

Desain Sistem Penentuan Kualitas Cuka Apel dengan Metode *Fuzzy Inference System (FIS) Tipe 1 dan Tipe 2*

Design of a Quality Assessment System for Apple Cider Vinegar Using Type 1 and Type 2 Fuzzy Inference Systems (FIS)

Fina Pradika Putri^{1*}, Odi Andanu²

¹Program Studi Agroindustri, Jurusan Teknologi Industri Pertanian, Politeknik Negeri Tanah Laut

²Program Studi Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Palangka Raya

*Email: fina@politala.ac.id

Naskah diterima: 31 Januari 2025; Naskah disetujui: 26 Juni 2025

ABSTRACT

Apple cider vinegar is a natural product produced through the alcoholic fermentation of apples. The quality of apple cider vinegar is influenced by several factors, such as pH, sugar concentration, and yeast content used in the fermentation process. Accurate quality determination requires a method that can handle uncertainty in these parameters. One such method is the Fuzzy Inference System (FIS), which can manage both linguistic and numerical uncertainties. This study develops a quality assessment system for apple cider vinegar using two types of FIS, type 1 and type 2. Type 1 FIS is used to address lower levels of uncertainty, while type 2 FIS is designed to handle more complex uncertainties. The results show that type 2 FIS is more effective in determining the quality of apple cider vinegar as it can accommodate various levels of uncertainty in the inputs and produce more accurate decisions.

Keywords: apple cider vinegar, quality, fuzzy inference system

ABSTRAK

Cuka apel adalah produk alami yang dihasilkan melalui proses fermentasi alkohol dari bahan baku apel. Kualitas cuka apel dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti pH, konsentrasi gula, dan jumlah ragi yang digunakan dalam proses fermentasi. Penentuan kualitas cuka apel yang akurat memerlukan metode yang mampu menangani ketidakpastian dalam parameter-parameter tersebut. Salah satu metode yang dapat digunakan adalah Sistem Inferensi Fuzzy (FIS), yang dapat menangani ketidakpastian linguistik dan numerik. Dalam penelitian ini, desain sistem penentuan kualitas cuka apel dikembangkan menggunakan dua tipe FIS, yaitu FIS tipe 1 dan tipe 2. FIS tipe 1 digunakan untuk menangani ketidakpastian dengan tingkat rendah, sementara FIS tipe 2 dirancang untuk menangani ketidakpastian yang lebih kompleks. Hasil penelitian menunjukkan bahwa FIS tipe 2 lebih efektif dalam menentukan kualitas cuka apel karena dapat menangani berbagai tingkat ketidakpastian pada input dan menghasilkan keputusan yang lebih tepat.

Kata kunci: cuka apel, kualitas, sistem inferensi fuzzy

PENDAHULUAN

Cuka adalah larutan berasa asam yang dihasilkan melalui fermentasi alkohol dengan bantuan bakteri asam asetat (Illy *et al.*, 2016). Dalam industri pengolahan pangan, cuka banyak digunakan sebagai bahan penambah cita rasa dalam masakan, pembangkit *flavor*, dan pengawet makanan (Afrianti, 2013). Cuka terdapat dua jenis, yaitu sintetis dan alami. Cuka yang beredar di pasar biasanya dibuat melalui proses sintetis (kimiawi), sedangkan cuka alami terbuat dari fermentasi sayuran, buah, dan biji-bijian sehingga lebih sehat (Priasty *et al.*, 2013). Salah satu contoh cuka alami adalah cuka apel.

Apel merupakan salah satu buah yang dapat dibudidayakan dengan baik di Indonesia. Apel banyak digemari oleh masyarakat Indonesia. Tetapi apel bersifat *perishable* (mudah rusak), yaitu apabila setelah dipanen tidak langsung ada penanganan lebih lanjut akan menyebabkan kerusakan dan penurunan mutu. Hal tersebut menyebabkan munculnya ide untuk memanfaatkan apel sebagai bahan baku utama pembuatan cuka melalui fermentasi. Apel khas Indonesia seperti apel *Rome Beauty* dan apel Manalagi memiliki komponen asam dan gula yang tinggi sehingga sesuai sebagai media pertumbuhan bakteri asam asetat.

Cuka apel (*apple cider vinegar*) diproduksi melalui fermentasi alkohol oleh bakteri asam asetat. Proses fermentasi melibatkan etanol sebagai substrat, yang kemudian dioksidasi oleh enzim menjadi asam asetat. Secara biokimia, etanol diubah menjadi asam asetat melalui dua tahap oksidasi. Alkohol dehidrogenase mengubah etanol menjadi asetaldehid, lalu aldehid dehidrogenase mengoksidasi asetaldehid menjadi asam asetat (Caturryanti *et al.*, 2008).

Cuka apel dikenal memiliki sifat antimikroba yang dapat membantu menghambat pertumbuhan bakteri dan jamur dalam saluran pencernaan sehingga mendukung fungsi pencernaan yang lebih baik, serta meningkatkan penyerapan nutrisi di usus. Selain itu, kandungan pektin (sejenis serat larut air) di dalamnya bermanfaat dalam mengikat air, lemak, toksin, dan kolesterol di saluran pencernaan, lalu mengeluarkannya bersama sisa metabolisme (Nurhayati *et al.*, 2018). Tren hidup sehat saat ini membuat banyak orang beralih dari pengobatan kimia ke pengobatan alami seperti cuka apel sehingga cuka apel banyak diproduksi sebagai pangan fungsional (Yulianti *et al.*, 2007).

Produksi cuka apel tentu perlu memperhatikan kualitasnya secara umum. Perbedaan komposisi pada proses pembuatan cuka apel akan menghasilkan cuka apel yang berbeda kualitasnya. Kualitas cuka apel sangat dipengaruhi pada substansi yang digunakan.

Pada dasarnya kualitas dari cuka dapat dilihat dari nilai pH, konsentrasi gula, dan jumlah ragi yang diperlukan dalam pembuatan cuka apel. Ketiga parameter tersebut menjadi penentu kualitas cuka apel karena berpengaruh langsung terhadap karakteristik fisik, kimia, dan mikrobiologis produk akhir.

Nilai pH merupakan indikator utama kematangan dan keasaman cuka, dimana nilai pH rendah menandakan kandungan asam asetat yang tinggi dan ketahanan terhadap mikroba (Ho *et al.*, 2017). Konsentrasi gula sebagai bahan dasar fermentasi memengaruhi laju proses fermentasi alkohol menjadi asam asetat (Ozturk *et al.*, 2015). Sementara itu, jumlah ragi harus tepat karena kekurangan ragi menyebabkan fermentasi tidak optimal, sedangkan terlalu banyak ragi dapat menghasilkan rasa atau aroma yang tidak diinginkan (Bamforth, 2009).

