

PENGEMBANGAN SISTEM PENGATUR SUHU BERBASIS FUZZY LOGIC PADA DISTILASI ETANOL TETES TEBU

MAULANA NASEEM HAMED¹, MUHAMMAD IMRAN HAMID², MAULANA NASEEM IKHLAS³, MUHAMMAD AFDHAL IZZATI⁴

Teknik Elektro, Universitas Andalas^{1,2,4}, Teknik Elektro, Politeknik Negeri Padang³
Email: maulanaamed@gmail.com¹, imran@eng.unand.ac.id², maulananikhlask@gmail.com³,
afdhalizzati04@gmail.com⁴

DOI: <http://dx.doi.org/10.31869/rtj.v9i2.7453>

Abstract: *The ethanol distillation process from sugarcane molasses requires precise temperature control to achieve optimal ethanol purity. Conventional control systems often exhibit fluctuations and delayed responses, which reduce process efficiency. This study aims to design and implement a fuzzy logic-based temperature control system capable of improving heating temperature stability automatically. A type-J thermocouple with a MAX6675 module was used for temperature measurement, while an Arduino microcontroller processed the data using a fuzzy logic algorithm and generated a PWM signal to regulate heater power through a phase-cut AC dimmer. System performance was evaluated under various operating conditions that represent practical distillation requirements. The results indicate that the system successfully reached the desired temperature within 20–28 minutes, with steady-state errors below $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ and minimal overshoot. The distillation process produced significant improvements in ethanol volume and concentration, with an average ethanol content of 33–37%. These findings demonstrate that the fuzzy logic-based controller is effective and adaptive for laboratory-scale ethanol distillation and has strong potential for industrial application.*

Keywords: *Fuzzy logic, ethanol distillation, temperature control, Arduino.*

Abstrak: Proses distilasi etanol dari tetes tebu membutuhkan pengendalian suhu yang presisi untuk memperoleh kadar etanol yang optimal. Sistem kendali konvensional sering mengalami fluktuasi dan keterlambatan respons sehingga menurunkan efisiensi proses. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem pengendalian suhu berbasis logika fuzzy yang mampu meningkatkan kestabilan suhu pemanasan secara otomatis. Sensor termokopel tipe J dengan modul MAX6675 digunakan untuk mengukur suhu, sementara mikrokontroler Arduino memproses data menggunakan algoritma fuzzy dan menghasilkan sinyal PWM untuk mengatur daya pemanas melalui dimmer AC metode pemotongan sudut fasa. Evaluasi kinerja dilakukan dengan menguji sistem pada berbagai kondisi kerja distilasi yang merepresentasikan kebutuhan operasional proses. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu mencapai suhu target dalam 20–28 menit dengan error keadaan tunak kurang dari $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ dan overshoot yang minimal. Proses distilasi menghasilkan peningkatan volume dan kadar etanol secara signifikan, dengan rata-rata konsentrasi 33–37%. Temuan ini membuktikan bahwa pengendali logika fuzzy efektif dan adaptif untuk distilasi etanol skala laboratorium serta berpotensi untuk diterapkan pada skala industri.

Kata Kunci: Logika fuzzy, distilasi etanol, pengendalian suhu, Arduino.

A. Pendahuluan

Industri tebu merupakan salah satu sektor agroindustri strategis yang berperan penting dalam perekonomian nasional, khususnya sebagai penghasil bahan baku utama gula (Nafisah et al., 2024). Selain menghasilkan produk utama berupa gula, proses pengolahan tebu juga menghasilkan limbah samping berupa tetes tebu (molasses), yaitu produk sisa dari pemisahan sirup low grade yang tidak dapat dikristalisasi lagi karena kandungan glukosa dan fruktosa yang tinggi (Geremew Kassa et al., 2024; Vieira et al., 2016). Tetes tebu tergolong limbah industri, namun masih mengandung senyawa organik kompleks seperti sukrosa ($\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$) dan monosakarida ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$), sehingga berpotensi besar untuk dimanfaatkan sebagai bahan baku alternatif dalam produksi bioethanol (Zentou et al., n.d.).

Bioetanol memiliki potensi besar dalam mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil dan menekan emisi gas rumah kaca, sejalan dengan komitmen global terhadap transisi energi bersih dan pembangunan berkelanjutan (Igwebuike et al., 2024). Selain sebagai bahan bakar, bioetanol juga dimanfaatkan sebagai bahan aktif dalam produk antiseptik seperti hand sanitizer karena kemampuannya menonaktifkan mikroorganisme patogen (Christy et al., 2023; Kusumawati et al., 2022; Zhang et al., 2024). Pemanfaatan tetes tebu sebagai bahan baku bioetanol juga berkontribusi terhadap pengurangan limbah organik dari industri gula (Sarkar et al., 2012).

Proses pembuatan bioetanol umumnya diawali dengan fermentasi substrat yang mengandung gula, kemudian dilanjutkan dengan proses distilasi untuk memisahkan etanol berdasarkan perbedaan titik didih. Efisiensi proses distilasi sangat bergantung pada kestabilan suhu dan tekanan uap dalam ketel, sehingga diperlukan sistem pengendalian suhu yang presisi untuk memperoleh hasil etanol dengan kadar optimal (Duque et al., 2021). Pengaturan suhu pada ketel distilasi dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti kapasitas sumber pemanas, volume dan karakteristik fisik tetes tebu, kondisi lingkungan, serta durasi pemanasan (Hargono et al., 2021).

