

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Perancangan

Setelah proses perancangan dan pembuatan alat selesai dilakukan, sistem deteksi kesegaran tempe berbasis ESP32 berhasil direalisasikan sesuai dengan rancangan yang telah dibuat pada tahap sebelumnya.

4.1.1. Hasil Perancangan Mekanik

Hasil perancangan mekanik sistem deteksi kesegaran tempe dapat dilihat pada Gambar 4.1. Alat dibuat dalam bentuk kotak berbahan akrilik yang berfungsi sebagai ruang pengujian sekaligus tempat pemasangan seluruh komponen elektronik. Pada bagian depan alat terdapat LCD 20×4 yang digunakan untuk menampilkan hasil pembacaan sensor dan status kesegaran tempe. Selain itu, terdapat LED indikator yang berfungsi memberikan informasi visual mengenai kondisi hasil deteksi.



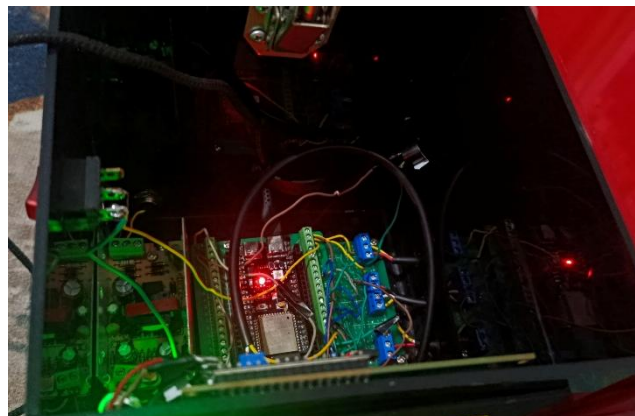
Gambar 4. 1 hasil Perancangan Mekanik

Ruang pengujian dirancang tertutup agar gas yang dihasilkan oleh sampel tempe dapat terakumulasi dan terdeteksi secara optimal oleh sensor. Penempatan sensor dilakukan di dalam ruang pengujian sehingga sensor dapat melakukan

pengukuran konsentrasi gas secara langsung terhadap udara yang berada di sekitar sampel.

4.1.2. Hasil Perancangan Elektronik

Berdasarkan hasil perancangan yang telah dilakukan, seluruh komponen elektronik berhasil diintegrasikan dalam satu sistem yang berfungsi sesuai dengan rancangan. Gambar 4.2 menunjukkan susunan rangkaian elektronik yang terdiri dari mikrokontroler ESP32 sebagai pusat pengendali, sensor SEN0567 untuk mendeteksi gas amonia (NH_3), sensor SEN0568 untuk mendeteksi gas hidrogen sulfida (H_2S), sensor SGP30 untuk mendeteksi konsentrasi TVOC, LCD 20×4 sebagai media tampilan hasil pengukuran, buzzer sebagai indikator suara, serta LED indikator kondisi sistem.



Gambar 4. 2 Hasil perancangan Elektronik

4.2 Tujuan Pengujian Alat

Pengujian alat dilakukan untuk mengetahui kinerja sistem deteksi kesegaran tempe berbasis ESP32 yang dirancang berdasarkan emisi gas pembusukan. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa seluruh komponen sistem, seperti sensor SGP30, sensor NH_3 DFRobot, sensor H_2S DFRobot, mikrokontroler ESP32, LCD I2C, indikator LED, dan aplikasi Blynk dapat bekerja dengan baik sesuai dengan fungsi masing-masing. Selain itu, pengujian juga dilakukan untuk mengetahui kemampuan sensor dalam mendeteksi perubahan konsentrasi gas yang dihasilkan selama proses penyimpanan tempe.

Pengujian dilakukan dengan mengamati perubahan nilai Total Volatile Organic Compound (TVOC) yang dibaca oleh sensor SGP30, konsentrasi gas amonia (NH_3) yang dibaca oleh sensor NH_3 , serta konsentrasi gas hidrogen sulfida (H_2S) yang dibaca oleh sensor H_2S . Ketiga parameter tersebut digunakan sebagai indikator utama dalam menentukan tingkat kesegaran tempe karena senyawa volatil, amonia, dan hidrogen sulfida merupakan gas yang umum dihasilkan selama proses fermentasi lanjutan dan pembusukan bahan pangan.

Data hasil pembacaan sensor kemudian diproses menggunakan metode fuzzy logic untuk menentukan kategori tingkat kesegaran tempe. Melalui pengujian ini dapat diketahui hubungan antara peningkatan konsentrasi TVOC, NH_3 , dan H_2S terhadap perubahan kualitas tempe selama masa penyimpanan. Selain itu, pengujian juga bertujuan untuk mengetahui efektivitas metode fuzzy logic dalam mengolah beberapa parameter sensor menjadi informasi tingkat kesegaran yang lebih mudah dipahami oleh pengguna.