Penentuan parameter yang mempengaruhi kualitas cuka apel tidak menentu dan menimbulkan ketidakpastian. Ketidakpastian dalam menentukan parameter ini muncul karena proses fermentasi bergantung pada banyak faktor seperti suhu dan udara. Oleh karena itu, diperlukan sebuah metode untuk memaksimalkan nilai pH, konsentrasi gula, dan jumlah ragi agar didapatkan kualitas cuka apel terbaik. Salah satu metode yang dapat digunakan adalah dengan logika fuzzy.

Logika fuzzy merupakan sebuah pendekatan komputasional yang mampu menangani sistem analisis dengan efektif, khususnya dalam menyelesaikan persoalan-persoalan yang mengandung unsur ketidakpastian. Metode ini banyak diaplikasikan untuk membangun pemetaan sistem dari masukan (input) menuju keluaran (output) yang diinginkan (Sumitre dan Kurniawan, 2014). Logika fuzzy memetakan sebuah ruang input ke dalam ruang output dengan menggunakan IF-THEN rules. Pemetaan dilakukan dalam suatu Sistem Inferensi Fuzzy (*Fuzzy Inference System/FIS*) yang merupakan sistem untuk mengevaluasi semua rule secara simultan dalam menghasilkan kesimpulan (Yulmaini, 2015).

Secara teoritis, FIS terbagi menjadi dua tipe, yaitu FIS tipe 1 dan FIS tipe 2 yang berbeda dalam cara menangani derajat keanggotaan dan ketidakpastian data (Mendel, 2015). Pada FIS tipe 1, digunakan himpunan fuzzy konvensional dimana derajat keanggotaan suatu variabel dinyatakan dalam nilai tunggal antara 0 dan 1. Namun, pendekatan ini memiliki keterbatasan ketika menghadapi ketidakpastian yang tinggi atau variasi data yang dinamis (Karnik dan Mendel, 2001). Sedangkan pada FIS tipe 2, derajat keanggotaan tidak lagi berupa nilai tunggal, melainkan suatu interval. Hal ini

memungkinkan sistem untuk lebih adaptif terhadap noise data, ketidakpastian pengukuran, atau perubahan kondisi lingkungan (Wu dan Mendel, 2007).

Penelitian ini menggunakan kedua tipe FIS untuk melihat karakteristik proses fermentasi cuka apel. Pemilihan untuk menguji kedua tipe ini didasarkan pada pertimbangan bahwa parameter kualitas cuka apel (pH, gula, ragi) memiliki derajat ketidakpastian yang bervariasi, namun belum dapat diprediksi apakah ketidakpastian tersebut bersifat sederhana atau kompleks. Selain itu, belum terdapat studi komprehensif yang secara langsung membandingkan efektivitas kedua tipe FIS dalam konteks fermentasi cuka apel. Hasil perbandingan ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi berbasis data mengenai tipe FIS yang paling sesuai untuk aplikasi produksi cuka apel skala kecil maupun industri. Berdasarkan permasalahan tersebut maka tujuan dari penelitian ini adalah untuk membuat desain sistem penentuan kualitas cuka apel dengan menggunakan penerapan metode *Fuzzy Inference System* (FIS) tipe 1 dan tipe 2.

METODE PENELITIAN

Logika Fuzzy

Logika fuzzy pertama kali dikembangkan pada tahun 1965 oleh Lotfi A. Zadeh, seorang profesor di University of California, Berkeley. Profesor Zadeh mengusulkan pendekatan baru untuk memproses informasi yang bersifat linguistik dan tidak pasti. Beliau mengkritisi keterbatasan logika biner konvensional yang hanya mengenal dua nilai kebenaran mutlak (benar/salah atau 1/0), sementara dalam realitas banyak terdapat kondisi antara (*intermediate*) yang tidak dapat dijelaskan secara memadai oleh sistem biner tersebut.

Profesor Zadeh memperkenalkan konsep himpunan fuzzy sebagai perluasan dari teori himpunan klasik untuk mengatasi keterbatasan tersebut. Berbeda dengan himpunan tradisional yang bersifat diskrit (anggota atau bukan anggota), himpunan fuzzy memungkinkan derajat keanggotaan bernilai kontinu antara 0 dan 1. Inovasi ini memungkinkan representasi matematis dari konsep-konsep linguistik seperti "agak panas", "cukup tinggi", atau "sedikit asam" yang sering muncul dalam sistem nyata tetapi sulit dimodelkan secara konvensional.

Konsep dari logika fuzzy terletak pada teori himpunan fuzzy, dimana konsep derajat keanggotaan (*membership degree*) memegang peranan penting. Berbeda dengan himpunan klasik yang bersifat biner, himpunan fuzzy menggunakan fungsi keanggotaan

(*membership function*) sebagai karakteristik utama dalam proses penalarannya. Fungsi ini mengkuantifikasi sejauh mana suatu elemen termasuk dalam suatu himpunan tertentu (Sumitre dan Kurniawan, 2014).

Fuzzy Inference System (FIS)

Fuzzy Inference System (FIS) merupakan kerangka komputasi berbasis teori himpunan fuzzy yang terdiri dari tiga komponen utama, yaitu himpunan fuzzy, aturan fuzzy IF-THEN, dan mekanisme penalaran fuzzy. Proses dalam FIS dimulai dengan memasukkan input tegas yang kemudian diproses melalui basis pengetahuan berisi aturan-aturan fuzzy. Sistem akan menghitung *fire strength* (derajat kebenaran) untuk setiap aturan sebelum melakukan inferensi dan defuzzifikasi untuk menghasilkan output tegas (Kusumadewi dan Purnomo, 2004).

Keunggulan FIS terletak pada kemampuannya memproses konsep linguistik menjadi himpunan fuzzy, melakukan pemetaan input-output nonlinear, integrasi pengetahuan pakar dalam bentuk aturan, serta memiliki semantik yang tinggi dengan kemampuan generalisasi yang baik (Guillaume, 2001).

Sistem logika fuzzy terbagi menjadi dua tipe, yaitu FIS tipe 1 dan FIS tipe 2. FIS tipe 1 paling banyak digunakan namun memiliki keterbatasan dalam menangani ketidakpastian tingkat tinggi yang sering ditemui dalam aplikasi nyata (Melin dan Castillo 2014). Sistem ini tidak dapat sepenuhnya menangani ketidakpastian linguistik dan numerik dalam lingkungan yang dinamis (Faizal *et al.*, 2013). FIS tipe 2 dikembangkan untuk mengatasi keterbatasan tipe 1 dengan kemampuan menangani ketidakpastian dan ketidaktepatan data yang lebih baik. Sistem ini sangat berguna ketika menghadapi kesulitan dalam menentukan fungsi keanggotaan yang tepat atau memodelkan berbagai persepsi yang berbeda (Wu dan Tan, 2005). Dengan struktur yang lebih kompleks, FIS tipe 2 dianggap lebih potensial dalam memodelkan ketidakpastian (Allawi, 2014).