Metode pemanasan suhu konvensional yang umumnya diterapkan masih bersifat manual dan sulit dikendalikan, sehingga menyebabkan ketidakstabilan suhu, inefisiensi energi, serta penurunan kualitas etanol (Juan et al., 2023; Kwon et al., 2021). Suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan kehilangan etanol akibat penguapan berlebih, sedangkan suhu yang terlalu rendah menghambat proses pemisahan etanol (Shen et al., 2018). Menurut Olguin-Camacho et al. (Jilani, 2022), sistem pengendalian suhu berbasis metode konvensional seperti PID sering kali menghadapi kesulitan dalam merespons dinamika nonlinier pada proses distilasi etanol, sehingga dibutuhkan strategi kendali yang lebih adaptif dan presisi. Oleh karena itu, diperlukan suatu sistem pengendalian suhu yang efisien, adaptif, dan mampu menjaga kestabilan suhu selama proses distilasi berlangsung.

Salah satu metode yang dapat diterapkan untuk meningkatkan akurasi pengendalian suhu adalah kendali logika fuzzy, yang merupakan sistem kendali kecerdasan buatan yang mampu menangani sistem nonlinear dan ketidakpastian parameter (Mahmoud, 2018; Nartker et al., 1966). Keunggulan kendali logika fuzzy terletak pada kemampuannya mengolah berbagai input secara simultan dan menghasilkan keputusan berbasis aturan tanpa memerlukan model matematis yang kompleks (Zentou et al., n.d.).

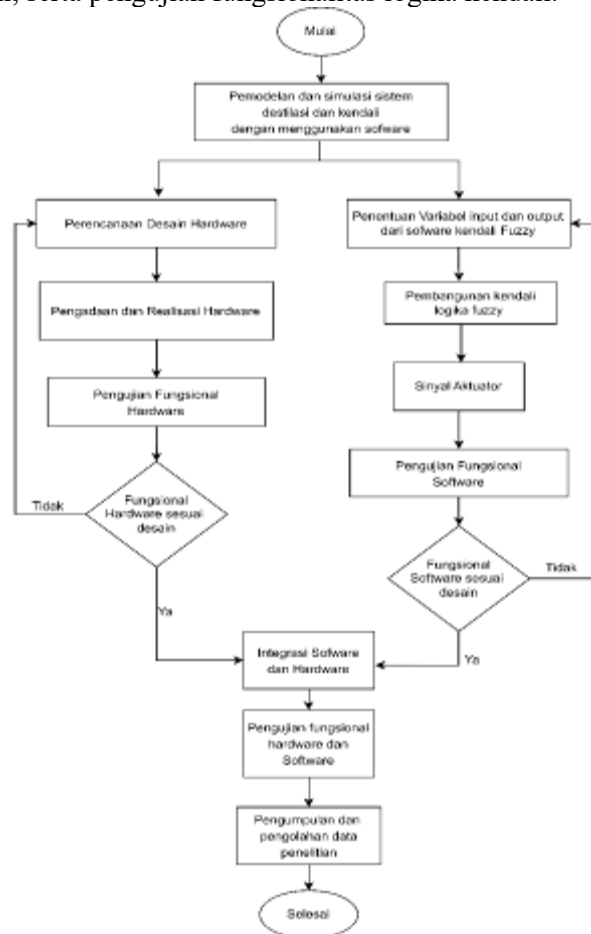
Berdasarkan data tersebut, dalam upaya meningkatkan efisiensi proses distilasi etanol dari tetes tebu dirancang sistem pengendalian suhu berbasis logika fuzzy yang mampu menjaga kestabilan suhu pemanasan secara adaptif terhadap perubahan kondisi proses. Sistem ini menggunakan sensor suhu termokopel yang terhubung dengan mikrokontroler Arduino untuk membaca dan memproses data suhu aktual. Nilai suhu tersebut difuzzifikasi dan diolah melalui mekanisme inferensi fuzzy berdasarkan aturan yang telah dirancang, kemudian didefuzzifikasi untuk menghasilkan sinyal Pulse Width Modulation (PWM) yang mengatur daya pemanas melalui dimmer AC. Kendali fuzzy dirancang dengan satu variabel input, yaitu suhu aktual, dengan parameter error dan delta error ditentukan melalui pengujian langsung pada perangkat keras agar sesuai dengan karakteristik sistem nyata. Fungsi keanggotaan fuzzy disusun berdasarkan data pengujian aktual untuk menghasilkan respon kendali yang optimal dalam menjaga suhu sesuai set point selama proses distilasi (Gurbanov, 2022; Marbun et al., 2019).

B. Metodologi Penelitian

Tahapan penelitian meliputi proses perancangan sistem kendali, pemodelan logika fuzzy, serta pengujian kinerja sistem pada proses distilasi etanol dari tetes tebu. Setiap tahap dirancang secara sistematis untuk memastikan kesinambungan dan integrasi antartahap, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.

Proses diawali dengan analisis kebutuhan sistem kendali suhu pada distilasi etanol, dilanjutkan dengan pemodelan dan simulasi sistem menggunakan perangkat lunak untuk memahami perilaku dinamis proses. Selanjutnya, Paper terbagi menjadi dua jalur parallel; pengembangan perangkat keras

dan pengembangan perangkat lunak. Pada sisi perangkat keras, dilakukan perencanaan desain, pengadaan komponen, realisasi rangkaian, dan pengujian fungsional. Sementara itu, pada sisi perangkat lunak, dilakukan penentuan variabel fuzzy, perancangan fungsi keanggotaan, penyusunan basis aturan fuzzy Mamdani, serta pengujian fungsionalitas logika kendali.

