

# Rancang Bangun Alat Deteksi *Salmonella* sp. pada Susu Berbasis *Electronic Nose*

Mohamad Syafaat<sup>1</sup>, Wulan Fitriani Safari<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Prodi Fisika, Institut Sains dan Teknologi Nasional, Jakarta 12630, Indonesia

<sup>2</sup>Prodi Teknologi Laboratorium Medis, Universitas Binawan, Jakarta 13630, Indonesia

Corresponding Author: wulan.fitriani@binawan.ac.id

## Riwayat Artikel

Diserahkan : 4, November , 2024

Diterima : 15, November, 2024

Direvisi : 2, Januari, 2025

Dipublikasi : 31, Mei, 2025

## Abstrak

Kontaminasi bakteri patogen dalam susu dapat menyebabkan kerusakan susu dan menjadi pintu gerbang penularan penyakit ke manusia. *Salmonella* sp. merupakan salah satu bakteri patogen yang mengontaminasi susu dan dapat menular ke manusia yang mengonsumsi susu tersebut. Keamanan susu dalam kaitannya dengan penyakit bawaan makanan merupakan hal yang penting untuk diperhatikan. Oleh karena itu perlu dilakukan pemeriksaan kontaminasi bakteri *Salmonella* dalam susu. Tujuan penelitian ini yaitu membuat membuat rancang bangun alat deteksi *Salmonella* sp. pada susu berbasis *Electronic Nose* (*E-nose*). Penelitian dilakukan melalui beberapa tahap yaitu pembuatan blok diagram, perancangan mekanik, perancangan Arduino, kalibrasi dan pengujian alat. Rancang bangun alat yang dibuat menggunakan sensor MQ-136 yang akan mendeteksi gas Hidrogen Sulfida ( $H_2S$ ). Hasil pengujian alat menunjukkan hasil pembacaan sensor MQ-136 udara bebas 92-118 ppm sedangkan pembacaan sensor MQ-136 susu yang diberi kultur *Salmonella* sp. dan diinkubasi 24 jam sebesar 126-166 ppm. Rancang bangun alat deteksi *Salmonella* sp. pada susu berbasis *electronic nose* berhasil dibuat. Hasil pengujian menunjukkan rancang bangun alat dapat mendeteksi *Salmonella* Sp. dalam susu setelah inkubasi 12 jam.

**Kata kunci:** *Salmonella* sp., susu, *Electronic nose*, MQ-136.

## Abstract

*Contamination of pathogenic bacteria in milk can cause milk spoilage and become a gateway for disease transmission to humans. Salmonella sp. is one of the pathogenic bacteria that contaminates milk and can be transmitted to humans who consume the milk. The safety of milk in relation to foodborne diseases is an important thing to consider. Therefore, it is necessary to examine the contamination of pathogenic bacteria in milk. The purpose of this study was to design a Salmonella sp. detection instrument in milk based on Electronic Nose (E-nose). The research was conducted through several stages, making block diagrams, mechanical design, Arduino design, calibration and instrument testing. The instrument using the MQ-136 sensor which will detect Hydrogen Sulfide ( $H_2S$ ) gas. The results test showed the reading of the MQ-136 sensor in free air was 92-118 ppm while the reading of the MQ-136 sensor in milk given Salmonella sp. culture and incubated for 24 hours was 126-166 ppm. The design of the Salmonella sp. detection tool in milk based on an electronic nose was successfully made. The test results showed that the design of the tool could detect Salmonella Sp. in milk after 12 hours of incubation.*

**Keywords:** *Salmonella* sp., milk, *Electronic nose*, MQ-136.

## 1. Pendahuluan

Susu dihasilkan dari kelenjar susu mamalia dan mengandung semua unsur yang diperlukan dan dapat dicerna dalam bentuk yang seimbang untuk pertumbuhan, reproduksi, sumber energi, pemeliharaan, dan perbaikan tubuh [1]. Susu merupakan bahan pangan yang kaya akan

zat gizi dengan komposisi terdiri dari 87% dari air dan 13% merupakan komponen penting yang mengandung gizi, seperti protein, karbohidrat, lipid dan zat gizi mikro esensial seperti vitamin dan mineral yang mudah diserap oleh tubuh [2]. Susu diakui sebagai makanan yang bermanfaat bagi semua jenis kelamin dan semua kelompok umur, khususnya pada masa kanak-kanak dan remaja, karena kandungan

kalsium, protein, fosfor, dan zat gizi mikro lainnya dapat meningkatkan perkembangan rangka, otot, dan saraf [3], [4]

Keberadaan mikroba merupakan salah satu parameter yang menentukan mutu dan keamanan susu. Kandungan zat gizinya yang tinggi membuat susu menjadi substrat yang baik bagi pertumbuhan berbagai macam mikroorganisme yang heterogen [5]. Susu dapat mengandung berbagai macam mikroba seperti bakteri, virus, jamur, dan protozoa, Namun fokus utama mikrobiologi susu adalah bakteri [6]. Kontaminasi bakteri patogen dalam susu dapat menyebabkan kerusakan susu dan menjadi pintu gerbang penularan penyakit ke manusia [7]. Kontaminasi dapat terjadi di semua tahap, mulai dari produksi primer, pemerahan, formulasi dan pemrosesan, pengemasan dan pelabelan, transportasi, penyimpanan, persiapan, dan penyajian [8]. Lingkungan, hewan yang diperah, pemerah susu, atau peralatan yang digunakan di tempat pemerahan susu dapat menjadi sumber kontaminasi, setelah bakteri masuk ke dalam susu, bakteri dapat berkembang biak dan menyebabkan perubahan pada kualitasnya., jika bakteri patogen yang mengkontaminasi maka bakteri tersebut dapat membahayakan konsumen dengan menyebabkan penyakit dan gangguan kesehatan [9]. Banyak jenis bakteri patogen yang mengontaminasi susu, termasuk *Staphylococcus aureus*, *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli*, dan spesies *Salmonella* [10].

*Salmonella* sp. merupakan bakteri gram negatif bentuk basil yang menjadi penyebab Salmonellosis yaitu penyakit bawaan makanan yang memengaruhi kesehatan masyarakat dan dapat menyebabkan kematian pada manusia. Gejala salmonellosis meliputi gastroenteritis, kram perut, diare berdarah, demam, mialgia, sakit kepala, mual dan muntah [11]. *Salmonella* sp. masuk melalui jalur oral-feses dengan media penularan berupa makanan dan minuman yang terkontaminasi [12] Banyak wabah Salmonellosis telah dilaporkan karena kontaminasi susu mentah dan produk susu dengan patogen tersebut [13]. nfeksi *Salmonella* sp. paling sering ditemukan pada hewan ternak seperti sapi kemungkinan menular ke manusia yang bersentuhan dengan sapi atau mengonsumsi produk susu atau daging sapi [14].