Fungsi Fuzzy

Fungsi fuzzy ditentukan dengan membuat rumus fungsi fuzzy sebagai berikut:

$$C = f(P, G, R)$$

Keterangan:

C : skor kualitas cuka apel (output)

P : nilai pH (input)

G : konsentrasi gula (input)

R : berat ragi (input)

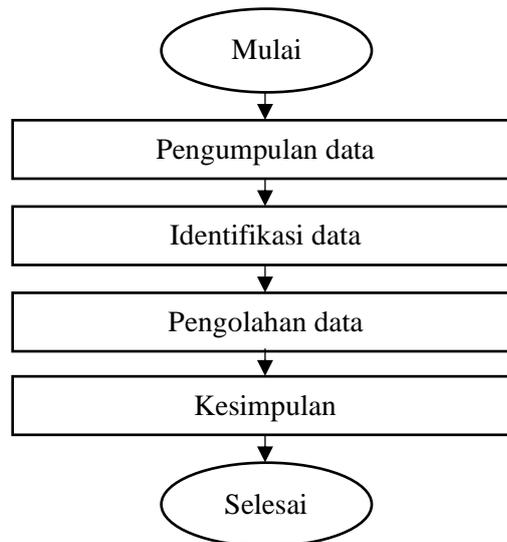
Kualitas cuka apel dimodelkan dalam fungsi fuzzy dengan mengintegrasikan tiga parameter input, yaitu pH (P), konsentrasi gula (G), dan berat ragi (R). Sistem menghasilkan output berupa skor kualitas cuka apel dengan range nilai 1 – 10, dimana semakin tinggi nilai skor maka kualitas cuka apel semakin baik.

Berdasarkan literatur, range masing-masing fungsi input sebagai berikut:

1. Nilai pH cuka apel adalah 1 – 5 (Atro *et al.*, 2015)
2. Konsentrasi gula pada cuka apel adalah 0% – 15% (Atro *et al.*, 2015)
3. Berat ragi yang diperlukan dalam membuat cuka apel adalah 5 gr – 20 gr (Priasty *et al.*, 2013)

Tahapan Penelitian

Sistem dirancang dengan 3 input, 1 output, dan 27 aturan untuk mengevaluasi kualitas cuka apel, dengan tahapan penelitian seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Tahapan penelitian

Pada Gambar 1 tahapan penelitian dijelaskan sebagai berikut:

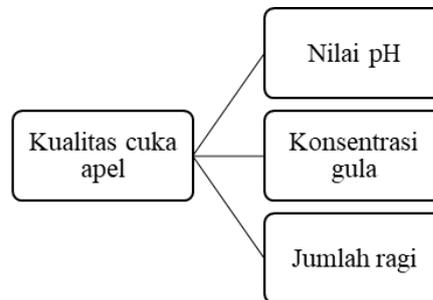
1. Pengumpulan data, dilakukan untuk mengetahui parameter yang mempengaruhi kualitas cuka apel.
2. Identifikasi data, dilakukan untuk menentukan variabel dan semesta pembicaraan yang digunakan dalam melakukan perhitungan dan analisis masalah.

3. Pengolahan data, dilakukan untuk mendapatkan hasil kualitas cuka apel terbaik. Pengolahan data dilakukan dengan bantuan software MATLAB menggunakan failitas pada toolbox fuzzy. Proses fuzzy terdiri dari pembentukan himpunan fuzzy (*fuzzification*), evaluasi rule fuzzy untuk menghasilkan output dari tiap rule (*inferensi*), penentuan kombinasi dari output semua rule (*composition*), dan perhitungan *crisp* output (*defuzzification*).
4. Kesimpulan, dilakukan untuk menarik hasil akhir berdasarkan analisis data.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kerangka Desain Sistem

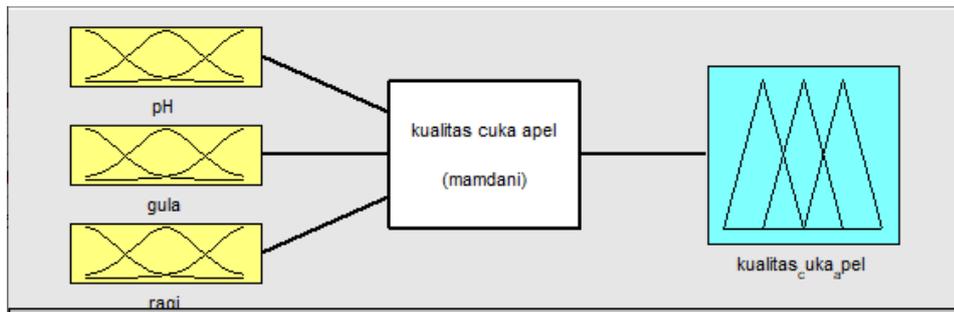
Desain sistem untuk penentuan kualitas cuka apel dirancang berbasis pengetahuan dengan pendekatan sistem pendukung keputusan menggunakan fungsi keanggotaan variabel linguistik untuk memetakan parameter input (pH, gula, ragi) menjadi output kualitas berdasarkan aturan-aturan fuzzy. Diagram penentuan kualitas cuka apel dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram penentuan kualitas cuka apel

Fuzzy Tipe 1

Implementasi menggunakan program MATLAB dilakukan dengan memasukkan data dan variabel yang telah ditentukan untuk mengetahui kualitas cuka apel. Rancangan sistem fuzzy tipe 1 penentuan kualitas cuka apel dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Rancangan sistem fuzzy tipe 1 penentuan kualitas cuka apel

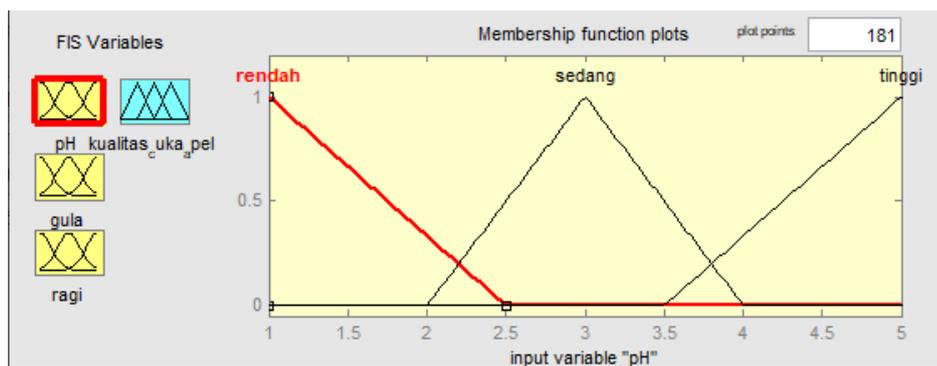
Sistem penentuan kualitas cuka apel ini bekerja melalui tiga tahap. Pertama, memasukkan input berupa parameter, yaitu pH, konsentrasi gula, dan jumlah ragi. Kedua, melakukan proses inferensi menggunakan 27 aturan IF-THEN yang dikembangkan berdasarkan pengetahuan pakar. Ketiga, menghasilkan output berupa skor kualitas cuka apel.

