Jurnal Fisika Unand (JFU)
Vol. 15, No. 6, November 2026, hal.562 – 569
ISSN: 2302-8491 (Print); 2686-2433 (Online)
https://doi.org/10.25077/jfu.15.6.562-569.2026

Open Access

Sistem Pemantauan pH, Kadar Alkohol dan Pengendalian Suhu pada Fermentasi Kombucha Menggunakan Metode Logika Fuzzy

Riffan Sudira, Nini Firmawati*, Wildian, Rahmat Rasyid
Laboratorium Elektronika dan Instrumentasi, Departemen Fisika,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Andalas,
Kampus Unand Limau Manis, Padang, 25163, Indonesia

Info Artikel

Histori Artikel:
Diajukan: 18 Januari 2026
Direvisi: 7 Juli 2026
Diterima: 28 Oktober 2026

Kata kunci:
Alkohol
Internet of Things
kombucha
logika fuzzy
pH

ABSTRAK

Proses fermentasi kombucha dipengaruhi oleh suhu, pH, dan kadar alkohol, sehingga diperlukan pemantauan dan pengendalian yang tepat untuk menjaga kualitas serta memastikan kadar alkohol tetap di bawah batas halal 0,5%. Penelitian ini mengembangkan sistem berbasis *Internet of Things* yang mampu memantau pH, kadar alcohol dan mengendalikan suhu ruang fermentasi secara otomatis menggunakan logika fuzzy. Sistem menggunakan mikrokontroler ESP32 dengan sensor DS18B20, pH-E4502C, dan MQ-3, serta mengatur elemen pemanas dan kipas DC melalui sinyal PWM berdasarkan evaluasi fuzzy terhadap suhu aktual dan selisih suhu terhadap setpoint 29 °C. Data ditampilkan pada LCD, dikirimkan secara *real-time* ke aplikasi *Blynk*, dan disimpan pada *Google Sheets*. Pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mempertahankan suhu mendekati setpoint dengan stabilitas baik. Sensor DS18B20 memiliki *error* rata-rata 0,41%, sedangkan sensor MQ-3 dan pH-E4502C menunjukkan korelasi tinggi dengan R^2 sebesar 0,9992 dan 0,9987. Hasil pemantauan selama fermentasi 111 jam menunjukkan bahwa pH akhir mencapai 3,37 dan kadar alkohol sebesar 0,48%, sehingga memenuhi standar mutu dan ketentuan halal. Dengan demikian, sistem ini efektif untuk memantau dan mengendalikan fermentasi kombucha secara otomatis dan akurat.

Keywords:
Alcohol
fuzzy logic
Internet of Things
kombucha
pH

Penulis Korespondensi:
Nini Firmawati
Email:
ninifirmawati@sci.unand.ac.id

The kombucha fermentation process is influenced by temperature, pH, and alcohol content; therefore, proper monitoring and control are required to maintain product quality and ensure that the alcohol level remains below the halal limit of 0.5%. This study developed an Internet of Things–based system capable of monitoring pH and alcohol content as well as automatically controlling the fermentation chamber temperature using fuzzy logic. The system employs an ESP32 microcontroller integrated with DS18B20, pH-E4502C, and MQ-3 sensors, and controls a heating element and DC fan through Pulse Width Modulation (PWM) signals based on fuzzy evaluation of the actual temperature and its deviation from the 29 °C setpoint. The data are displayed on an LCD, transmitted in real time to the Blynk application, and stored in Google Sheets. Experimental results showed that the system was able to maintain the fermentation temperature close to the setpoint with good stability. The DS18B20 sensor achieved an average error of 0.41%, while the MQ-3 and pH-E4502C sensors showed high correlation coefficients with R^2 values of 0.9992 and 0.9987, respectively. Monitoring results during 111 hours of fermentation showed a final pH value of 3.37 and an alcohol content of 0.48%, meeting quality standards and halal requirements. Therefore, the developed system is effective for automatically and accurately monitoring and controlling the kombucha fermentation process.