Keamanan susu dalam kaitannya dengan penyakit bawaan makanan merupakan hal yang penting untuk diperhatikan. Oleh karena itu perlu dilakukan pemeriksaan kontaminasi bakteri patogen dalam susu. Metode utama untuk mendeteksi kontaminasi bakteri patogen dalam susu adalah kultur bakteri dengan menggunakan media khusus. Beberapa media yang dapat digunakan yaitu *Rapaport Vassilidis (RV) broth*, *Mueller-Kauffmann tetrathionate/novobiocin broth*, *Xylose Lysine Deoxycholate (XLD) agar plates*, *Brilliant Green agar plates* dan *Salmonella and Shigella agar* yang dilanjutkannya dengan uji biokimia seperti uji triple sugar iron agar (TSI), Indole, Methyl Red, Voges-Proskauer dan Sitrat (IMVC) [15], [16], [17]. Metode kultur ini memerlukan waktu yang Panjang dan tenaga yang banyak. Beberapa metode cepat dengan teknik identifikasi yang berbeda telah dikembangkan, yang meliputi pengujian berbasis imunologi, pengujian berbasis molekuler, deteksi berbasis spektrometri massa, deteksi berbasis spektroskopi, deteksi fenotipe optik, dan biosensor elektrokimia. Pengujian berbasis imunologi, seperti enzyme-linked immunosorbent

assay (ELISA), metode aglutinasi lateks, dan pengujian imunokromatografi. Pengujian berbasis molekuler, misalnya polymerase chain reaction (PCR), *Loop-mediated isothermal amplification* (LAMP), *nucleic acid sequence-based amplification* (NASBA), *recombinase polymerase amplification* (RPA), *DNA microarrays*, *whole genome-sequencing* (WGS), metode berbasis spektrometri massa, misalnya *matrix-assisted laser desorption ionisation-time-of-flight mass spectrometry* (MALDI-TOF MS), *liquid chromatography-mass spectrometry* (LC-MS), metode berbasis spektroskopi, misalnya, spektroskopi Raman, spektroskopi inframerah dekat (NIR), dan pencitraan hiperspektral (HIS), fenotipe optik dengan teknologi difraksi cahaya, dan biosensor elektrokimia sedangkan biosensor yang umum digunakan dirangkum, termasuk antibodi, aptamer, probe asam nukleat, bakteriofag dan lektin [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24]

Metode cepat yang sudah dikembangkan masih membutuhkan biaya yang mahal sehingga diperlukan metode deteksi yang lebih murah agar dapat dijangkau oleh banyak pihak. Strategi alternatif untuk deteksi bakteri adalah dengan mendeteksi senyawa organik volatil spesifik yang dihasilkan selama metabolisme primer dan sekunder, seperti alkohol, aldehida, hidrokarbon, asam, eter, ester, keton, dan terpen [25]. Senyawa volatil tersebut dapat dideteksi salah satunya dengan menggunakan *Electronic Nose (E-nose)* atau hidung elektronik. *E-nose* adalah sebuah alat yang digunakan untuk mendeteksi dan menganalisis campuran zat bau, yang prinsip kerjanya sama dengan indra penciuman mamalia dan dinilai sebagai instrumen yang cepat, berbiaya rendah, dan non-invasif [26]. *E-nose* terdiri dari rangkaian sensor gas yang berfungsi sebagai detektor gas kimia sehingga dapat digunakan untuk mendeteksi aroma sampel. Salah satu sensor yang digunakan pada *E-nose* yaitu sensor gas elektrokimia. Sensor ini merupakan perangkat yang mengubah kuantitas kimia menjadi sinyal listrik. Pengoperasiannya didasarkan pada interaksi molekul gas dengan bahan pelapis sensor yang mengatur arus listrik yang melewati sensor. Sinyal listrik tersebut dideteksi oleh transduser yang mengubah modulasi menjadi sinyal elektronik yang dapat direka [27].

Pemanfaatan *E-nose* untuk deteksi bakteri sudah dilakukan. *E-nose* yang menggunakan sensor TGS 826 berhasil untuk mendeteksi *E. coli*, *Salmonella enterica*, dan *Klebsiella pneumoniae* dalam susu pasteurisasi [28]. *E-nose* yang menggunakan sensor TGS 825 dan TGS 826 berhasil untuk mendeteksi *Salmonella typhi* pada tuna [29]. *E-nose* yang diberi nama EOS507C, menggunakan sensor *Metal Oxide Semiconductor* (MOX) berhasil untuk mendeteksi *Enterobacter hormaechei* pada sup sayuran [30]. *E-nose* untuk mendeteksi *L. monocytogenes* [31]. Cyranose 320 digunakan untuk mendeteksi *S. aureus*, *Haemophilus influenzae*, *Streptococcus pneumoniae*, *E. coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, dan *Moraxella catarrhali* dari luka kaki pasien diabetes [32]. ChemPro 100i digunakan untuk mendeteksi *Staphylococcus saprophyticus*, *E. coli*, *Enterococcus faecalis*, dan *Klebsiella* dari pasien penderita infeksi saluran kemih [33].

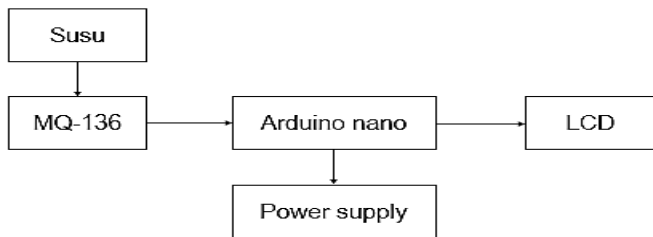
Penelitian ini bertujuan untuk membuat rancang bangun alat deteksi *Salmonella* sp. pada susu berbasis *E-nose* dengan menggunakan sensor *Metal Oxide*. Susu

mengandung laktosa yang menjadi karbohidrat utama. Laktosa merupakan molekul disakarida yang terdiri dari glukosa dan galaktosa [34]. Strain *Salmonella* tertentu mampu memfermentasi laktosa. *Salmonella* sp. dapat memfermentasi laktosa yang ada di dalam susu dan menghasilkan gas Hidrogen Sulfida ( $H_2S$ ) [35]. Deteksi *Salmonella* dalam susu menggunakan sensor *E-nose* didasarkan pada fermentasi laktosa dan produksi  $H_2S$ .