Input Fuzzy Tipe 1

Pada desain sistem fuzzy tipe 1, terdapat 3 input variabel yang terdiri atas data nilai pH, konsentrasi gula, dan jumlah ragi. Lebih jelasnya akan diuraikan sebagai berikut:

1. pH

Variabel nilai pH rendah [1 1 2.5], sedang [2 3 4], dan tinggi [3.5 5 5]. Fungsi keanggotaan dari variabel fuzzy tipe 1 untuk nilai pH dapat dilihat pada Gambar 4.



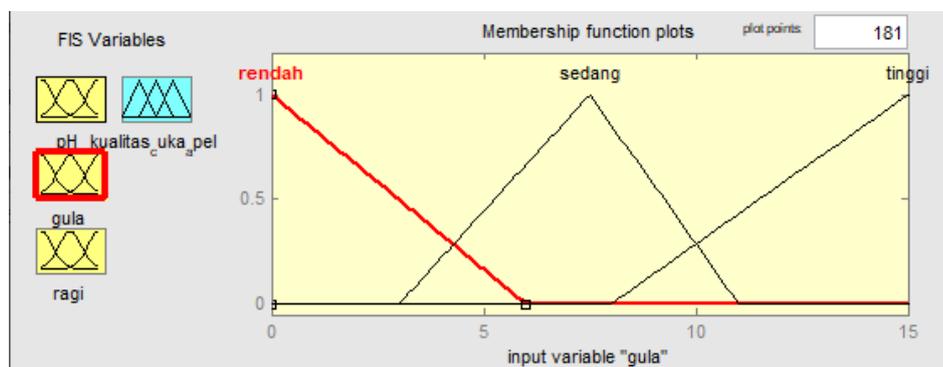
Gambar 4. Fungsi variabel fuzzy tipe 1 untuk nilai pH

Variabel pH dalam sistem ini diklasifikasikan menjadi tiga kategori fuzzy, yaitu nilai rendah menunjukkan kondisi asam kuat, nilai sedang menunjukkan tingkat keasaman optimal untuk fermentasi, dan nilai tinggi menunjukkan kondisi mendekati netral. Fungsi keanggotaan ini dibuat untuk menangkap karakteristik pH dalam proses fermentasi cuka

apel, dimana rentang 2-3.5 merupakan zona optimal bagi aktivitas bakteri asam asetat. Menurut Atro *et al.* (2015), nilai pH ideal cuka apel berada pada kisaran 2.8-3.4. Nilai pH di bawah 2.5 menunjukkan keasaman berlebihan yang dapat mempengaruhi rasa, sedangkan nilai pH di atas 3.5 menandakan proses fermentasi yang tidak sempurna.

2. Konsentrasi Gula

Variabel konsentrasi gula rendah [0 0 6], sedang [3 7.5 11], dan tinggi [8 15 15]. Fungsi keanggotaan dari variabel fuzzy tipe 1 untuk konsentrasi gula dapat dilihat pada Gambar 5.

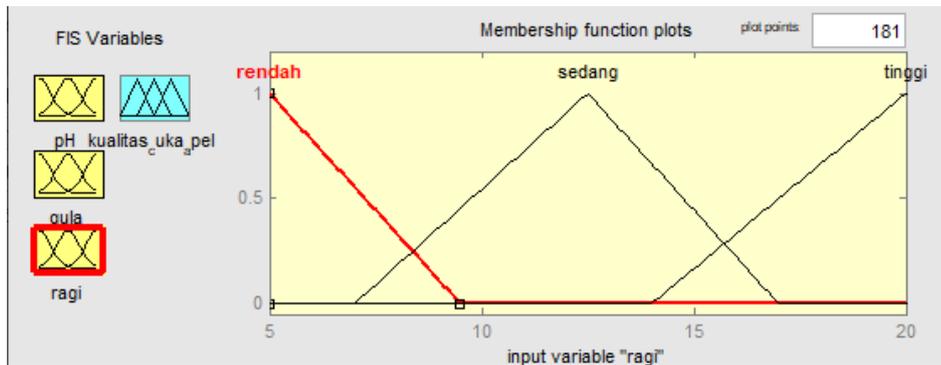


Gambar 5. Fungsi variabel fuzzy tipe 1 untuk konsentrasi gula

Variabel konsentrasi gula dalam sistem ini diklasifikasikan menjadi tiga kategori fuzzy, yaitu konsentrasi rendah menunjukkan kondisi substrat kurang yang menyebabkan fermentasi lambat, konsentrasi sedang menunjukkan kisaran optimal untuk produksi asam asetat, dan konsentrasi tinggi menunjukkan risiko kontaminasi mikroba akibat kelebihan substrat. Fungsi keanggotaan ini dibuat untuk memetakan pengaruh linear konsentrasi gula terhadap kualitas fermentasi. Menurut Atro *et al.* (2015), konsentrasi gula 7.5-11% menghasilkan yield asam asetat tertinggi. Konsentrasi di bawah 6% menyebabkan fermentasi tidak sempurna, sedangkan konsentrasi gula di atas 12% berpotensi menghambat aktivitas bakteri asam asetat.

3. Jumlah Ragi

Variabel jumlah ragi rendah [5 5 9.5], sedang [7 12.5 17], dan tinggi [14 20 20]. Fungsi keanggotaan dari variabel fuzzy tipe 1 untuk jumlah ragi dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Fungsi variabel fuzzy tipe 1 untuk jumlah ragi

Variabel jumlah ragi dalam sistem ini diklasifikasikan menjadi tiga kategori fuzzy, yaitu jumlah rendah menunjukkan inokulum yang kurang untuk memulai fermentasi optimal, jumlah sedang menunjukkan jumlah optimal untuk produksi etanol, dan jumlah tinggi menunjukkan kondisi *over-fermentasi* yang dapat menghasilkan flavor tidak diinginkan. Fungsi keanggotaan ini dibuat untuk mengangani variasi kebutuhan ragi berdasarkan skala produksi. Menurut Priasty *et al.* (2013), jumlah ragi 10-15 gr per liter substrat menghasilkan konversi gula-etanol paling efisien. Jumlah di bawah 7 gr menyebabkan fermentasi lambat, sedangkan jumlah ragi di atas 17 gr berpotensi menimbulkan *off-flavor* akibat produksi metabolit sekunder yang berlebihan.

Rule Base Fuzzy Tipe 1

Penyusunan rule base didasarkan pada jumlah variabel yang telah ditetapkan kemudian dilakukan kombinasi sehingga didapatkan 27 aturan dalam penentuan kualitas cuka apel. Rule base fuzzy tipe 1 penentuan kualitas cuka apel dapat dilihat pada Gambar 7.

