

Analisa Penentuan Suhu Ideal Susu dalam Pembuatan Yogurt Menggunakan Metode Fuzzy Tsukamoto

Nava Azahra¹, Arba Rinata², Syafiul Muzid³

^{1,2,3)} Program Studi Sistem Informasi, Universitas Muria Kudus
Jl. Lingkar Utara UMK, Gondangmanis, Bae, Kudus-59327 Jawa Tengah-Indonesia
Email: 202353052@std.umk.ac.id¹, 202353062@std.umk.ac.id²
syafiul.muzid@umk.ac.id³

ABSTRAK

Pembuatan yoghurt merupakan proses fermentasi susu yang dipengaruhi oleh suhu, terutama saat pasteurisasi dan fermentasi. Ketidaktepatan suhu dapat menurunkan nilai gizi dan menghambat pertumbuhan bakteri starter seperti *Lactobacillus bulgaricus*. Untuk mengatasi tantangan ini, penelitian mengusulkan penggunaan metode Fuzzy Tsukamoto sebagai sistem pendukung keputusan. Metode ini efektif menangani data linguistik dan ketidakpastian dengan mempertimbangkan variabel pH, kadar lemak, waktu fermentasi, dan konsentrasi bakteri starter. Hasilnya, sistem mampu merekomendasikan suhu optimal secara konsisten dalam rentang 30-45°C, yaitu sebesar 38.68°C, sehingga dapat meningkatkan kualitas dan efisiensi produksi yogurt, terutama di industri kecil dan menengah.

Kata kunci: Sistem Pendukung Keputusan, Fuzzy Tsukamoto, Suhu Fermentasi, Yogurt, Fermentasi Susu.

ABSTRACT

*The production of yogurt is a fermentation process of milk that is influenced by temperature, especially during pasteurization and fermentation. Temperature inaccuracies can reduce nutritional value and inhibit the growth of starter bacteria such as *Lactobacillus bulgaricus*. To address this challenge, the research proposes the use of the Fuzzy Tsukamoto method as a decision support system. This method effectively handles linguistic data and uncertainty by considering the variables of pH, fat content, fermentation time, and starter bacteria concentration. As a result, the system is able to consistently recommend an optimal temperature in the range of 30-45°C, specifically 38.68°C, thereby improving the quality and efficiency of yogurt production, especially in small and medium-sized industries.*

Keywords: Decision Support System, Fuzzy Tsukamoto, Fermentation Temperature, Yogurt, Milk Fermentation.

Pendahuluan

Dalam era revolusi industri 4.0, pemanfaatan teknologi informasi dan sistem cerdas menjadi kebutuhan penting dalam berbagai sektor, termasuk industri pangan (Burhanuddin et al., 2023). Pembuatan yoghurt merupakan salah satu metode diversifikasi produk susu yang memerlukan pengendalian suhu yang ketat agar menghasilkan produk berkualitas. Suhu dalam proses pasteurisasi dan fermentasi susu berpengaruh signifikan terhadap keberhasilan pembentukan tekstur dan karakteristik yoghurt. Misalnya, suhu yang terlalu tinggi saat pasteurisasi dapat merusak kandungan nutrisi penting dalam susu seperti vitamin dan mineral (Ramadhani et al., 2024). Selain itu, suhu fermentasi ideal, yaitu sekitar 41–43°C, dibutuhkan untuk menjaga viabilitas bakteri asam laktat seperti *Lactobacillus bulgaricus* dan *Streptococcus thermophilus* yang berperan dalam pembentukan asam laktat (Utami et al., 2020). Kegagalan menjaga suhu dapat menyebabkan fermentasi tidak optimal, penurunan pH yang terlalu cepat, dan berkurangnya jumlah bakteri probiotik yang bermanfaat bagi kesehatan pencernaan (Wardhani et al., 2023; Zahirah et al., 2022). Ini menjadi penting untuk menghasilkan produk yoghurt yang bergizi, aman, dan tahan lama. Kegagalan dalam menjaga suhu dapat menyebabkan kegagalan fermentasi, turunnya pH secara drastis, atau menurunnya jumlah bakteri probiotik yang bermanfaat bagi kesehatan manusia. Oleh karena itu, penentuan suhu ideal dalam proses ini menjadi penting untuk menghasilkan produk yang bernilai gizi tinggi dan memiliki masa simpan optimal (Pangestu et al., 2021).

Salah satu masalah utama dalam proses pembuatan yoghurt adalah ketidakkonsistenan pengaturan suhu. Ini dapat terjadi karena pengendalian manual atau karena tidak adanya sistem otomatisasi. Hal ini menyebabkan hasil produksi yang tidak seragam dan kualitas yoghurt menurun karena ditinjau oleh faktor seperti pH (Noviatanti Nabilah et al., 2022). Sebaliknya, banyak UKM tidak memiliki sistem pemantauan suhu otomatis, sehingga proses pengolahan susu seringkali tidak konsisten dan bergantung pada pengalaman subjektif. Selain itu, ketidaksesuaian suhu menghambat perkembangan bakteri fermentasi seperti *Lactobacillus bulgaricus* dan *Streptococcus thermophilus*. Hal ini menyebabkan pH akhir yoghurt tidak stabil (Jati et al., 2024). Akibatnya, pelaku usaha mengalami kerugian karena produk tidak layak konsumsi. (Ramadhani et al., 2024). Oleh karena itu, dibutuhkan solusi berbasis sistem untuk mengatur dan merekomendasikan suhu ideal dalam proses produksi yoghurt.