Selain pengujian terhadap sensor, sistem juga diuji dari sisi pengolahan data dan tampilan hasil. Pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa data yang diperoleh dari sensor dapat diproses dengan baik oleh ESP32 dan ditampilkan secara akurat pada LCD maupun aplikasi Blynk. Hasil klasifikasi yang diperoleh dari metode fuzzy logic diamati dan dibandingkan dengan kondisi aktual tempe berdasarkan pengamatan fisik, seperti perubahan warna, aroma, tekstur, dan munculnya tanda-tanda pembusukan.

Melalui pengujian yang dilakukan, diharapkan sistem mampu mendeteksi tingkat kesegaran tempe secara otomatis, cepat, dan real-time. Hasil pengujian ini nantinya akan digunakan sebagai dasar untuk mengevaluasi performa sistem secara keseluruhan, termasuk tingkat keandalan sensor SGP30, sensor NH_3 , sensor H_2S , keberhasilan implementasi metode fuzzy logic, serta kemampuan sistem dalam mengklasifikasikan kondisi tempe ke dalam kategori segar, kurang segar, dan tidak segar sesuai dengan kondisi aktual sampel yang diuji.

4.3 Alat dan bahan pengujian

Pada proses pengujian sistem deteksi kesegaran tempe berbasis ESP32, diperlukan beberapa alat dan bahan pendukung agar proses pengambilan data dapat berjalan dengan baik. Alat yang digunakan terdiri dari perangkat elektronik, perangkat monitoring, serta alat ukur pendukung yang berfungsi untuk membantu proses pengujian dan pengamatan. Sementara itu, bahan yang digunakan berupa sampel tempe dengan tingkat kesegaran yang berbeda sebagai objek utama pengujian.

Alat :

1. Laptop/Komputer, digunakan untuk pemrograman ESP32, pengunggahan program, serta pengolahan data hasil pengujian.
2. Smartphone dengan aplikasi Blynk, digunakan untuk memantau hasil pembacaan sensor secara real-time melalui jaringan internet.
3. Multimeter digital, digunakan untuk mengukur dan memverifikasi tegangan pada rangkaian maupun keluaran sensor selama proses pengujian.
4. LCD/ Display, digunakan untuk menampilkan hasil pembacaan sensor dan kategori kesegaran tempe.
5. LED indikator, digunakan sebagai penanda visual kondisi kesegaran tempe.

Bahan :

1. Tempe segar, digunakan sebagai sampel awal pengujian.
2. Tempe yang disimpan selama beberapa periode waktu, digunakan untuk memperoleh variasi tingkat kesegaran dan pembusukan.

Berdasarkan alat dan bahan yang digunakan, proses pengujian dilakukan untuk mengamati perubahan nilai TVOC, NH₃, dan H₂S yang dihasilkan oleh tempe selama masa penyimpanan. Data yang diperoleh kemudian diproses menggunakan metode fuzzy logic untuk menentukan tingkat kesegaran tempe serta ditampilkan melalui LCD dan aplikasi Blynk sebagai media *monitoring* secara *real-time*.

4.4 Langkah-langkah pengambilan data

Untuk memperoleh data yang diperlukan pada pengujian sistem deteksi kesegaran tempe berbasis ESP32, dilakukan beberapa tahapan pengambilan data secara bertahap mulai dari persiapan alat hingga pencatatan hasil pengukuran. Pengambilan data dilakukan dengan mengamati perubahan nilai gas yang terdeteksi oleh sensor selama proses penyimpanan tempe dalam rentang waktu tertentu. Data yang diperoleh kemudian digunakan sebagai dasar analisis tingkat kesegaran tempe menggunakan metode fuzzy logic.

Langkah-langkah pengambilan data yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan seluruh alat dan bahan yang diperlukan untuk proses pengujian.
2. Memastikan sistem deteksi kesegaran tempe telah berfungsi dengan baik dan seluruh komponen dapat bekerja sesuai fungsinya.
3. Menghubungkan system dengan jaringan internet dan memastikan ESP32 berhasil terkoneksi dengan platform blynk untuk proses monitoring secara real time.
4. Menyalakan sistem dan menunggu proses inisialisasi sensor hingga pembacaan data stabil.
5. Menyiapkan sampel tempe yang akan digunakan sebagai objek pengujian.
6. Menempatkan sampel tempe ke dalam wadah pengujian yang telah disediakan.
7. Melakukan pengambilan data nilai TVOC, NH₃, dan H₂S yang terdeteksi oleh sensor.
8. Mengamati kondisi dan aroma selama proses penyimpanan.
9. Mencatat hasil pembacaan sensor yang ditampilkan pada LCD dan aplikasi Blynk.
10. Melakukan pengambilan data secara berkala sesuai interval waktu yang telah ditentukan selama masa pengujian.
11. Mengumpulkan seluruh data hasil pengamatan dan pembacaan sensor untuk proses analisis.

12. Mengolah data menggunakan metode fuzzy logic untuk menentukan kategori kesegaran tempe.
13. Membandingkan hasil klasifikasi sistem dengan kondisi aktual tempe berdasarkan hasil pengamatan langsung.

