

**STUDI PENGEMBANGAN *E-TONGUE* BERBASIS LIMA SENSOR
ELEKTROKIMIA UNTUK KLASIFIKASI AIR MINUM**

SKRIPSI

**OLEH :
VADYA ARYKE WIBOWO
NIM : 210604110048**



**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2025**

**STUDI PENGEMBANGAN *E-TONGUE* BERBASIS LIMA SENSOR
ELEKTROKIMIA UNTUK KLASIFIKASI AIR MINUM**

SKRIPSI

Diajukan Kepada
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang
Untuk Memenuhi Salah Satu Persyaratan Dalam
Menyelesaikan Program Sarjana Sains (S.Si)

OLEH :
VADYA ARYKE WIBOWO
NIM : 210604110048

**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2025**

HALAMAN PERSETUJUAN

STUDI PENGEMBANGAN E-TONGUE BERBASIS LIMA SENSOR ELEKTROKIMIA UNTUK KLASIFIKASI AIR MINUM

SKRIPSI

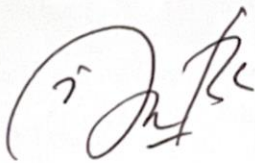
Oleh:

Vadya Aryke Wibowo

NIM. 210604110048

Telah Diperiksa dan Disetujui
Pada tanggal, 16 Juni 2025

Dosen Pembimbing I



Muthmainnah, M.Si

NIP. 19860325 201903 2 009

Dosen Pembimbing II



Dr. Umaiyatus Syarifah, MA

NIP. 19820925 200901 2 005

Mengetahui,
Ketua Program Studi



Dr. Arman Tazi, M.Si

NIP. 196730 200312 1 002

HALAMAN PENGESAHAN

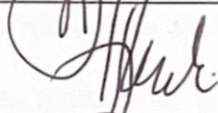
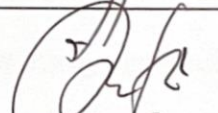
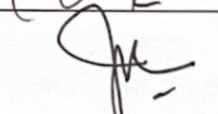
STUDI PENGEMBANGAN E-TONGUE BERBASIS LIMA SENSOR ELEKTROKIMIA UNTUK KLASIFIKASI AIR MINUM

SKRIPSI

Oleh:

Vadya Aryke Wibowo
NIM. 210604110048

Telah Dipertahankan Di Depan Dewan Penguji
Dan Diterima Sebagai Salah Satu Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)
Pada Tanggal, 20 Juni 2025

Penguji Utama :	<u>Dr. Imam Tazi, M.Si</u> NIP. 19740730 200312 1 002	
Ketua Penguji :	<u>Naqibatin Nadliriyah, S.Si. M.Si</u> NIP. 19920221 201903 2 020	
Sekretaris Penguji :	<u>Muthmainnah, M.Si</u> NIP. 19860325 201903 2 009	
Anggota Penguji :	<u>Dr. Umaiatus Syarifah, MA</u> NIP. 19820925 200901 2 005	

Mengesahkan,
Ketua Program Studi




Dr. Imam Tazi, M.Si
NIP. 19740730 200312 1 002

PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Vadya Aryke Wibowo

NIM : 210604110048

Program Studi : Fisika

Fakultas : Sains dan Teknologi

Judul Skripsi : Studi Pengembangan *E-Tongue* Berbasis Lima Sensor

Elektrokimia Untuk Klasifikasi Air Minum

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar tulisan saya dan bukan merupakan plagiasi/falsifikasi/fabrikasi baik sebagian atau seluruhnya.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa skripsi saya hasil plagiasi/falsifikasi/fabrikasi baik sebagian atau seluruhnya, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Malang, 10 Juni 2024

Yang membuat pernyataan,



vadya Aryke Wibowo
NIM.210604110048

MOTTO

إذا لم يتقدم الأمر، فلن ينتهي

“Vadya Aryke”

HALAMAN PERSEMBAHAN

Puji syukur kepada Allah SWT yang telah memberikan segala nikmat yang diberikan kepada umatnya. Sholawat serta salam semoga tetap tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW.