Copyright © 2026 Author(s)

I. PENDAHULUAN

Kombucha merupakan minuman fermentasi teh manis yang berasal dari Tiongkok sejak sekitar tahun 220 SM dan dikenal luas karena khasiatnya bagi kesehatan. Minuman ini dibuat dengan memfermentasi teh manis menggunakan kultur mikroorganisme simbiotik yang disebut SCOBY (*Symbiotic Colony of Bacteria and Yeasts*), yang terdiri atas koloni ragi dan bakteri asam asetat yang bekerja secara sinergis dalam mengubah gula menjadi senyawa bioaktif (Viera dkk., 2023). Komposisi dan aktivitas mikroorganisme dalam SCOBY sangat menentukan jalannya fermentasi karena interaksi antara ragi dan bakteri asam asetat memengaruhi pembentukan etanol, asam organik, serta karakteristik kimia dan sensoris kombucha (Huang, 2024). Selama proses fermentasi yang umumnya berlangsung antara 7 hingga 14 hari, ragi menghasilkan etanol melalui fermentasi alkohol, kemudian bakteri asam asetat mengoksidasi etanol menjadi asam organik seperti asam asetat dan asam glukuronat. Proses ini menghasilkan minuman dengan rasa asam khas, kandungan vitamin B kompleks, asam amino, antioksidan, serta sejumlah senyawa volatil yang bermanfaat bagi kesehatan (Fraiz dkk., 2024). Penelitian terbaru menunjukkan bahwa selama fermentasi terjadi perubahan dinamis pada komunitas mikroba dan senyawa volatil, termasuk alkohol, asam, ester, aldehida, keton, fenolik, dan terpen, yang berkontribusi terhadap karakteristik aroma dan cita rasa kombucha (Meng dkk., 2024).

Fermentasi kombucha yang optimal sangat bergantung pada kondisi fermentasi, terutama suhu, pH, dan kadar alkohol (Grassi dkk., 2022). Suhu ideal fermentasi berada pada rentang 22–30 °C, di mana suhu di bawah 22 °C dapat memperlambat aktivitas mikroba, sedangkan suhu di atas 30 °C dapat menurunkan aktivitas SCOBY atau memicu pertumbuhan mikroorganisme yang tidak diinginkan (Soto et al., 2018). Nilai pH yang aman berada antara 2,5 hingga 3,5, yang berfungsi mencegah pertumbuhan mikroba patogen serta menjaga cita rasa dan keamanan produk (Nyhan dkk., 2022). Perubahan pH selama fermentasi merupakan indikator penting perkembangan proses fermentasi karena produksi asam organik oleh mikroorganisme menyebabkan pH menurun seiring bertambahnya waktu fermentasi. Penurunan pH tersebut disertai peningkatan keasaman total dan perubahan komposisi asam organik, yang pada akhirnya memengaruhi karakteristik mutu kombucha (Wang dkk., 2023). Selain parameter fisikokimia tersebut, kondisi fermentasi dan jenis substrat juga dapat memengaruhi pembentukan serta konsentrasi senyawa bioaktif dalam kombucha, sehingga optimasi kondisi proses menjadi penting untuk mempertahankan karakteristik dan kualitas produk (Bortolomedi dkk., 2022). Selain itu, kadar alkohol juga menjadi parameter penting karena selama fermentasi, ragi secara alami menghasilkan etanol yang dapat meningkat apabila tidak dikendalikan dengan baik.

Sesuai dengan Fatwa Majelis Ulama Indonesia (MUI) Nomor 10 Tahun 2018, produk minuman fermentasi dengan kadar alkohol lebih dari 0,5% termasuk kategori minuman beralkohol dan tidak diperbolehkan untuk dikonsumsi (Pintaito dan Hanafiah, 2025). Ketentuan ini menjadi penting terutama bagi produsen kombucha di Indonesia agar produk yang dihasilkan tetap sesuai dengan standar kehalalan. Aung dan Eun (2022) menunjukkan bahwa waktu dan suhu fermentasi memengaruhi laju fermentasi serta perubahan karakteristik fisikokimia kombucha. Namun, pada produksi skala kecil atau rumahan yang masih menggunakan metode fermentasi manual, proses pemantauan parameter fermentasi seperti suhu dan pH umumnya dilakukan secara subjektif dan tidak kontinu. Kondisi ini berpotensi menyebabkan peningkatan kadar alkohol di atas ambang batas yang diizinkan dan menurunkan kualitas serta konsistensi produk (Jang dkk., 2021).