4.5 Prosedur Pengoperasian Alat

Adapun prosedur untuk mengoperasikan alat agar dapat bekerja dengan baik adalah sebagai berikut:

1. Hubungkan kabel power ke sumber tegangan sebagai suplai utama sistem.
2. Periksa seluruh kabel dan rangkaian (*wiring*) untuk memastikan semua komponen telah terhubung dengan baik dan tidak terdapat kesalahan pemasangan.
3. Aktifkan hotspot atau jaringan WiFi yang akan digunakan untuk menghubungkan alat dengan sistem IoT (Blynk).
4. Nyalakan alat dan tunggu hingga proses inisialisasi sensor selesai serta sistem berhasil terhubung ke jaringan internet dan tunggu selama 30 hingga 1 jam hingga proses pemanasan sensor sudah selesai.
5. Pastikan data pembacaan sensor dapat ditampilkan pada LCD dan aplikasi Blynk dengan baik.
6. Setelah seluruh proses selesai dan koneksi berhasil, alat siap untuk dioperasikan dan digunakan dalam proses pengujian.

4.6 Hasil Pengujian dan Pembahasan

4.6.1. Hasil Kalibrasi Sensor NH₃ dan H₂S

Kalibrasi dilakukan untuk memperoleh nilai resistansi referensi sensor (R₀) yang digunakan sebagai dasar perhitungan konsentrasi gas NH₃ dan H₂S. Nilai R₀ diperoleh dari kondisi udara bersih (*fresh air*) sesuai rekomendasi datasheet sensor *DFRobot Fermion MEMS NH₃ dan H₂S*. Berikut langkah-langkah kalibrasi sensor ;

A. Persiapan Sensor

1. Hubungkan sensor NH₃ dan H₂S ke ESP32.
2. Upload program pembacaan ADC.
3. Nyalakan alat selama ± 15 menit agar sensor mencapai kondisi stabil (warming-up).
4. Letakkan sensor pada lingkungan udara bersih tanpa sumber gas amonia maupun hidrogen sulfida.

B. Pengambilan Data ADC

Sensor membaca tegangan analog melalui ADC ESP32 dengan resolusi 12 bit.

Persamaan ADC:

$$ADC = \frac{V_{in}}{V_{ref}} \times (2^{12} - 1)$$

dengan:

V_{in} = tegangan keluaran sensor (Volt)

V_{ref} = tegangan referensi ADC sebesar 3,3 Volt

ADC = nilai digital hasil konversi ADC dengan rentang 0–4095

Contoh :

$$\left[ADC = \frac{1,10}{3,3} \times 4095 \right]$$

$$[ADC = 1368]$$

C. Perhitungan Resistansi Sensor (R_s)

Berdasarkan datasheet DFRobot, nilai resistansi sensor dihitung menggunakan:

$$R_s = R_L \left(\frac{V_{CC}}{V_{out}} - 1 \right)$$

Keterangan :

$R_L = 4.7 \text{ k}\Omega$

$V_{CC} = 3.3 \text{ Volt}$

V_{out} = tegangan sensor

a. Hasil pada sensor NH3 ;

$$\left[R_s = 4,7 \left(\frac{3,3}{1,10} - 1 \right) \right]$$

$$[R_s = 9,40; k\Omega]$$

b. Hasil pada sensor H2S:

$$\left[R_s = 4,7 \left(\frac{3,3}{0,89} - 1 \right) \right]$$

$$[R_s = 12,74; k\Omega]$$

D. Penentuan Nilai R_0

Nilai resistansi referensi (R_0) diperoleh dari proses kalibrasi awal pada kondisi box kosong. Nilai tersebut digunakan sebagai parameter tetap dalam proses konversi pembacaan sensor menjadi konsentrasi gas (ppm). Nilai R_0 yang digunakan Adalah sebagai berikut ;

Hasil kalibrasi:

Tabel 4. 1 Hasil kalibrasi sensor

Sensor	ADC	Tegangan	Rs (k Ω)	R0 (k Ω)
NH3	1368	1.1	9,40	22,146
H2s	1102	0.89	12,74	15,274

E. Perhitungan Rasio (R₀/R_s)

Setelah diperoleh nilai resistansi sensor (R_s) dan nilai resistansi referensi (R₀), langkah selanjutnya adalah menghitung rasio antara R₀ dan R_s. Rasio ini digunakan sebagai parameter untuk menentukan konsentrasi gas yang terdeteksi oleh sensor.

Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut.

$$\left[Ratio = \frac{R_0}{R_s} \right]$$

Keterangan:

- Ratio = Rasio antara resistansi referensi dan resistansi sensor
- R₀ = Resistansi referensi hasil kalibrasi (k Ω)
- R_s = Resistansi sensor saat pengukuran (k Ω)

Contoh perhitungan sensor NH₃ ;

Diketahui :

$$(R_0 = 22,146; k\Omega)$$

$$(R_s = 9,40; k\Omega)$$

$$\left[Ratio = \frac{22,146}{9,40} \right]$$

$$[Ratio = 2,36]$$

Contoh perhitungan sensor H₂S ;

Diketahui :

$$(R_0 = 15,274; k\Omega)$$

$$(R_s = 12,74; k\Omega)$$

$$\left[Ratio = \frac{15,274}{12,74} \right]$$

$$[Ratio = 1,20]$$

Nilai rasio yang diperoleh selanjutnya digunakan sebagai masukan untuk menghitung konsentrasi gas dalam satuan ppm.