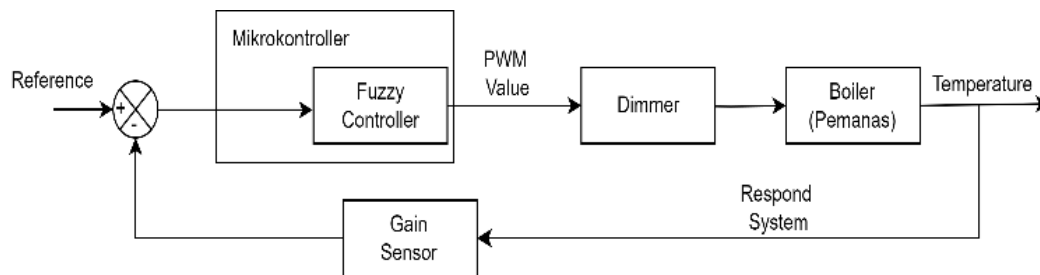


Gambar. 1 Flowchart Metode Penelitian

Setelah Hardware dan Software berfungsi sesuai dengan rancangan, kedua subsistem tersebut diintegrasikan, kemudian diuji secara eksperimental untuk mengevaluasi kinerja pengendalian suhu berdasarkan parameter kestabilan termal, waktu pencapaian setpoint, dan respons sinyal PWM terhadap perubahan kondisi proses. Data hasil pengujian selanjutnya digunakan sebagai dasar analisis untuk menilai efektivitas penerapan kendali berbasis logika fuzzy pada proses distilasi etanol dari tetes tebu.

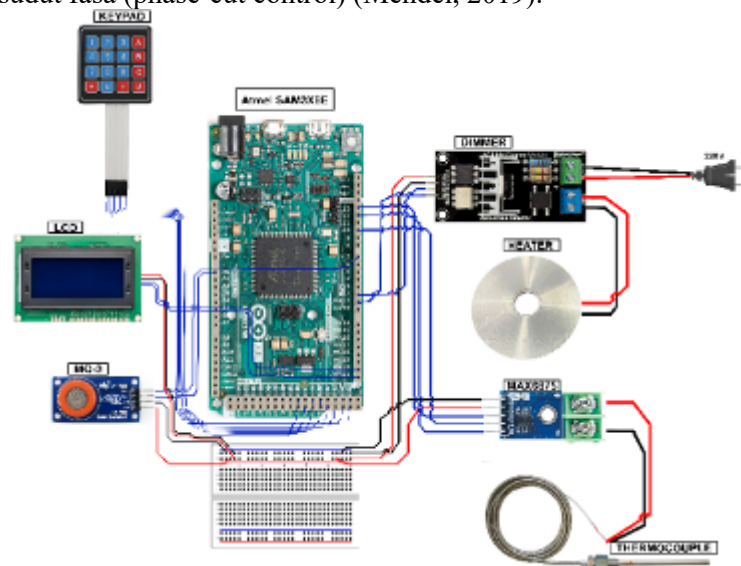
Perancangan Hardware

Perancangan Hardware dilakukan untuk merealisasikan sistem kendali suhu berbasis logika fuzzy yang telah dirancang pada tahap sebelumnya. Rancangan ini melibatkan integrasi antara sensor suhu, mikrokontroler, pengatur daya, dan elemen pemanas yang bekerja secara terkoordinasi untuk menjaga kestabilan suhu selama proses distilasi.



Gambar. 2 Blok Diagram Sistem Pengendalian Suhu Berbasis Logika Fuzzy pada Proses Distilasi Etanol

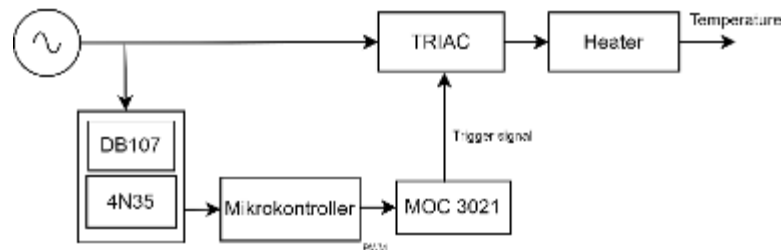
Gambar 2 menunjukkan diagram blok sistem kendali yang dikembangkan. Sensor suhu berfungsi mengukur temperatur cairan dalam ketel distilasi secara real-time dan mengirimkan data ke mikrokontroler. Arduino Due digunakan sebagai unit pengendali utama yang menjalankan algoritma logika fuzzy. Hasil pemrosesan logika fuzzy menghasilkan sinyal PWM yang dikirimkan ke modul dimmer AC untuk mengatur besar tegangan dan daya yang diteruskan ke elemen pemanas melalui metode pemotongan sudut fasa (phase-cut control) (Mendel, 2019).



Gambar. 3 Komponen Elektronika sistem destilasi

Komponen-komponen yang digunakan dalam sistem divisualisasikan pada Gambar 3. Selain sensor suhu dan mikrokontroler, sistem dilengkapi dengan modul tampilan LCD yang berfungsi menampilkan suhu aktual dan nilai sinyal PWM secara real-time. Integrasi antarperangkat dilakukan dengan memperhatikan efisiensi, keandalan, serta kemudahan implementasi sistem secara keseluruhan.

Sistem pengendalian tegangan pada elemen pemanas menggunakan dimmer berbasis TRIAC yang diatur melalui mikrokontroler. Rangkaian ini berfungsi untuk menghasilkan tegangan terkontrol bagi komponen heater dengan prinsip pengaturan sudut picu (α) (Sunardi et al., 2023). Gambar 6 menunjukkan skema rangkaian dimmer yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar. 4 skema rangkaian dimmer

Besarnya sudut picu dihitung oleh mikrokontroler dengan memanfaatkan sinyal dari rangkaian zero-crossing detector yang terdiri dari modul penyearah DB107 dan optocoupler 4N35. Sinyal tersebut digunakan untuk mendeteksi titik nol gelombang AC, yang menjadi acuan dalam menentukan waktu penyalan TRIAC. Mikrokontroler kemudian mengirimkan sinyal pemicu melalui gate driver optocoupler MOC3021 dengan nilai duty cycle PWM yang dinyatakan dalam rentang bilangan 0 hingga 255 (Sunardi et al., 2023).

Tegangan yang disalurkan oleh TRIAC ke elemen pemanas berbanding lurus dengan nilai duty cycle yang dihasilkan. Dengan metode ini, sistem mampu mengatur suhu pemanas secara presisi dan responsif terhadap perubahan kondisi suhu di dalam ketel distilasi.