**2. Metode**

**2.1 Pembuatan Blok Diagram**

Blok diagram rancang bangun alat dapat dilihat pada gambar 1 berikut. Blok diagram ini merupakan gambaran dasar mengenai sistem yang akan dirancang. Setiap bagian blok sistem memiliki fungsi masing-masing. Alat akan mendeteksi *Salmonella* sp. dalam susu melalui pembacaan sensor gas MQ-136 yang dihasilkan oleh fermentasi bakteri. *Liquid Crystal Display* (LCD) akan menampilkan nilai pembacaan sensor dari susu yang sedang diperiksa.



Gambar 1. Blok Diagram Alat.

**2.2 Perancangan Mekanik**

Alat yang dibuat menggunakan beberapa komponen perangkat keras yaitu sensor gas MQ-136, Arduino nano, Baterai, kabel, LCD dan Extension board. A.

**a. Sensor MQ-136**

Sensor MQ-136 yang digunakan dapat dilihat pada gambar 2 di bawah ini.

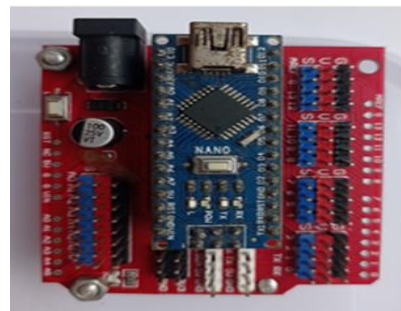


Gambar 2. Sensor MQ-136.

Sensor MQ 136 digunakan sebagai modul untuk mendeteksi kandungan Hidrogen Sulfida ( $H_2S$ ) [36]. Sensor beroperasi berdasarkan prinsip perubahan resistansi ketika gas target diserap ke permukaan sensor yang dipanaskan [37]. Sensor MQ terdiri dari tabung keramik mikro  $Al_2O_3$ , lapisan sensitif timah dioksida ( $SnO_2$ ), elektroda pengukur dan pemanas, dan pada bagian luar terdiri dari karet dan jaring *stainless steel* [38].

**b. Arduino nano**

Arduino merupakan *platform open source* yang disusun dalam bentuk papan mikrokontroler sederhana. Arduino dirancang agar mudah digunakan dan memiliki bahasa pemrograman sendiri yang disebut bahasa pemrograman Arduino. Arduino memiliki kelebihan yaitu dapat dihubungkan dengan komputer dengan mudah melalui port USB. Arduino juga dapat dikombinasikan dengan komponen lain seperti transceiver NRF24L01, LCD, dan lain-lain dengan sangat mudah [39]. Arduino dilengkapi dengan berbagai pin input dan output yang dapat digunakan untuk menghubungkan sensor, aktuator, dan perangkat elektronik lainnya [40]. Arduino Nano merupakan papan pengembangan mikrokontroler yang berukuran kecil, lengkap, dan mendukung penggunaan *breadboard* [41]. Arduino nano pada alat ini berfungsi menghubungkan sensor MQ-136 dengan LCD. Arduino nano yang digunakan dapat dilihat pada gambar 3 berikut.



Gambar 3. Arduino nano.

**c. Liquid Crystal Display (LCD)**

LCD merupakan rangkaian elektronika yang digunakan untuk menampilkan keterangan atau indikator yang diberikan kedalam mikrokontroler [42]. LCD yang digunakan pada alat yang dirancang merupakan LCD 16x2 seperti ditunjukkan oleh gambar 4.



Gambar 4. LCD.

Prinsip kerja LCD 16x2 adalah dengan menggunakan lapisan film yang berisi kristal cair dan diletakkan di antara dua lempeng kaca yang telah dipasang elektroda logam transparan. Saat tegangan dicatukan pada beberapa pasang elektroda, molekul-molekul kristal cair akan menyusun agar cahaya yang mengenainya akan diserap. Dari hasil penyerapan cahaya tersebut akan terbentuk huruf, angka, atau gambar sesuai bagian yang diaktifkan [43].

**d. Baterai Sebagai Power Supply**

Alat yang dirancang menggunakan baterai sebagai power supply (gambar 5).



Gambar 5. Baterai sebagai power supply.

Baterai alkaline yang digunakan merupakan baterai primer.

### 2.3 Perancangan Program Arduino

Aplikasi yang digunakan untuk membuat program pada alat ini adalah Arduino *Integrated Development Environment* (IDE). Arduino tidak hanya sekedar alat perkembangan, kombinasi dari *hardware*, bahasa pemrograman dan *Integrated Development Environment* (IDE) yang canggih. IDE adalah sebuah software yang berperan untuk menulis program, meng-compile, menjadi kode biner dan meng-upload ke dalam memori microcontroller [44]. *Part listing* program arduino IDE tersaji pada gambar 6.

```
void setup()
{
  lcd.init();
  lcd.backlight();
}

void loop()
{
  nilaisensor = analogRead(mq136);
  lcd.setCursor(1, 0);
  lcd.print("Nilai Sensor");
  delay(3000);
  //lcd.clear();

  lcd.setCursor(5, 1);
  lcd.print(nilaisensor);
}
```

Gambar 6. *Part listing* program Arduino IDE.

- a. **AnalogRead(analogPin)** digunakan untuk membaca nilai analog dari sensor MQ-136. Nilai ini akan berkisar antara 0 (tidak ada gas) hingga 1023 (konsentrasi gas tinggi)
- b. **DigitalRead(digitalPin)** digunakan untuk membaca status digital dari sensor (jika dipakai), yang memberi informasi apakah tingkat gas telah melebihi ambang batas yang telah ditentukan.

### 2.4 Kalibrasi Alat

Kalibrasi Alat dilakukan agar sensor memberikan pembacaan yang akurat. Kalibrasi dilakukan dengan menghidupkan sensor MQ-136 selama beberapa jam agar pemanasan (*preheating*) sensor selesai dan mengukur pembacaan sensor di lingkungan yang bebas gas amonia untuk mendapatkan nilai dasar (*baseline*).

### 2.5 Perancangan Program Arduino

Pemrograman Arduino dilakukan setelah proses kalibrasi dilakukan, hal ini bertujuan agar sensor hanya membaca hasil dengan ambang batas yang sudah ditetapkan. *Part listing* program arduino IDE tersaji pada gambar 7.

```
// Menampilkan nilai analog dan digital di Serial Monitor
Serial.print("Nilai Sensor Analog: ");
Serial.println(sensorValue);

Serial.print("Status Digital (0 = tidak terdeteksi, 1 = terdeteksi): ");
Serial.println(digitalState);

// Menampilkan informasi status sensor
if (sensorValue > 300) {
  Serial.println("Tingkat gas amonia tinggi terdeteksi! Mungkin ada aktivitas bakteri.");
} else {
  Serial.println("Tingkat gas amonia normal, kemungkinan aktivitas bakteri rendah.");
}
```

Gambar 7. *Part listing* program Arduino IDE.