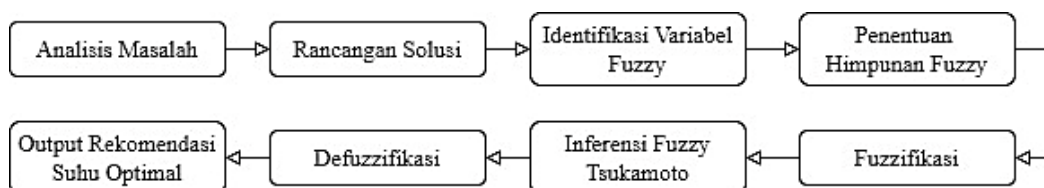
Salah satu pendekatan yang dapat digunakan untuk mengatasi permasalahan ini adalah Sistem Pendukung Keputusan (SPK). SPK dirancang untuk membantu pengambilan keputusan dalam kondisi kompleks dan tidak pasti, dengan menggunakan data, model matematis, serta teknik analisis canggih dengan cepat dan akurat (Suhendri et al., 2022). SPK telah diterapkan pada berbagai bidang seperti Pendidikan, kesehatan, dan industri (Susanti & Nawangsit, 2023). Salah satu metode dalam SPK yang cocok digunakan dalam kasus penentuan suhu adalah metode Fuzzy Tsukamoto. Metode ini memungkinkan pemodelan variabel yang tidak pasti atau tidak pasti secara linguistic menjadi angka pasti melalui proses inferensi dan defuzzifikasi (Zahirah et al., 2022). Keunggulan metode ini adalah mampu

menghasilkan nilai keluaran (*crisp value*) dari aturan fuzzy yang memiliki fungsi keanggotaan monoton (Susanti & Nawangsit, 2023). Logika fuzzy mudah dipahami oleh manusia, sangat fleksibel, tahan terhadap data yang kurang tepat, dan dapat memodelkan fungsi nonlinear yang sangat kompleks. Orang sering berbicara dalam bahasa yang tidak jelas batasnya, sehingga untuk mengatasi masalah ini, sebuah basis data dibangun menggunakan teknik logika fuzzy yang dijabarkan dalam istilah linguistik (Astuti, 2020).

Penelitian oleh Astuti (2020) menerapkan metode Fuzzy Tsukamoto untuk menentukan harga jual sepeda motor bekas berdasarkan parameter seperti kondisi, tahun pembuatan, dan harga beli. Meskipun inputnya bersifat linguistik, sistem mampu menghasilkan output yang logis, menunjukkan efektivitas fuzzy dalam menangani data tidak pasti. Dalam penelitian lain oleh Sunardi et al. (2023), metode ini digunakan pada sistem kendali suhu dan kelembaban berbasis IoT, yang secara otomatis menyesuaikan kecepatan kipas berdasarkan sensor, menghasilkan kontrol lingkungan yang lebih akurat. Penelitian tim pengembang aplikasi FREAK MILK, Harahap (2022) menerapkannya pada aplikasi FREAK MILK untuk menilai kepuasan pelanggan susu murni dari aspek rasa, tekstur, dan kemasan. Ketiga studi ini menunjukkan bahwa Fuzzy Tsukamoto efektif dalam pengambilan keputusan dengan variabel tidak pasti, relevan untuk proses seperti penentuan suhu fermentasi yoghurt.

Metode Penelitian

Metodologi penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen simulasi, di mana model logika fuzzy Tsukamoto diterapkan untuk menentukan suhu ideal dalam proses pembuatan yoghurt. Proses implementasi dilakukan untuk menguji sistem inferensi fuzzy berbasis nilai input seperti pH susu, kadar lemak, waktu fermentasi, dan persentase starter bakteri. Tahapan yang dilakukan mencakup identifikasi variabel input dan output, pembuatan fungsi keanggotaan fuzzy, penerapan aturan IF-THEN, serta defuzzifikasi menggunakan rata-rata terbobot. Data yang digunakan bersumber dari literatur ilmiah yang relevan mengenai parameter fisikokimia yoghurt (Pangestu et al., 2021) dan sistem kendali suhu pada proses fermentasi susu (Ramadhani et al., 2024). Metode ini dipilih karena Fuzzy Tsukamoto mampu menghasilkan output crisp yang lebih terstruktur dan sesuai untuk proses pengambilan keputusan kuantitatif (Susanti & Nawangsit, 2023). Melalui pendekatan ini, hasil simulasi diharapkan mampu memberikan rekomendasi suhu fermentasi optimal dalam kondisi parameter produksi yang bervariasi. Gambar 1 menunjukkan alur kerangka penelitian yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 1. Kerangka penelitian