Proses fermentasi kombucha secara manual kurang efisien dan akurat karena membutuhkan pemantauan terus-menerus, sementara fluktuasi suhu dan kelembapan dapat memengaruhi aktivitas mikroorganisme dan kualitas produk. Untuk menjaga konsistensi mutu, diperlukan sistem pemantauan dan pengendalian otomatis yang mampu menjaga kondisi fermentasi tetap optimal sehingga menghasilkan produk yang aman dan stabil. Penelitian mengenai sistem monitoring dan pengendalian fermentasi kombucha juga terus berkembang. Penelitian terbaru mengembangkan sistem *digital twin* untuk memantau dan mengendalikan proses fermentasi kombucha secara *real-time* dengan memanfaatkan sensor IoT untuk mengukur berbagai parameter proses, seperti pH, konsentrasi sumber karbon, total asam, konsentrasi bakteri, oksigen terlarut, dan L-theanine. Sistem tersebut menunjukkan bahwa integrasi sensor IoT dengan pemodelan dan pengendalian proses dapat digunakan untuk meningkatkan pemantauan serta optimasi fermentasi kombucha (Wang dkk., 2025). Sejumlah penelitian

sebelumnya telah berupaya mengembangkan sistem pemantauan fermentasi kombucha, namun masih menghadapi berbagai keterbatasan. Albertini dkk. (2022) menambahkan sensor MQ-3 untuk deteksi alkohol, namun belum dilengkapi mekanisme kontrol suhu. Sementara itu, Nugraha dkk. (2024) mengembangkan sistem pemantauan suhu dan pH menggunakan sensor DS18B20 dan sensor pH, tetapi belum mencakup pemantauan alkohol. Berdasarkan hasil-hasil tersebut, diperlukan sistem terintegrasi yang mampu melakukan pemantauan pH dan kadar alkohol serta pengendalian suhu fermentasi secara otomatis.

Dalam pengendalian suhu fermentasi, metode konvensional seperti *ON/OFF* dan PID memiliki keterbatasan karena tidak mampu merespons secara halus terhadap dinamika sistem yang kompleks dan nonlinier. Sebagai alternatif, logika fuzzy menawarkan pendekatan yang lebih fleksibel tanpa memerlukan model matematis yang presisi. Pendekatan ini menggunakan aturan linguistik yang menyerupai cara berpikir manusia, sehingga sistem dapat beradaptasi terhadap perubahan kondisi lingkungan dan memberikan pengendalian suhu yang lebih stabil selama proses fermentasi (Davvaz dkk., 2021).

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan merancang sistem yang mampu memantau pH dan kadar alkohol serta mengendalikan suhu fermentasi kombucha secara otomatis menggunakan mikrokontroler ESP32 berbasis IoT dan logika fuzzy. Sistem ini mampu memantau suhu, pH, dan kadar alkohol secara *real-time* serta mengendalikan suhu secara adaptif. Dengan rancangan ini, proses fermentasi diharapkan berlangsung lebih efisien, stabil, dan menghasilkan produk kombucha yang aman serta sesuai dengan standar kehalalan MUI.

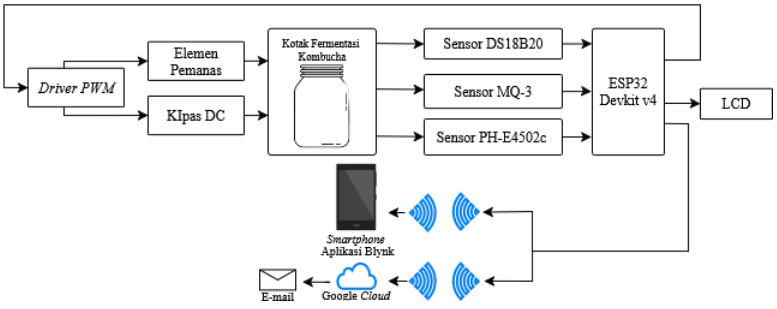
II. METODE

2.1 Alat dan Bahan

Penelitian ini menggunakan mikrokontroler ESP32 DevKitC V4 sebagai pusat pemrosesan data, sedangkan komunikasi IoT dilakukan melalui jaringan Wi-Fi untuk mengirimkan data ke aplikasi Blynk dan *Google Sheets*. Sensor DS18B20, MQ-3, dan pH-E4502C digunakan untuk mengukur suhu, kadar alkohol, dan pHPengendalian suhu dilakukan menggunakan elemen pemanas 12 V 50 W dan kipas DC 12 V yang dikendalikan oleh motor driver L298N menggunakan metode *Pulse Width Modulation* (PWM). Data ditampilkan pada LCD serta dikirimkan secara *real-time* ke aplikasi *Blynk* dan *Google Sheets*. Proses fermentasi menggunakan teh hitam, gula, dan SCOBY dalam botol kaca 2,5 L yang ditempatkan di ruang fermentasi tertutup.