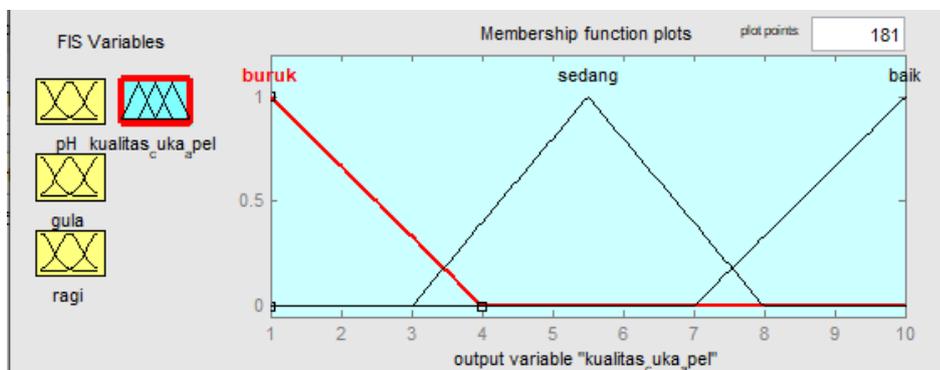
1. If (pH is rendah) and (gula is rendah) and (ragi is rendah) then (kualitas_cuka_apel is baik) (1)
2. If (pH is rendah) and (gula is rendah) and (ragi is sedang) then (kualitas_cuka_apel is baik) (1)
3. If (pH is rendah) and (gula is rendah) and (ragi is tinggi) then (kualitas_cuka_apel is sedang) (1)
4. If (pH is rendah) and (gula is sedang) and (ragi is rendah) then (kualitas_cuka_apel is baik) (1)
5. If (pH is rendah) and (gula is sedang) and (ragi is sedang) then (kualitas_cuka_apel is sedang) (1)
6. If (pH is rendah) and (gula is sedang) and (ragi is tinggi) then (kualitas_cuka_apel is buruk) (1)
7. If (pH is rendah) and (gula is tinggi) and (ragi is rendah) then (kualitas_cuka_apel is sedang) (1)
8. If (pH is rendah) and (gula is tinggi) and (ragi is sedang) then (kualitas_cuka_apel is sedang) (1)
9. If (pH is rendah) and (gula is tinggi) and (ragi is tinggi) then (kualitas_cuka_apel is sedang) (1)
10. If (pH is sedang) and (gula is rendah) and (ragi is rendah) then (kualitas_cuka_apel is baik) (1)
11. If (pH is sedang) and (gula is rendah) and (ragi is sedang) then (kualitas_cuka_apel is baik) (1)
12. If (pH is sedang) and (gula is rendah) and (ragi is tinggi) then (kualitas_cuka_apel is sedang) (1)
13. If (pH is sedang) and (gula is sedang) and (ragi is rendah) then (kualitas_cuka_apel is baik) (1)
14. If (pH is sedang) and (gula is sedang) and (ragi is sedang) then (kualitas_cuka_apel is baik) (1)
15. If (pH is sedang) and (gula is sedang) and (ragi is tinggi) then (kualitas_cuka_apel is sedang) (1)
16. If (pH is sedang) and (gula is tinggi) and (ragi is rendah) then (kualitas_cuka_apel is sedang) (1)
17. If (pH is sedang) and (gula is tinggi) and (ragi is sedang) then (kualitas_cuka_apel is buruk) (1)
18. If (pH is sedang) and (gula is tinggi) and (ragi is tinggi) then (kualitas_cuka_apel is buruk) (1)
19. If (pH is tinggi) and (gula is rendah) and (ragi is rendah) then (kualitas_cuka_apel is sedang) (1)
20. If (pH is tinggi) and (gula is rendah) and (ragi is sedang) then (kualitas_cuka_apel is sedang) (1)
21. If (pH is tinggi) and (gula is rendah) and (ragi is tinggi) then (kualitas_cuka_apel is buruk) (1)
22. If (pH is tinggi) and (gula is sedang) and (ragi is rendah) then (kualitas_cuka_apel is sedang) (1)
23. If (pH is tinggi) and (gula is sedang) and (ragi is sedang) then (kualitas_cuka_apel is buruk) (1)
24. If (pH is tinggi) and (gula is sedang) and (ragi is tinggi) then (kualitas_cuka_apel is buruk) (1)
25. If (pH is tinggi) and (gula is tinggi) and (ragi is rendah) then (kualitas_cuka_apel is buruk) (1)
26. If (pH is tinggi) and (gula is tinggi) and (ragi is sedang) then (kualitas_cuka_apel is buruk) (1)
27. If (pH is tinggi) and (gula is tinggi) and (ragi is tinggi) then (kualitas_cuka_apel is buruk) (1)

Gambar 7. Rule base fuzzy tipe 1 penentuan kualitas cuka apel

Sistem ini menghasilkan 27 aturan fuzzy yang dibentuk melalui kombinasi komprehensif dari tiga parameter input, yaitu pH, konsentrasi gula, dan jumlah ragi. Setiap aturan mengikuti pola IF-THEN yang menghubungkan kondisi input dengan output kualitas, yaitu IF pH AND gula AND ragi THEN kualitas.

Output Fuzzy Tipe 1

Output berupa kualitas cuka apel didapatkan dari input nilai pH, konsentrasi gula, dan jumlah ragi. Output berupa nilai kualitas dengan variabel buruk [1 1 4], sedang [3 5.5 8], dan baik [7 10 10]. Output fuzzy tipe 1 kualitas cuka apel dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Output fuzzy tipe 1 kualitas cuka apel

Sistem penilaian kualitas cuka apel dalam penelitian ini menggunakan skala fuzzy dengan tiga kategori yang merepresentasikan berbagai kondisi fermentasi. Pendekatan ini mampu memberikan gradasi penilaian yang lebih detail, menangani variasi alami dalam proses fermentasi yang bersifat dinamis dan nonlinear, serta mempermudah interpretasi hasil oleh produsen dalam mengevaluasi kualitas produk mereka. Menurut Kusumadewi dan Purnomo (2004), pendekatan fuzzy sangat sesuai untuk sistem penilaian yang melibatkan banyak parameter dengan hubungan yang kompleks, karena mampu memberikan hasil yang lebih akurat dan mudah dipahami.

Rule Viewer Fuzzy Tipe 1

Rule viewer merupakan gambaran antara variabel-variabel input dan variabel output. Dimana pada fuzzy tipe 1 hasil output dapat dilihat dengan cara mengatur (menggeser garis pada masing-masing input) untuk mengetahui bagaimana simulasi kualitas cuka apel yang akan didapatkan. Sebagai contoh, rule viewer fuzzy tipe 1 kualitas cuka apel seperti pada Gambar 9 jika nilai pH 5, konsentrasi gula 15%, dan jumlah ragi 20 gr maka kualitas cuka apel dengan nilai 9.03 (masuk dalam kategori baik).