- a. **AnalogRead(analogPin)**: Membaca nilai analog dari sensor MQ-136, yang akan menunjukkan konsentrasi gas H<sub>2</sub>S pada sampel susu.
- b. **DigitalRead(digitalPin)**: Jika menggunakan mode digital, ini memberi status apakah konsentrasi gas H<sub>2</sub>S melebihi ambang batas yang telah ditentukan.

Jika nilai sensor melebihi ambang batas tertentu berarti terdapat gas H<sub>2</sub>S dalam konsentrasi yang cukup tinggi, yang bisa menjadi indikasi adanya *Salmonella* sp. pada sampel susu.

### 2.6 Pengujian Alat

Pengujian alat dilakukan untuk mengetahui hasil pembacaan alat dalam mendeteksi keberadaan *Salmonella* sp. dalam susu. Pengujian dilakukan dengan melihat pembacaan sensor MQ-136 pada susu UHT dengan perlakuan sebagai berikut:

- a. Kontrol negatif yaitu 100 ml susu UHT tanpa diinokulasikan kultur *Salmonella* Sp dan diinkubasi pada suhu 36°C selama 2 x 24 jam
- b. Kontrol positif yaitu 100 ml susu UHT yang diinokulasikan 10 ml kultur *Salmonella* Sp dan diinkubasi pada suhu 36°C selama 2 x 24 jam.

## 3. Hasil dan Pembahasan

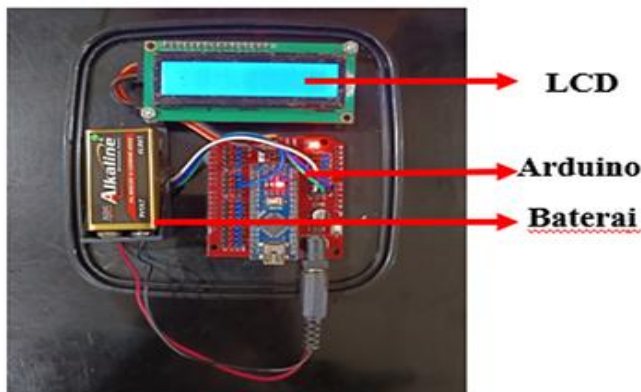
### 3.1 Perancangan Mekanik

Rancang bangun alat dapat dilihat pada gambar 8 di bawah ini.



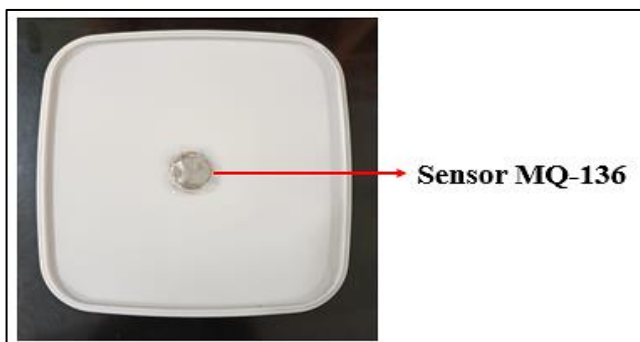
Gambar 8. Rancang Bangun Alat Deteksi.

Alat dibagi menjadi 3 bagian. Bagian atas terdiri dari Arduino, LCD dan Baterai dengan rincian pada Gambar 9. LCD berfungsi untuk menampilkan hasil pembacaan sensor, Arduino berfungsi untuk pemrosesan data yang didapat dari sensor sedangkan baterai berfungsi sebagai sumber daya untuk LCD dan Arduino.



Gambar 9. Bagian Atas Alat.

Bagian tengah peralatan diperuntukan untuk sensor dan bagian bawah untuk tempat sampel yang akan diuji seperti yang terlihat pada gambar 10 dan 11 berikut.



Gambar 10. Bagian Tengah alat



Gambar 11. Bagian Bawah Alat

Bagian bawah merupakan tempat tertutup yang tidak memungkinkan dapat keluar agar sensor dapat mendeteksi gas target. Sensor gas umumnya mendeteksi perubahan kimia yang terjadi di dalam ruangan sensor, oleh karena itu sensor tertentu biasanya ditempatkan di ruangan tertutup. [45]. Selama pengujian, sensor ini terpapar metabolit gas di ruang tertutup peralatan.

Alat yang dirancang menggunakan kotak plastik yang sudah ada di pasaran. Kotak plastik digunakan karena plastik memiliki bobot yang lebih ringan dibandingkan dengan banyak bahan lainnya, seperti logam atau kaca. Ini

membuat prototipe alat yang menggunakan plastik lebih mudah untuk dipindahkan, diuji, dan disesuaikan. Selain itu, plastik umumnya lebih murah dibandingkan dengan bahan lain seperti logam atau kaca. Hal ini membuat plastik menjadi pilihan yang lebih ekonomis.

### 3.2 Hasil Kalibrasi

Kalibrasi alat dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor MQ-136 di udara bebas dengan susu yang diberi *Salmonella* sp. dan diinkubasi selama 24 jam. Hasil pengujian tersaji pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengujian Alat

Sampel	Pembacaan sensor (ppm)
Udara bebas	92 - 118
Susu + Kultur <i>Salmonella</i> sp.	126 - 166

Hasil pada Tabel 1 menunjukkan terdapat perbedaan hasil pembacaan sensor MQ-136 udara bebas dengan susu yang diberi *Salmonella* sp dan diinkubasi selama 24 jam. Hal ini yang berarti terjadi perubahan nilai konsentrasi gas H<sub>2</sub>S yang terbaca akibat aktivitas fermentasi laktosa pada susu oleh *Salmonella* sp.. Setelah terpapar H<sub>2</sub>S, elektron yang terperangkap oleh ion oksigen dan molekul gas yang menjadi target, kembali ke bahan penyusunnya sehingga menghasilkan nilai sensitivitas yang sangat tinggi yang disebabkan oleh berkurangnya penghalang potensial di antarmuka [46].