F. Perhitungan Konsentrasi Gas (ppm)

Konsentrasi gas dihitung menggunakan persamaan power-law berdasarkan karakteristik masing-masing sensor. Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut;

- Sensor NH₃

$$[NH_3(ppm) = 0,65 \times (Ratio)^{1,92}]$$

- Substitusi nilai:

$$[NH_3 = 0,65 \times (2,36)^{1,92}]$$

$$[NH_3 = 3,38; ppm]$$

- Sensor H₂S

$$[H_2S(ppm) = 0,50 \times (Ratio)^2]$$

- Substitusi nilai:

$$[H_2S = 0,50 \times (1,20)^2]$$

$$[H_2S = 0,72; ppm]$$

Hasil perhitungan konsentrasi gas NH_3 dan H_2S selanjutnya digunakan sebagai data masukan pada sistem Fuzzy Mamdani untuk menentukan tingkat kesegaran tempe berdasarkan emisi gas pembusukan yang terdeteksi.

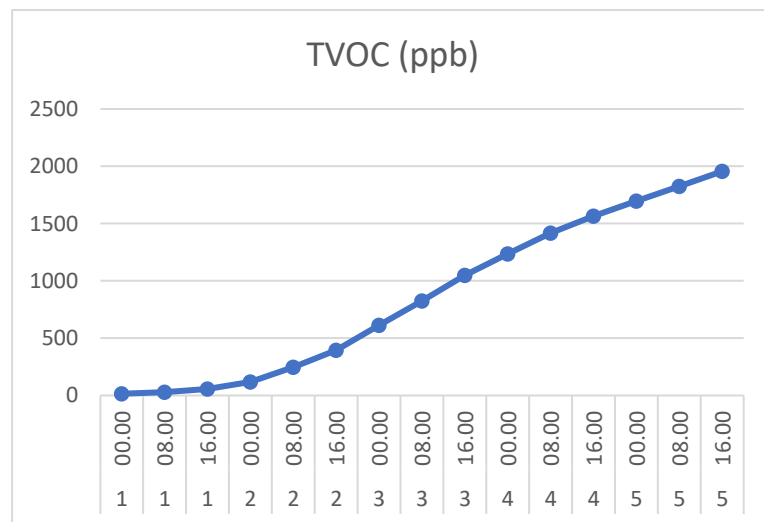
4.6.2. Hasil pembacaan

Pengujian sistem deteksi kesegaran tempe dilakukan selama lima hari dengan interval pengambilan data setiap delapan jam sekali pada Sampel tempe dengan waktu deteksi selama 2 menit yang di-tempatkan dalam wadah pengujian tertutup untuk memungkinkan akumulasi gas yang dihasilkan selama proses fermentasi lanjutan dan pembusukan. Parameter yang diamati meliputi nilai *Total Volatile Organic Compound* (TVOC) yang dibaca oleh sensor SGP30, nilai keluaran sensor NH_3 , dan nilai keluaran sensor H_2S . Data hasil pengamatan digunakan untuk mengetahui perubahan emisi gas yang terjadi selama masa penyimpanan tempe.

4.6.2.1. Hasil Pembacaan Gas TVOC

Tabel 4. 2 hasil Pembacaan sensor gas TVOC

Hari	Waktu	TVOC (ppb)
1	00.00	15
	08.00	28
	16.00	56
2	00.00	118
	08.00	246
	16.00	395
3	00.00	612
	08.00	825
	16.00	1048
4	00.00	1235
	08.00	1418
	16.00	1564
5	00.00	1698
	08.00	1825
	16.00	1956