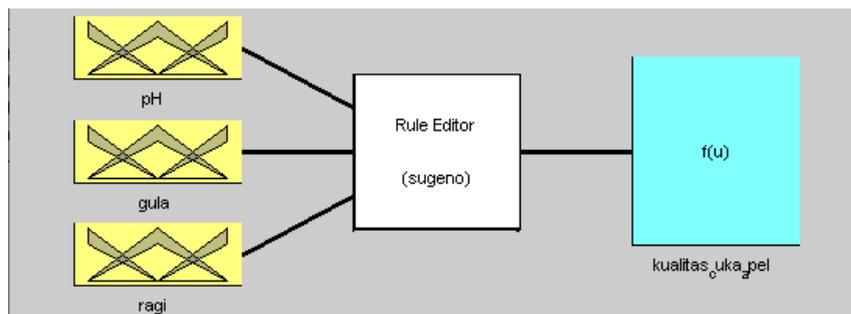


Gambar 9. Rule viewer fuzzy tipe 1 kualitas cuka apel

Hasil simulasi sistem menunjukkan performa yang konsisten dengan prinsip dasar fermentasi asam asetat dimana pH 5 (meskipun termasuk kategori tinggi) masih dalam batas toleransi bakteri asam asetat, konsentrasi gula 15% menyediakan substrat cukup untuk produksi etanol, dan inokulum ragi 20 gr masih menjamin proses fermentasi alkohol berlangsung optimal. Contoh simulasi ini membuktikan bahwa model fuzzy yang dikembangkan telah mampu menangani variasi parameter input, menghasilkan output yang sesuai dengan ekspektasi teoritis, serta memberikan gradasi penilaian yang lebih detail dibanding sistem biner tradisional.

Fuzzy Tipe 2

Implementasi menggunakan program MATLAB dilakukan dengan memasukkan data dan variabel yang telah ditentukan untuk mengetahui kualitas cuka apel. Rancangan sistem fuzzy tipe 2 penentuan kualitas cuka apel dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Rancangan sistem fuzzy tipe 2 penentuan kualitas cuka apel

Implementasi fuzzy tipe 2 dalam penelitian ini bertujuan untuk mengatasi berbagai bentuk ketidakpastian yang melekat dalam proses fermentasi cuka apel. Menurut Wu dan Mendel (2007), pendekatan ini secara khusus efektif dalam menangani tiga sumber ketidakpastian utama, yaitu variasi alat ukur (terutama pada pembacaan pH dan timbangan ragi), fluktuasi kualitas bahan baku, serta ketidakstabilan kondisi lingkungan (fermentasi). Sistem ini memperhitungkan ketidakpastian tersebut melalui mekanisme *Footprint of Uncertainty* (FOU) yang memungkinkan derajat keanggotaan berupa interval nilai, bukan nilai tunggal seperti pada tipe 1.

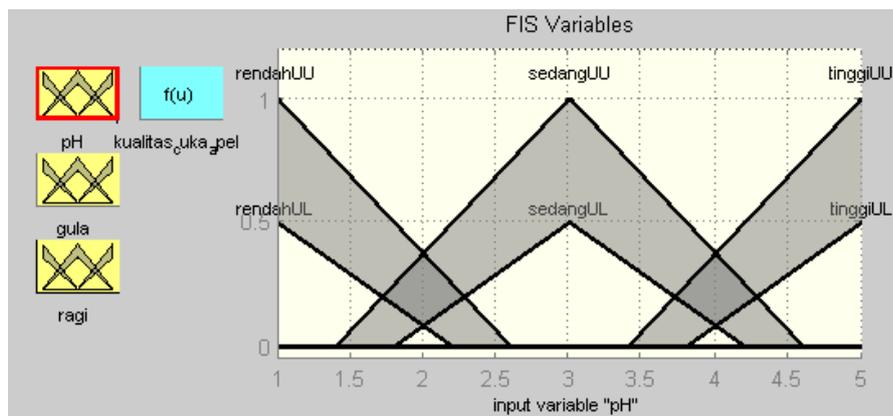
Input Fuzzy Tipe 2

Pada desain sistem fuzzy tipe 2, sama seperti sebelumnya terdapat 3 input variabel yang terdiri atas data nilai pH, konsentrasi gula, dan jumlah ragi. Tetapi terdapat perbedaan

dalam fungsi keanggotaannya karena terdapat batas atas dan batas bawah. Lebih jelasnya seperti uraian sebagai berikut:

1. pH

Variabel nilai pH rendah lower [0 1 2.2 0.5], rendah upper [0 1 2.6 1], sedang lower [1.8 3 4.2 0.5], sedang upper [1.4 3 4.6 1], tinggi lower [3.8 5 5 0.5], dan tinggi upper [3.4 5 5 1]. Fungsi keanggotaan dari variabel fuzzy tipe 2 untuk nilai pH dapat dilihat pada Gambar 11.

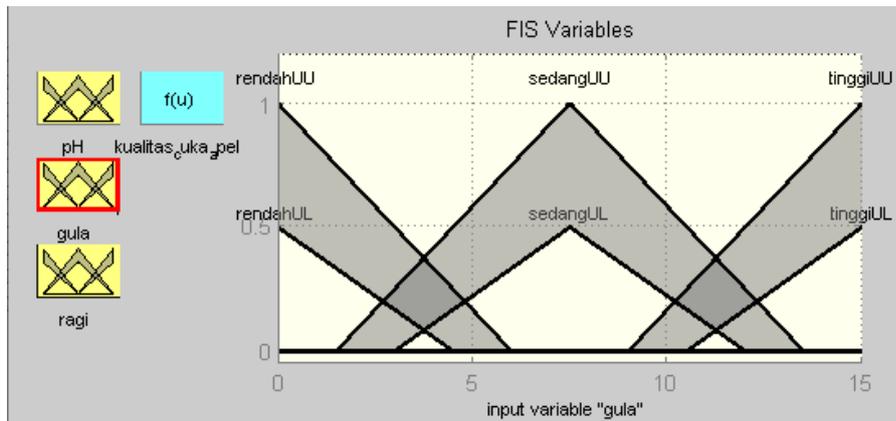


Gambar 11. Fungsi variabel fuzzy tipe 2 untuk nilai pH

Variabel pH memiliki FOU sebesar ± 0.4 yang merepresentasikan ketidakpastian akibat variasi pengukuran alat dan perubahan alami selama fermentasi. Wu dan Mendel (2007) menyatakan bahwa penggunaan FOU pada sistem fuzzy tipe 2 efektif dalam menangani ketidakpastian yang muncul akibat keterbatasan instrumen pengukuran dalam proses biologi.

2. Konsentrasi Gula

Variabel konsentrasi gula rendah lower [0 0 4.5 0.5], rendah upper [0 0 6 1], sedang lower [3 7.5 12 0.5], sedang upper [1.5 7.5 13.5 1], tinggi lower [10.5 15 15 0.5], dan tinggi upper [9 15 15 1]. Fungsi keanggotaan dari variabel fuzzy tipe 2 untuk konsentrasi gula dapat dilihat pada Gambar 12.