Hasil pembacaan sensor MQ-136 yang menunjukkan adanya gas H<sub>2</sub>S pada udara dapat disebabkan oleh beberapa faktor. Kinerja sensor terutama ditentukan oleh elemen sensitif gas, sistem pemanas, dan substrat. Elemen sensitif gas menentukan sensitivitas selektivitas, stabilitas, dan aspek lain dari sensor. Sensor terlebih dahulu melewati proses pemanasan awal untuk mencapai keseimbangan kimia Sistem pemanas menyediakan energi untuk aktivasi sensor gas. Mode pemanasan juga memengaruhi stabilitas sensor. Pemanasan suhu tinggi yang berkelanjutan dapat menyebabkan pertumbuhan kristal yang tidak terduga dari bahan penginderaan. Sementara itu, beberapa faktor eksternal juga memengaruhi stabilitas sensor, seperti kelembaban, suhu pengoperasian, gas target dan lain-lain [47], [48].

Suhu dan kelembaban lingkungan juga mempengaruhi hasil pembacaan sensor. Konduktansi dan respon sensor dari sensor gas MQ memiliki ketergantungan tinggi terhadap suhu sekitar dan kelembaban relatif [49]. Respons sensor gas meningkat dan mencapai maksimumnya pada suhu tertentu, lalu menurun dengan cepat seiring peningkatan suhu. Suhu yang lebih tinggi, biasanya lebih dari 300 °C, konduktivitas bahan-bahan ini berubah seiring dengan konsentrasi gas karena penyerapan molekul gas oleh ion oksigen yang ditemukan di lapisan permukaan [50]. Kelembaban merupakan masalah penting dalam kinerja sensor gas. Kelembaban terkadang menurunkan sensitivitas. Resistansi dasar sensor gas menurun saat terjadi reaksi antara oksigen permukaan dan molekul air [51]. Molekul air mengikat pada area penginderaan yang menyebabkan penyimpangan respons sensor gas. Pengurangan permukaan penginderaan menyebabkan penurunan aktivitas kemisorpsi antara gas target dengan

lapisan tipis oksida logam pada sensor [52]. MQ-136 dapat juga terpengaruh oleh gas lain yang ada di udara, seperti karbon monoksida (CO), metana (CH<sub>4</sub>), etanol, benzena, atau bahkan gas rumah tangga lainnya yang mungkin ada dalam udara bebas atau di sekitarnya. Gas-gas ini bisa mengganggu pembacaan sensor dan memberikan sinyal yang salah, menunjukkan ada gas H<sub>2</sub>S meskipun tidak ada gas H<sub>2</sub>S di udara bebas [53]. Selain itu, Posisi outlet gas dalam kaitannya dengan sensor dan konfigurasi dan pengoperasian sistem sensor dapat memengaruhi kinerja sensor [54]. Faktor lain yang juga mempengaruhi sensitivitas dan stabilitas dari sensor yaitu bahan, komponen, poisoning dan doping. Umumnya, ukuran butir lapisan peka gas oksida logam kurang dari 100 nm. Semakin kecil ukuran butir, semakin baik kinerja penginderaan gas sensor yang dapat diperoleh. Doping unsur dapat secara signifikan memengaruhi struktur material, kemampuan adsorpsi, visual, listrik, dan sifat-sifat lainnya. Elemen doping juga menyebabkan rekombinasi elektron oksida, yang menyebabkan penurunan konsentrasi pembawa muatan. Poisoning merupakan keadaan sensor yang bereaksi dengan beberapa molekul yang tidak diinginkan, yang menyebabkan ketidakstabilan. Gas atau zat kimia selain gas target umumnya disebut gangguan karena menyebabkan reaksi reversible [55].

### 3.3 Hasil Pengujian Alat

Hasil kalibrasi merupakan langkah awal untuk pengujian alat untuk deteksi *Salmonella* Sp. dalam susu, selanjutnya dari kalibrasi ini dilakukan pemrograman pembacaan alat yaitu “Terdeteksi untuk nilai lebih dari 125 ppm dan dan “Tidak terdeteksi” untuk nilai pembacaan di bawah 125. Pengujian alat dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan antara susu yang diberikan kultur *Salmonella* Sp. dengan susu tanpa *Salmonella* Sp. selama 48 jam inkubasi seperti yang dapat dilihat pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Hasil Pengujian Alat

Waktu Inkubasi	Hasil Pembacaan	
	Susu tanpa <i>Salmonella</i> sp.	Susu dengan <i>Salmonella</i> sp.
6	Tidak Terdeteksi	Tidak Terdeteksi
12	Tidak Terdeteksi	Terdeteksi
24	Tidak Terdeteksi	Terdeteksi
36	Tidak Terdeteksi	Terdeteksi
48	Tidak Terdeteksi	Terdeteksi

Hasil penelitian pada Tabel 2 menunjukkan bahwa pada waktu inkubasi selama 6 jam hasil pembacaan tidak terdeteksi. Hal ini berarti bahwa gas H<sub>2</sub>S pada susu dengan salmonella masih di bawah 125 ppm sehingga *Salmonella* belum terdeteksi, namun pada waktu inkubasi 12, 24, 36

dan 48 jam, *Salmonella* sudah terdeteksi yang berarti gas H<sub>2</sub>S sudah lebih dari 126 ppm. Tidak terdeteksinya gas H<sub>2</sub>S pada waktu inkubasi 6 jam dapat disebabkan karena konsentrasi gas H<sub>2</sub>S yang diproduksi masih rendah. Konduktivitas sensor MQ-136 akan meningkat seiring dengan meningkatnya konsentrasi gas H<sub>2</sub>S [56]. Rendahnya konsentrasi H<sub>2</sub>S yang dihasilkan pada waktu inkubasi 6 jam dapat disebabkan oleh beberapa faktor yang mempengaruhi proses fermentasi laktosa pada susu. Faktor tersebut di antaranya yaitu konsentrasi inokulum atau jumlah bakteri dan jenis bakterinya [57]. Selain itu juga dipengaruhi oleh pH dan waktu inkubasi [58], [59].

Hasil penelitian ini berbeda dengan dengan yang dilaporkan oleh Nastiti [60] tentang deteksi kesegaran daging ayam dengan menggunakan sensor MQ-136 dengan H<sub>2</sub>S yang digunakan sebagai parameter untuk mendeteksi kesegaran daging ayam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi H<sub>2</sub>S meningkat secara signifikan selama 12 jam awal penyimpanan daging ayam, kemudian cenderung konstan dari 12 hingga 21 jam penyimpanan, dan akhirnya meningkat lebih dari 300% dari 21 hingga 24 jam penyimpanan. Perubahan yang tertangkap ini menunjukkan bahwa sensor yang digunakan dapat mendeteksi fluktuasi H<sub>2</sub>S yang dilepaskan dari sampel daging.