Skripsi ini saya persembahkan kepada :

1. Kedua orang tua saya tercinta Ibu Sundari dan Bapak Pardi Eko Wibowo beliau memang tidak berpendidikan tinggi seperti orang tua lain, akan tetapi penulis dibimbing diberi arahan hingga mendapatkan gelar sarjana. Yang perjalanannya sungguh luar biasa, semua sangat mudah karena dukungan, doa yang selalu mengalir disetiap langkah penulis. Semoga Allah SWT selalu memberikan keberkahan, kesehatan serta rezeki yang luar biasa dalam setiap langkah orang tua penulis. Terimakasih sudah memberikan kehidupan yang cukup dengan penuh kesederhanaan yang selalu diajarkan.
2. Kepada keluargaku tercinta Tante Wiwik, Mbah Pani dan Mbah Marni yang tak lepas selalu memberikan dukungan dan doa yang tak pernah henti kepada penulis, sehingga penulis bisa menyelesaikan skripsi dengan penuh semangat. Semoga Allah SWT senantiasa memberi kesehatan dan kebahagiaan .
3. Kepada teman jurusanku fisika yang saling mengingatkan mengenai persyaratan agar bisa melewati ujian-ujian dalam proses skripsi ini terimakasih banyak. Karena tanpa adanya dukungan dan bimbingan dari kalian mungkin penulis lupa dan kurang terus menerus dalam proses pendaftaran ujian maupun setelahnya. Dalam pertemuan pasti ada

perpisahan “People come and go” sehat selalu ya kalian semoga setelah menyandang gelar sarjana diberi keberkahan ilmu dan kemudahan dalam mendapatkan pekerjaan.

4. Kepada diriku sendiri, terimakasih sudah berusaha dan bertahan untuk menyelesaikan ujian yang ada hingga namaku sendiri bisa menyandang gelar Vadya Aryke Wibowo, S.Si. Banyak sekali keluh dan tangis untuk melewatinya, dan sekali lagi terimakasih sudah berusaha mewujudkan keinginan orang tua, bisa menyekolahkan anaknya hingga sarjana. Semoga setelah melewati hal-hal semua ini penulis bisa lebih baik dan memperbaiki diri sendiri.
5. Kepada Hafiz Daniswara terimakasih sudah membersamai, memberikan semangat yang tak pernah henti untuk penulis. Tak lelah dalam memberikan masukan kepada penulis dalam proses penulisan skripsi, selalu sabar dalam memberikan masukan kepada penulis. Semoga segera menyusul dengan gelar yang seharusnya ada, jangan lalai dalam proses skripsimu. Semoga Allah SWT memberi kemudahan dan keberkahan dalam setiap langkah yang kamu ambil.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Allah SWT, berkat rahmat dan karunia-Nya akhirnya penulis dapat menyelesaikan proposal skripsi berjudul “Pengembangan E-tongue Berbasis Lima Sensor Elektrokimia Untuk Klasifikasi Air Minum” sholat serta salam tetap tercurahkan kepada baginda tercinta Rasulullah Muhammad SAW yang telah memberikan kita jalan yang terang benderang yakni Addinul islam waliman.

Dalam kesempatan ini, penulis mengucapkan terimakasih kepada ibu Muthmainnah,M.Si., selaku dosen pembimbing yang telah memberikan motivasi, bimbingan serta arahan kepada penulis selama proses penyusunan proposal skripsi ini. Selain itu dukungan dari orang tua tercinta saya bapak pardi dan ibu sundari yang selalu mendo’akan setiap langkah saya serta sahabat-sahabat saya telah membantu baik secara langsung maupun tidak langsung dalam menyelesaikan penulisan skripsi ini.