Hubungan matematis antar duty cycle, sudut ($^{\circ}$), waktu tunda penyalan TRIAC dinyatakan sebagai persamaan berikut ini:

$$\delta = \frac{\text{Nilai PWM}}{\text{Max PWM}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\alpha = 360^{\circ} \times \frac{t_{\text{delay}}}{T_{AC}} \quad (2)$$

$$t_{\text{delay}} = (1 - \text{duty cycle}) \times \frac{T_{AC}}{2} \quad (3)$$

T_{AC} adalah periode gelombang listrik AC, yang pada sistem listrik 50 Hz bernilai 20 ms. δ merupakan Duty cycle menyatakan proporsi waktu aktif dari sinyal PWM setiap setengah periode sinyal tegangan input, sedangkan t_{delay} merupakan waktu tunda dari titik nol gelombang AC sebelum sinyal trigger aktif, yang terjadi satu kali setiap setengah siklus (180°) (Sunardi et al., 2023).

Berdasarkan hubungan matematis tersebut, perubahan nilai PWM dari blok pengendali fuzzy logic akan memengaruhi sudut picu TRIAC dan secara langsung mengubah besar daya yang dihantarkan ke elemen pemanas, sehingga berpengaruh terhadap laju peningkatan suhu dalam ketel distilasi. Nilai-nilai eksperimental dari parameter-parameter tersebut ditampilkan pada Tabel 1 yang mana diuji dengan menginputkan nilai PWM untuk mencapai suhu 70

Tabel. 1 Pengukuran Variabel Sistem Destilasi

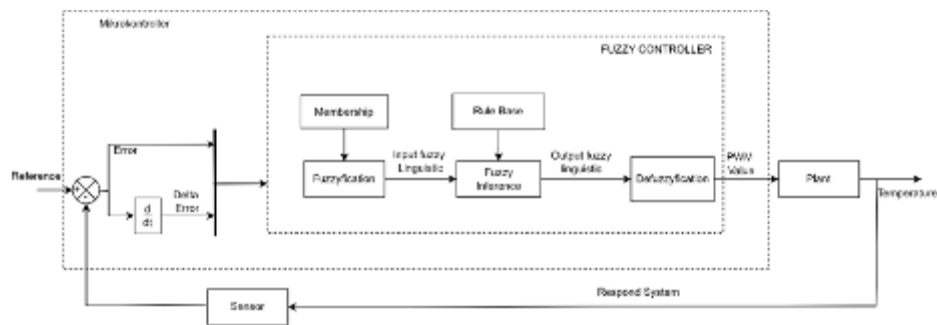
No	PWM Value	Duty Cycle (%)	Tegangan (V)
1	35	13	15
2	70	27	45
3	105	41	91
4	140	55	128
5	175	69	175
6	210	82	198
7	245	96	209
8	255	100	211

Tabel 1 menunjukkan hasil pengukuran hubungan antara nilai PWM, duty cycle, dan tegangan keluaran pada sistem pemanas. Peningkatan nilai PWM menghasilkan kenaikan tegangan keluaran secara proporsional, yang menandakan bahwa dimmer beroperasi sesuai prinsip phase-cut control.

Pada mekanisme ini, kenaikan duty cycle memperpanjang durasi konduksi TRIAC sehingga meningkatkan nilai tegangan efektif pada beban pemanas. (Sunardi et al., 2023).

Perancangan Software

Perancangan Software difokuskan pada penerapan algoritma logika fuzzy untuk mengendalikan suhu selama proses distilasi etanol. Pada Gambar 5 menunjukkan blok diagram sistem kendali suhu berbasis logika fuzzy yang bekerja dalam konfigurasi loop tertutup. Sensor suhu membaca nilai suhu aktual dan mengirimkannya ke mikrokontroler untuk dibandingkan dengan nilai setpoint, sehingga dihasilkan besaran error. Nilai error ini digunakan untuk menghitung delta error, yaitu perubahan error antara waktu pengambilan sampel ke- n dan ke- $(n-1)$.



Gambar. 5 Perancangan Software

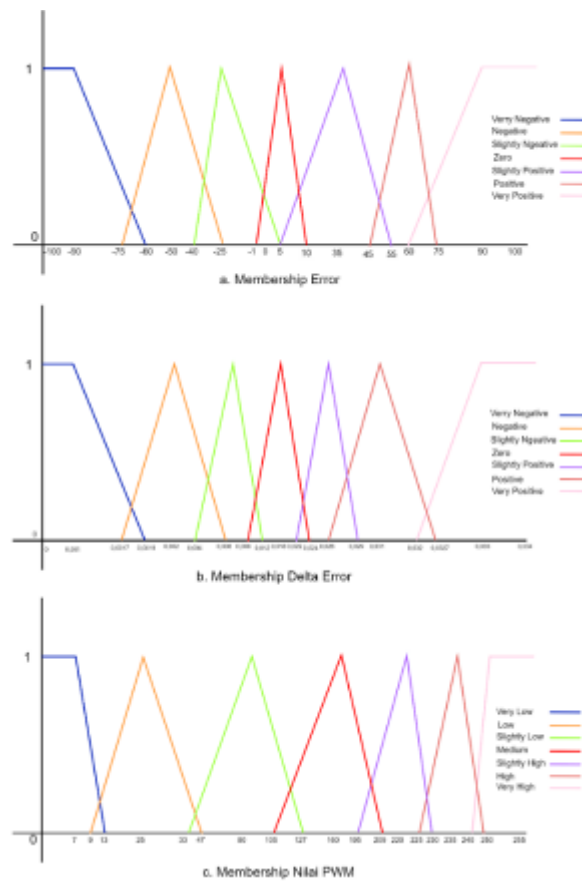
Kedua parameter tersebut menjadi masukan utama bagi pengendali fuzzy. Proses pengendalian dilakukan melalui tiga tahap utama, yaitu fuzzifikasi, inferensi, dan defuzzifikasi. Pada tahap fuzzifikasi, nilai-nilai crisp dari variabel masukan dikonversi menjadi derajat keanggotaan linguistik. Selanjutnya, inference memproses data berdasarkan rule base yang dirancang, dan hasilnya didefuzzifikasi untuk menghasilkan nilai keluaran berupa duty cycle pada nilai PWM, yang kemudian digunakan untuk mengendalikan besar tegangan pada dimmer AC sehingga daya pemanas dapat diatur sesuai kebutuhan proses (Wang & Tang, 2020).