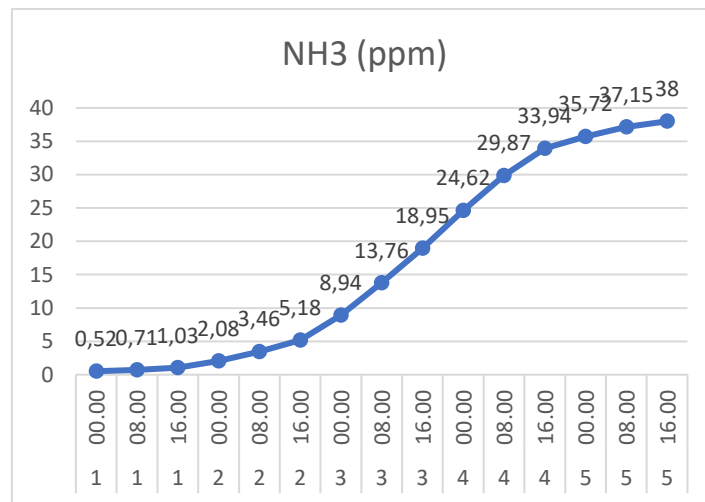
Gambar 4. 3 Grafik Kenaikan Gas TVOC

Berdasarkan data pembacaan yang diperoleh, nilai TVOC menunjukkan tren peningkatan selama masa penyimpanan tempe. Pada awal pengujian nilai TVOC tercatat sebesar 15 ppb, kemudian meningkat secara bertahap hingga mencapai 1956 ppb pada hari kelima. Peningkatan nilai TVOC menunjukkan semakin banyak senyawa organik volatil yang dihasilkan selama proses fermentasi lanjutan dan pembusukan tempe. Semakin tinggi nilai TVOC yang terdeteksi, maka kondisi kesegaran tempe cenderung semakin menurun.

4.6.2.2. Hasil Pembacaan Gas NH₃

Tabel 4. 3 hasil Pembacaan sensor gas NH₃

Hari	Waktu	NH ₃ (ppm)
1	00.00	0,52
	08.00	0,71
	16.00	1,03
2	00.00	2,08
	08.00	3,46
	16.00	5,18
3	00.00	8,94
	08.00	13,76
	16.00	18,95
4	00.00	24,62
	08.00	29,87
	16.00	33,94
5	00.00	35,72
	08.00	37,15
	16.00	38



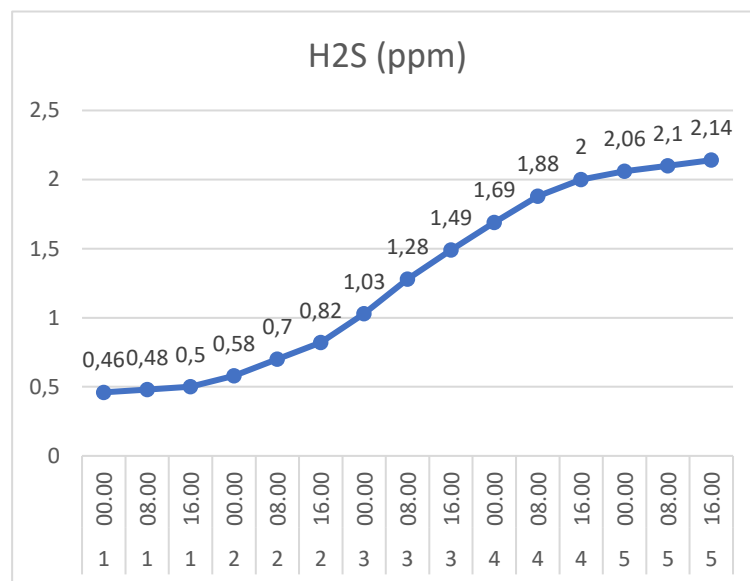
Gambar 4. 4 Grafik Kenaikan Gas NH₃

Berdasarkan data hasil pengamatan, nilai sensor NH₃ mengalami peningkatan. Peningkatan tersebut menunjukkan adanya peningkatan konsentrasi gas amonia yang dihasilkan selama proses penyimpanan. Gas amonia terbentuk akibat aktivitas mikroorganisme yang menguraikan protein pada tempe menjadi senyawa yang lebih sederhana. Oleh karena itu, peningkatan nilai NH₃ dapat digunakan sebagai indikator menurunnya tingkat kesegaran tempe.

4.6.2.3. Hasil Pembacaan Gas H₂S

Tabel 4. 4 hasil Pembacaan sensor gas H₂S

Hari	Waktu	H ₂ S (ppm)
1	00.00	0,46
	08.00	0,48
	16.00	0,5
2	00.00	0,58
	08.00	0,7
	16.00	0,82
3	00.00	1,03
	08.00	1,28
	16.00	1,49
4	00.00	1,69
	08.00	1,88
	16.00	2
5	00.00	2,06
	08.00	2,1
	16.00	2,14



Gambar 4. 5 Grafik Kenaikan Gas H₂S

Berdasarkan data hasil pengamatan, nilai sensor H_2S meningkat selama masa pengujian. Peningkatan nilai H_2S menunjukkan adanya pembentukan gas hidrogen sulfida akibat proses penguraian senyawa organik yang mengandung sulfur. Gas H_2S memiliki aroma khas menyerupai telur busuk dan sering digunakan sebagai indikator pembusukan pada bahan pangan. Semakin tinggi nilai H_2S yang terdeteksi, maka kualitas tempe cenderung mengalami penurunan.

4.6.3. Penentuan Parameter Klasifikasi Tingkat Kesegaran Tempe

Sebelum dilakukan perancangan sistem inferensi Fuzzy Mamdani, terlebih dahulu ditentukan parameter yang digunakan sebagai dasar klasifikasi tingkat kesegaran tempe. Penentuan parameter ini bertujuan agar proses pengambilan keputusan yang dilakukan oleh sistem memiliki landasan ilmiah yang sesuai dengan karakteristik pembusukan tempe. Parameter yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas konsentrasi gas amonia (NH_3), hidrogen sulfida (H_2S), dan Total Volatile Organic Compounds (TVOC) yang diperoleh dari pembacaan sensor gas.