Dapat dilihat pada gambar 1, metodologi penelitian ini diawali dengan analisis masalah, yakni identifikasi kebutuhan akan sistem yang mampu memberikan rekomendasi suhu ideal dalam proses fermentasi susu untuk pembuatan yoghurt (Pangestu et al., 2021). Tahapan analisis masalah meliputi pengamatan objek yang disertai studi literatur dan pengumpulan data penelitian (Albahry & Chandra, 2024; Nugroho et al., 2021). Analisis kebutuhan digunakan untuk menentukan fitur dan fungsionalitas yang diperlukan oleh SPK (Sariangsah, 2024) dan studi literatur menggunakan referensi teori yang relevan dengan permasalahan yang ada, bisa dari jurnal, prosiding, buku, perpustakaan, bahan dari internet dan lain sebagainya (Dewi et al., 2024; Budiman et al., 2024). Masalah muncul karena suhu yang tidak sesuai memengaruhi kualitas yoghurt dan viabilitas bakteri. Setelah masalah diidentifikasi, langkah berikutnya adalah rancangan solusi berupa penerapan logika fuzzy Tsukamoto, dengan beberapa input yaitu 1) input berupa pH, 2) kadar lemak, 3) waktu fermentasi, dan 4) konsentrasi starter, serta 1 buah output yaitu suhu fermentasi ideal.

Selanjutnya dilakukan penentuan himpunan fuzzy untuk masing-masing variabel dengan kategori linguistik seperti “rendah”, “normal”, dan “tinggi,” yang direpresentasikan melalui fungsi keanggotaan berbentuk linear atau segitiga. Nilai-nilai input yang dimasukkan kemudian melalui proses fuzzifikasi, di mana nilai numerik diubah menjadi derajat keanggotaan (μ) dalam himpunan fuzzy. Proses ini dilanjutkan dengan inferensi fuzzy Tsukamoto, yaitu penerapan aturan IF-THEN yang menghasilkan nilai crisp untuk setiap aturan berdasarkan tingkat aktivasi atau α -predikat (Sunardi et al., 2023).

$$\alpha - predikat_i = \min (\mu X_{(n)} \cap \mu Y_{(n)}) \quad (1)$$

Pada persamaan 1, alpha predikat ke i ($\alpha - predikat_i$ atau α_i) merupakan derajat kebenaran dari suatu aturan fuzzy IF-THEN, $\min(\mu X(n), \mu Y(n))$ merupakan derajat keanggotaan dari masing-masing input, untuk i adalah 1,2,3,...,n (Setiawan et al., 2018). Misal, $\alpha = \min(\mu_{pH_rendah}, \mu_{lemak_tinggi})$ maka $\alpha = \min(0.75, 0.5) = 0.5$ karena rule-nya menggunakan logika AND.

Fungsi Turun:

$$\alpha_i = \frac{z_{max} - z_i}{z_{max} - z_{min}} \rightarrow z_i = z_{max} - \alpha_i(z_{max} - z_{min}) \quad (2)$$

Fungsi naik:

$$\alpha_i = \frac{z_i - z_{min}}{z_{max} - z_{min}} \rightarrow z_i = \alpha_i(z_{max} - z_{min}) + z_{min} \quad (3)$$

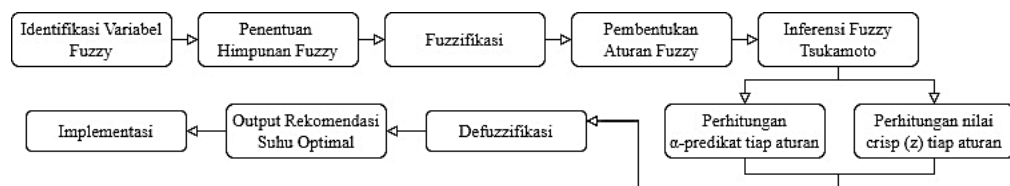
Fungsi turun digunakan untuk menurunkan nilai dari z_i ke dalam skala antara 0 hingga 1, semakin besar nilai asli α_i maka nilai z_i semakin kecil. Seringkali digunakan saat ingin memetakan nilai tinggi ke nilai kecil. Sedangkan fungsi naik digunakan untuk menaikkan nilai dari z_i ke dalam skala antara 0 hingga 1, semakin besar nilai z_i , maka nilai α_i juga semakin besar. Seringkali digunakan untuk memetakan nilai rendah ke nilai kecil, dan nilai tinggi ke nilai besar. Hasil dari semua aturan tersebut digabungkan dalam tahap defuzzifikasi menggunakan metode rata-rata terbobot untuk memperoleh satu nilai output akhir.

$$Z = \frac{\sum(\alpha_i \cdot z_i)}{\sum \alpha_i} = \frac{(\alpha_1 \cdot z_1) + (\alpha_2 \cdot z_2) + \dots + (\alpha_n \cdot z_n)}{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n} \quad (4)$$

Z merupakan nilai akhir yang dihasilkan oleh sistem fuzzy, α_i merupakan Derajat aktivasi dari aturan ke-i, z_i merupakan nilai hasil inferensi dari aturan. Hasil akhir ini berupa rekomendasi suhu optimal yang menjadi keputusan dari sistem dalam menentukan suhu terbaik untuk fermentasi susu pada proses pembuatan yoghurt.

