

RANCANG BANGUN SISTEM DETEKSI KERUSAKAN BUAH APEL MERAH BERBASIS MIKROKONTROLER DENGAN PENDEKATAN LOGIKA *FUZZY* SUGENO

Juan Dini^{1,*}, Muhammad Ikhsan²

^{1,2}Ilmu Komputer, Fakultas Sains dan Teknologi

^{1,2}Universitas Islam Negeri Sumatera Utara Medan, Indonesia

Article Info

Article history:

Received January 24, 2026

Accepted February 23, 2026

Published February 25, 2026

Keywords:

Fruit Damage Detection,
Microcontroller, Sugeno Fuzzy
Logic, Apple Quality
Classification, Automatic
Sorting System

ABSTRACT

The manual apple sorting process still has limitations in terms of speed, objectivity, and accuracy, thus potentially reducing product quality in the market. This study aims to design and implement a microcontroller-based red apple damage detection system with a Sugeno Fuzzy logic approach using a TCS3200 color sensor and an MQ-135 gas sensor. Color and gas parameters are used as indicators of physical and chemical changes in the fruit due to the decay process. Sensor data is processed by a microcontroller to classify the condition of apples into three categories, namely good, slightly damaged, and severely damaged, and to control the sorting mechanism automatically. The research method is carried out through prototype design, experimental data collection, application of fuzzy rules, and system testing on 30 apple samples. The test results show that the system is able to classify 26 of the 30 samples correctly with an accuracy level of 86.7%. These findings prove that the combination of color and gas sensors with the Sugeno Fuzzy approach is effective for detecting apple damage automatically and has the potential to increase the efficiency of the sorting process in agriculture.



Corresponding Author:

Juan Dini,

Ilmu Komputer, Fakultas Sains dan Teknologi

Universitas Islam Negeri Sumatera Utara Medan, Indonesia

Jl. Lap. Golf No. 120, Kp. Tengah, Kec. Pancur Batu, Kab. Deli Serdang 20353, Indonesia.

Email: juandini975@gmail.com

1. PENGANTAR

Buah apel termasuk dalam hasil pertanian yang memiliki nilai ekonomi tinggi dan banyak diminati oleh masyarakat. Berdasarkan kutipan dari website Badan Pusat Statistik (BPS), produksi apel di Indonesia pada tahun 2023 mencapai 3.925.627,73 ton. Jumlah ini menunjukkan bahwa apel merupakan salah satu hasil pertanian yang cukup besar di Indonesia. Buah merupakan sumber vitamin yang penting bagi kesehatan manusia karena tubuh tidak mampu memproduksi vitamin secara mandiri, sehingga kebutuhan tersebut diperoleh melalui konsumsi buah, terutama pada kondisi matang yang memiliki kandungan gizi lebih optimal[1]. Apel juga dikenal sebagai buah yang kaya serat, vitamin C, dan antioksidan serta memiliki kandungan air yang tinggi[2]. Oleh karena itu, menjaga kualitas apel tetap baik adalah salah satu cara agar buah apel tetap memiliki nilai pasar yang tinggi. Kualitas apel sangat dipengaruhi oleh kondisi fisiknya, seperti kesegaran dan tekstur, yang menentukan harga jual serta kepuasan konsumen[3]. Kerusakan pada apel merah umumnya ditandai dengan perubahan warna kulit menjadi cokelat atau gelap, munculnya bintik lunak, serta pelepasan gas akibat proses pembusukan alami, yang menurunkan mutu dan daya jual buah[4].

Dalam konteks ini, deteksi kerusakan merupakan proses untuk mengidentifikasi penurunan kualitas suatu objek secara fisik maupun kimia. Sistem deteksi kerusakan buah apel berbasis teknologi diperlukan agar dapat meningkatkan efisiensi dalam pemilihan apel yang berkualitas. Penggunaan mikrokontroler dengan pendekatan logika *fuzzy* Sugeno menjadi salah satu solusi yang dapat diterapkan untuk mengetahui kerusakan apel secara lebih akurat. Logika *fuzzy* Sugeno menghasilkan *output* berupa nilai numerik langsung, biasanya dalam bentuk fungsi linier atau konstanta [5]. Metode ini memungkinkan sistem untuk memberikan keluaran

yang lebih fleksibel dan adaptif berdasarkan kondisi yang berubah-ubah [6]. Bahasa *fuzzy* bersifat kabur atau samar, dimana suatu nilai bisa benar dan bisa juga salah pada saat yang bersamaan. Meskipun istilah tersebut berarti samar, bukan berarti logika ini tidak jelas, melainkan logika yang berfungsi untuk memberikan gambaran tentang ambiguitas yang terjadi [7]. Mikrokontroler adalah sebuah *Integrated Circuit* (IC) yang didesain untuk melakukan operasi khusus pada sebuah sistem yang tertanam [8]. Mikrokontroler seperti Arduino mampu memproses data dari sensor dengan cepat, sehingga proses sortir dapat dilakukan secara otomatis tanpa campur tangan manusia [9]. Mikrokontroler merupakan perangkat elektronik yang mengintegrasikan unit pemroses, memori, serta antarmuka *input* dan *output* dalam satu paket [10]. Sementara itu logika *fuzzy* sugeno digunakan untuk mengevaluasi kualitas apel berdasarkan parameter seperti warna, tekstur, dan ukuran, memungkinkan sistem untuk membedakan apel yang layak konsumsi dan yang mengalami kerusakan.