Perbedaan hasil pada waktu deteksi dan juga konsentrasi gas H<sub>2</sub>S dapat dipengaruhi oleh jumlah sensor yang digunakan. Penggunaan sensor gas yang lebih banyak, dapat mengurangi **noise** atau gangguan, karena informasi dari banyak sensor bisa digabungkan atau disaring untuk menghasilkan data yang lebih stabil dan akurat. Hal ini dapat meningkatkan sensitivitas sistem secara keseluruhan, namun sebaliknya, penambahan sensor dapat juga menyebabkan peningkatan noise, sehingga saling bertentangan, yang dapat menurunkan akurasi atau sensitivitas dalam beberapa situasi [61]. Sensor kimia yang paling banyak digunakan untuk memantau H<sub>2</sub>S secara *real-time* adalah sensor elektrokimia, sensor semikonduktor oksida logam, sensor optik, sensor piezoelektrik atau rangkaian sensor metal oxide. Sensor gas metal oxide telah menunjukkan keuntungan berupa biaya rendah, kemudahan penggunaan, portabilitas, ukuran kompak, konsumsi daya rendah, dan sensitivitas tinggi [62].

### 4. Kesimpulan

Hasil pengujian alat menunjukkan hasil pembacaan sensor MQ-136 udara bebas 92-118 ppm sedangkan pembacaan sensor MQ-136 susu yang diberi kultur *Salmonella* sp. dan diinkubasi 24 jam sebesar 126-166 ppm. Rancang bangun alat deteksi *Salmonella* sp. pada susu berbasis electronic nose berhasil dibuat. Hasil pengujian menunjukkan rancang bangun alat dapat mendeteksi *Salmonella* Sp. dalam susu setelah inkubasi 12 jam

### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada KEMENDIKBUDRISTEK DIKTI yang sudah mendanai penelitian ini melalui skema Penelitian Dosen Pemula (PDP).

### Daftar Pustaka

- [1] A. Bezie, "The Effect of Different Heat Treatment on the Nutritional Value of Milk and Milk Products and Shelf-Life of Milk Products. A Review," *Journal of Dairy & Veterinary Sciences*, vol. 11, no. 5, May 2019, doi: 10.19080/jdvs.2019.11.555822.
- [2] H. Górská-Warsewicz, K. Rejman, W. Laskowski, and M. Czeczotko, "Milk and dairy products and their nutritional contribution to the average polish diet," *Nutrients*, vol. 11, no. 8, Aug. 2019, doi: 10.3390/nu11081771.
- [3] M. Pal, S. V. Pinto, and J. Prajapati, "Bacterial Contamination of Dairy Products," 2016. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/308294887>
- [4] F. Visioli and A. Strata, "Milk, dairy products, and their functional effects in humans: A narrative review of recent evidence," 2014, *American Society for Nutrition*. doi: 10.3945/an.113.005025.
- [5] V. Fusco *et al.*, "Microbial quality and safety of milk and milk products in the 21st century," *Compr Rev Food Sci Food Saf*, vol. 19, no. 4, pp. 2013–2049, Jul. 2020, doi: 10.1111/1541-4337.12568.
- [6] K. J. Boor, M. Wiedmann, S. Murphy, and S. Alcaine, "A 100-Year Review: Microbiology and safety of milk handling," *J Dairy Sci*, vol. 100, no. 12, pp. 9933–9951, Dec. 2017, doi: 10.3168/jds.2017-12969.
- [7] J. uma B. Ngasala, H. E. Nonga, and M. M. A. Mtambo, "Assessment of raw milk quality and stakeholders' awareness on milk-borne health risks in Arusha City and Meru District, Tanzania," *Trop Anim Health Prod*, vol. 47, no. 5, pp. 927–932, Jun. 2015, doi: 10.1007/s11250-015-0810-y.
- [8] J. Owusu-Kwarteng, F. Akabanda, D. Agyei, and L. Jespersen, "Microbial safety of milk production and fermented dairy products in africa," *Microorganisms*, vol. 8, no. 5, May 2020, doi: 10.3390/microorganisms8050752.
- [9] A. Bekuma and U. Galmessa, "Review on Hygienic Milk Products Practice and Occurrence of Mastitis in Cow's Milk," vol. 76, 2018, [Online]. Available: [www.iiste.org](http://www.iiste.org)
- [10] A. Mikru, M. Adane, and B. Dobo, "Microbial Hazard Analysis in the Pasteurized Milk Production Value Chain at a Commercial Dairy Plant in Hawassa, Southern Ethiopia," 2021.
- [11] O. Ehuwa, A. K. Jaiswal, and S. Jaiswal, "Salmonella, food safety and food handling practices," *Foods*, vol. 10, no. 5, May 2021, doi: 10.3390/foods10050907.
- [12] D. Chusna Mufida, H. Arif Shabri, B. Hermansyah, M. A. Shodikin, and E. Suswati, "Impact of milking hygiene on salmonella contamination in cow's milk: A study in Jember Regency," *BIO Web Conf*, vol. 132, p. 02005, Oct. 2024, doi: 10.1051/bioconf/202413202005.
- [13] R. Castañeda-Salazar, A. Pulido-Villamarín, G. L. Ángel-Rodríguez, C. A. Zafra-Alba, and O. Oliver-Espinosa, "Isolation and identification of salmonella spp. In raw milk from dairy herds in Colombia," *Braz J Vet Res Anim Sci*, vol. 58, 2021, doi: 10.11606/issn.1678-4456.bjvras.2021.172805.
- [14] I. Asefa, E. Legabo, T. Wolde, and H. Fesseha, "Study on Salmonella Isolates from Fresh Milk of Dairy Cows in Selected Districts of Wolaita Zone, Southern Ethiopia," *Int J Microbiol*, vol. 2023, 2023, doi: 10.1155/2023/6837797.
- [15] B. Dabash, "Detection And Typing Of Salmonella Spp Isolated From Bulk Tank Milk And Environmental Samples Of Dairy Farms," 2016.
- [16] S. Yasmin, S. Parveen, Md. Munna, and R. Noor, "Detection of Salmonella spp. and Microbiological Analysis of Milk and Milk Based Products Available within Dhaka Metropolis, Bangladesh," *Br Microbiol Res J*, vol. 5, no. 6, pp. 474–480, Jan. 2015, doi: 10.9734/bmrj/2015/11010.
- [17] A. S. Hasan, "Detection of Salmonella Spp. in milk samples of selected regions of Diyala city البقار تكون الحليب انتج عند الصحية الشروط توفر عدم عن نتج قد مبستر الغير الخام الحليب في التلوث ل حامله هو السبب يكون ربما ضئيلة المبيسترنسية الحليب عينات في تلوث ظهور كذلك السالمونيال جرثومة البسترة عملية بعد حصل قد ما تلوث هنالك يكون قد او بمجملها العملية كفاءة عدم," 2017.
- [18] M. S. Awang *et al.*, "Advancement in salmonella detection methods: From conventional to electrochemical-based sensing detection," Sep. 01, 2021, *MDPI*. doi: 10.3390/bios11090346.
- [19] M. Wang *et al.*, "Overview of Rapid Detection Methods for Salmonella in Foods: Progress and Challenges," 2021, doi: 10.3390/foods101.
- [20] G. M. Ibrahim and P. M. Morin, "Salmonella serotyping using whole genome sequencing," *Front Microbiol*, vol. 9, no. DEC, Dec. 2018, doi: 10.3389/fmicb.2018.02993.
- [21] E. Bonah, X. Huang, J. H. Aheto, and R. Osae, "Application of Hyperspectral Imaging as a Nondestructive Technique for Foodborne Pathogen Detection and Characterization," *Foodborne Pathog Dis*, vol. 16, no. 10, pp. 712–722, Oct. 2019, doi: 10.1089/fpd.2018.2617.
- [22] R. L. Bell, K. G. Jarvis, A. R. Ottesen, M. A. Mcfarland, and E. W. Brown, "Recent and emerging innovations in Salmonella detection: A food and environmental perspective," May 01, 2016, *John Wiley and Sons Ltd*. doi: 10.1111/1751-7915.12359.