Hasil dan Pembahasan

Penelitian ini menggunakan metode logika fuzzy Tsukamoto untuk menentukan suhu fermentasi ideal dalam pembuatan yoghurt. Sistem memproses input seperti pH, kadar lemak, waktu fermentasi, kadar gula, dan starter bakteri untuk menghasilkan rekomendasi suhu yang akurat. Dengan pendekatan ini, penentuan suhu tidak lagi bergantung pada intuisi, tetapi berdasarkan perhitungan logis. Alur proses bisnis dirancang untuk menggambarkan tahapan sistem, dari input data hingga keluaran rekomendasi suhu. Gambar 2 menggambarkan tahapan dalam alur proses fuzzy tsukamoto yang dilakukan.



Gambar 2. Alur proses Fuzzy Tsukamoto

Berikut adalah penjelasan dari alur proses bisnis pada gambar 2:

1. Tahap pertama adalah mengidentifikasi variabel-variabel yang akan digunakan sebagai input dalam sistem. Dalam konteks pembuatan yoghurt, variabel ini meliputi pH susu, kadar lemak, waktu fermentasi, dan jumlah starter bakteri (Purnomo et al., 2021). Setiap variabel ini berperan dalam memengaruhi suhu fermentasi yang dibutuhkan. Pemilihan variabel didasarkan pada literatur ilmiah yang menjelaskan pengaruh masing-masing parameter terhadap proses fermentasi susu.
2. Setelah variabel ditentukan, setiap variabel dikelompokkan ke dalam himpunan fuzzy linguistik, seperti “rendah”, “normal”, dan “tinggi”. Untuk masing-masing himpunan, dirancang fungsi keanggotaan (*membership function*) yang menggambarkan hubungan antara nilai numerik dengan tingkat keanggotaan dalam himpunan tersebut. Misalnya, pH 6.4 bisa memiliki keanggotaan tinggi dalam kategori “rendah”. Tabel 1 menyajikan daftar himpunan variabel yang digunakan dalam penelitian ini beserta kriteria masing-masing.

Tabel 1. Kriteria dan kategori variabel

Tabel kriteria input dan output				
No	Fungsi	Variabel	Himpunan fuzzy	Domain
1	Input	pH susu	Rendah	[6.4 - 6.6]
2	Input	pH susu	Normal	[6.5 - 6.7]
3	Input	pH susu	Tinggi	[6.6 - 6.8]
4	Input	Lemak susu	Rendah	[0.5 - 2.5]
5	Input	Lemak susu	Normal	[1.5 - 3.5]
6	Input	Lemak susu	Tinggi	[2.5 - 4.0]
7	Input	Waktu fermentasi	Singkat	[6 - 9]
8	Input	Waktu fermentasi	Normal	[7 - 10]
9	Input	Waktu fermentasi	Lama	[9 - 12]
10	Input	Starter bakteri	Sedikit	[1 - 2]
11	Input	Starter bakteri	Normal	[1.5 - 2.5]
12	Input	Starter bakteri	Banyak	[2 - 3]
13	Output	Suhu fermentasi	Rendah	[30 - 36]
14	Output	Suhu fermentasi	Normal	[33 - 39]
15	Output	Suhu fermentasi	Tinggi	[36 - 45]

3. Pada tahap fuzzifikasi ini, nilai input numerik (crisp) yang dimasukkan ke sistem akan dikonversi ke dalam nilai fuzzy berdasarkan fungsi keanggotaan yang telah dibuat. Proses ini memungkinkan sistem memahami data input dalam bentuk linguistik yang fleksibel, sesuai prinsip logika fuzzy. Grafik derajat keanggotaan juga bermanfaat untuk melihat penggunaan fungsi naik atau turun pada perhitungan (Filla et al., 2024).

Fungsi Keanggotaan Variabel pH Susu

Berikut fungsi keanggotaan dari variabel pH susu dan kurva linier turun untuk himpunan pH rendah, kurva segitiga untuk himpunan pH normal, dan kurva linier naik untuk himpunan pH tinggi.

$$\mu_{Rendah}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 6.4 \\ \frac{6.6-x}{6.6-6.4}, & 6.4 \leq x \leq 6.6 \\ 0, & x > 6.6 \end{cases} \quad (5)$$

$$\mu_{Normal}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 6.5 \\ \frac{x-6.5}{6.6-6.5}, & 6.5 < x \leq 6.6 \\ \frac{6.7-x}{6.7-6.6}, & 6.6 < x \leq 6.7 \\ 0, & x > 6.7 \end{cases} \quad (6)$$

$$\mu_{Tinggi}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 6.6 \\ \frac{x-6.6}{6.8-6.6}, & 6.6 < x \leq 6.8 \\ 1, & x > 6.8 \end{cases} \quad (7)$$

Fungsi Keanggotaan Variabel Lemak Susu

Fungsi keanggotaan dari variabel lemak susu dan kurva linier turun untuk himpunan lemak rendah, kurva segitiga untuk himpunan lemak normal, dan kurva linier naik untuk himpunan lemak tinggi sama dengan fungsi keanggotaan variabel pH susu dengan penyesuaian domain pada tabel 1.