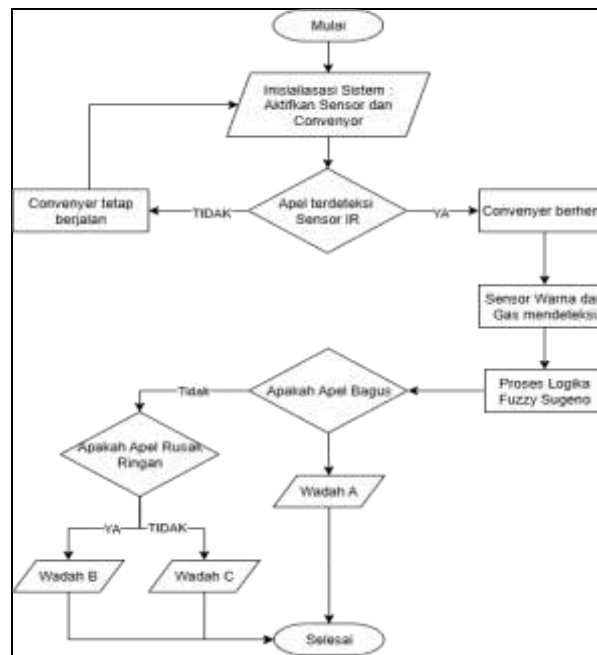
Penelitian terdahulu yang dilakukan oleh M. Noor Khafit pada tahun 2023 telah merancang sistem sortir otomatis buah apel berdasarkan ukuran dan warna dengan tingkat keberhasilan 96% untuk sortir ukuran dan 80% untuk sortir warna [9]. Meskipun sistem ini dapat bekerja secara otomatis, penelitian tersebut masih terbatas pada klasifikasi karakteristik fisik dasar dan belum mampu mendeteksi tingkat kerusakan atau kualitas buah yang merupakan faktor penentu kualitas dan nilai ekonomis produk.

Di sisi lain, penelitian yang dilakukan oleh Siti Sumita Harahap tahun 2021 telah menunjukkan efektivitas penerapan Logika *Fuzzy* Sugeno untuk menyortir buah tomat berdasarkan tingkat kematangan menggunakan sensor TCS3200 dan mikrokontroler [11]. Metode ini terbukti memberikan keunggulan dalam proses perhitungan yang lebih sederhana dan akurat dalam pengambilan keputusan otomatis. Namun, penelitian tersebut masih terfokus pada buah tomat dan klasifikasi kematangan, belum mengeksplorasi potensi metode ini untuk deteksi kerusakan pada jenis buah lain seperti apel. Berdasarkan penelitian-penelitian tersebut membuktikan kebutuhan akan sistem otomatis untuk buah apel dan telah menunjukkan keandalan metode Logika *Fuzzy* Sugeno untuk aplikasi buah. Akan tetapi, belum ada penelitian yang menggabungkan keunggulan kedua pendekatan tersebut untuk mengembangkan sistem deteksi kerusakan buah apel secara spesifik.

Berdasarkan penelitian-penelitian sebelumnya, belum ada sistem yang mampu mendeteksi kerusakan buah apel secara fisik maupun kimiawi sekaligus dalam satu perangkat yang terintegrasi. Penelitian ini hadir untuk mengisi kekosongan tersebut dengan tiga hal yang membedakannya dari penelitian sebelumnya. *Pertama*, penelitian ini menggunakan pendekatan delta gas (ΔGas), yaitu selisih antara nilai gas di lingkungan sekitar dan nilai gas saat apel terdeteksi. Cara ini membuat pembacaan sensor lebih mencerminkan kondisi buah yang sebenarnya, bukan terganggu oleh perubahan suhu atau angin di sekitar alat. *Kedua*, sensor warna (TCS3200) dan sensor gas (MQ-135) digunakan secara bersamaan dalam satu mikrokontroler, sehingga sistem dapat mendeteksi perubahan warna pada permukaan buah sekaligus gas yang dihasilkan dari proses pembusukan di dalam buah sesuatu yang belum dilakukan pada penelitian sortir buah sebelumnya. *Ketiga*, aturan *fuzzy* yang dirancang memberikan peran lebih besar kepada nilai gas dibanding warna ketika warna buah terlihat mulai kusam. Hal ini didasarkan pada kenyataan bahwa buah yang membusuk dari dalam seringkali belum menunjukkan perubahan warna yang jelas di luar. Dengan ketiga hal tersebut, penelitian ini bukan sekadar mengulang penelitian sebelumnya dengan objek yang berbeda, melainkan menawarkan pendekatan sistem yang lebih lengkap dan lebih sesuai dengan karakteristik nyata proses kerusakan buah apel.

2. METODE PENELITIAN

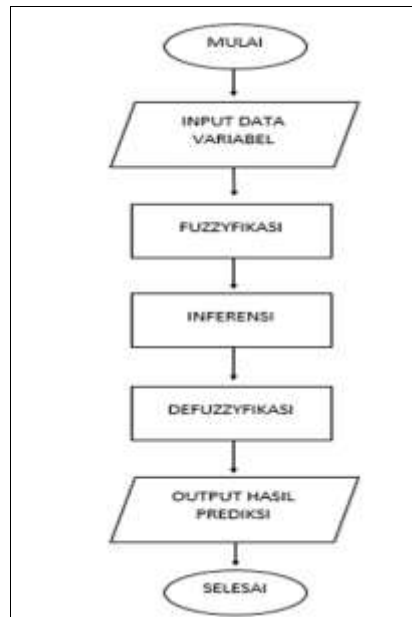
Perancangan sistem bertujuan untuk membangun kerangka teknis dalam implementasi deteksi kerusakan buah apel menggunakan sensor warna dan sensor gas berbasis logika *Fuzzy* Sugeno. Proses perancangan divisualisasikan melalui *flowchart* yang menggambarkan alur kerja sistem, mulai dari pendeteksian buah oleh sensor, penghentian *conveyor*, hingga klasifikasi kondisi apel berdasarkan keluaran *fuzzy*. Adapun variabel yang digunakan peneliti guna menjadi acuan dalam penelitian ini, yaitu variabel warna dan gas. Untuk variabel warna akan ada 3 kategori dengan masing-masing rentang nya, yaitu merah segar merah kusam, merah gelap, dan untuk variabel sensor gas akan ada 3 kategori dengan masing-masing rentangnya, yaitu rendah, sedang (apel mulai rusak ringan, mulai menghasilkan gas), tinggi (apel busuk, menghasilkan gas berlebih).