Tahap berikutnya adalah perancangan pengendali fuzzy secara digital dengan menentukan variabel serta fungsi keanggotaannya. Dua variabel masukan digunakan, yaitu error (selisih antara suhu setpoint dan suhu aktual) dan delta error (perubahan nilai terhadap waktu), sedangkan satu variabel keluaran berupa sinyal PWM digunakan untuk mengatur daya pemanas. Setiap variabel tersebut direpresentasikan dalam bentuk fungsi keanggotaan fuzzy, yang dirumuskan menggunakan fungsi keanggotaan segitiga dan trapesium sebagaimana ditunjukkan pada persamaan berikut.

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & \text{Jika } x \leq a \text{ atau } x \geq c \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{Jika } a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & \text{Jika } b \leq x \leq c \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & \text{Jika } x \leq a \text{ atau } x \geq b \\ \frac{x-a}{x-b}, & \text{Jika } a < x \leq b \\ 1, & \text{Jika } b < x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & \text{Jika } c < x < d \end{cases} \quad (5)$$

Ketiga variabel tersebut difuzzifikasi ke dalam tujuh kategori linguistik, yaitu NB (Negative Big), NM (Negative Medium), NS (Negative Small), Z (Zero), PS (Positive Small), PM (Positive Medium), dan PB (Positive Big), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6. Fungsi keanggotaan dirancang menggunakan bentuk segitiga dengan rentang -100 hingga 100 untuk error, $-0,034$ hingga $0,034$ untuk delta error, serta 0 hingga 255 untuk PWM.



Gambar. 6 Fungsi Keanggotaan Kendali Logika Fuzzy

Setelah proses fuzzifikasi dilakukan, tahap selanjutnya adalah inferensi logika fuzzy. Pada tahap ini, nilai derajat keanggotaan dari variabel error dan delta error diproses menggunakan basis aturan (rule base) berukuran 7×7 yang mengatur hubungan antarvariabel terhadap keluaran PWM. Aturan-aturan tersebut disusun berdasarkan hasil pengamatan empiris untuk menghasilkan respon kendali yang stabil terhadap variasi suhu selama proses distilasi, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel. 2 Aturan Logika Fuzzy

E/ Δ E	NB	NS	NK	Z	PK	PS	PB
NB	VL	VL	VL	VL	VL	VL	VL
NS	VL	VL	VL	VL	VL	VL	VL
NK	VL	VL	VL	VL	VL	VL	VL
Z	VL	VL	L	SL	M	SH	H
PK	VL	L	SL	M	SH	H	VH
PS	L	SL	M	SH	H	VH	VH
PB	SL	M	SH	H	VH	VH	VH

Pada proses inferensi, digunakan aturan fuzzy berbasis teori himpunan fuzzy serta pernyataan dalam bentuk IF-THEN untuk membentuk relasi logis antar variabel (Santra et al., 2018; Stem & Kuhn, 1995). Operator dasar dalam logika fuzzy meliputi AND, OR, dan NOT (Peter et al., 2022). Operator AND digunakan untuk menentukan nilai minimum dari dua derajat keanggotaan, OR untuk nilai maksimum, dan NOT untuk menghasilkan komplemen dari suatu derajat keanggotaan dengan mengurangkan nilai tersebut dari 1 (Kravchenko et al., 2020).

Dalam penelitian ini, setiap aturan fuzzy diterapkan menggunakan operator AND, yang secara matematis dinyatakan dengan Persamaan (4):

$$\mu A \cap B = \min(\mu A[e], \mu B[\Delta_e]) \quad (4)$$

Setelah proses inferensi, keluaran sistem masih berupa himpunan fuzzy yang merepresentasikan tingkat aktivasi dari setiap kategori output. Untuk memperoleh nilai crisp yang dapat digunakan secara langsung oleh sistem kendali, dilakukan tahap defuzzifikasi. Metode defuzzifikasi yang diterapkan dalam penelitian ini adalah metode centroid, yang menghitung titik keseimbangan dari distribusi derajat keanggotaan pada domain output (Marbun et al., 2019). Persamaan matematis metode ini ditunjukkan pada Persamaan (5):

$$z^* = \frac{\sum z_i \cdot \mu(z_i)}{\sum \mu(z_i)} \quad (5)$$

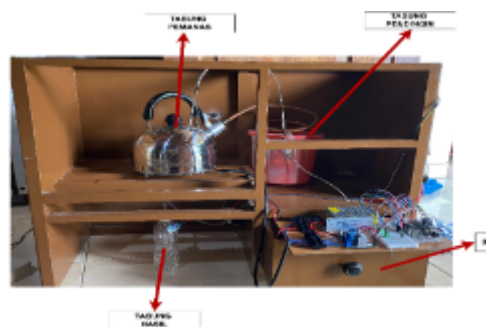
Dalam persamaan (5) z_i menyatakan elemen diskrit dari domain output, sedangkan $\mu(z_i)$ merupakan derajat keanggotaan fuzzy dari masing-masing z_i (Singerman et al., 2021). Proses ini menghasilkan nilai keluaran berupa sinyal PWM yang kemudian digunakan untuk mengatur tegangan pada elemen pemanas.