Fungsi Keanggotaan Variabel Waktu Fermentasi

Fungsi keanggotaan dari variabel waktu fermentasi dan kurva linier turun untuk himpunan waktu singkat, kurva segitiga untuk himpunan waktu normal, dan kurva linier naik untuk himpunan waktu lama sama dengan fungsi keanggotaan variabel pH dengan penyesuaian domain pada tabel 1.

Fungsi Keanggotaan Variabel Starter Bakteri

Fungsi keanggotaan dari variabel starter bakteri dan kurva linier turun untuk himpunan starter sedikit, kurva segitiga untuk himpunan starter normal, dan kurva linier naik untuk himpunan starter banyak sama dengan fungsi keanggotaan variabel pH susu dengan penyesuaian domain pada tabel 1.

Fungsi Keanggotaan Variabel Suhu Fermentasi

Fungsi keanggotaan dari variabel suhu fermentasi dan kurva linier turun untuk himpunan suhu rendah, kurva segitiga untuk himpunan suhu normal, dan kurva linier naik untuk himpunan suhu tinggi sama dengan fungsi keanggotaan variabel pH susu dengan penyesuaian domain pada tabel 1.

Pada contoh studi kasus untuk sistem pendukung keputusan penentuan suhu fermentasi yoghurt menggunakan metode Fuzzy Tsukamoto dengan input data pH susu sebesar 6.65, kadar lemak susu sebanyak 0.8%, waktu fermentasi selama 10 jam, dan konsentrasi starter sebanyak 2.8%.

Penyelesaian Langkah Fuzzifikasi (Hitung Derajat Keanggotaan)

- a. pH susu = 6.65 masuk domain normal dan tinggi, sehingga menggunakan persamaan (6) dan persamaan (7).

$$\mu_{Normal}(x) = \frac{6.7-x}{6.7-6.6} = \frac{6.7-6.65}{6.7-6.6} = \frac{0.05}{0.1} = 0.5$$

$$\mu_{Tinggi}(x) = \frac{x-6.6}{6.8-6.6} = \frac{6.65-6.6}{6.8-6.6} = \frac{0.05}{0.2} = 0.25$$

Jadi, $\mu_{Normal}(6.65) = 0.5$ dan $\mu_{Tinggi}(6.65) = 0.25$.

- b. Kadar lemak susu = 0.8% masuk domain rendah.

$$\mu_{Rendah}(x) = \frac{2.5-x}{2.5-0.5} = \frac{2.5-0.8}{2.5-0.5} = \frac{1.7}{2.0} = 0.85$$

Jadi, $\mu_{Rendah}(0.8) = 0.85$.

- c. Waktu fermentasi = 10 jam masuk domain lama.

$$\mu_{Lama}(x) = \frac{x-9}{12-9} = \frac{10-9}{12-9} = \frac{1}{3} = 0.333$$

Jadi, $\mu_{Lama}(10) = 0.333$.

- d. Konsentrasi starter bakteri = 2.8% masuk domain banyak.

$$\mu_{Banyak}(x) = \frac{x-2.0}{3.0-2.0} = \frac{2.8-2.0}{3.0-2.0} = \frac{0.8}{1.0} = 0.8$$

Jadi, $\mu_{Banyak}(2.8) = 0.8$.

4. Tahap pembentukan aturan fuzzy (fuzzy rule) merupakan proses merumuskan hubungan antara variabel input dan output dalam bentuk pernyataan IF–THEN. Aturan-aturan ini disusun berdasarkan pengetahuan pakar atau pengamatan terhadap pola hubungan antar variabel, sehingga sistem dapat memetakan kombinasi kondisi input tertentu ke hasil output yang sesuai. Setiap aturan mencerminkan logika keputusan yang menggambarkan situasi nyata dalam proses fermentasi susu. Tabel 2 memuat sebagian fuzzy rule yang merepresentasikan basis pengetahuan sistem dalam memetakan kondisi input ke output secara logis.

Tabel 2. Aturan fuzzy (if-then)

Tabel fuzzy rule (if-then)					
Rule	pH susu	Lemak susu	Waktu sermentasi	Starter bakteri	Suhu fermentasi
R1	Rendah	Rendah	Singkat	Sedikit	Rendah
R2	Rendah	Rendah	Singkat	Normal	Rendah
R3	Rendah	Rendah	Singkat	Banyak	Normal
R4	Rendah	Rendah	Normal	Sedikit	Rendah
R5	Rendah	Rendah	Normal	Normal	Normal
R6	Rendah	Rendah	Normal	Banyak	Normal
R7	Rendah	Rendah	Lama	Sedikit	Normal
R8	Rendah	Rendah	Lama	Normal	Normal
R9	Rendah	Rendah	Lama	Banyak	Tinggi
R10	Rendah	Normal	Singkat	Sedikit	Rendah
R11	Rendah	Normal	Singkat	Normal	Normal
R12	Rendah	Normal	Singkat	Banyak	Normal
R13	Rendah	Normal	Normal	Sedikit	Rendah
R14	Rendah	Normal	Normal	Normal	Normal
R15	Rendah	Normal	Normal	Banyak	Normal
R16	Rendah	Normal	Lama	Sedikit	Normal
R17	Rendah	Normal	Lama	Normal	Normal
R18	Rendah	Normal	Lama	Banyak	Tinggi
R19	Rendah	Tinggi	Singkat	Sedikit	Normal
R20	Rendah	Tinggi	Singkat	Normal	Normal
R21	Rendah	Tinggi	Singkat	Banyak	Normal
R22	Rendah	Tinggi	Normal	Sedikit	Normal
R23	Rendah	Tinggi	Normal	Normal	Normal
R24	Rendah	Tinggi	Normal	Banyak	Tinggi
R25	Rendah	Tinggi	Lama	Sedikit	Normal
R26	Rendah	Tinggi	Lama	Normal	Tinggi
R27	Rendah	Tinggi	Lama	Banyak	Tinggi
R28	Normal	Rendah	Singkat	Sedikit	Rendah
R29	Normal	Rendah	Singkat	Normal	Normal