Gambar 1. Alur Kerja Sistem

Gambar 1. menggambarkan alur kerja sistem yang digunakan untuk mendeteksi kerusakan pada buah apel. Proses dimulai dengan inialisasi seluruh perangkat keras yang digunakan, seperti sensor warna TCS3200, sensor gas, sensor infra merah, *motor conveyor*, dan aktuator servo. Selanjutnya, sensor infra merah mendeteksi keberadaan apel yang bergerak di atas *conveyor*. Saat apel terdeteksi, sistem secara otomatis melakukan pembacaan nilai warna merah menggunakan sensor warna serta nilai gas melalui sensor gas. Data gas yang diperoleh kemudian diproses oleh perangkat lunak untuk menghitung nilai *delta gas*, yaitu selisih antara nilai gas acuan (*baseline*) dan nilai gas pada saat apel terdeteksi. Nilai warna merah dan *delta gas* tersebut selanjutnya diproses pada tahap fuzzifikasi untuk menentukan derajat keanggotaan pada setiap himpunan *fuzzy* yang telah ditentukan. Berdasarkan hasil fuzzifikasi tersebut, sistem melakukan evaluasi aturan menggunakan metode logika *Fuzzy Sugeno* sesuai dengan *rule base* yang telah dirancang. Hasil inferensi kemudian didefuzzifikasi untuk menghasilkan keputusan akhir berupa kategori kondisi apel, yaitu baik, rusak ringan, atau rusak parah. Berdasarkan hasil klasifikasi tersebut, mikrokontroler mengendalikan pergerakan servo untuk memisahkan apel ke wadah yang sesuai, kemudian *conveyor* kembali berjalan untuk memproses sampel apel berikutnya.

Sensor gas MQ-135 dipanaskan selama satu jam sebelum pengujian dimulai agar elemen semikonduktor di dalamnya mencapai kondisi stabil sehingga pembacaan tidak terpengaruh oleh perubahan suhu awal komponen. Setelah pemanasan selesai, nilai gas lingkungan tanpa kehadiran apel diukur sebagai nilai *baseline*. Nilai *baseline* ini diambil sekali di awal sebelum seluruh sesi pengujian dimulai dan digunakan sebagai acuan tetap untuk menghitung nilai perubahan gas (ΔGas) pada setiap sampel, yaitu dengan mengurangi nilai gas saat apel terdeteksi dengan nilai *baseline* tersebut. Pendekatan ini bertujuan agar nilai yang diproses sistem mencerminkan gas yang benar-benar berasal dari buah apel, bukan dari kondisi udara lingkungan sekitar. Pengujian dilakukan di dalam kotak akrilik bertirai sebagai upaya membatasi masuknya udara luar ke area sensor. Namun karena tirai harus dibuka setiap kali sampel apel dimasukkan, sirkulasi udara dari luar tetap berpotensi mempengaruhi pembacaan sensor secara singkat. Untuk sensor warna TCS3200, sensor digunakan langsung tanpa prosedur kalibrasi formal dengan memanfaatkan pencahayaan dari cahaya ruangan yang ada. Berikut ini merupakan *flowchart* logika *fuzzy* untuk memperjelas tahapan pengambilan keputusan pada sistem yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Flowchart Logika Fuzzy

Rancangan sistem deteksi kerusakan buah apel berbasis Logika *Fuzzy* Sugeno dilakukan melalui tahapan fuzzifikasi, inferensi, dan defuzzifikasi, yang berfungsi untuk mengklasifikasikan kondisi apel berdasarkan warna dan kandungan gas. Proses sistem diawali dari tahap *input* data variabel, di mana sensor warna dan sensor gas membaca parameter apel sebagai masukan. Selanjutnya, pada tahap fuzzifikasi, nilai numerik dari sensor diubah menjadi derajat keanggotaan *fuzzy* sesuai kategori yang telah ditentukan, seperti merah segar, merah kusam, merah gelap, serta gas rendah, sedang, dan tinggi. Tahap inferensi memproses aturan *fuzzy* (*IF-THEN*) untuk menentukan kondisi apel berdasarkan kombinasi nilai fuzzifikasi. Hasil dari inferensi kemudian diubah menjadi nilai pasti melalui tahap defuzzifikasi, sehingga sistem dapat menghasilkan *output* hasil prediksi berupa status kondisi apel, yaitu baik, rusak ringan, atau rusak parah. Dengan alur kerja yang terstruktur ini, sistem deteksi dapat berjalan secara otomatis dan siap melakukan klasifikasi pada setiap siklus pengukuran.

2.1 Fuzzifikasi

Adapun tahap pertama yang dilakukan dalam pembuatan sistem deteksi kerusakan buah apel merah ini adalah dengan melakukan perhitungan secara manual dan membuat golongan *fuzzy* pada masing - masing variabel *input* dan *output*. Berdasarkan data hasil pengujian, nilai intensitas warna merah dikelompokkan ke dalam tiga kategori, yaitu merah segar, merah kusam, dan merah gelap. Sementara itu, nilai perubahan gas (Δ Gas) diklasifikasikan ke dalam kategori rendah, sedang, dan tinggi. Rentang nilai *membership function* ditentukan berdasarkan hasil pengukuran sensor secara langsung pada sampel pengujian awal. Titik tengah setiap himpunan ditetapkan dari nilai rata-rata pembacaan sensor pada masing-masing kondisi apel, sedangkan batas bawah dan atas ditentukan berdasarkan nilai minimum dan maksimum yang diperoleh dari data pengujian, dengan sedikit kelonggaran untuk mengakomodasi variasi antar sampel. Nilai *crisp output* ditentukan berdasarkan skala gradasi kerusakan yang proporsional. Nilai 100 digunakan untuk kondisi Baik, nilai 60 untuk Rusak Ringan, dan nilai 20 untuk Rusak Parah. Selisih antar nilai yang sama rata yaitu 40 dipilih agar setiap kategori memiliki perbedaan yang seimbang pada saat proses defuzzifikasi.