2.2 Prancangan Diagram Block Sistem

Prinsip alat ini yaitu dengan menggunakan sensor DS18B20, MQ-3, dan pH-E4502C sebagai perangkat akuisisi data yang mengukur suhu ruang fermentasi, kadar alkohol, dan pH kombucha. Data dari ketiga sensor tersebut dikirimkan ke mikrokontroler ESP32. Data suhu kemudian diolah menggunakan logika fuzzy untuk menghasilkan nilai *Pulse Width Modulation* (PWM) yang digunakan oleh motor driver L298N dalam mengendalikan elemen pemanas dan kipas DC agar suhu ruang fermentasi tetap berada pada setpoint 29 °C. Selain itu, data suhu, pH, dan kadar alkohol ditampilkan melalui LCD, dikirimkan ke aplikasi *Blynk*, dan disimpan secara otomatis pada *Google Sheets*. Diagram blok dari system yang dibuat dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Diagram Block Sistem

2.3 Perancangan Logika Fuzzy

Perancangan logika fuzzy pada penelitian ini dilakukan untuk mengendalikan suhu ruang fermentasi pada setpoint 29 °C. Sistem fuzzy menggunakan dua variabel input, yaitu suhu aktual dan selisih suhu terhadap setpoint. Variabel suhu memiliki rentang (20 hingga 40) °C, sedangkan selisih suhu terhadap setpoint berada pada rentang −5 °C hingga 5 °C. Masing-masing variabel input dibagi menjadi lima fungsi keanggotaan, yaitu Dingin, Agak Dingin, Normal, Agak Panas, dan Panas untuk suhu, serta Positif, Positif Kecil, Normal, Negatif Kecil, dan Negatif untuk selisih suhu terhadap setpoint.

Sistem memiliki dua variabel output berupa nilai *Pulse Width Modulation* (PWM) untuk kipas DC dan elemen pemanas. Pada metode Sugeno, masing-masing output direpresentasikan dalam lima nilai konstan yang menunjukkan tingkat aksi pengendalian, yaitu Sangat Lemah, Lemah, Sedang, Kuat, dan Sangat Kuat. Aturan fuzzy disusun berdasarkan hubungan antara suhu dan selisih suhu terhadap setpoint dengan aksi pengendalian. Total terdapat 14 aturan fuzzy yang disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1 Aturan Fuzzy

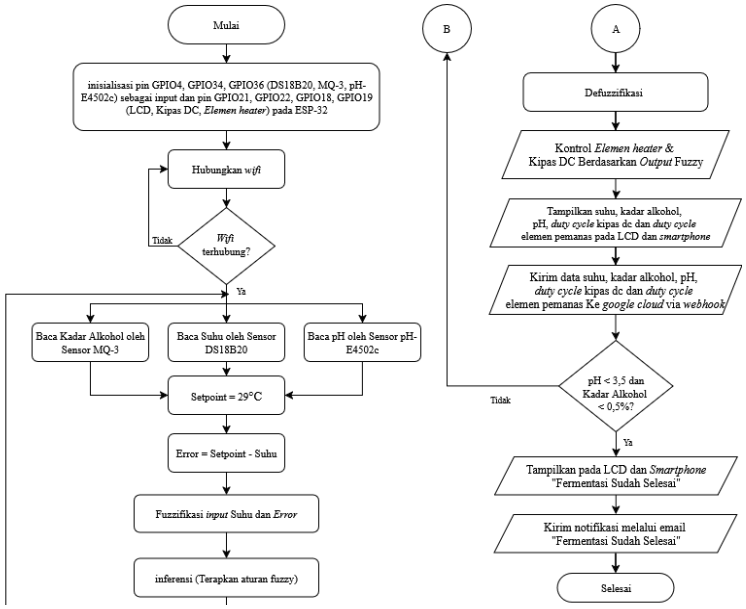
Suhu / Error	Positif	Positif Kecil	Normal	Negatif Kecil	Negatif
Dingin	SL/SK	SL/K	SL/S	-	-
Agak Dingin	SL/K	SL/S	SL/L	-	-
Normal	-	SL/L	SL/SL	L/SL	-
Agak Panas	-	-	L/SL	S/SL	C/SL
Panas	-	-	-	C/SL	SC/SL

dengan SL, L, S, C, dan SC masing-masing menyatakan Sangat Lambat, Lambat, Sedang, Cepat, dan Sangat Cepat, sedangkan SK dan K masing-masing menyatakan Sangat Kuat dan Kuat.