Tabel fuzzy rule (if-then)					
Rule	pH susu	Lemak susu	Waktu sermentasi	Starter bakteri	Suhu fermentasi
R30	Normal	Rendah	Singkat	Banyak	Normal
R31	Normal	Rendah	Normal	Sedikit	Normal
R32	Normal	Rendah	Normal	Normal	Normal
R33	Normal	Rendah	Normal	Banyak	Tinggi
R34	Normal	Rendah	Lama	Sedikit	Normal
R35	Normal	Rendah	Lama	Normal	Tinggi
R36	Normal	Rendah	Lama	Banyak	Tinggi
R37	Normal	Normal	Singkat	Sedikit	Rendah
R38	Normal	Normal	Singkat	Normal	Normal
R39	Normal	Normal	Singkat	Banyak	Normal
R40	Normal	Normal	Normal	Sedikit	Normal
R41	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
R42	Normal	Normal	Normal	Banyak	Tinggi
R43	Normal	Normal	Lama	Sedikit	Normal
R44	Normal	Normal	Lama	Normal	Tinggi
R45	Normal	Normal	Lama	Banyak	Tinggi
R46	Normal	Tinggi	Singkat	Sedikit	Normal
R47	Normal	Tinggi	Singkat	Normal	Normal
R48	Normal	Tinggi	Singkat	Banyak	Tinggi
R49	Normal	Tinggi	Normal	Sedikit	Normal
R50	Normal	Tinggi	Normal	Normal	Tinggi
R51	Normal	Tinggi	Normal	Banyak	Tinggi
R52	Normal	Tinggi	Lama	Sedikit	Normal
R53	Normal	Tinggi	Lama	Normal	Tinggi
R54	Normal	Tinggi	Lama	Banyak	Tinggi
R55	Tinggi	Rendah	Singkat	Sedikit	Normal
R56	Tinggi	Rendah	Singkat	Normal	Normal
R57	Tinggi	Rendah	Singkat	Banyak	Tinggi
R58	Tinggi	Rendah	Normal	Sedikit	Normal
R59	Tinggi	Rendah	Normal	Normal	Tinggi
R60	Tinggi	Rendah	Normal	Banyak	Tinggi
R61	Tinggi	Rendah	Lama	Sedikit	Normal
R62	Tinggi	Rendah	Lama	Normal	Tinggi
R63	Tinggi	Rendah	Lama	Banyak	Tinggi
R64	Tinggi	Normal	Singkat	Sedikit	Normal
R65	Tinggi	Normal	Singkat	Normal	Normal
R66	Tinggi	Normal	Singkat	Banyak	Tinggi
R67	Tinggi	Normal	Normal	Sedikit	Normal
R68	Tinggi	Normal	Normal	Normal	Tinggi
R69	Tinggi	Normal	Normal	Banyak	Tinggi
R70	Tinggi	Normal	Lama	Sedikit	Normal

Berdasarkan studi kasus, *rule* yang aktif adalah **R36** dan **R63**.

5. Tahap inferensi adalah inti dari sistem pengambilan keputusan fuzzy. Masing-masing aturan/*rule* fuzzy menghasilkan dua proses utama:

- 1) Perhitungan α -predikat, yaitu derajat kebenaran dari tiap aturan, diperoleh dari nilai minimum keanggotaan pada bagian kondisi (premis).
- 2) Perhitungan nilai crisp (z), yaitu hasil numerik dari konsekuen aturan berdasarkan α -predikat tersebut.

Output tiap aturan akan berupa satu nilai suhu (z) yang telah ditentukan berdasarkan kondisi input yang dikenali. Dari hasil perhitungan sebelumnya, diperoleh derajat keanggotaan pH susu $\mu_{Normal}(6.65) = 0.5$ dan $\mu_{Tinggi}(6.65) = 0.25$, kadar lemak $\mu_{Rendah}(0.8) = 0.85$, waktu fermentasi $\mu_{Lama}(10) = 0.333$, dan starter bakteri $\mu_{Banyak}(2.8) = 0.8$, serta *rule* yang aktif adalah R36 dan R63.