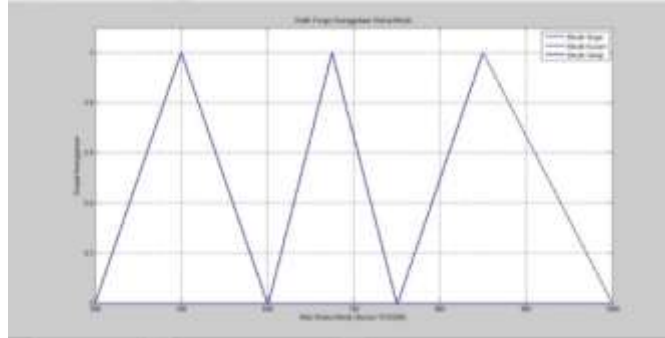
Tabel 1. Pembentukan Himpunan Fuzzy

Fungsi	Variabel	Himpunan Fuzzy	Domain
Input	Warna Merah	Merah Segar	[400 500 600]
		Merah Kusam	[601 675 750]
		Merah Gelap	[751 850 1000]
		Rendah	[0 1 2]
Input	Gas	Sedang	[2 3 4]
		Tinggi	[4 7 10]
		Baik	100
Output	Tingkat Kerusakan	Rusak Ringan	60
		Rusak Parah	20

Berdasarkan tabel 1. Adapun fungsi keanggotaan sebagai berikut.

A. Variabel Warna

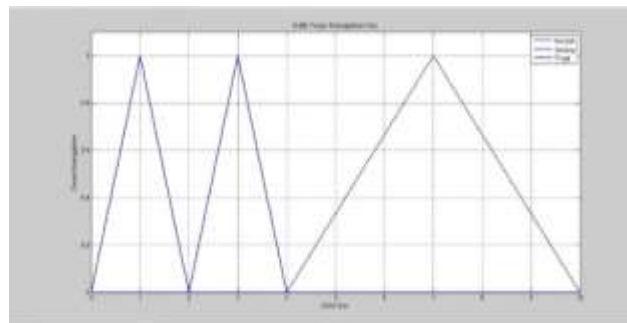
Variabel warna pada penelitian ini diperoleh dari sensor warna TCS3200 yang digunakan untuk mengukur intensitas warna merah pada permukaan buah apel merah. Nilai-nilai intensitas warna merah yang diperoleh kemudian diubah menjadi fungsi keanggotaan untuk masing-masing kategori, sebagaimana ditunjukkan pada grafik berikut.



Gambar 3. Fungsi Keanggotaan Warna

B. Variabel Gas

Variabel gas pada penelitian ini diperoleh dari sensor gas MQ-135 yang digunakan untuk mendeteksi perubahan gas yang dihasilkan oleh buah apel selama proses penyimpanan. Nilai ΔGas tersebut digunakan sebagai indikator tingkat pembusukan buah apel dan dikelompokkan ke dalam kategori rendah, sedang, dan tinggi sebagai variabel masukan dalam proses pengolahan data yang direpresentasikan dengan grafik fungsi keanggotaan sebagai berikut.



Gambar 4. Fungsi Keanggotaan Gas

2.2 Inferensi Fuzzy

1. Keanggotaan Warna

Dari grafik ke anggotaan tersebut dapat di buat formula derajat ke anggotaan warna sebagai berikut:

a) Merah Segar (400,500,600)

$$\mu_{\text{MerahSegar}}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 400 \\ \frac{x-400}{500-400}, & 400 < x \leq 500 \\ \frac{600-x}{600-500}, & 500 < x < 600 \end{cases} \quad (1)$$

b) Merah Kusam (601,675,750)

$$\mu_{\text{MerahKusam}}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 601 \\ \frac{x-601}{675-601}, & 601 < x \leq 675 \\ \frac{750-x}{750-675}, & 675 < x < 750 \end{cases} \quad (2)$$

c) Merah Gelap (751,850,1000)

$$\mu_{MerahGelap}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 751 \\ \frac{x-751}{850-751}, & 751 < x \leq 850 \\ \frac{1000-x}{1000-850}, & 850 < x < 1000 \end{cases} \quad (3)$$

2. Keanggotaan Gas

Dari grafik ke anggotaaan tersebut dapat di buat formula derajat ke anggotaaannya gas sebagai berikut:

a) Gas Rendah (0,1,2)

$$\mu_{GasRendah}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \text{ atau } x \geq 2 \\ \frac{x-0}{1-0}, & 0 < x \leq 1 \\ \frac{2-x}{2-1}, & 1 < x < 2 \end{cases} \quad (4)$$

b) Gas Sedang (2,3,4)

$$\mu_{GasSedang}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 2 \text{ atau } x \geq 4 \\ \frac{x-2}{3-2}, & 2 < x \leq 3 \\ \frac{4-x}{4-3}, & 3 < x < 4 \end{cases} \quad (5)$$

c) Gas Tinggi (4,7,10)

$$\mu_{GasTinggi}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 4 \text{ atau } x \geq 10 \\ \frac{x-4}{7-4}, & 4 < x \leq 7 \\ \frac{10-x}{10-7}, & 7 < x < 10 \end{cases} \quad (6)$$

2.3 Rule Base

Berikut ini merupakan aturan aturan metode logika *fuzzy* sugeno dalam pembuatan alat deteksi kerusakan buah apel merah. Aturan ini dibuat berdasarkan karakteristik buah apel merah agar sistem dapat menentukan kondisi buah secara konsisten.