C. Pembahasan dan Analisa

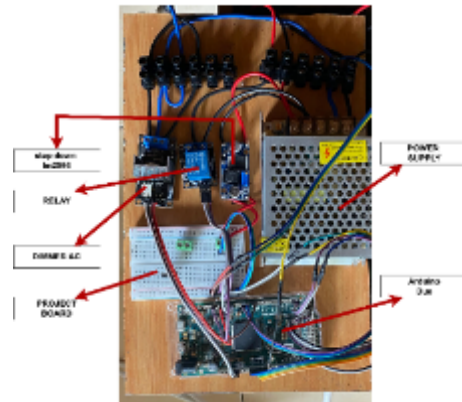
Bagian ini menyajikan hasil pengujian sistem pengendalian suhu berbasis logika fuzzy yang telah dirancang serta analisis kinerjanya pada proses distilasi molase. Hasil disusun secara sistematis untuk menggambarkan performa perangkat keras, respons sistem terhadap berbagai setpoint dan volume, serta evaluasi efektivitas pengendali fuzzy dalam kondisi distilasi aktual. Pembahasan berikut diuraikan dalam beberapa subbagian sebagai berikut:

Struktur Sistem Perangkat Keras

Struktur perangkat keras dari sistem distilasi molase ditunjukkan pada Gambar 7. Sistem terdiri atas ketel pemanas sebagai wadah utama cairan molase, elemen pemanas yang dikendalikan melalui modul dimmer berbasis pengaturan sudut fasa, serta sensor suhu thermocouple tipe J yang dipasang pada penutup ketel untuk mengukur suhu secara real-time. Komponen instrumentasi ditampilkan pada Gambar 8, yang meliputi catu daya 12 VDC sebagai sumber energi utama bagi seluruh subsistem, serta konverter step-down LM2596 yang menurunkan tegangan menjadi 5 VDC untuk mikrokontroler dan modul kontrol daya. Mikrokontroler Arduino Due berfungsi sebagai pengendali utama yang memproses sinyal dari sensor suhu melalui modul MAX6675 dan menghasilkan sinyal Pulse Width Modulation (PWM) untuk mengatur daya pemanas melalui dimmer AC.



Gambar 7. Struktur Perangkat Keras

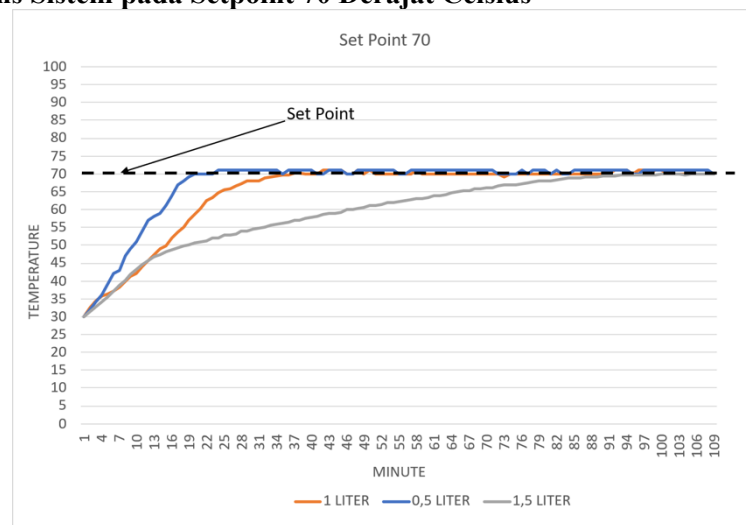


Gambar 8. Komponen Instrumentasi

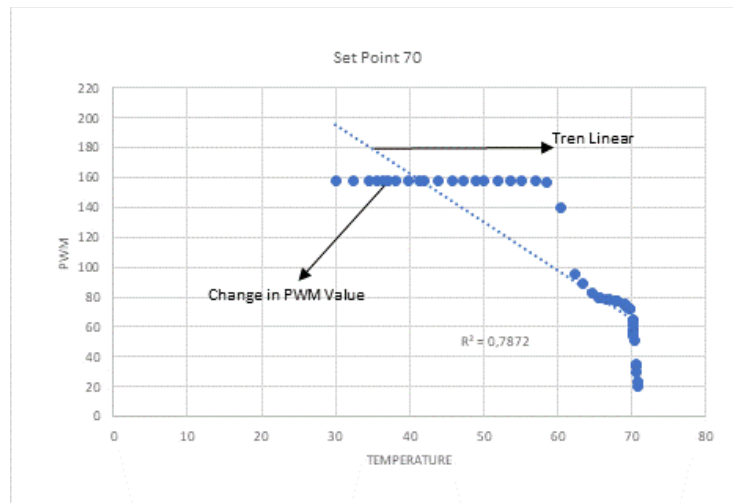
Pengujian Sistem Pengendalian Suhu

Setelah perangkat keras dan perangkat lunak terintegrasi, dilakukan pengujian untuk mengevaluasi kinerja sistem kendali suhu berbasis logika fuzzy pada proses distilasi molase. Pengujian dilakukan dengan variasi setpoint suhu 60, 65, 70, 75, dan 80 derajat Celsius serta tiga variasi volume molase, yaitu 0,5 L, 1 L, dan 1,5 L. Setiap kombinasi setpoint dan volume diuji secara terpisah untuk menganalisis pengaruh perubahan volume terhadap respons sistem. Parameter utama yang diamati meliputi waktu naik (rise time), waktu penetapan (settling time), dan kestabilan sistem dalam mempertahankan setpoint.

Analisis Respons Sistem pada Setpoint 70 Derajat Celsius



Gambar 8. Peningkatan volume molase terhadap waktu



Gambar 9. Nilai PWM

Pada setpoint 70 derajat Celsius, hasil pengujian ditampilkan pada Gambar 8. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan volume molase menyebabkan perlambatan waktu transien. Untuk volume 0,5 L diperoleh waktu naik 11 menit dan waktu penetapan 16 menit; untuk volume 1,0 L masing-masing 20 dan 27 menit; dan untuk volume 1,5 L masing-masing 84 dan 94 menit. Semua pengujian menunjukkan kesalahan keadaan tunak di bawah 0,2 derajat Celsius, menandakan akurasi pengendalian yang tinggi. Gambar 9. memperlihatkan bahwa nilai PWM menurun secara bertahap seiring dengan kenaikan suhu mendekati setpoint, mengikuti tren linier dengan koefisien determinasi R^2 sebesar 0,7872.