- [23] D. Çam, "Lateral Flow Assay for Salmonella Detection and Potential Reagents." [Online]. Available: [www.intechopen.com](http://www.intechopen.com)
- [24] S. Mangmee, O. Reamtong, T. Kalambaheti, S. Roytrakul, and P. Sonthayanon, "MALDI-TOF mass spectrometry typing for predominant serovars of non-typhoidal Salmonella in a Thai broiler industry," *Food Control*, vol. 113, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.foodcont.2020.107188.
- [25] T. Dias *et al.*, "A Lab-Made E-Nose-MOS Device for Assessing the Bacterial Growth in a Solid Culture Medium," *Biosensors (Basel)*, vol. 13, no. 1, Jan. 2023, doi: 10.3390/bios13010019.
- [26] "chapter-7-electronic-noses-and-electronic-tongues\_24472".
- [27] P. KALITA, M. P. SAIKIA, and N. H. SINGH, "Electronic-Nose Technology and its Application - A Systematic Survey," *IJIREICE*, pp. 123–128, Jan. 2015, doi: 10.17148/ijireice.2015.3126.
- [28] J. K. Carrillo Gómez, C. M. Durán Acevedo, and R. O. G. Rico, "E-nose and E-tongue systems for the Bacteria Detection in milk," in *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology*, Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2021. doi: 10.18687/LACCEI2021.1.1.600.
- [29] S. D. Astuti, A. B. Muhamad, A. Rahmatillah, A. K. Yaqubi, Y. Susilo, and A. K. Aji, "Electronic Nose (E-Nose) for Quality Detection of Tuna (*Thunnus thynnus*) Contaminated Bacteria," *Indonesian Journal of Tropical and Infectious Disease*, vol. 11, no. 1, pp. 52–65, Apr. 2023, doi: 10.20473/ijtid.v11i1.39206.
- [30] G. Zambotti, V. Sberveglieri, E. Gobbi, M. Falasconi, E. Nunez, and A. Pulvirenti, "Fast identification of microbiological contamination in vegetable soup by electronic nose," in *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, 2014, pp. 1302–1305. doi: 10.1016/j.proeng.2014.11.686.
- [31] Y. X. Yu, X. H. Sun, Y. Liu, Y. J. Pan, and Y. Zhao, "Odor fingerprinting of listeria monocytogenes recognized by SPME-GC-MS and E-nose," *Can J Microbiol*, vol. 61, no. 5, pp. 367–372, Dec. 2015, doi: 10.1139/cjm-2014-0652.
- [32] N. Yusuf *et al.*, "In-vitro diagnosis of single and poly microbial species targeted for diabetic foot infection using e-nose technology," *BMC Bioinformatics*, vol. 16, no. 1, Dec. 2015, doi: 10.1186/s12859-015-0601-5.
- [33] A. Roine *et al.*, "Rapid and accurate detection of urinary pathogens by mobile IMS-based electronic nose: A proof-of-principle study," *PLoS One*, vol. 9, no. 12, Dec. 2014, doi: 10.1371/journal.pone.0114279.
- [34] H. Vaskova and M. Buckova, "Measuring the lactose content in milk", doi: 10.1051/05011.
- [35] Y. Midorikawa, S. Nakamura, R. Phetsouvanh, and K. Midorikawa, "Detection of Non-Typhoidal Salmonella Using a Mechanism for Controlling Hydrogen Sulfide Production," *Open J Med Microbiol*, vol. 04, no. 01, pp. 90–95, 2014, doi: 10.4236/ojmm.2014.41010.
- [36] N. Hamrun, F. Azalia, N. Auliya, and M. Riswan, "Constructing halitosis sensor for early detection in periodontal diseases," *Journal of Dentomaxillofacial Science*, vol. 5, no. 2, pp. 110–113, 2020, doi: 10.15562/jdmfs.v5i2.1080.
- [37] I. Gede *et al.*, "Integrated Microcontroller Mq Sensors For Monitoring Biogas: Advancements In Methane And Hydrogen Sulfide Detection Sensor Mq Mikrokontroler Terintegrasi Untuk Memantau Biogas: Kemajuan Dalam Deteksi Metana Dan Hidrogen Sulfida."
- [38] N. Harpawi, Y. Triyani, W. Khabzli, Y. Syaputra, P. Caltex Riau, and T. Elektronika dan Telekomunikasi, "Monitoring Kualitas Udara dan Kontrol Air Purifier Honeywell HHT-080 Berbasis IoT," 2022. [Online]. Available: <https://jurnal.pcr.ac.id/index.php/elementer/>
- [39] E. S. B. Santosa and S. Waluyanti, "Teaching Microcontrollers using Arduino Nano Based Quadcopter," in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics Publishing, Dec. 2019. doi: 10.1088/1742-6596/1413/1/012003.
- [40] C. Putra Hadisusila, "Aplikasi Arduino dalam Teknik I/O untuk Mengintegrasikan dan Mengendalikan Perangkat Elektronik," *Jurnal Nusantara Of Engineering*, vol. 6, no. 2, 2023, [Online]. Available: <https://ojs.unpkediri.ac.id/index.php/noe>
- [41] H. Hariyanto, M. Rusdi, D. Parennden, C. Cipto, and K. A. Rahangmetan, "Dye-Sensitized Solar Cell performance measurement analysis using Arduino Board," in *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, Dec. 2021. doi: 10.1051/e3sconf/202132807005.
- [42] H. Suryantoro and A. Budiyanto, "Indonesian Journal Of Laboratory Prototype Sistem Monitoring Level Air Berbasis Labview & Arduino Sebagai Sarana Pendukung Praktikum Instrumentasi Sistem Kendali," Online, 2019.
- [43] "239-File Utama Naskah-862-1-10-20230726".
- [44] P. R. Wigati, "IT/ Jurnal Explore IT | 24 Implementasi Sistem Monitoring Suhu Tubuh Berbasis Smartphone Menggunakan Mikrokontroler Arduino Via Bluetooth," Online. [Online]. Available:



- <http://jurnal.yudharta.ac.id/v2/index.php/EXPLOR E>
- [45] D. Lelono and K. Triyana, "Suhu Pemanas Sampel Optimal Untuk Klasifikasi Teh Hitam Menggunakan Electronic Nose," *IJEIS (Indonesian Journal of Electronics and Instrumentation Systems)*, vol. 9, no. 1, p. 45, Apr. 2019, doi: 10.22146/ijeis.39683.
- [46] N. Goel, K. Kunal, A. Kushwaha, and M. Kumar, "Metal Oxide nanostructures-based Gas Sensors," Jul. 23, 2022. doi: 10.22541/au.165856861.19641373/v1.
- [47] H. Chai *et al.*, "Stability of Metal Oxide Semiconductor Gas Sensors: A Review," Mar. 15, 2022, *Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.* doi: 10.1109/JSEN.2022.3148264.
- [48] R. Purbakawaca, A. S. Yuwono, I. D. M. Subrata, and H. Alatas, "Low-Cost Calibration MOS Gas Sensor for Measuring SO<sub>2</sub> Pollutants in Ambient Air," *Nature Environment and Pollution Technology*, vol. 21, no. 1, pp. 339–347, Mar. 2022, doi: 10.46488/NEPT.2022.v21i01.041.
- [49] K. Sukhdev, P. Harinarayanan, U. S. Kumar, and P. Baburaj, "A Simplified Model for Calculating the Dependence of Ambient Temperature and Relative Humidity on Commercial Metal Oxide Chemiresistive Gas Sensors," *Sensors and Materials*, vol. 34, no. 9, pp. 3411–3427, 2022, doi: 10.18494/SAM3995.
- [50] "MMS-01641-2024-02-Early-Access".
- [51] A. Sarkar, S. Maity, P. Chakraborty, and S. K. Chakraborty, "Licensed Under Creative Commons Attribution CC BY Factors Influencing On Sensitivity of the Metal Oxide Gas Sensors," 2015. [Online]. Available: [www.ijsr.net](http://www.ijsr.net)
- [52] A. Nabil Abdullah, K. Kamarudin, S. Muhammad Mamduh, A. Hamid Adom, and Z. Hadi Mohd Juffry, "Effect of Environmental Temperature and Humidity on Different Metal Oxide Gas Sensors at Various Gas Concentration Levels," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing Ltd, Jul. 2020. doi: 10.1088/1757-899X/864/1/012152.
- [53] N. A. Isaac, I. Pikaar, and G. Biskos, "Metal oxide semiconducting nanomaterials for air quality gas sensors: operating principles, performance, and synthesis techniques," May 01, 2022, *Springer*. doi: 10.1007/s00604-022-05254-0.
- [54] S. D. Johanne Galceran *et al.*, "Development and Comparison of Arduino Based MQ-2 and MQ-6 LPG Leak Sensors," *American Journal of Sensor Technology*, vol. 7, no. 1, pp. 1–9, 2023, doi: 10.12691/ajst-7-1-1.
- [55] H. Chai *et al.*, "Stability of Metal Oxide Semiconductor Gas Sensors: A Review," Mar. 15, 2022, *Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.* doi: 10.1109/JSEN.2022.3148264.
- [56] N. Hamrun, F. Azalia, N. Auliya, and M. Riswan, "Constructing halitosis sensor for early detection in periodontal diseases," *Journal of Dentomaxillofacial Science*, vol. 5, no. 2, pp. 110–113, 2020, doi: 10.15562/jdmfs.v5i2.1080.
- [57] J. K. Son, Y. J. Jo, Y. J. Jung, Y. R. Lee, J. Lee, and H. S. Jeong, "Fermentation and Quality Characteristics of Yogurt Treated with *Bifidobacterium longum*," *Nutrients*, vol. 15, no. 15, Aug. 2023, doi: 10.3390/nu15153490.
- [58] I. Aldaw Ibrahim, R. Naufalin, Erminawati, and H. Dwiyaniti, "Effect of fermentation temperature and culture concentration on microbial and physicochemical properties of cow and goat milk yogurt," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics Publishing, Dec. 2019. doi: 10.1088/1755-1315/406/1/012009.
- [59] H. Chen, L. Ma, J. Qi, J. Cao, and Y. Tan, "Optimization of Fermentation Conditions for the Production of Angiotensin-Converting Enzyme (ACE) Inhibitory Peptides from Cow Milk by *Lactobacillus bulgaricus* LB6," *Acta Universitatis Cibiniensis. Series E: Food Technology*, vol. 23, no. 1, pp. 19–26, Jun. 2019, doi: 10.2478/aucft-2019-0003.
- [60] P. W. Nastiti, N. Bintoro, J. N. W. Karyadi, S. Rahayoe, and A. D. Saputro, "Apparatus development for detecting the freshness of chicken meat using TCS 3200, PH-98108, and MOS gas sensors," *Food Res*, vol. 7, no. 2, pp. 280–288, Apr. 2023, doi: 10.26656/fr.2017.7(2).024.
- [61] J. Smulko *et al.*, "New approaches for improving selectivity and sensitivity of resistive gas sensors: A review."
- [62] A. Alsarraj, A. Ur Rehman, S. B. Belhaouari, K. M. Saoud, and A. Bermak, "Hydrogen Sulfide (HS) Sensor: A Concept of Physical Versus Virtual Sensing," *IEEE Trans Instrum Meas*, vol. 70, 2021, doi: 10.1109/TIM.2021.3120150.