Penulis mengakui bahwa skripsi ini kurang dari cukup. Oleh karena itu, penulis dengan rendah hati meminta maaf jika ada kesalahan atau kekurangan membangun akan digunakan untuk perbaikan dimasa mendatang. Semoga Allah SWT memberikan rahmat dan hidayat kepada kita semua. Sehingga dengan penuh keremdhahan hati dan rasa hormat penulis mengucapkan terimakasih sebesar-besarnya kepada :

1. Prof. Dr. H. M. Zainuddin, M.A., selaku rektor Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim.

2. Prof. Dr. Sri Harini, M.Si, selaku dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
3. Dr. Imam Tazi, M.Si, selaku ketua Program Studi Fisika, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
4. Ibu Muthmainnah, M.Si sebagai dosen pembimbing yang senantiasa memberikan ilmu pengetahuan, inovasi dan meluangkan waktunya untuk membimbing penulis selama proses penyusunan skripsi.
5. Dr. Umaiyyatus Syarifah, MA selaku dosen pembimbing II.
6. Kedua orang tua penulis, Bapak Pardi Eko Wibowo dan Ibu Sundari, Mbah Marni, Mbah Pani dan Tante Wiwik yang selalu memberikan dukungan dan doa yang tidak pernah terhenti untuk penulis.
7. Teman penulis Intan yang sudah kebersamaan penulis sebelum sidang dan memberikan dukungan moril untuk penulis.
8. Serta semua pihak yang telah berkenan memberikan bantuan dalam penyusunan skripsi ini hingga selesai, yang tidak bisa disebutkan satu persatu. Dalam penyusunan dan penulisan skripsi ini, penulis menyadari masih terdapat banyak kekurangan serta kesalahan. Maka dari itu penulis mengharapkan segala kritik dan saran yang bersifat membangun. Demikian yang dapat penulis sampaikan, semoga skripsi ini dapat bermanfaat dan menambah pengetahuan bagi orang lain.

Malang, 10 Juni 2025

Vadya Aryke Wibowo

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	ii
LEMBAR PERSETUJUAN	iii
LEMBAR PENGESAHAN	iv
PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN	v
MOTTO	vi
HALAMAN PERSEMBAHAN	vii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xv
ABSTRAK	xvi
ABSTRACT	xvii

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Batasan Masalah	6
1.5 Manfaat Penelitian	6

BAB II KAJIAN PUSTAKA

2.1 Kajian Teoritis.....	7
2.1.1 Air Minum dan Kualitasnya.....	7
2.1.2 Sensor Elektrokimia.....	13
2.1.3 Sistem E-Tongue	22
2.1.4 Klasifikasi Air Minum Menggunakan E-Tongue.....	29
2.2 Penelitian Terdahulu	30
2.3 Kerangka Pemikiran.....	35

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian.....	38
3.2 Waktu dan Tempat Penelitian.....	39
3.3 Alat dan Bahan.....	39
3.4 Tahap dan Alur Penelitian	40
3.5 Prosedur Penelitian	41
3.5.1 Perancangan Sistem E-Tongue.....	42
3.5.2 Pengumpulan Data E-Tongue	42
3.5.3 Pengolahan Data.....	42
3.5.4 Analisis Data dengan PCA.....	44
3.5.5 Interpretasi dan Klasifikasi	44

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian	46
4.2 Pembahasan.....	70

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan	85
5.2 Saran	86

DAFTAR PUSTAKA.....	88
----------------------------	-----------

LAMPIRAN.....	92
----------------------	-----------

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Sistem E-Tongue.....	23
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	41
Gambar 4.1 Grafik Konvergensi Nilai Eigen Menggunakan PCA.....	57
Gambar 4.2 Loading Plot PCA untuk Lima Parameter Sensor	58
Gambar 4.3 Score Plot PCA Berdasarkan Parameter Kualitas Air Minum.....	59
Gambar 4.4 Biplot 2D Hasil Pengujian Menggunakan Metode PCA	61
Gambar 4.5 Grafik Nilai Merek Air Terhadap Sensor Chloride.....	63
Gambar 4.6 Grafik Nilai Merek Air Terhadap Sensor Fluoride	64
Gambar 4.7 Grafik Nilai Merek Air Terhadap Sensor pH.....	65
Gambar 4.8 Grafik Nilai Merek Air Terhadap Sensor DO	66
Gambar 4.9 Grafik Nilai Merek Air Terhadap Sensor TDS	67