Hasil Pengujian Proses Distilasi Etanol

Untuk mengevaluasi performa sistem dalam kondisi distilasi aktual, dilakukan pengujian tambahan dengan setpoint suhu 70 derajat Celsius selama sepuluh siklus distilasi dengan durasi 30 hingga 165 menit. Hasil pengujian ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian Proses Distilasi Etanol

Percobaan	Waktu (Menit)	Volume Ethanol (ml)	Kadar Ethanol (%)
1	35	10	33
2	45	18	35
3	60	28	35
4	75	38	35
5	90	48	35
6	105	58	36
7	120	66	36
8	135	74	36
9	150	82	36
10	165	90s	36

Berdasarkan data pada Tabel 3, volume etanol yang dihasilkan meningkat seiring dengan durasi proses distilasi, yaitu dari 10 ml hingga mencapai 90 ml. Konsentrasi etanol juga berada pada rentang yang relatif stabil, yaitu antara 33% hingga 36%, yang menunjukkan bahwa proses pemisahan

berlangsung secara efisien. Stabilitas ini mencerminkan kemampuan pengendali fuzzy dalam menjaga suhu tetap terkendali, sehingga proses penguapan dan kondensasi dapat berlangsung secara optimal.

Dari hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa sistem kendali berbasis logika fuzzy mampu mempertahankan suhu pemanasan secara stabil pada berbagai variasi setpoint dan volume molase. Peningkatan waktu transien pada volume yang lebih besar sesuai dengan prinsip perpindahan panas, di mana massa cairan yang lebih besar memerlukan waktu lebih lama untuk mencapai kesetimbangan termal. Selain itu, pengendali fuzzy menunjukkan karakteristik adaptif yang lebih baik dibandingkan metode konvensional, karena mampu memproses perubahan nilai error dan delta error secara simultan tanpa memerlukan model matematis yang kompleks.

Jika dibandingkan dengan penelitian sebelumnya (Anggraini et al., 2024), yang hanya menghasilkan etanol dengan konsentrasi sekitar 10% pada suhu 80°C menggunakan metode kontrol konvensional, sistem fuzzy pada penelitian ini mampu mencapai konsentrasi hingga 36%. Peningkatan ini menunjukkan adanya peningkatan efisiensi proses distilasi yang signifikan. Kinerja pengendali fuzzy yang superior dipengaruhi oleh kemampuannya dalam menyesuaikan sinyal PWM secara dinamis terhadap perubahan suhu, sehingga dapat meminimalkan overshoot serta mempercepat pencapaian kestabilan suhu.

D. Penutup

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem pengendalian suhu berbasis logika fuzzy pada proses distilasi etanol dari tetes tebu. Sistem yang dilengkapi sensor suhu tipe-J dan pengendali berbasis Arduino mampu menjaga kestabilan suhu pada berbagai setpoint (60°C–80°C) dengan waktu naik antara 20–28 menit dan kesalahan tunak di bawah $\pm 1^\circ\text{C}$. Hubungan linier antara nilai PWM dan suhu dengan koefisien determinasi ($R^2 > 0,72$) menunjukkan konsistensi dan keandalan sistem kendali. Hasil distilasi menghasilkan etanol dengan kadar 33–36%, lebih tinggi dibandingkan metode konvensional. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini membuktikan bahwa penerapan kendali logika fuzzy dapat meningkatkan kestabilan suhu dan efisiensi distilasi, serta berpotensi untuk dikembangkan pada skala industri.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Andalas atas dukungan fasilitas laboratorium dan perangkat penelitian yang memungkinkan terlaksananya penelitian berjudul “Pengembangan Sistem Pengatur Suhu Berbasis Fuzzy Logic pada Distilasi Etanol Tetes Tebu”. Penghargaan yang setinggi-tingginya disampaikan kepada Bapak Muhammad Imran Hamid selaku dosen pembimbing atas bimbingan, arahan, dan masukan ilmiah yang sangat berharga sepanjang proses penelitian. Ucapan terima kasih juga ditujukan kepada rekan peneliti, Maulana Naseem Ikhlas, atas kontribusi, diskusi teknis, dan dukungan kolaboratif dalam setiap tahapan pengembangan sistem. Penulis turut menyampaikan apresiasi kepada semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu atas bantuan dan dukungan yang telah diberikan hingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

Daftar Pustaka

- Anggraini, T., Hamed, M. N., & Susanti, R. (2024). *Identification of Bioethanol Destilator of Sugarcane Drops Kerosene Substitute Using Artificial Neural Network*. 2(12), 1917–1928.
- Christy, E. J. S. B. A., Kapilan, R., Wickramasinghe, I., & Wijesekara, I. (2023). Optimization of Bioethanol Production from *Ceratophyllum demersum* for hand sanitizers. *Ceylon Journal of Science*, 52(4), 495–506. <https://doi.org/10.4038/cjs.v52i4.8164>
- Duque, A., Álvarez, C., Doménech, P., Manzanares, P., & Moreno, A. D. (2021). Advanced bioethanol production: From novel raw materials to integrated biorefineries. *Processes*, 9(2), 1–30. <https://doi.org/10.3390/pr9020206>
- Geremew Kassa, M., Asemu, A. M., Belachew, M. T., Satheesh, N., Abera, B. D., & Alemu Teferi, D. (2024). Review on the application, health usage, and negative effects of molasses. *CYTA -*