Proses inferensi dalam sistem ini menggunakan metode *Min–Max*, sedangkan defuzzifikasi dilakukan menggunakan metode *Weighted Average*. Hasil defuzzifikasi berupa nilai PWM akhir yang digunakan oleh mikrokontroler untuk mengatur kecepatan kipas dan tingkat pemanasan elemen pemanas dalam menjaga suhu fermentasi tetap stabil.

2.4 Perancangan Perangkat Lunak

Perangkat lunak sistem dikembangkan menggunakan Arduino IDE pada mikrokontroler ESP32. Program melakukan pembacaan data suhu, pH, dan kadar alkohol secara berkala. Nilai suhu dan selisih suhu terdapap setpoint diproses menggunakan logika fuzzy metode Sugeno untuk menghasilkan nilai



Gambar 2 Diagram alir rancangan perangkat lunak sistem

PWM yang digunakan dalam pengendalian elemen pemanas dan kipas DC melalui driver L298N. Alur kerja perangkat lunak sistem ditunjukkan pada diagram alir yang disajikan pada Gambar 2.

III. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Karakterisasi dan Pengujian Sensor

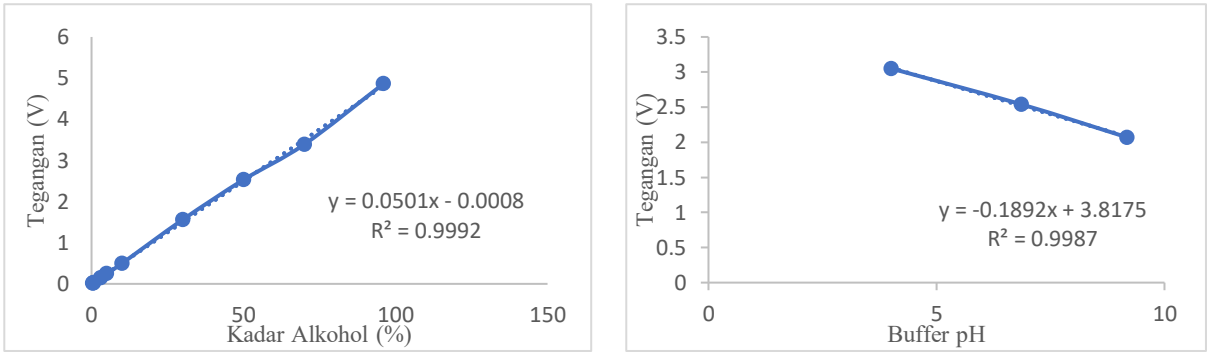
Pengujian sensor dilakukan untuk mengetahui tingkat akurasi dan linearitas sensor sebelum digunakan pada sistem fermentasi kombucha. Sensor DS18B20 diuji menggunakan termometer standar, sedangkan sensor MQ-3 dan pH-E4502C dikarakterisasi menggunakan data referensi kadar alkohol dan larutan buffer pH. Hasil pengujian sensor DS18B20 dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2 Hasil Pengujian Sensor DS18B20

NO	Suhu terbaca pada Sensor DS18B20 (°C)	Suhu terbaca pada Lutron MCH 383SD (°C)	Error (%)
1	27,25	27,4	0,55
2	28,25	28,3	0,57
3	29,06	29,3	0,82
4	29,87	30	0,43
5	31,19	31,2	0,03
		Rata - rata *Error*	2,4

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 2, sensor DS18B20 memiliki rata-rata error sebesar 0,41%, sehingga sensor dinilai cukup akurat dan layak digunakan sebagai masukan sistem pengendalian suhu berbasis logika fuzzy.

Hasil karakterisasi sensor MQ-3 dan pH-E4502C dapat dilihat pada Gambar 3.