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tabel Penelitian Terkait	34
Tabel 3.1 Tabel Parameter Kimia dan Skor Kualitas Air Minum.....	43
Tabel 3.2 Tabel Klasifikasi Hasil.....	45
Tabel 4.1 Hasil Pengukuran Sampel Air Minum Merek Aquin.....	48
Tabel 4.2 Hasil Pengukuran Sampel Air Minum Merek Orchid	49
Tabel 4.3 Hasil Pengukuran Sampel Air Minum Merek Santri	50
Tabel 4.4 Hasil Pengukuran Sampel Air Minum Merek Pirlo.....	51
Tabel 4.5 Hasil Pengukuran Sampel Air Minum Merek Agro	52
Tabel 4.6 Tabel Waktu Respon Sensor terhadap Sampel Air Minum	53
Tabel 4.7 Hasil Nilai Eigen Pola Data PCA	55

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Lampiran Pengambilan Data	93
Lampiran 2	Lampiran Code Arduino	94
Lampiran 3	Lampiran Hasil Pengukuran	95

ABSTRAK

Wibowo, Vadya Aryke. 2025. **Studi Pengembangan *E-Tongue* Berbasis Lima Sensor Elektrokimia Untuk Klasifikasi Air Minum**. Skripsi. Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Dosen Pembimbing: Muthmainnah, M.Si

Kata Kunci: *E-Tongue*, Sensor Elektrokimia, Air Minum Kemasan, PCA, Pengembangan.

Kualitas air minum merupakan aspek penting dalam menjaga kesehatan masyarakat, terutama di tengah meningkatnya risiko pencemaran akibat industrialisasi dan aktivitas manusia. Oleh karena itu, diperlukan sistem pemantauan kualitas air yang mampu memberikan hasil cepat dan akurat. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem e-tongue berbasis lima sensor elektrokimia guna mengklasifikasikan kualitas air minum kemasan produk lokal. Parameter yang digunakan meliputi ion klorida (Cl^-), ion fluorida (F^-), pH, oksigen terlarut (DO), dan total padatan terlarut (TDS). Lima sampel air minum diuji menggunakan sistem e-tongue, dan data hasil pengukuran dianalisis menggunakan metode *Principal Component Analysis* (PCA). Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem e-tongue memiliki waktu respon sensor rata-rata selama 15 detik, menunjukkan efisiensi dalam proses deteksi. Analisis PCA menghasilkan proporsi PC1 sebesar 31,49%, PC2 sebesar 20,36%, sehingga proporsi kumulatifnya mencapai 51,85%, yang mencerminkan kemampuan dua komponen utama dalam menjelaskan sebagian besar variasi data. Pola klasifikasi pada plot PCA dua dimensi menunjukkan pemisahan kluster yang jelas antar merek air minum, menandakan bahwa sistem ini mampu mengidentifikasi perbedaan karakteristik kimiawi air secara efektif. Efektivitas sistem dalam klasifikasi tergolong tinggi, ditunjukkan melalui konsistensi hasil serta ketepatan pemisahan antar sampel. Dengan demikian, sistem e-tongue yang dikembangkan mampu mengklasifikasikan kualitas air minum secara cepat, akurat, dan berpotensi diaplikasikan sebagai alat pemantau kualitas air baik di laboratorium maupun industri.

ABSTRACT

Wibowo, Vadya Aryke. 2025. **Development Study of an *E-Tongue* Based on Five Electrochemical Sensors for Drinking Water Classification**. Undergraduate Thesis. Faculty of Science and Technology, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Advisor: Muthmainnah, M.Si.

Keywords: E-Tongue, Electrochemical Sensor, Bottled Drinking Water, PCA, Development.