Tabel 2. Aturan-aturan Fuzzy

No	Warna	ΔGas	Kondisi Apel	Output Crisp
1	Merah Segar	Rendah	Baik	100
2	Merah Segar	Sedang	Rusak Ringan	60
3	Merah Segar	Tinggi	Rusak Parah	20
4	Merah Kusam	Rendah	Baik	100
5	Merah Kusam	Sedang	Rusak Ringan	60
6	Merah Kusam	Tinggi	Rusak Parah	20
7	Merah Gelap	Rendah	Rusak Ringan	60
8	Merah Gelap	Sedang	Rusak Parah	20
9	Merah Gelap	Tinggi	Rusak Parah	20

2.4 Defuzzifikasi

Defuzzifikasi merupakan tahap terakhir dalam sistem logika *fuzzy* yang berfungsi untuk mengubah *output fuzzy* menjadi nilai tunggal (*crisp value*) yang dapat digunakan untuk pengambilan Keputusan [12]. Setelah *input* diubah menjadi derajat keanggotaan melalui proses fuzzifikasi dan aturan pada *rule base* dijalankan, sistem akan menghasilkan nilai *fuzzy* untuk setiap *rule*. Nilai-nilai ini belum dapat langsung digunakan sebagai kategori akhir karena masih berbentuk derajat keanggotaan. Melalui proses defuzzifikasi, semua hasil *fuzzy* tersebut disatukan menjadi satu angka nyata yang mewakili *output* akhir system [13].

Rumus *weighted average*:

$$Z_{akhir} = \sum \frac{(a_i \times z_i)}{a_i} \quad (7)$$

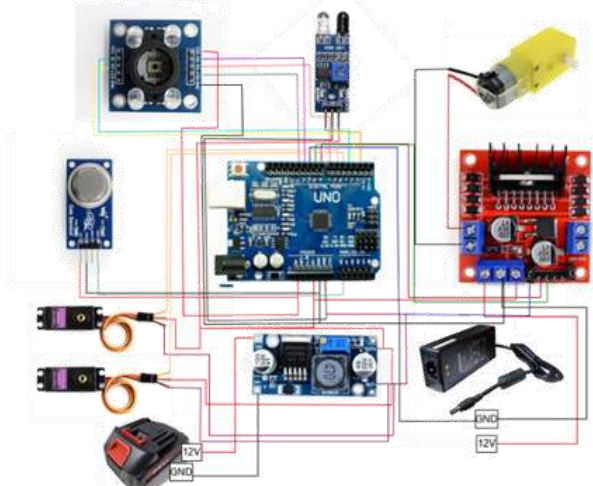
3. HASIL DAN ANALISIS

3.1 Implementasi Perangkat Keras

Implementasi perangkat keras pada penelitian ini bertujuan untuk merealisasikan sistem deteksi kerusakan buah apel merah sesuai dengan perancangan yang telah dilakukan. Sistem hardware terdiri dari mikrokontroler sebagai pusat pengendali, sensor warna TCS3200, sensor gas MQ-135, sensor inframerah,

motor *conveyor*, motor servo, serta rangkaian pendukung lainnya yang terhubung secara terintegrasi. Dalam sistem pendeteksi kerusakan buah, *conveyor* berperan sebagai alat transportasi yang menggerakkan buah secara teratur melewati rangkaian sensor memungkinkan proses pendeteksian berlangsung secara otomatis sehingga dapat meningkatkan efektivitas dan konsistensi dalam penilaian kualitas buah[14].

Perancangan perangkat keras diawali dengan pembuatan rangkaian *wiring* diagram yang berfungsi sebagai panduan dalam menghubungkan setiap komponen ke mikrokontroler sesuai dengan konfigurasi pin dan fungsi masing-masing. *Wiring* diagram ini kemudian direalisasikan dalam bentuk rangkaian fisik (rangkaiannya asli) dengan merakit seluruh komponen menggunakan kabel penghubung dan papan rangkaian.



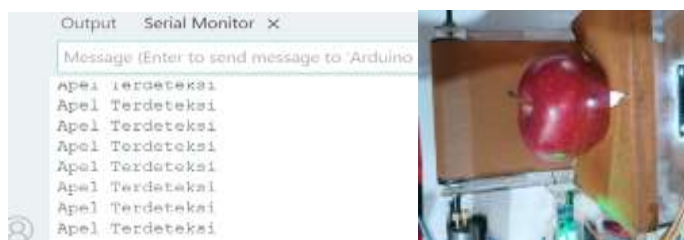
Gambar 5. Rangkaian *Wiring* Diagram



Gambar 6. Rangkaian Keseluruhan Alat

3.2 Pengujian IR Sensor

Sensor *infrared* (IR) adalah sensor yang bekerja dengan memanfaatkan sinyal cahaya inframerah untuk mendeteksi keberadaan, jarak, atau gerakan suatu objek [15]. Pengujian IR sensor dilakukan untuk memastikan kemampuan sensor dalam mendeteksi keberadaan buah apel yang melewati jalur *conveyor*. Pada pengujian ini, buah apel dilewatkan secara bergantian di atas *conveyor* menuju area sensor. Ketika apel terdeteksi, sistem akan memberikan respon berupa penghentian sementara *conveyor* sebelum proses pembacaan sensor warna dan sensor gas dilakukan. Kondisi terdeteksi atau tidak terdeteksi diamati melalui perubahan logika sinyal keluaran IR sensor yang ditampilkan pada *Serial Monitor* Arduino.



Gambar 7. Hasil Pengujian IR Sensor

3.3 Pengujian Sensor TCS3200

Pada proses pengujian, buah apel diletakkan tepat di bawah sensor setelah *conveyor* berhenti akibat sinyal dari IR sensor. Sensor kemudian membaca nilai intensitas warna merah (*red*) yang digunakan sebagai parameter dalam penentuan kondisi buah apel. Nilai hasil pembacaan ditampilkan pada Serial Monitor Arduino untuk dianalisis.

```

Nilai Intensitas Warna Merah: 420
Nilai Intensitas Warna Merah: 426
Nilai Intensitas Warna Merah: 425
Nilai Intensitas Warna Merah: 425
Nilai Intensitas Warna Merah: 424
Nilai Intensitas Warna Merah: 425