(a) (b)

Gambar 3 Grafik karakterisasi (a) sensor MQ-3 (b) sensor pH-E4502C

Berdasarkan Gambar 3(a), sensor MQ-3 menunjukkan hubungan linear antara nilai pembacaan sensor dan kadar alkohol referensi dengan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9992. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sensor memiliki tingkat linearitas yang sangat baik dalam mendeteksi kadar alkohol.

Sementara itu, hasil karakterisasi sensor pH-E4502C pada Gambar 3(b) menunjukkan hubungan linear yang sangat baik dengan nilai referensi pH, dengan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9987. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sensor mampu melakukan pembacaan pH secara stabil dan akurat selama proses fermentasi.

3.2 Pengujian Elemen Pemanas dan Kipas DC Menggunakan Logika Fuzzy

Pengujian elemen pemanas dan kipas DC dilakukan untuk mengamati respons sistem terhadap perubahan suhu dengan mengatur keluaran PWM dan *duty cycle* pada elemen pemanas serta kipas DC. Sistem dikendalikan oleh logika fuzzy yang menentukan nilai *duty cycle* berdasarkan suhu aktual dan selisihnya terhadap nilai setpoint. Hasil pengujian Elemen Pemanas dan Kipas DC Menggunakan Logika Fuzzy ditampilkan pada Tabel 3.

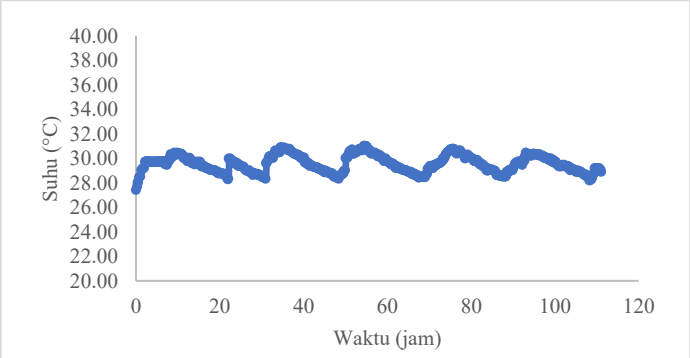
Tabel 3 Hasil Pengujian elemen pemanas dan kipas DC menggunakan logika fuzzy

NO	Suhu (°C)	Elemen Heater PWM	Kipas DC PWM	Duty Cycle Elemen Pemanas (%)	Duty Cycle Kipas DC (%)
1	24,12	235,95	51	92,53	20
2	26,3	166,36	51	65,24	20
3	29,09	51	54,87	20	21,52
4	31,56	51	159,34	20	62,49
5	33,67	51	232,38	20	91,13

Hasil pengujian pada Tabel 3 menunjukkan bahwa ketika suhu ruang fermentasi masih berada di bawah setpoint (24-26) °C, sistem memberikan nilai PWM tinggi pada elemen pemanas dengan duty cycle 65–92%, sementara kipas dijaga pada *duty cycle* rendah sekitar 20%. Saat suhu mendekati setpoint (≈29 °C), nilai PWM pemanas diturunkan menjadi 20%, dan kipas mulai diaktifkan dengan duty cycle sekitar 21% untuk menjaga kestabilan suhu. Pada suhu yang lebih tinggi (31-33)°C, pemanas tetap berada pada nilai minimum, sedangkan kipas meningkatkan *duty cycle* hingga (62-91)% untuk mempercepat proses pendinginan. Respons ini menunjukkan bahwa pengendalian fuzzy mampu memberikan aksi pemanasan dan pendinginan secara proporsional terhadap perubahan suhu yang terjadi.

