzy dengan mengatur kecepatan motor pengaduk pada 100 atau 120 RPM dengan konsistensi. Hasil yang diperoleh yaitu ditemukan bahwa 30 percobaan semuanya berhasil, artinya keberhasilan pengendalian proses koagulasi pada pembuatan tahu mencapai 100%. Keberhasilan ini menjadi bukti bahwa algoritma Fuzzy mampu diandalkan untuk mengatur sebuah proses yang melibatkan berbagai nilai input secara efektif [20].

Jalannya penelitian ini yang masih terbatas pada penggunaan nyata skala laboratorium menjadikan temuan ini belum bisa menjamin keberhasilan jika digunakan langsung di industri. Hal ini menjadi tantangan tersendiri karena dalam konteks penggunaan di industri tentu akan melibatkan lebih banyak variabel yang butuh analisa lanjutan. Namun setidaknya penelitian ini tidak hanya menunjukkan potensi penerapan teknologi IoT dalam otomasi industri, tetapi juga menegaskan kemampuan algoritma fuzzy Mamdani dalam mengendalikan sebuah proses dengan keberhasilan yang tinggi [21].

## VI. KESIMPULAN

Dari 15 percobaan hasil pengadukan otomatis didapati keseluruhan proses dinyatakan berhasil menggumpalkan sari kedelai dengan variasi kecepatan motor dikendalikan oleh algoritma Fuzzy berdasarkan kondisi pH katalis cuka dan suhu sari kedelai. Diperoleh fakta bahwa kecepatan pengadukan lebih cepat pada PH cuka lebih (asam), yaitu kecepatan motor pengaduk akan 120 rpm pada pH 3.44 hingga 3.99 dan kecepatan akan turun pada PH diatasnya. Fakta lain yang didapatkan yaitu kecepatan motor pengaduk akan naik jadi 120 RPM pada suhu sari kedelai yang lebih tinggi (44°C - 46,56°C) dan akan pelan pada suhu yang lebih rendah. Oleh karena itu penelitian ini menyimpulkan bahwa Algoritma Fuzzy mamdani mampu mengendalikan proses penggumpalan atau koagulasi pembuatan tahu dengan keberhasilan 100% melalui cara mengatur kecepatan pengadukan. Temuan ini menjadi penguat bahwa algoritma fuzzy sekali lagi berhasil dijadikan rule pengendalian proses dengan hasil yang memuaskan.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. Cui *et al.*, "Developing radio frequency (RF) heating protocol in packed tofu processing by computer simulation," *Curr Res Food Sci*, vol. 6, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.crfcs.2023.100474.
- [2] W. Lei *et al.*, "Effect of ultrasound treatment on thawing process of frozen tofu prepared with different salt coagulants," *Ultrason Sonochem*, vol. 99, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.ultsonch.2023.106578.
- [3] R. D. Gagnon, M. È. Langevin, F. Lutin, and L. Bazinet, "Impact of nanofiltration pre-concentration prior to a combination of electrodialytic processes on the extraction of proteins from tofu whey," *Future Foods*, vol. 8, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.fufo.2023.100258.
- [4] F. Qiao *et al.*, "Hydrothermal pretreatment of protein-rich substrate: Modified physiochemical properties and consequent responses in its anaerobic digestion," *Carbon Resources Conversion*, vol. 6, no. 1, pp. 1–10, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.crcon.2022.10.001.
- [5] Y. Qiu *et al.*, "Exploring a new technology for producing better-flavored HongJun Tofu, a traditional Neurospora-type okara food," *LWT*, vol. 180, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.lwt.2023.114700.
- [6] R. Tindjau, J. Y. Chua, and S. Q. Liu, "Growth and metabolic behavior of probiotic *Bifidobacteria longum* subsp. *longum* in minimally supplemented soy (tofu) whey," *Future Foods*, vol. 8, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.fufo.2023.100272.
- [7] S. Abadi and Fitriyani, "Detected The Sex Of Fish That Is Good For Cultivation Using Fuzzy," *bit-Tech*, vol. 5, no. 2, pp. 113–120, Dec. 2022, doi: 10.32877/bt.v5i2.615.
- [8] A. Wijaya and Rino, "Flood Monitoring Early Warning System using Internet of Things-based Telegram," *bit-Tech*, vol. 6, no. 3, pp. 281–286, Apr. 2024, doi: 10.32877/bt.v6i3.971.
- [9] A. Ade Sunarto, "Determination of Critical Servers by using Fuzzy Mamdani and Fuzzy Sugeno on PT. Samudera Indonesia Tbk," *Bit-Tech*, vol. 1, no. 3, 2018, doi: 10.32877/bt.v1i3.
- [10] R. González *et al.*, "Estimation of the density of veins from susceptibility-weighted imaging by using Mamdani fuzzy-type rule-based system. Investigating the neurovascular coupling in migraine," *Neuroimage Clin*, vol. 39, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.nicl.2023.103489.
- [11] H. Ouifak and A. Idri, "On the performance and interpretability of Mamdani and Takagi-Sugeno-Kang based neuro-fuzzy systems for medical diagnosis," *Sci Afr*, vol. 20, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.sciaf.2023.e01610.
- [12] S. Komsiyah, M. R. Ardyanti, and I. A. Iswanto, "Flood-Prone Susceptibility Analysis In Garut Using Fuzzy Inference System Mamdani Method," in *Procedia Computer Science*, Elsevier B.V., 2023, pp. 912–921. doi: 10.1016/j.procs.2023.10.598.
- [13] D. M. Khojely, S. E. Ibrahim, E. Sapey, and T. Han, "History, current status, and prospects of soybean production and research in sub-Saharan Africa," Jun. 01, 2018, *Crop Science Society of China/Institute of Crop Sciences*. doi: 10.1016/j.cj.2018.03.006.
- [14] Y. Ariei, Y. Sano, and K. Nishizawa, "Direct comparison of the tofu-like precipitate formation by adding different coagulants: magnesium chloride and glucono- $\delta$ -lactone," *Heliyon*, vol. 7, no. 6, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e07239.
- [15] A. Prasetyo, A. Fajaryanto, Y. Litanianda, A. R. Yusuf, M. B. Setyawan, and R. Rahmatika Az-Zahra, "Irigasi Tanaman Agriculture Dengan Logika Fuzzy Terintegrasi Internet of Things," 2022.