```



Gambar 8. Hasil Pengujian Sensor Warna

3.4 Pengujian Sensor MQ-135

Pada tahap pengujian, sistem terlebih dahulu mengambil nilai gas awal (*baseline*) ketika belum terdapat buah apel di dalam boks. Nilai *baseline* ini digunakan sebagai acuan untuk menghitung perubahan nilai gas (Δ Gas) saat apel berada di dalam area pendeteksian. Setelah *conveyor* berhenti, sensor MQ-135 membaca nilai gas dan hasilnya ditampilkan pada *Serial Monitor* Arduino. Nilai Δ Gas dinyatakan dalam satuan ADC (tanpa satuan fisik).

```

Nilai Gas (ADC): 272
Nilai Gas (ADC): 272
Nilai Gas (ADC): 273
Nilai Gas (ADC): 272
Nilai Gas (ADC): 273
Nilai Gas (ADC): 276
Nilai Gas (ADC): 274
Nilai Gas (ADC): 274

```



Gambar 9. Hasil Pengujian Sensor Gas MQ-135

3.5 Pengujian Keseluruhan Sistem

Pengujian sistem diawali dengan *conveyor* yang bergerak secara kontinu untuk membawa buah apel menuju area pendeteksian. Ketika buah apel terdeteksi oleh sensor inframerah, sistem memberikan perintah untuk menghentikan *conveyor* sementara guna memastikan proses pembacaan sensor dapat dilakukan secara stabil dan akurat. Pada kondisi ini, sensor warna TCS3200 melakukan pembacaan nilai intensitas warna merah pada permukaan buah apel, sedangkan sensor gas MQ-135 membaca perubahan nilai gas (Δ Gas) yang dihasilkan oleh buah apel dibandingkan dengan nilai *baseline* gas lingkungan. Data hasil pembacaan dari kedua sensor tersebut kemudian dikirim ke mikrokontroler untuk diproses menggunakan metode logika *fuzzy* Sugeno. Proses ini meliputi tahap fuzzifikasi, penerapan *rule base*, perhitungan *output*, dan defuzzifikasi sehingga diperoleh keputusan akhir berupa klasifikasi kondisi buah apel, yaitu apel baik, rusak ringan, atau rusak parah.

```

Apel terdeteksi
Red: 578 | Gas Raw: 175 | ΔGas: 1 | Output: 100
Apel terdeteksi
Red: 586 | Gas Raw: 179 | ΔGas: 5 | Output: 20
Apel terdeteksi
Red: 587 | Gas Raw: 188 | ΔGas: 18 | Output: 50

```

Gambar 10. Hasil Pengujian Sistem

Hasil pengujian sistem secara keseluruhan, yang meliputi data pembacaan sensor warna TCS3200, sensor gas MQ-135, nilai *baseline* gas, nilai perubahan gas (Δ Gas), serta hasil klasifikasi kondisi buah apel menggunakan metode logika *Fuzzy* Sugeno, disajikan pada tabel berikut.

Tabel 3. Hasil Pengujian Sistem

No	Sampel Apel	Nilai Red (TCS3200)	Gas Raw (Apel)	Baseline Gas	Δ Gas	Label Kondisi
1	Apel 1	545	174	174	0	Baik
2	Apel 2	602	177	174	3	Rusak Ringan

3	Apel 3	790	179	174	5	Rusak Parah
4	Apel 4	551	175	174	1	Baik
5	Apel 5	606	176	174	2	Rusak Ringan
6	Apel 6	802	180	174	6	Rusak Parah
7	Apel 7	480	175	174	1	Baik
8	Apel 8	643	176	174	2	Rusak Ringan
9	Apel 9	610	175	174	1	Baik
10	Apel 10	586	179	174	5	Rusak parah
11	Apel 11	905	182	174	8	Rusak parah
12	Apel 12	950	179	174	5	Rusak Parah
13	Apel 13	682	176	174	2	Rusak Ringan
14	Apel 14	611	176	174	2	Rusak Ringan
15	Apel 15	472	175	174	1	Baik
16	Apel 16	553	175	174	1	Baik
17	Apel 17	608	175	174	1	Baik
18	Apel 18	795	179	174	5	Rusak Parah
19	Apel 19	489	174	174	0	Baik
20	Apel 20	615	177	174	3	Rusak Ringan
21	Apel 21	810	180	174	6	Rusak Parah
22	Apel 22	671	177	174	3	Rusak Ringan
23	Apel 23	610	175	174	1	Baik
24	Apel 24	888	181	174	7	Rusak Parah
25	Apel 25	463	174	174	0	Baik
26	Apel 26	605	175	174	1	Baik
27	Apel 27	842	180	174	6	Rusak Parah
28	Apel 28	629	177	174	3	Rusak Ringan
29	Apel 29	690	175	174	1	Baik
30	Apel 30	920	182	174	8	Rusak Parah

Berdasarkan Tabel 2. Hasil pengujian terhadap 30 sampel buah apel, sistem mampu mengklasifikasikan kondisi buah secara benar pada 26 sampel, sementara 4 sampel mengalami kesalahan klasifikasi. Rekapitulasi hasil pengujian tersebut disajikan pada tabel berikut:

Tabel 4. Pengujian Aktual dengan Hasil Sistem

Kondisi	Jumlah Sampel	Berhasil	Gagal
Baik	10	9	1
Rusak Ringan	10	7	3
Rusak Parah	10	10	0
Total	30	26	4

Tingkat Keberhasilan sistem:

$$Akurasi Sistem = \frac{26}{30} \times 100\% = 86,67\%$$

Untuk memberikan gambaran yang lebih komprehensif tentang kinerja sistem, evaluasi dilakukan menggunakan confusion matrix serta metrik precision, recall, dan F1-score untuk setiap kelas kondisi apel.