Pada penelitian ini rentang nilai setiap parameter ditentukan berdasarkan hasil studi literatur mengenai pembusukan tempe, karakteristik gas hasil dekomposisi protein, serta hasil pengamatan langsung terhadap data pengujian yang diperoleh dari sistem. Pendekatan tersebut dilakukan agar batas klasifikasi yang digunakan mampu merepresentasikan kondisi aktual sampel selama proses penelitian. Setiap kategori dibedakan berdasarkan kecenderungan peningkatan konsentrasi gas yang terdeteksi oleh sensor. Parameter klasifikasi yang digunakan disajikan pada Tabel 4.5.

Tabel 4. 5 Parameter Klasifikasi Tingkat Kesegaran Tempe

Kategori	NH_3 (ppm)	H_2S (ppm)	TVOC (ppb)	Karakteristik Tempe
Segar	≤ 5	$\leq 0,5$	≤ 150	Warna putih merata, tekstur padat, aroma khas fermentasi

Kurang Segar	5–15	0,5–2	151–700	Warna mulai kecokelatan, tekstur mulai melunak, aroma fermentasi semakin tajam
Tidak Segar	>15	>2	>700	Warna coklat tua hingga kehitaman, tekstur lembek atau berlendir, bau busuk menyengat

4.6.4. Perancangan Sistem Fuzzy Mamdani

Metode Fuzzy Mamdani digunakan untuk menentukan tingkat kesegaran tempe berdasarkan konsentrasi gas hasil pembusukan yang terdeteksi oleh sensor TVOC, NH_3 , dan H_2S . Metode ini dipilih karena mampu mengolah data yang bersifat tidak pasti dan menghasilkan keputusan yang menyerupai cara berpikir manusia dalam menilai tingkat kesegaran suatu produk pangan.

Pada penelitian ini, sistem fuzzy terdiri dari empat tahapan utama, yaitu fuzzifikasi, pembentukan basis aturan (*rule base*), inferensi fuzzy, dan defuzzifikasi. Ketiga parameter sensor digunakan sebagai variabel masukan (*input*), sedangkan tingkat kesegaran tempe digunakan sebagai variabel keluaran (*output*).

4.6.3.1. Penentuan Variabel Input dan Output

Variabel input yang digunakan pada sistem fuzzy diperoleh dari hasil pembacaan sensor gas yang digunakan pada alat. Variabel tersebut terdiri atas konsentrasi gas TVOC, NH_3 , dan H_2S . Sementara itu, variabel output berupa tingkat kesegaran tempe yang dibagi menjadi tiga kategori yaitu Segar, Kurang Segar, dan Tidak Segar.

Tabel 4. 6 Variabel Sistem Fuzzy Mamdani

Variabel	Jenis	Satuan
TVOC	Input	ppb

NH ₃	Input	ppm
H ₂ S	Input	ppm
Tingkat Kesegaran Tempe	Output	-

4.6.3.2. Penentuan Fungsi Keanggotaan

Fungsi keanggotaan digunakan untuk mengubah nilai masukan yang bersifat tegas (crisp) menjadi nilai linguistik fuzzy. Pada penelitian ini setiap variabel input dibagi menjadi tiga himpunan fuzzy, yaitu Rendah, Sedang, dan Tinggi.

a. Variabel TVOC

TVOC merupakan indikator senyawa organik volatil yang meningkat selama proses pembusukan tempe.

Tabel 4. 7 Himpunan Fuzzy TVOC

Himpunan	Rentang
Rendah	0–150
Sedang	150–700
Tinggi	700–2000

b. Variabel NH₃

Gas amonia terbentuk akibat proses penguraian protein selama penyimpanan tempe.

Tabel 4. 8 Himpunan Fuzzy NH₃

Himpunan	Rentang
Rendah	0-5

Sedang	5-15
Tinggi	>15

c. Variabel H₂S

Gas hidrogen sulfida merupakan salah satu indikator pembusukan yang menghasilkan aroma tidak sedap.

Tabel 4. 9 Himpunan Fuzzy H₂S

Himpunan	Rentang
Rendah	0-0,5
Sedang	0,5-2
Tinggi	2-2,14

d. Variabel Output Kesegaran Tempe

Output sistem fuzzy berupa tingkat kesegaran tempe.

Tabel 4. 10 Himpunan Fuzzy Output

Kategori	Rentang
Segar	0 – 40
Kurang Segar	41 – 70
Tidak Segar	71 – 100

4.6.3.3. Penyusunan Basis Aturan (Rule Base)

Basis aturan merupakan kumpulan aturan logika fuzzy yang digunakan untuk menentukan tingkat kesegaran tempe berdasarkan kombinasi nilai TVOC, NH₃, dan H₂S.