Penyelesaian Langkah Inferensi

a. Nilai α -predicate

Berdasarkan persamaan (1), perhitungan α -predikat pada studi kasus ini adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\alpha_i &= \min(\mu_{pH \text{ susu}}, \mu_{kadar \text{ lemak}}, \mu_{waktu \text{ fermentasi}}, \mu_{starter \text{ bakteri}}) \quad (8) \\ \alpha_{36} &= \min(0.5, 0.85, 0.33, 0.8) \\ \alpha_{63} &= \min(0.25, 0.85, 0.33, 0.8)\end{aligned}$$

Jadi, nilai α_i R36 = 0.333 dan α_i R63 = 0.25

b. Nilai crisp (z)

Berdasarkan persamaan (2) dan persamaan (3), perhitungan α -predikat pada studi kasus ini adalah sebagai berikut.

$$z_i = \alpha_i(45 - 36) + 36 \quad (9)$$

Perhitungan z_i R36 dan R63 Suhu Fermentasi Tinggi:

$$\begin{aligned}z_{36} &= 0.333(45 - 39) + 39 = 0.333(9) + 36 = 2.997 + 36 = 38.997 = 39 \\ z_{63} &= 0.25(45 - 36) + 36 = 0.25(9) + 36 = 2.25 + 36 = 38.25\end{aligned}$$

Jadi, nilai $z_{36} = 39$ dan $z_{63} = 38.25$.

6. Setelah semua aturan menghasilkan output z dan α -predikat, sistem akan menggabungkan semua hasil tersebut menggunakan metode rata-rata terbobot (weighted average). Hasil akhir dari proses ini adalah satu nilai suhu yang bersifat tegas (crisp), yang mewakili suhu fermentasi optimal.

Berdasarkan persamaan (4), perhitungan Z pada studi kasus ini adalah sebagai berikut.

$$Z = \frac{(0.333 \cdot 39) + (0.25 \cdot 38.25)}{0.333 + 0.25} = \frac{12.987 + 9.5625}{0.583} = \frac{21.987}{0.583} = 38.678 = 38.68$$

Jadi, output berupa suhu fermentasi ideal dihitung sebesar $\pm 38.68^\circ\text{C}$, termasuk dalam suhu fermentasi kategori tinggi.

7. Hasil akhir yang ditampilkan oleh sistem adalah rekomendasi suhu fermentasi, yaitu 38.68°C . Nilai ini sudah mempertimbangkan semua input yang diberikan dan diproses melalui logika fuzzy secara sistematis.

8. Tahap akhir dari proses bisnis ini adalah penerapan hasil keputusan ke dalam praktik produksi, baik sebagai masukan otomatis untuk alat pengatur suhu fermentasi (seperti termostat atau kontroler suhu), maupun sebagai rekomendasi bagi operator produksi. Implementasi ini memastikan hasil simulasi fuzzy benar-benar digunakan untuk meningkatkan efisiensi dan konsistensi mutu yoghurt yang dihasilkan.

Simpulan

Berdasarkan penelitian yang kami lakukan, dapat disimpulkan bahwa penerapan metode Fuzzy Tsukamoto dalam sistem pendukung keputusan terbukti efektif untuk menentukan suhu fermentasi ideal dalam proses pembuatan yoghurt. Dengan mempertimbangkan variabel-variabel penting seperti pH susu, kadar lemak, waktu fermentasi, dan konsentrasi starter bakteri, sistem ini mampu memberikan rekomendasi suhu yang logis dan konsisten. Hasil akhir berupa suhu optimal sebesar 38.68°C yang dihasilkan tidak hanya membantu meningkatkan kualitas yoghurt, tetapi juga memberikan dasar pengambilan keputusan yang lebih objektif dibandingkan metode manual atau berdasarkan intuisi semata.

Daftar Pustaka

- Albahry, A., & Chandra, A. Y. (2024). Rancang Bangun Sistem Prediksi Penjualan Berbasis Web Dengan Metode Single Moving Average. *Jurnal SITECH*, 7(1). <http://www.jurnal.Umk.Ac.Id/Sitech>
- Astuti, D. P. P. (2020). Penerapan Metode Fuzzy Tsukamoto Dan Fuzzy Sugeno Dalam Penentuan Harga Jual Sepeda Motor Bekas (Studi Kasus: Showroom Mulyo Motor). *Journal of Mathematics*, 9(2). <https://doi.org/doi.org/10.15294/ujm.v9i2.33434>
- Budiman, A., Lestari, Y. D., & Eka, M. (2024). Penerapan Metode MAUT dalam Pemilihan Peminatan pada Program Studi Teknik Informatika. *Jurnal Unitek*, 17(2).
- Burhanuddin, A., Nugraha, F., Fithri, D. L., Handayani, K. P., & Susanti, N. (2023). Pemanfaatan Teknologi Qr Code Untuk Sistem Informasi Kependudukan Di Desa Pilangrejo Penulis Korespondensi. *Jurnal SITECH*, 6(2). <http://www.jurnal.umk.ac.id/sitech>
- Dewi, A. R., Sembiring, B. O., Sinaga, T. H., & Rahayu, E. (2024). Analisis Sistem Pendukung Keputusan dalam Penentuan Pemilihan Asisten Laboratorium Komputer Menggunakan Metode Electre. *Jurnal Unitek*, 17(2), 2024. <https://doi.org/10.52072/unitek.v17i2.1024>
- Filla, S. U., Kurniawan, R. R., & Suhardi. (2024). Prototype Alat Pengatur Temperatur Ruang Kerja Pada Rumah Menggunakan Logika Fuzzy Tsukamoto Berbasis Iot. *Journal of Science and Social Research*, 7(1), 68–77. <http://jurnal.goretanpena.com/index.php/JSSR>
- Harahap, A. M. (2022). Analisa Dan Perancangan Aplikasi Fuzzy Untuk Menentukan Angka Kepuasan Pelanggan Pada Pengolahan Susu Murni “Freak Milk” Berbasis Web Dengan Menggunakan Metode Tsukamoto. *Jurnal ESTUPRO*, 7(2). <https://jurnal.ugn.ac.id/index.php/ESTUPRO/article/view/1108>
- Jati, W. A., Alfari, S. A., Uda’a, R. A., & Anindita, N. S. (2024). Inovasi fermentasi yogurt fungsional dengan penambahan ekstrak rempah secang. *Prosiding*