Tabel 5. Confusion Matrix Hasil Pengujian Sistem (30 Sampel)

Aktual \ Prediksi	Pred. Baik	Pred. Rusak Ringan	Pred. Rusak Parah
Aktual Baik (10)	9 (TP)	1 (FN)	0
Aktual Rusak Ringan (10)	3 (FP)	7 (TP)	0
Aktual Rusak Parah (10)	0	0	10 (TP)

Tabel 6. Metrik Evaluasi Performa Sistem per Kelas

Kelas	TP	FP	FN	Precision	Recall	F1-Score
Baik	9	3	1	0.75	0.90	0.82
Rusak Ringan	7	1	3	0.88	0.70	0.78
Rusak Parah	10	0	0	1.00	1.00	1.00
Rata-rata (Macro)	—	—	—	0.88	0.87	0.87
Akurasi Keseluruhan	26/30					86.7%

Berdasarkan *confusion matrix* pada Tabel 4, seluruh kesalahan klasifikasi terkonsentrasi pada perbatasan antara kelas Baik dan Rusak Ringan. Sebanyak 1 sampel Baik diklasifikasikan sebagai Rusak Ringan, dan 3 sampel Rusak Ringan diklasifikasikan sebagai Baik. Sementara itu, kelas Rusak Parah berhasil diklasifikasikan dengan sempurna tanpa satu pun kesalahan, dengan nilai *precision*, *recall*, dan *F1-score* masing-masing sebesar 1.00. Hal ini menunjukkan bahwa sistem sangat andal dalam mendeteksi apel yang telah mengalami kerusakan parah, yang merupakan kondisi paling kritis dari sisi keamanan pangan dan nilai ekonomi produk.

Dari Tabel 5 terlihat bahwa kelas Baik memiliki *recall* tertinggi (0.90), artinya sistem sangat baik dalam mengidentifikasi apel yang kondisinya masih baik. Namun *precision* kelas ini lebih rendah (0.75), yang berarti beberapa apel Rusak Ringan ikut terklasifikasikan sebagai Baik. Kondisi sebaliknya terjadi pada kelas Rusak Ringan, di mana *precision* lebih tinggi (0.88) namun *recall* lebih rendah (0.70). Kesalahan ini umumnya terjadi pada sampel dengan nilai sensor yang berada di zona perbatasan antar himpunan *fuzzy*, yaitu nilai Red sekitar 600–640 dan $\Delta\text{Gas} = 1-2$, di mana derajat keanggotaan dua himpunan yang berdekatan nilainya hampir sama sehingga keputusan sistem menjadi ambigu. Secara keseluruhan, sistem mencapai akurasi 86.7% dengan rata-rata *F1-score* makro sebesar 0.87, yang menunjukkan kinerja yang cukup andal dan seimbang dalam mengklasifikasikan ketiga kategori kondisi apel.

Jika dibandingkan dengan penelitian sebelumnya, penelitian yang dilakukan oleh Khafit [9] menggunakan metode sortir berbasis ukuran dan warna tanpa logika fuzzy dan tanpa sensor gas, dengan tingkat keberhasilan sortir warna sebesar 80%. Sementara penelitian Harahap [11] menerapkan logika fuzzy Sugeno pada buah tomat namun hanya menggunakan sensor warna tanpa melibatkan parameter gas. Penelitian ini menggabungkan kedua parameter sekaligus, yaitu warna dan gas, dengan pendekatan logika fuzzy Sugeno, dan menghasilkan akurasi sebesar 86,7%. Peningkatan ini menunjukkan bahwa penambahan parameter gas sebagai indikator kondisi kimiawi buah mampu memberikan informasi tambahan yang tidak dapat ditangkap oleh sensor warna saja. Selain itu, penggunaan logika fuzzy dinilai lebih sesuai dibandingkan pendekatan threshold sederhana untuk kasus ini, karena proses kerusakan buah bersifat gradual dan tidak memiliki batas yang tegas antar kategori. Pendekatan threshold yang menggunakan batas nilai kaku berisiko menghasilkan kesalahan klasifikasi yang lebih tinggi pada sampel-sampel yang nilainya berada di perbatasan antar kategori, sedangkan logika fuzzy mampu menangani kondisi tersebut dengan lebih fleksibel melalui derajat keanggotaan yang bersifat parsial.

3.6 Analisis Kesalahan dan Keterbatasan Sistem

Seluruh kesalahan klasifikasi terkonsentrasi pada perbatasan antara kelas Baik dan Rusak Ringan, tidak ada satu pun kesalahan pada kelas rusak parah. Kesalahan ini terjadi karena pada rentang nilai Red TCS3200 antara 600–640 ADC dan ΔGas MQ-135 antara 1–2 ADC, dua himpunan *fuzzy* yang bersebelahan merah segar dengan merah kusam, serta gas rendah dengan gas sedang menghasilkan derajat keanggotaan yang hampir setara. Akibatnya, proses inferensi Sugeno mengaktifkan dua aturan secara bersamaan dan menghasilkan nilai *output crisp* yang berada di antara dua kategori, sehingga keputusan akhir sistem sangat rentan terhadap fluktuasi sensor sekecil 1 unit ADC. Fluktuasi ini terutama berasal dari sensor MQ-135 yang sensitif terhadap perubahan suhu ruangan dan sirkulasi udara, ditambah nilai *baseline* gas yang hanya diambil sekali di awal sesi sehingga perubahan kondisi lingkungan selama pengujian tidak terkompensasi. Sensor TCS3200 juga digunakan tanpa kalibrasi formal terhadap sumber cahaya, sehingga variasi pencahayaan ruangan berpotensi menggeser nilai Red dan memperparah ketidakpastian pada zona perbatasan kategori.