Drinking water quality is an important aspect in maintaining public health, especially amidst the increasing risk of pollution due to industrialization and human activities. Therefore, a water quality monitoring system is needed that can provide fast and accurate results. This study aims to develop an e-tongue system based on five electrochemical sensors to classify the quality of locally produced bottled drinking water. The parameters used include chloride ions (Cl^-), fluoride ions (F^-), pH, dissolved oxygen (DO), and total dissolved solids (TDS). Five drinking water samples were tested using the e-tongue system, and the measurement data were analyzed using the Principal Component Analysis (PCA) method. The test results showed that the e-tongue system had an average sensor response time of 15 seconds, indicating efficiency in the detection process. PCA analysis produced a proportion of PC1 of 31.49%, PC2 of 20.36%, so that the cumulative proportion reached 51.85%, reflecting the ability of the two principal components to explain most of the data variation. The classification pattern in the two-dimensional PCA plot shows a clear cluster separation between drinking water brands, indicating that the system is able to identify differences in the chemical characteristics of water effectively. The effectiveness of the system in classification is quite high, indicated by the consistency of the results and the accuracy of separation between samples. Thus, the developed e-tongue system is able to classify drinking water quality quickly, accurately, and has the potential to be applied as a water quality monitoring tool both in laboratories and industry.

مستخلص البحث

ويبو، فاديا أريكي. 2025. دراسة تطوير لسان إلكتروني قائم على خمسة حساسات كيميائية كهربائية لتصنيف مياه الشرب. بحث جامعي. كلية العلوم والتكنولوجيا، الجامعة مولانا مالك إبراهيم الإسلامية الحكومية مالانج. المشرف: مطمئة، الماجستير.

الكلمة الرئيسية: اللسان الإلكتروني، مستشعر الكهروكيمياء، مياه الشرب المعبأة، تحليل المكونات الرئيسية، التطوير.

تُعتبر جودة مياه الشرب جانباً هاماً في الحفاظ على صحة المجتمع، خاصة في ظل تزايد مخاطر التلوث الناتج عن التصنيع والأنشطة البشرية. لذلك، هناك حاجة إلى نظام لمراقبة جودة المياه قادر على تقديم نتائج سريعة ودقيقة. تهدف هذه الدراسة إلى تطوير نظام لسان إلكتروني يعتمد على خمسة حساسات كيميائية كهربائية من أجل تصنيف جودة مياه الشرب المعبأة من المنتجات المحلية. تشمل المعايير المستخدمة أيونات الكلوريد (Cl^-)، أيونات الفلوريد (F^-)، الرقم الهيدروجيني (pH)، الأكسجين المذاب (DO)، وإجمالي المواد الصلبة المذابة (TDS). الطريقة المستخدمة هي التجربة الكمية في المختبر. تم اختبار خمس عينات من مياه الشرب باستخدام نظام اللسان الإلكتروني، وتم تحليل بيانات القياس باستخدام طريقة تحليل المكونات الرئيسية (PCA) لتقليل أبعاد البيانات وتحديد أنماط التصنيف. تظهر نتائج الاختبار أن نظام اللسان الإلكتروني لديه وقت استجابة متوسط للـ 15 $sensors$ يبلغ 15 ثانية، مما يدل على الكفاءة في عملية الكشف. ينتج تحليل PCA نسبة PC_1 تبلغ 49،31%، و PC_2 تبلغ 20،36%، مما يجعل النسبة التراكمية تصل إلى 51،85%، مما يعكس قدرة العنصرين الرئيسيين في تفسير الجزء الأكبر من تنوع البيانات. تظهر أنماط التصنيف في رسم PCA ثنائي الأبعاد فصلاً واضحاً بين مجموعات علامات المياه المعدنية، مما يشير إلى أن هذا النظام قادر على تحديد الاختلافات الكيميائية لمياه الشرب بشكل فعال. إن فاعلية النظام في التصنيف مرتفعة، كما يتضح من اتساق النتائج ودقة الفصل بين العينات. وبالتالي، فإن نظام اللسان الإلكتروني الذي تم تطويره أثبت قدرته على تصنيف جودة مياه الشرب بسرعة وبدقة، ويحتمل أن يُستخدم كأداة لمراقبة جودة المياه سواء في المختبرات أو في الصناعة.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Air merupakan komponen yang sangat vital bagi kehidupan manusia. Tidak hanya sebagai komponen utama dalam metabolisme, tetapi juga berfungsi sebagai media yang mendukung berbagai reaksi biokimia penting dalam tubuh. Manusia, dengan komposisi tubuh sekitar 60-70% terdiri dari air, sangat bergantung pada kualitas air yang dikonsumsi untuk menjaga kesehatan. Sebagaimana yang telah dijelaskan dalam firman Allah dalam Q.S al-Anbiya (21): 30,