- [16] L. S. Hwa and L. Te Chuan, "A Brief Review of Artificial Intelligence Robotic in Food Industry," in *Procedia Computer Science*, Elsevier B.V., 2024, pp. 1694–1700. doi: 10.1016/j.procs.2024.01.167.
- [17] D. S. Rajput, G. Meena, M. Acharya, and K. K. Mohbey, "Fault prediction using fuzzy convolution neural network on IoT environment with heterogeneous sensing data fusion," *Measurement: Sensors*, vol. 26, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.measen.2023.100701.
- [18] R. Pratiwi, A. Waris, and S. Salengke, "Rancang Bangun Sistem Kendali Kecepatan Putaran Motor Dc Berbasis Logika Fuzzy Untuk Mesin Pengaduk Hasil Pertanian (Studi Kasus Pengadukan Biji Kedelai)," *Jurnal Agritechno*, pp. 44–55, May 2019, doi: 10.20956/at.v12i1.185.
- [19] S. H. Park, D. H. Kim, and S. C. Kim, "Recognition of IoT-based fire-detection system fire-signal patterns applying fuzzy logic," *Heliyon*, vol. 9, no. 2, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e12964.
- [20] A. Prasetyo, A. R. Yusuf, Y. Litanianda, S. Sugianti, and F. Masykur, "Implementation of Fuzzy Logic for Chili Irrigation Integrated with Internet of Things," *Journal of Computer Networks, Architecture and High Performance Computing*, vol. 5, no. 2, pp. 494–502, Jul. 2023, doi: 10.47709/cnahpc.v5i2.2518.
- [21] D. D. Patil, M. P. Lokhande, and N. M. Mule, "An intelligent system with fuzzy-based inference engine for secured tele-robotic surgery: Smart Fuzzy Inference engine for tele-robotic Surgery," *Healthcare Analytics*, vol. 4, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.health.2023.100264.