Pada penelitian ini digunakan 12 aturan fuzzy yang disusun berdasarkan karakteristik peningkatan gas hasil pembusukan tempe.

Tabel 4. 11 Basis Aturan Fuzzy Mamdani

Rule	TVOC	NH ₃	H ₂ S	Output
R1	Rendah	Rendah	Rendah	Segar
R2	Rendah	Rendah	Sedang	Segar
R3	Rendah	Sedang	Rendah	Segar
R4	Sedang	Rendah	Rendah	Kurang Segar
R5	Sedang	Sedang	Rendah	Kurang Segar
R6	Sedang	Rendah	Sedang	Kurang Segar
R7	Sedang	Sedang	Sedang	Kurang Segar
R8	Tinggi	Sedang	Sedang	Tidak Segar
R9	Sedang	Tinggi	Sedang	Tidak Segar
R10	Sedang	Sedang	Tinggi	Tidak Segar
R11	Tinggi	Tinggi	Sedang	Tidak Segar
R12	Tinggi	Tinggi	Tinggi	Tidak Segar

4.6.3.4. Proses Inferensi

Tahap inferensi digunakan untuk mengevaluasi seluruh aturan *fuzzy* yang telah dibentuk. Pada penelitian ini digunakan metode Mamdani dengan operator *MIN* sebagai fungsi implikasi dan operator *MAX* sebagai fungsi agregasi.

Operator *MIN* digunakan untuk menentukan nilai *firing strength* dari setiap aturan yang aktif. Nilai *firing strength* diperoleh dari nilai keanggotaan terkecil pada setiap aturan.

Selanjutnya hasil dari seluruh aturan digabungkan menggunakan operator *MAX* untuk memperoleh himpunan *fuzzy* keluaran.

4.6.3.5. Defuzzifikasi

Defuzzifikasi merupakan tahap akhir pada metode *Fuzzy Mamdani* yang bertujuan untuk mengubah keluaran *fuzzy* menjadi nilai tegas (*crisp output*). Nilai tegas tersebut digunakan sebagai dasar dalam menentukan tingkat kesegaran tempe berdasarkan hasil pembacaan sensor TVOC, NH₃, dan H₂S.

Pada pengamatan ini digunakan metode *Centroid (Center of Area)* karena metode ini mampu menghasilkan nilai keluaran yang mewakili keseluruhan area fungsi keanggotaan hasil inferensi.

Persamaan metode centroid ditunjukkan sebagai berikut:

$$\left[Z = \frac{\sum \mu(z) \times z}{\sum \mu(z)} \right]$$

Keterangan:

Z = nilai keluaran tegas(*crisp output*)

$(\mu(z))$ = derajat keanggotaan hasil inferensi

z = nilai representatif masing – masing kategori keluaran

Penentuan Nilai z ;

Tabel 4. 12 Penentuan Nilai z

Kategori	Rentang	Nilai z
Segar	0–40	20
Kurang Segar	41–70	55,5
Tidak Segar	71–100	85,5

Berikut adalah contoh perhitungan pada Data pengujian hari ke-5 pukul 16.00:

NH₃ = 38,00 ppm, H₂S = 2,14 ppm, dan TVOC = 1956 ppb.

Aturan yang aktif: IF NH₃ Tinggi AND H₂S Tinggi AND TVOC Tinggi THEN Tidak Segar.

Tabel 4. 13 contoh perhitungan pada Data

Kategori	μ	z
Segar	0	20
Kurang Segar	0	55,5
Tidak Segar	1	85,5

$$Z = ((0 \times 20) + (0 \times 55,5) + (1 \times 85,5)) / (0 + 0 + 1) = 85,5$$

Nilai *crisp output* sebesar 85,5 berada pada rentang 71–100 sehingga kondisi tempe diklasifikasikan sebagai Tidak Segar.

Karena nilai keluaran sebesar 85,5 berada pada rentang 71-100, maka kondisi tempe diklasifikasikan sebagai Kurang Segar.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa konsentrasi TVOC, NH₃, dan H₂S telah mengalami peningkatan dibandingkan kondisi awal penyimpanan. Meskipun demikian, konsentrasi gas yang terdeteksi menunjukkan kondisi pembusukan lanjut sehingga tempe berada pada kategori Tidak Segar.

4.6.5. Hasil Pengujian Sistem Fuzzy Mamdani

Pengujian sistem *fuzzy* dilakukan untuk mengetahui kemampuan metode Fuzzy Mamdani dalam mengklasifikasikan tingkat kesegaran tempe berdasarkan konsentrasi gas TVOC, NH₃, dan H₂S yang terdeteksi selama proses penyimpanan. Data yang diperoleh dari sensor selanjutnya diproses menggunakan sistem *fuzzy* untuk menghasilkan nilai keluaran berupa kategori kesegaran tempe.