أَوَلَمْ يَرَ الَّذِينَ كَفَرُوا أَنَّ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضَ كَانَتَا رَتْقًا فَفَتَقْنَاهُمَا وَجَعَلْنَا مِنَ الْمَاءِ كُلَّ شَيْءٍ حَيٍّ أَفَلَا يُؤْمِنُونَ

Artinya : “Apakah orang-orang kafir tidak mengetahui bahwa langit dan bumi, keduanya, dahulu menyatu, kemudian Kami memisahkan keduanya dan Kami menjadikan segala sesuatu yang hidup berasal dari air? Maka, tidakkah mereka beriman?” (Q.S al-Anbiya (21): 30) ”.

Dalam Q.S al-Anbiya (21): 30, dapat diketahui bahwa air adalah sumber kehidupan segala makhluk, sehingga menjaga kualitas air yang aman dan bersih merupakan bagian dari tanggung jawab manusia untuk memastikan kehidupan yang sehat dan berkelanjutan. Kebutuhan akan air minum yang bersih dan sehat juga semakin mendesak di Tengah peningkatan populasi dan industrialisasi yang dapat menyebabkan kontaminasi air (Musli dkk, 2016). Air minum yang aman harus memenuhi standar kesehatan tertentu yang ditetapkan oleh lembaga kesehatan nasional maupun internasional. Menurut Achyani (2023), kualitas air minum dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk kandungan mineral seperti kalsium, magnesium, dan ion-ion berbahaya seperti klorida dan fluorida. Jika konsentrasi

ion-ion tersebut tidak terkendali, dampaknya terhadap kesehatan manusia dapat sangat serius, mulai dari gangguan pencernaan hingga kerusakan tulang dan gigi akibat tingginya kadar fluorida. Hal ini menunjukkan pentingnya pemahaman tentang karakteristik air sebagai zat yang sangat dibutuhkan oleh tubuh manusia. Sebagaimana firman Allah dalam Q.S. al-Mursalat (77):27,

وَجَعَلْنَا فِيهَا رَوَاسِي شَيْخٍ وَأَسْقَيْنُكُمْ مَاءً فُرَاتًا

Artinya : *"Dan Kami jadikan di dalamnya gunung-gunung yang tinggi, dan Kami beri minum kamu dengan air tawar."*(Q.S. al-Mursalat (77):27)".

Q.S. al-Mursalat (77):27 menunjukkan bahwa air tawar adalah salah satu anugerah besar dari Allah yang secara khusus diperuntukkan bagi kebutuhan hidup manusia. Air tawar memiliki karakteristik yang sesuai untuk dikonsumsi dan sangat penting dalam menunjang metabolisme tubuh. Oleh karena itu, memahami kualitas air minum dari segi sifat kimia dan fisiknya menjadi penting untuk dikaji secara ilmiah. Salah satu pendekatan ilmiah yang digunakan dalam penelitian ini adalah melalui pengembangan teknologi sensor elektrokimia dalam sistem e-tongue untuk klasifikasi kualitas air minum kemasan. Selain itu, pH air yang tidak seimbang dapat menimbulkan dampak buruk pada kesehatan, termasuk iritasi saluran pencernaan. Maka dari itu, analisis terhadap air sebagai objek ilmiah menjadi sangat relevan dalam bidang kajian fisika dan teknologi. (Santoso, 2021).