- Journal of Food*, 22(1), 1–11. <https://doi.org/10.1080/19476337.2024.2321984>
- Gurbanov, F. (2022). *IMCRA FUZZY LOGIC OF LUTFI ZADEH AND METHODOLOGICAL AND EPISTEMO- LOGICAL ANALYSIS OF SET THEORY * 127*. 5(4), 100–110.
- Hargono, H., Jos, B., Purwanto, P., Sumardiono, S., & Zakaria, M. (2021). Bioethanol Purification from Fermentation of Suweg Starch Using Two Stage Distillation Method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1053(1), 012114. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1053/1/012114>
- Igwebuike, C. M., Awad, S., & Andrès, Y. (2024). Renewable Energy Potential: Second-Generation Biomass as Feedstock for Bioethanol Production. *Molecules*, 29(7). <https://doi.org/10.3390/molecules29071619>
- Jilani, S. A. (2022). *Overview of Distillation Techniques and Process in Recovery and Reuse of Volatile Liquids. February 2018*.
- Juan, O.-C., Kevin, P.-A. L., & Donaji, J.-I. (2023). Temperature Control in the Ethanol-Water Distillation Process. *Advances in Modelling and Analysis B*, 66(1–4), 19–25. https://doi.org/10.18280/ama_b.661-403
- Kravchenko, Y., Leshchenko, O., Dakhno, N., Deinega, V., Shevchenko, H., & Trush, O. (2020). Intellectual fuzzy system air pollution control. *ATIT 2020 - Proceedings: 2020 2nd IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory*, 186–191. <https://doi.org/10.1109/ATIT50783.2020.9349334>
- Kusumawati, N., Setiarso, P., Santoso, A. B., & Muslim, S. (2022). Expansion of Hand Hygiene Compliance and Decreasing Counterfeiting of Sanitation Products in the Era of the COVID-19 through Diversification and Standardization of Alcohol-Based Gel and Wipes Hand Sanitizer. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 12(1), 411–422. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.12.1.13940>
- Kwon, H., Oh, K. C., Choi, Y., Chung, Y. G., & Kim, J. (2021). Development and application of machine learning-based prediction model for distillation column. *International Journal of Intelligent Systems*, 36(5), 1970–1997. <https://doi.org/10.1002/int.22368>
- Mahmoud, M. M. A. S. (2018). Damping of Surge Effects and Enhancement of Dynamic Response of Distillation Plant Using MIMO Fuzzy Control. *IFAC-PapersOnLine*, 51(30), 15–20. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.11.237>
- Marbun, M., Ramdhan, W., Priyanto, D., Zarlis, M., & Nasution, Z. (2019). Philosophy of Fuzzy Logic as Fundamental of Decision Making Based on Rule. *Journal of Physics: Conference Series*, 1230(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1230/1/012021>
- Mendel, J. M. (2019). Type-2 fuzzy sets as well as computing with words. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 14(1), 82–95. <https://doi.org/10.1109/MCI.2018.2881646>
- Nafisah, N., Syamsiana, I. N., Putri, R. I., Kusuma, W., & Sumari, A. D. W. (2024). Implementation of fuzzy logic control algorithm for temperature control in robusta rotary dryer coffee bean dryer. *MethodsX*, 12, 102580. <https://doi.org/10.1016/J.MEX.2024.102580>
- Nartker, T. A., Skrygley, J. M., & Holland, C. D. (1966). Solution of problems involving systems of distillation columns. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 44(4), 217–226. <https://doi.org/10.1002/cjce.5450440406>
- Peter, G., Pragma, K., Sherine, A., & Ganji, V. (2022). A Combined PWM and AEM-Based AC Voltage Controller for Resistive Loads. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/9246050>
- Santra, S. B., Bhattacharya, K., Chudhury, T. R., & Chatterjee, D. (2018). Generation of PWM Schemes for Power Electronic Converters. *2018 20th National Power Systems Conference, NPSC 2018*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/NPSC.2018.8771819>
- Sarkar, N., Ghosh, S. K., Bannerjee, S., & Aikat, K. (2012). Bioethanol production from agricultural wastes: An overview. *Renewable Energy*, 37(1), 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.06.045>

- Shen, C., Zhao, Y., & Li, Y. (2018). Design of Boiler Steam Temperature Control System. *Thermal Science and Engineering*, 1(1). <https://doi.org/10.24294/tse.v1i1.357>
- Singerman, P. G., Orourke, S. M., Narayanan, R. M., & Rangaswamy, M. (2021). Language-Based Cost Functions: Another Step Toward a Truly Cognitive Radar. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 57(6), 3827–3843. <https://doi.org/10.1109/TAES.2021.3082714>
- Stem, R., & Kuhn, U. (1995). Automation of a Batch Distillation Column Using Fuzzy and Conventional Control. In *IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY* (Vol. 3, Issue 2).
- Sunardi, Yudhana, A., & Furizal. (2023). Tsukamoto Fuzzy Inference System on Internet of Things-Based for Room Temperature and Humidity Control. *IEEE Access*, 11, 6209–6227. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3236183>
- Vieira, J. P. F., Ienczak, J. L., Costa, P. S., Rossell, C. E. V., Franco, T. T., & Pradella, J. G. C. (2016). Single cell oil production integrated to a sugarcane-mill: Conceptual design, process specifications and economic analysis using molasses as raw material. *Industrial Crops and Products*, 89, 478–485. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.05.046>
- Wang, B., & Tang, Y. (2020). Research on fuzzy control of pwm rectifier voltage. *Proceedings - 2020 3rd International Conference on Advanced Electronic Materials, Computers and Software Engineering, AEMCSE 2020*, 798–801. <https://doi.org/10.1109/AEMCSE50948.2020.00174>
- Zentou, H., Abidin, Z. Z., Zouanti, M., & Greetham, D. (n.d.). *Effect of Operating Conditions on Molasses fermentation for Bioethanol production SEE PROFILE*. <https://www.researchgate.net/publication/319273429>
- Zhang, B., Wei, Z., & Mao, B. (2024). Flocculation with intermittent dosing for enhanced microalgae harvesting. *Separation and Purification Technology*, 330. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125445>