4. Kesimpulan

Berdasarkan perancangan, implementasi, dan pengujian, sistem deteksi kerusakan buah apel merah berbasis mikrokontroler dengan sensor warna TCS3200, sensor gas MQ-135, dan metode logika *fuzzy* Sugeno berhasil direalisasikan dan berfungsi sesuai tujuan penelitian. Sistem mampu mendeteksi keberadaan buah, membaca parameter warna dan gas, serta mengolah data untuk mengklasifikasikan kondisi apel menjadi baik, rusak ringan, atau rusak parah. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai intensitas warna merah dari sensor TCS3200 dan nilai perubahan gas dari sensor MQ-135 dapat digunakan sebagai parameter *input* dalam sistem logika *Fuzzy* Sugeno untuk mengklasifikasikan kondisi buah apel ke dalam tiga kategori, yaitu baik, rusak ringan, dan rusak parah. Proses perhitungan *Fuzzy* Sugeno menghasilkan keluaran berupa nilai *crisp* yang kemudian digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan pada proses penyortiran buah. Dengan demikian, prototipe ini efektif sebagai alat deteksi dan pemilahan apel merah tanpa kamera, serta memiliki potensi pengembangan lebih lanjut dengan akurasi dan skala yang lebih besar.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. Ramadan, D. Syauqy, and R. Primananda, "Sistem Pendeteksi Kematangan Buah Apel menggunakan

- Metode Naïve Bayes berbasis Embedded System,” *J. Pengemb. Teknol. Inf. dan Ilmu Komput.*, vol. 5, no. 4, pp. 1654–1661, 2021.
- [2] C. Suryanti and M. G. Rohman, “Klasifikasi Kualitas Buah Apel Berdasarkan Warna dan Bentuk Menggunakan Metode KNN,” *Gener. J.*, vol. 8, no. 1, pp. 34–41, 2024, doi: 10.29407/gj.v8i1.21052.
 - [3] A. Ridho'i, K. Setyadjit, and B. Hariadi, “Menentukan kualitas buah apel malang berdasarkan kulitnya memanfaatkan pengolahan citra digital,” *J. Univ. 1945 Surabaya*, vol. 25, no. 2, pp. 1–12, 2022.
 - [4] N. E. R. Pah, S. A. S. Mola, and A. Y. Mauko, “Ekstrasi Ciri Warna Hsv Dan Ciri Bentuk Moment Invariant Untuk Klasifikasi Buah Apel Merah,” *J. Komput. dan Inform.*, vol. 9, no. 2, pp. 142–153, 2021, doi: 10.35508/jicon.v9i2.5043.
 - [5] F. A. Sihombing, “Kajian Fuzzy Metode Mamdani dan Fuzzy Metode Sugeno serta Implementasinya,” *Innov. J. Soc. Sci. Res.*, vol. 4, no. 4, pp. 4940–4955, 2024.
 - [6] B. Sugandi and J. Armentaria, “Sistem Penyiraman Tanaman Otomatis Menggunakan Metode Logika Fuzzy,” *J. Appl. Electr. Eng.*, vol. 5, no. 1, pp. 5–8, 2021, doi: 10.30871/jaee.v5i1.2991.
 - [7] R. Kurniawan, M. S. Hasibuan, and I. Prayuda, “Automatic Fish Sorter With Microcontroller Based Sugeno Fuzzy Logic,” *INFOKUM, August, Data Mining, Image Process. Artif. Intell.*, vol. 10, no. 3, pp. 85–92, 2022, [Online]. Available: <http://infor.seaninstitute.org/index.php/infokum/article/view/583>
 - [8] M. N. Saragih *et al.*, “Pelatihan Mikrokontroler Arduino dengan Simulasi Berbasis WebsiteWokwi pada Siswa SMAN 6 Samarinda,” *Inov. Teknol. Masy.*, vol. 2, no. 2, pp. 34–41, 2024, doi: 10.53622/intekmas.v2i2.265.
 - [9] M. N. Khafit, N. Khamdi, J. Jaenudin, and E. Edilla, “Rancang Bangun Alat Sortir Buah Apel Berdasarkan Perbedaan Ukuran dan Warna Menggunakan Mikrokontroler Arduino,” *JTEV (Jurnal Tek. Elektro dan Vokasional)*, vol. 9, no. 1, p. 147, 2023, doi: 10.24036/jtev.v9i1.122935.
 - [10] S. H. Wibowo, P. Musa, M. Artiyasa, F. M. Dewadi, D. A. Nggego, and I. Irwanto, *Robotika*. 2023.
 - [11] S. S. Harahap, *Implementasi Metode Logika Fuzzy Sugeno Pada Alat Penyortir Buah Tomat Berbasis Mikrokontroler*. 2021.
 - [12] T. M. Purba and P. Gultom, “Analisis Perbandingan Fuzzy Inference System Metode Mamdani dan Sugeno dalam Optimisasi Produksi Barang,” *Innov. J. Soc. Sci. Res.*, vol. 4, pp. 4076–4088, 2024.
 - [13] R. Ricardo, “Sistem Pakar Diagnosa Vitiligo Menerapkan Metode Fuzzy Sugeno,” *Kaji. Ilm. Inform. dan Komput.*, vol. 1, no. 6, pp. 253–256, 2021.
 - [14] I. Prayuda, “Pemilah Ikan Otomatis Dengan Logika Fuzzy Sugeno berbasis Mikrokontroler,” *Univ. Islam Negeri Sumatera Utara*, 2022, [Online]. Available: [http://repository.uinsu.ac.id/id/eprint/15712%0Ahttp://repository.uinsu.ac.id/15712/1/Skripsi Ivan Prayuda - Pemilah Ikan Otomatis Dengan Logika Fuzzy Sugeno Berbasis Mikrokontroler.pdf](http://repository.uinsu.ac.id/id/eprint/15712%0Ahttp://repository.uinsu.ac.id/15712/1/Skripsi%20Ivan%20Prayuda%20-%20Pemilah%20Ikan%20Otomatis%20Dengan%20Logika%20Fuzzy%20Sugeno%20Berbasis%20Mikrokontroler.pdf)
 - [15] V. P. Brahmaiah, A. S. Kumar, N. Neelima, S. S. Priyanka, and T. V. Jessy, “An Efficient Pulse Detector with Arduino and IR Sensor,” *2022 13th Int. Conf. Comput. Commun. Netw. Technol. ICCCNT 2022*, no. January 2023, 2022, doi: 10.1109/ICCCNT54827.2022.9984465.