Kandungan mineral dalam air memiliki peran vital untuk menentukan kualitas air yang aman dikonsumsi. Berbagai metode telah dikembangkan untuk memantau kualitas air, salah satunya dengan menggunakan sensor elektrokimia yang mampu mendeteksi ion-ion tertentu, pH, dan tingkat oksigen terlarut (DO) dalam air. Menurut Setiawan dan Nugroho (2020), teknologi sensor elektrokimia

mampu melakukan deteksi kualitas air dengan baik, namun masih memerlukan pengembangan lebih lanjut untuk menghasilkan klasifikasi kualitas air minum yang lebih akurat dan komprehensif. Di sinilah teknologi e-tongue hadir sebagai inovasi sensor untuk analisis kualitas air, guna menjawab kebutuhan tersebut (Wijaya et al., 2022).

Teknologi e-tongue memanfaatkan integrasi berbagai sensor elektrokimia dalam satu sistem untuk mendeteksi parameter fisik dan kimiawi air minum. Dengan kemampuan mengukur variabel kualitas air secara simultan, seperti ion klorida, ion fluorida, pH, oksigen terlarut, dan total padatan terlarut (TDS), e-tongue memungkinkan penilaian kualitas air minum secara lebih akurat. Deteksi presisi ini dimungkinkan oleh lima sensor elektrokimia yang menangkap perubahan kecil dalam komposisi kimia air (Rahmawati et al., 2023). Tantangan dalam pengukuran kualitas air salah satunya adalah kecepatan respon sensor, karena respon yang lambat dapat menunda pengambilan keputusan terkait keamanan air.

Oleh karena itu, penelitian ini mengevaluasi waktu respon dari kelima sensor elektrokimia dalam e-tongue. Berbagai sampel air minum akan diuji untuk menilai kemampuan sistem e-tongue dalam mengklasifikasikan kualitas air secara cepat dan akurat (Kurniawan, 2022). Kecepatan respon ini penting dalam pengembangan teknologi e-tongue ke depan, terutama mengingat banyaknya merek air minum kemasan yang mungkin belum sepenuhnya memenuhi standar kesehatan. Dengan kemampuannya mengklasifikasikan kualitas air berdasarkan parameter fisik dan kimia, sistem e-tongue diharapkan dapat menjadi alat bagi masyarakat dan industri untuk memastikan air yang dikonsumsi aman dan berkualitas. Oleh karena itu, penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi

dalam pengembangan teknologi sensor elektrokimia untuk deteksi dan klasifikasi kualitas air minum secara efisien (Handayani et al., 2023).

Dalam analisis data, metode Principal Component Analysis (PCA) digunakan untuk mereduksi dimensi data tanpa kehilangan informasi penting dari dataset awal. Menurut Sari (2021), PCA mempermudah pemantauan kualitas air dengan mengidentifikasi pola klasifikasi yang dihasilkan oleh sensor elektrokimia dalam sistem e-tongue. Dengan PCA, data sensor dapat diolah lebih efisien untuk menghasilkan representasi visual dari parameter kualitas air seperti pH, TDS, dan kandungan ion spesifik (Wulandari & Lestari, 2022).

Pada penelitian ini, PCA berfungsi untuk mengelompokkan dan mengklasifikasikan kualitas air berdasarkan variabel utama yang memengaruhi keamanan konsumsi. Diharapkan sistem e-tongue mampu memberikan hasil klasifikasi akurat secara real-time. Akhirnya, penerapan teknologi ini diharapkan mampu meningkatkan jaminan kualitas air minum di masyarakat serta mendeteksi potensi kontaminasi yang berbahaya bagi kesehatan. Teknologi e-tongue juga diharapkan berkembang lebih lanjut untuk aplikasi yang lebih luas, termasuk dalam industri makanan dan minuman yang bergantung pada kualitas air dalam proses produksinya (Wibowo et al., 2023).

Dengan demikian, penelitian ini menjadi langkah awal yang penting dalam pengembangan teknologi sensor elektrokimia berbasis e-tongue untuk klasifikasi kualitas air minum, yang diharapkan membawa dampak signifikan bagi kesehatan masyarakat dan industri air minum. Sehingga, berdasarkan latar belakang tersebut,

peneliti tertarik untuk melakukan penelitian yang berjudul “Studi Pengembangan E-tongue Berbasis Lima Sensor Elektrokimia untuk Klasifikasi Air Minum”.