3.3 Pengujian Sistem Secara Keseluruhan dan Pengambilan Data

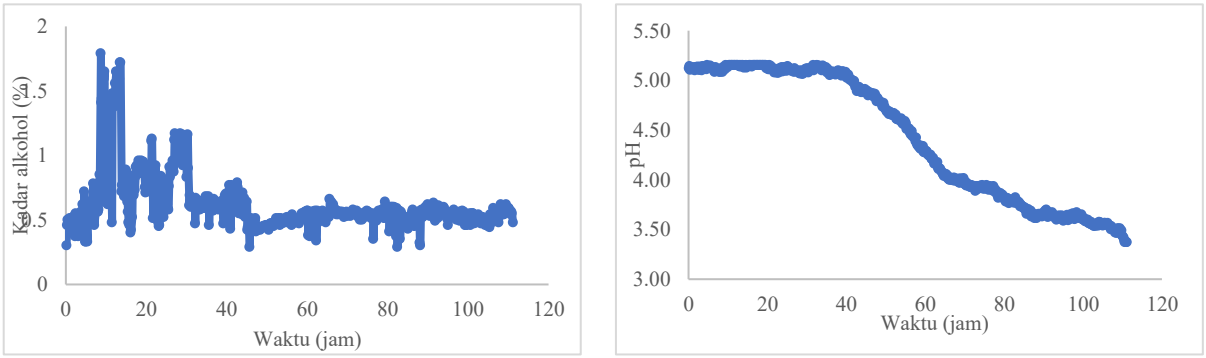
Hasil pengujian sistem secara keseluruhan dilakukan dengan melaksanakan proses fermentasi kombucha secara penuh, dimulai dari tahap awal hingga fermentasi dinyatakan selesai. Sistem yang telah dirancang dioperasikan secara otomatis selama proses fermentasi berlangsung untuk memantau dan mengendalikan parameter penting, yaitu suhu, pH, dan kadar alkohol. Grafik hasil pemantauan suhu saat proses fermentasi dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4 Grafik perubahan suhu ruang fermentasi terhadap waktu

Berdasarkan Gambar 4, suhu ruang fermentasi mampu dipertahankan mendekati setpoint 29 °C dengan rentang suhu sekitar (28-31) °C selama proses fermentasi berlangsung. Stabilitas suhu tersebut diperoleh melalui sistem kontrol logika fuzzy yang mengatur nilai *Pulse Width Modulation* (PWM) pada elemen pemanas dan kipas DC berdasarkan kondisi suhu aktual dan selisih suhu terhadap setpoint. Perubahan nilai pH dan kadar alkohol selama proses fermentasi ditunjukkan pada Gambar 5.

Berdasarkan Gambar 5(a), nilai pH mengalami penurunan secara bertahap dari 5,15 hingga mencapai 3,37 pada akhir fermentasi akibat pembentukan asam organik oleh mikroorganisme dalam SCOBY. Nilai pH akhir yang berada pada rentang 2,5–3,5 menunjukkan bahwa fermentasi telah mencapai kondisi optimal. Sementara itu, Gambar 5(b) menunjukkan bahwa kadar alkohol meningkat hingga lebih dari 1,6% pada 20 jam pertama akibat aktivitas ragi yang mengubah gula menjadi etanol. Setelah mencapai puncak, kadar alkohol menurun dan stabil pada kisaran (0,4-0,6) % seiring aktivitas bakteri asam asetat yang mengonversi etanol menjadi asam organik. Proses fermentasi berlangsung selama 111 jam dengan hasil akhir menunjukkan nilai pH sebesar 3,37 dan kadar alkohol sebesar 0,48%, sehingga memenuhi standar kombucha non-alkohol dengan pH di bawah 3,5 dan kadar alkohol di bawah 0,5%.



(a) (b)

Gambar 5 Grafik perubahan selama proses fermentasi terhadap waktu: (a) pH dan (b) kadar alkohol

IV. KESIMPULAN

Sistem yang dikembangkan berhasil mengendalikan suhu ruang fermentasi secara otomatis pada setpoint 29 °C menggunakan logika fuzzy Sugeno dengan metode *defuzzifikasi Weighted Average*. Kombinasi pengaturan elemen pemanas dan kipas DC memberikan respons yang stabil dan mampu menyesuaikan diri terhadap perubahan suhu lingkungan. Selain itu, sistem juga mampu memantau pH dan kadar alkohol secara *real-time* selama proses fermentasi. Hasil pengujian selama 111 jam fermentasi menunjukkan bahwa nilai pH akhir berada pada rentang 2,5–3,5 dan kadar alkohol tetap di bawah 0,5%, sehingga memenuhi standar keamanan pangan dan ketentuan kehalalan. Dengan demikian, sistem ini efektif digunakan untuk memantau pH dan kadar alkohol serta mengendalikan suhu fermentasi kombucha secara otomatis dan akurat.

UCAPAN TERIMA KASIH

Tidak ada.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan tidak terdapat konflik kepentingan.

PERNYATAAN PENDANAAN

Penelitian ini tidak memperoleh pendanaan khusus.

PERNYATAAN PENGGUNAAN AI GENERATIF DAN TEKNOLOGI BERBASIS AI

GPT hanya digunakan untuk mengoreksi kesalahan tata bahasa dan tipografi. Penulis bertanggung jawab penuh atas isi dan integritas publikasi.