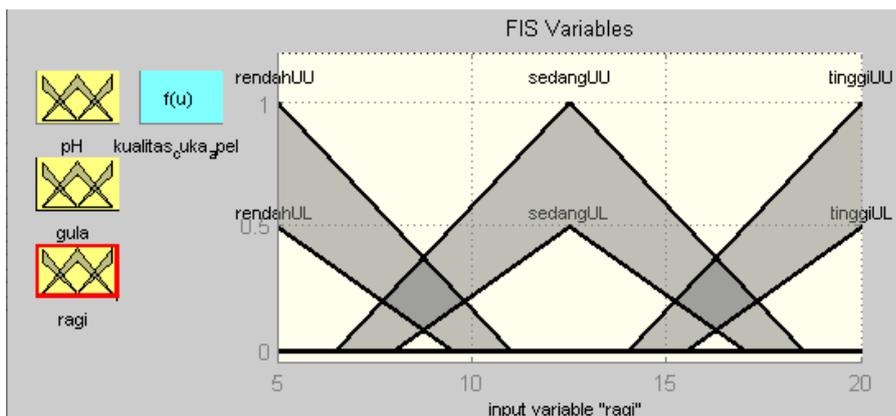


Gambar 12. Fungsi variabel fuzzy tipe 2 untuk konsentrasi gula

Variabel konsentrasi gula memiliki FOU sebesar $\pm 1.5\%$ yang digunakan untuk mempertimbangkan variabilitas alami kadar gula pada bahan baku buah serta ketidakseragaman selama proses pencampuran substrat. Menurut penelitian Mendel *et al.* (2016), rentang FOU sebesar 1.5–2% dinilai efektif untuk merepresentasikan variasi substrat karbohidrat dalam proses fermentasi.

3. Jumlah Ragi

Variabel jumlah ragi rendah lower [0 5 9.5 0.5], rendah upper [0 5 11 1], sedang lower [8 12.5 17 0.5], sedang upper [6.5 12.5 18.5 1], tinggi lower [15.5 20 20 0.5], dan tinggi upper [14 20 20 1]. Fungsi keanggotaan dari variabel fuzzy tipe 2 untuk jumlah ragi dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar 13. Fungsi variabel fuzzy tipe 2 untuk jumlah ragi

Variabel jumlah ragi dirancang dengan FOU sebesar ± 1.5 gr, guna memperhitungkan ketidakpresisian alat timbangan serta distribusi sel ragi yang tidak merata dalam media fermentasi. Hal ini sesuai dengan pendapat Karnik dan Mendel (2001)

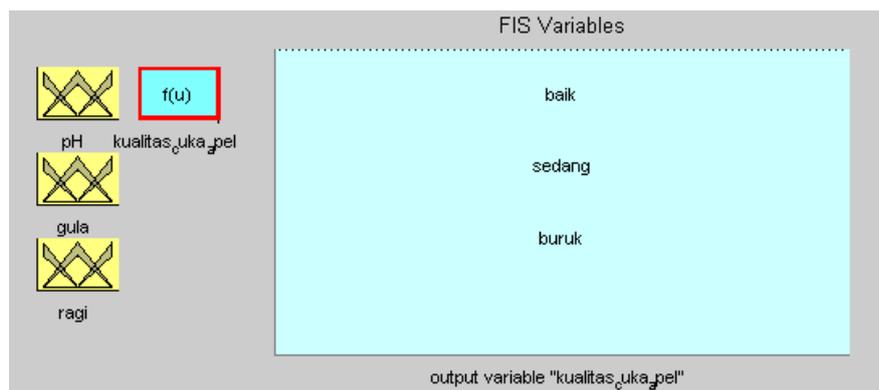
yang menjelaskan bahwa ketidakpastian dalam pengukuran bahan biologis dapat dimodelkan secara efektif dengan FOU dalam kisaran 1–2 gr.

Rule Base Fuzzy Tipe 2

Penyusunan rule base fuzzy tipe 2 didasarkan pada jumlah variabel yang telah ditetapkan kemudian dilakukan kombinasi sehingga didapatkan 27 aturan dalam penentuan kualitas cuka apel. Kombinasi rule base fuzzy tipe 2 sama dengan fuzzy tipe 1 yang telah dibahas sebelumnya.

Output Fuzzy Tipe 2

Output berupa kualitas cuka apel didapatkan dari input nilai pH, konsentrasi gula, dan jumlah ragi. Output berupa nilai kualitas dengan variabel buruk [0], sedang [0.5], dan baik [1]. Output fuzzy tipe 2 kualitas cuka apel dapat dilihat pada Gambar 14.



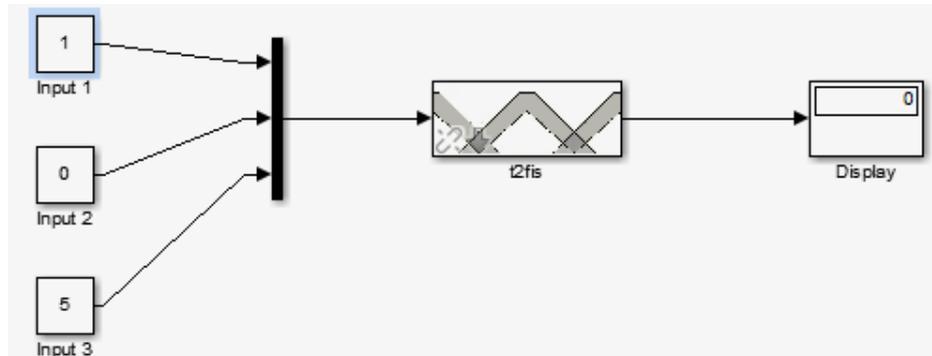
Gambar 14. Fungsi variabel fuzzy tipe 2 untuk jumlah ragi

Sistem fuzzy tipe 2 dalam penelitian ini menghasilkan output kualitas cuka apel dengan diskritisasi menjadi 3 level tersebut yang kemudian melalui proses centroid defuzzifikasi untuk mendapatkan nilai tegas. Karnik dan Mendel (2001) menjelaskan bahwa metode centroid defuzzifikasi pada fuzzy tipe 2 memiliki keunggulan dalam presisi representasi distribusi kemungkinan dan stabilitas terhadap variasi parameter input.

Rule Viewer Fuzzy Tipe 2

Rule viewer merupakan gambaran antara variabel-variabel input dan variabel output. Dimana pada fuzzy tipe 2 hasil output dapat dilihat dengan cara memasukkan nilai yang diinginkan sesuai dengan range yang ditentukan pada masing-masing input. Sebagai contoh, rule viewer fuzzy tipe 2 kualitas cuka apel seperti pada Gambar 15 jika

dimasukkan nilai pH 1, konsentrasi gula 0%, dan jumlah ragi 5 gr maka kualitas cuka apel dengan nilai 0 (kategori buruk).



Gambar 15. Rule viewer fuzzy tipe 2 kualitas cuka apel

Hasil simulasi pada fuzzy tipe 2 menunjukkan bahwa sistem mampu mempertahankan prinsip fermentasi dalam menangani berbagai skenario input, termasuk kondisi ekstrim seperti pH sangat rendah, tanpa gula, dan jumlah ragi terbatas yang secara konsisten menghasilkan kualitas cuka apel dengan kategori buruk. Hasil ini membuktikan bahwa fuzzy tipe 2 memiliki keunggulan dalam hal ketahanan terhadap noise data dan variasi data input, kemampuan memodelkan hubungan nonlinear antar parameter fermentasi melalui FOU, dan akurasi dalam kondisi batas kritis kualitas fermentasi. Menurut Mendel (2015), pendekatan fuzzy tipe 2 secara efektif mampu memodelkan proses biokompleks seperti fermentasi, dimana interaksi antar variabel bersifat dinamis dan multi-faktor. Implementasi rule viewer dalam sistem ini mengadopsi prinsip-prinsip tersebut untuk memastikan validitas output dalam berbagai kondisi operasional.