- Seminar Nasional Penelitian Dan Pengabdian Kepada Masyarakat*, 2. <https://proceeding.unisayogya.ac.id/index.php/prosemnaslppm/article/view/647>
- Noviatanti Nabilah, F., Listiyowati, S., & Astuti, R. I. (2022). Diversitas Pangan Fermentasi Berbasis-Susu di Indonesia dan Kandungan Gizinya. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 27(4), 552–561. <https://doi.org/10.18343/jipi.27.4.552>
- Nugroho, G. B. S., Rolliawati, D., & Yusuf, A. (2021). Sistem Pendukung Keputusan Asesmen Rehabilitasi Narkotika Menggunakan Metode Random Forest. *Jurnal SITECH*, 4(1). <http://www.jurnal.umk.ac.id/sitech>
- Pangestu, A. D., Kurniawan, & Supriyadi. (2021). The Effect Of Temperature Variation And Storage Time On The Viability Of Latic Acid Bacteria (Lab) And Ph Value Of Yoghurt. *Borneo Journal of Medical Laboratory Technology (BJMLT)*, 3(2), 231–236. <http://journal.umpalangkaraya.ac.id/index.php/bjmlt>
- Purnomo, D., Apridamayanti, P., & Sari, R. (2021). Potensi antibakteri dari susu fermentasi dengan starter *Lactobacillus casei* terhadap *Escherichia coli* dan *Staphylococcus aureus*. *Jurnal Cerebellum*, 6(2), 31. <https://doi.org/10.26418/jc.v6i2.45301>
- Ramadhani, D. Y., Murtono, A., & Saukani, I. (2024). Sistem Kendali Suhu Susu Pada Pembuatan Yoghurt. 4(1). <https://doi.org/10.8734/Kohesi.v1i2.365>
- Sariangsah, H. (2024). Perancangan Sistem Pendukung Keputusan dalam Menentukan Menu Makanan untuk Penderita Batu Ginjal. *Jurnal Unitek*, 17(1), 2024. <https://doi.org/10.52072/unitek.v17i1.800>
- Setiawan, A., Yanto, B., & Yasdomi, K. (2018). *Logika Fuzzy Dengan Matlab (Contoh Kasus Penelitian Penyakit Bayi dengan Fuzzy Tsukamoto)*. Jayapangus Press. <http://jayapanguspress.org>
- Suhendri, Susanti, D., & Hanggara, R. R. (2022). Implementasi Algoritma Fuzzy Tsukamoto Pada Sistem Pendukung Keputusan Penentuan Penerima Bantuan Program Keluarga Harapan (Pkh) Di Kabupaten Majalengka. *Infotech Journal*, 8(2), 84–93. <https://doi.org/10.31949/infotech.v8i2.3312>
- 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>
- Susanti, S., & Nawangsit, G. R. (2023). Penerapan Metode Fuzzy Tsukamoto Pada Sistem Pendukung Keputusan Penentuan Pemberian Beasiswa. *JIKA (Jurnal Informatika)*, 7(3), 248. <https://doi.org/10.31000/jika.v7i3.7626>
- Utami, M. M. D., Pantaya, D., Subagja, H., Ningsih, N., & Dewi, A. C. (2020). Teknologi Pengolahan Yoghurt Sebagai Diversifikasi Produk Susu Kambing pada Kelompok Ternak Desa Wonoasri Kecamatan Tempurejo Kabupaten Jember. *PRIMA: Journal of Community Empowering and Services*, 4(1), 30. <https://doi.org/10.20961/prima.v4i1.39531>
- Wardhani, S. A., Haris, H., & Fanani, M. Z. (2023). Kajian Produk Olahan Susu Fermentasi. *Jurnal Ilmiah Pangan Halal*, 5(1), 34–37. <https://doi.org/10.30997/jiph.v5i1.10001>
- Zahirah, R. P. W., Adiningtias, M. N., Millennialita, F., Sulistiaputri, R. B., & Athiyah, U. (2022). Sistem Pendukung Pengambilan Keputusan Jumlah Produksi Barang Metode Fuzzy Tsukamoto. *Jurnal Informatika & Rekayasa Elektronika*, 5(2). <http://e-journal.stmiklombok.ac.id/index.php/jireISSN.2620-6900>