DAFTAR PUSTAKA

Albertini, N. S., Pezzin, E. V. B., Bressan, S., Radin, D., Kern, K. M., Pezzin, M. Z., & Foralosso, F. B. (2022). Comparação entre métodos analíticos convencionais e microcontroladores de baixo custo para monitoramento de processos biotecnológicos aplicados à alimentos. *Anais Da Mostra Nacional de Iniciação Científica e Tecnológica Interdisciplinar (MICTI)*, *1*(16), 57–64. https://doi.org/10.1300/J096v10n02_08

Aung, T., & Eun, J.-B. (2022). Impact of time and temperature on the physicochemical, microbiological, and nutraceutical properties of laver kombucha (Porphyra dentata) during fermentation. LWT, 154, 112643. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112643

Bortolomedi, B. M., Paglarini, C. S., & Brod, F. C. A. (2022). Bioactive compounds in kombucha: A review of substrate effect and fermentation conditions. *Food Chemistry*, 385, 132719. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132719

Davvaz, B., Mukhlash, I., & Soleha, S. (2021). Himpunan Fuzzy dan Rough Sets. *Limits: Journal of Mathematics and Its Applications*, *18*(1), 79. https://doi.org/10.12962/limits.v18i1.7705

Fraiz, G. M., Costa, M. A. C., Cardoso, R. R., Hébert, J. R., Zhao, L., Corich, V., Giacomini, A., Milagro, F. I., Barros, F. A. R., & Bressan, J. (2024). Black Tea Kombucha Consumption: Effect on Cardiometabolic Parameters and Diet Quality of Individuals with and without Obesity. *Fermentation*, *10*(8). https://doi.org/10.3390/fermentation10080384

Grassi, A., Cristani, C., Palla, M., Di Giorgi, R., Giovannetti, M., & Agnolucci, M. (2022). Storage time and temperature affect microbial dynamics of yeasts and acetic acid bacteria in a kombucha beverage. *International Journal of Food Microbiology*, *382*(September), 109934. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2022.109934

Huang, R. (2024). Exploring Kombucha: Production, Microbiota Biotransformation, Flavor, Health Benefits and Potential Risks. *ACS Food Science & Technology*, 4(7), 1610–1625. https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.4c00242

Jang, S. S. I. K., Intyre, L. M. C., Chan, M., Brown, P. N., Finley, J., & Chen, S. X. (2021). *Ethanol Concentration of Kombucha Teas in British Columbia, Canada*. *84*(11), 1878–1883. https://doi.org/10.4315/JFP-21-130

Meng, Y., Wang, X., Li, Y., Chen, J., & Chen, X. (2024). Microbial interactions and dynamic changes of volatile flavor compounds during the fermentation of traditional kombucha. *Food Chemistry*, 430, 137060. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137060

Nugraha, B. I. A., Susanto, R., & Erlinawati, M. (2024). pH and temperature monitoring system for coffee fermentation based on the Internet of Things. G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan, 8(3), 1816–1826. https://doi.org/10.33379/gtech.v8i3.4571

Nyhan, L. M., Lynch, K. M., Sahin, A. W., & Arendt, E. K. (2022). Advances in Kombucha Tea Fermentation: A Review. *Applied Microbiology*, *2*(1), 73–103. https://doi.org/10.3390/applmicrobiol2010005

Pitantio, Z.A., & Hanafiah, I. (2025). Critical points halal of fermented beverage products. *Journal of Halal Science and Research (JHSR)*. 6(2), 121-133 https://doi.org/10.12928/jhsr.v6i2.11924

Soto, S. A. V., Beaufort, S., Bouajila, J., Souchard, J. P., & Taillandier, P. (2018). Understanding Kombucha Tea Fermentation: A Review. *Journal of Food Science*, *83*(3), 580–588. https://doi.org/10.1111/1750-3841.14068

Viera, P., Oliveira, D., Henrique, A., De, C. R. S., Fagundes, C., & Hernandes, C. (2023). Kombucha benefits, risks and regulatory frameworks: A review. *Food Chemistry Advances*, *2*(January), 100288. https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100288

Wang, S., Li, C., Wang, Y., et al. (2023). Changes on physiochemical properties and volatile compounds of Chinese kombucha during fermentation. *Food Bioscience*, 55, 103029. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103029