KESIMPULAN

Fuzzy Inference System (FIS) merupakan suatu kerangka kerja komputasional yang dibangun berdasarkan teori himpunan fuzzy, kaidah-kaidah inferensi fuzzy, serta mekanisme penalaran berbasis logika fuzzy. FIS digunakan untuk membantu memberikan simulasi desain sistem dalam penentuan kualitas cuka apel. Terdapat 2 tipe dalam logika fuzzy, yaitu fuzzy tipe 1 dan fuzzy tipe 2. Fuzzy tipe 1 merupakan jenis yang paling umum digunakan dalam berbagai aplikasi. Namun, kemampuannya dalam menangani ketidakpastian bersifat terbatas. Dalam praktiknya, sering kali sistem harus menghadapi berbagai sumber dengan tingkat ketidakpastian yang tinggi. Dalam kondisi tersebut, fuzzy

tipe 2 menjadi lebih relevan karena mampu menangani kesulitan dalam menentukan fungsi keanggotaan secara akurat, serta dapat merepresentasikan variasi pendapat dari sejumlah individu yang berbeda.

Dalam penentuan kualitas cuka apel terdapat 3 input, yaitu nilai pH, konsentrasi gula, dan jumlah ragi. Masing-masing variabel memiliki 3 fungsi variabel yang terdiri dari rendah, sedang, dan tinggi. Hasil pada fuzzy tipe 1 menunjukkan simulasi kualitas cuka apel yang dapat dilihat dengan cara menggeser nilai pada masing-masing input. Sedangkan hasil pada fuzzy tipe 2 menunjukkan simulasi kualitas cuka apel yang dapat dilihat dengan memasukkan nilai pada masing-masing input. Berdasarkan hasil tersebut, metode fuzzy tipe 2 lebih baik dalam melakukan simulasi kualitas cuka apel dikarenakan nilai yang dimasukkan dalam tiap input dapat lebih kompleks dan hasil yang diperoleh lebih tepat dan pasti.

DAFTAR PUSTAKA

- Afrinati, L. (2013). *Teknologi Pengawetan Pangan*. Bandung: Alfabeta.
- Allawi, Z. (2014). 'An Optimized Interval Type-2 Fuzzy Logic Control Scheme based on Optimal Defuzzification', 95(13), pp. 26–31.
- Atro, R., Periadnadi, dan Nurmiati. (2015). 'Keberadaan Mikroflora Alami dalam Fermentasi Cuka Apel Hijau (*Malus sylvestris* Mill.) Kultivar *Granny Smith*', 4(3), pp. 158–161.
- Bamforth, C. W. (2009). 'Current Perspectives on The Role of Enzymes in Brewing', *Journal of Cereal Science*, 50(3), pp. 353–357.
- Caturryanti, D., Luwihana, S., dan Tamaroh, S. (2008). 'Pengaruh Varietas Apel dan Campuran Bakteri Asam Asetat Terhadap Proses Fermentasi Cider', *Agritech*, 28(2), pp. 70–75.
- Faisal, M., Hedjar, R., Sulaiman M., and Al-Mutib, K. (2013). 'Fuzzy Logic Navigation and Obstacle Avoidance by a Mobile Robot in an Unknown Dynamic Environment', *International Journal of Advance Robot System*, 10.
- Guillaume, S. (2001). 'Designing Fuzzy Inference Systems from Data: An Intepretability-Oriented Review', *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 9(3), pp. 426–443.
- Ho, C. W., Lazim, A. M., Fazry, S., Zaki, U. K. H. H., and Lim, S. J. (2017). 'Varieties, Production, Composition and Health Benefits of Vinegars: A Review', *Food Chemistry*, 221, pp. 1621–1630.

- Illi, N *et al.* 2016. ‘Pengaruh Asam Cuka Saguier Terhadap Sifat Organoleptik Daging Itik Serati (*Cairina moschata*)’. *Jurnal Zootek*, 36(1), pp. 184–190.
- Karnik, N. N., and Mendel, J. M. (2001). ‘Centroid of a Type-2 Fuzzy Set’, *Information Sciences*, 132(1-4), pp 195–220.
- Kusumadewi, S. dan Purnomo, H. (2004). *Aplikasi Logika Fuzzy untuk Mendukung Keputusan*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Melin, P and Castillo, O. (2014). ‘A Review on Type-2 Fuzzy Logic Applications in Clustering, Classification and Pattern Recognition’, *Application Soft Computing Journal*, 21, pp. 568–577.
- Mendel, J. M. (2015). ‘Type-2 Fuzzy Sets and Systems: a Retrospective’, *Informatik-Spektrum*, 38(6), pp. 523–532.
- Mendel, J. M., Rajati, M. R., and Sussner, P. (2016). ‘On Clarifying Some Definitions and Notations Used For Type-2 Fuzzy Sets As Well As Some Recommended Changes’, *Information Sciences*, 340-341, pp. 337–345.
- Ozturk, I., Caliskan, O., Tornuk, F., Ozcan, N., Yalcin, H., Baslar, M., and Sagdic, O. (2015). ‘Antioxidant, Antimicrobial, Mineral, Volatile, Physicochemical and Microbiological Characteristics of Traditional Home-Made Turkish Vinegars’, *LWT-Food Science and Technology*, 63(1), pp. 144–151.
- Priasty, E., Hasanuddin, dan Dewi K. (2013). ‘Kualitas Cuka Kelapa (*Cocos nucifera* L.) dengan Metode Lambat (*Slow Methods*)’, *Jurnal Agroindustri*, 3(1), pp. 1–13.
- Sumitre, M. dan Kurniawan, R. (2014). ‘Rancang Bangun Sistem Pendukung Keputusan Seleksi Penerimaan Tenaga Pengajar dengan Metode *Fuzzy Inference System* (FIS) Mamdani’, *Jurnal Informatika*, 14(1), pp. 61–71.
- Wu, D. and Tan, W. (2005). ‘Computationally Efficient Type-Reduction Strategies for a Type-2 Fuzzy Logic Controller’, *14th IEEE International Conference Fuzzy System 2005*, pp. 353–358.
- Wu, D., & Mendel, J. M. (2007). ‘Uncertainty Measures for Interval Type-2 Fuzzy Sets’, *Information Sciences*, 177(23), pp. 5378–5393.
- Yulmaini. (2015). Penggunaan Metode *Fuzzy Inference System* (FIS) Mamdani dalam Pemilihan Peminatan Mahasiswa untuk Tugas Akhir, *Jurnal Informatika*, 15(1), pp. 10-23.