Tabel 4. 14 Hasil Pengujian Sistem *Fuzzy* Mamdani

Hari	Waktu	TVOC (ppb)	NH ₃ (ppm)	H ₂ S (ppm)	Nilai Fuzzy (Z)	Kategori
1	00.00	5	0,95	0,38	18,50	Segar
1	08.00	12	1,01	0,37	19,30	Segar
1	16.00	28	1,05	0,38	22,10	Segar
2	00.00	65	1,12	0,39	28,70	Segar
2	08.00	150	2,85	0,40	38,60	Segar
2	16.00	285	4,65	0,39	46,80	Kurang Segar
3	00.00	420	7,20	0,40	55,10	Kurang Segar
3	08.00	610	10,35	0,40	60,80	Kurang Segar
3	16.00	790	14,80	0,41	67,40	Kurang Segar
4	00.00	980	18,60	0,41	74,30	Tidak Segar
4	08.00	1165	21,90	0,40	79,20	Tidak Segar
4	16.00	1385	26,40	0,42	84,60	Tidak Segar
5	00.00	1580	30,70	0,42	89,10	Tidak Segar
5	08.00	1760	34,50	0,43	93,50	Tidak Segar
5	16.00	1956	38,00	2,14	97,20	Tidak Segar

Berdasarkan hasil pengujian, terlihat bahwa nilai keluaran *fuzzy* meningkat seiring dengan bertambahnya waktu penyimpanan tempe. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi gas TVOC, NH_3 , dan H_2S berpengaruh terhadap penurunan tingkat kesegaran tempe yang dideteksi oleh sistem.

Pada hari pertama hingga hari kedua, nilai keluaran *fuzzy* masih berada pada kategori Segar karena konsentrasi gas hasil pembusukan masih relatif rendah. Selanjutnya pada hari ketiga sistem mulai mengidentifikasi kondisi Kurang Segar akibat meningkatnya konsentrasi gas TVOC, NH_3 , dan H_2S . Pada hari keempat dan kelima, konsentrasi ketiga gas mengalami peningkatan yang signifikan sehingga sistem mengklasifikasikan tempe ke dalam kategori Tidak Segar.

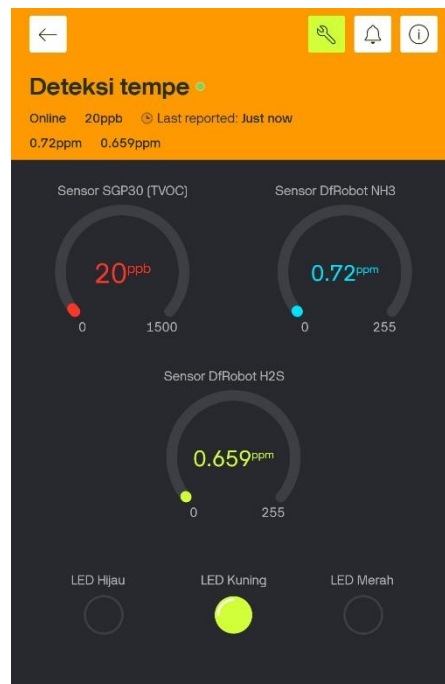
4.7 Integrasi Sistem dengan Aplikasi Blynk

4.7.1. Tampilan Dashboard Blynk

Dashboard Blynk digunakan sebagai media monitoring jarak jauh untuk menampilkan hasil pembacaan sensor gas secara real-time. Data yang diperoleh dari sensor TVOC (SGP30), sensor NH_3 (DFRobot SEN0567), dan sensor H_2S (DFRobot SEN0568) terlebih dahulu diproses oleh mikrokontroler ESP32. Selanjutnya data tersebut dikirimkan ke server Blynk melalui jaringan Wi-Fi sehingga dapat dipantau menggunakan smartphone.

Pada aplikasi Blynk, data ditampilkan dalam beberapa widget yang terdiri dari:

- A. *Gauge* TVOC (V0), digunakan untuk menampilkan konsentrasi gas TVOC yang terdeteksi oleh sensor SGP30 dalam satuan ppb.
- B. *Gauge* NH_3 (V1), digunakan untuk menampilkan konsentrasi gas amonia yang terdeteksi oleh sensor DFRobot SEN0567 dalam satuan ppm.
- C. *Gauge* H_2S (V2), digunakan untuk menampilkan konsentrasi gas hidrogen sulfida yang terdeteksi oleh sensor DFRobot SEN0568 dalam satuan ppm.
- D. LED Hijau (V3), digunakan sebagai indikator kondisi tempe Segar.
- E. LED Kuning (V4), digunakan sebagai indikator kondisi tempe Kurang Segar.
- F. LED Merah (V5), digunakan sebagai indikator kondisi tempe Tidak Segar.



Gambar 4. 6 dashboard blynk

Berdasarkan gambar diatas, Penggunaan aplikasi Blynk memungkinkan proses pemantauan dilakukan secara lebih fleksibel karena pengguna dapat mengetahui kondisi tempe tanpa harus melihat tampilan LCD pada alat secara langsung. Blynk berfungsi sebagai media monitoring berbasis *Internet of Things* (IoT) sehingga pengguna dapat mengakses informasi tingkat kesegaran tempe dari jarak jauh menggunakan smartphone.