1.2 Rumusan Masalah

Dari paparan latar belakang diatas, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Bagaimana respons time sensor elektrokimia dalam menganalisis sampel air minum kemasan produk lokal?
2. Bagaimana pola klasifikasi sampel air minum menggunakan analisis PCA?
3. Seberapa efektif sistem E-tongue dalam mengklasifikasikan kualitas air minum berdasarkan parameter sensor elektrokimia?

1.3 Tujuan Penelitian

Dari paparan rumusan masalah diatas, maka tujuan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Untuk mengetahui respons time sensor elektrokimia dalam menganalisis sampel air minum kemasan produk lokal.
2. Untuk mengetahui pola klasifikasi sampel air minum menggunakan analisis PCA.
3. Untuk mengetahui efektifitas sistem e-tongue dalam mengklasifikasikan kualitas air minum berdasarkan parameter sensor elektrokimia.

1.4 Batasan Masalah

Agar penelitian lebih terarah dan tidak menyimpang dari fokus utama, maka batasan masalah dalam penelitian ini ditentukan sebagai berikut:

1. Penelitian ini hanya menggunakan lima sampel air minum kemasan produk lokal yang tersedia di pasaran.
2. Parameter yang diamati terbatas pada lima indikator kualitas air, yaitu klorida (Cl^-), fluorida (F^-), pH, oksigen terlarut (DO), dan total padatan terlarut (TDS).
3. Sensor yang digunakan terdiri dari lima sensor elektrokimia yang masing-masing merepresentasikan satu parameter kualitas air.
4. Penelitian ini tidak mencakup analisis mikrobiologis dan tidak melibatkan parameter fisik seperti kekeruhan, warna, maupun suhu.
5. Teknik analisis data yang digunakan dibatasi pada metode Principal Component Analysis (PCA).
6. Penelitian dilakukan secara eksperimental di laboratorium dan tidak mencakup uji lapangan atau komersialisasi alat.

1.5 Manfaat Penelitian

1. Manfaat Khusus
 - a. Memperoleh informasi tentang kualitas air minum kemasan produk lokal dari berbagai merek yang diuji.
 - b. Mendeteksi potensi kontaminasi pada air minum untuk mengurangi risiko masalah kesehatan.
 - c. Mengintegrasikan berbagai parameter kimia dalam sistem e-tongue, guna mendukung pengembangan teknologi sensor elektrokimia yang lebih efisien.
2. Manfaat Umum

- a. Memberikan kontribusi ilmu pengetahuan baru terkait pengembangan lidah elektronik berbasis lima sensor elektrokimia.
- b. Menyediakan aplikasi praktis dari sensor chloride, fluoride, pH, DO (*Dissolved Oxygen*), dan TDS (*Total Dissolved Solids*) dalam analisis kualitas mineral air minum kemasan produk lokal.
- c. Memajukan penelitian dalam bidang pengembangan e-tongue berbasis sensor elektrokimia untuk klasifikasi kualitas air minum yang lebih akurat dan efektif.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Teoritis

2.1.1 Air Minum Dan Kualitasnya

Kualitas air minum merupakan aspek krusial yang memengaruhi kesehatan dan kesejahteraan manusia, mengingat air adalah elemen esensial dalam kehidupan, dan tubuh manusia terdiri dari sekitar 60-70% air. Air minum yang layak konsumsi harus memenuhi sejumlah standar kesehatan, baik yang ditetapkan oleh lembaga kesehatan dunia seperti WHO, maupun badan pengawas lokal di setiap negara, seperti Peraturan Menteri Kesehatan di Indonesia. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Fitri et al. (2020), kualitas air minum umumnya diukur berdasarkan parameter fisik, kimia, dan mikrobiologi yang penting dalam memastikan keamanan air dari potensi kontaminan yang bisa menyebabkan penyakit atau gangguan kesehatan (Fitri et al., 2020). Sebagaimana yang telah dijelaskan dalam firman Allah dalam Q.S Al-Mulk ayat (67) :30,

قُلْ أَرَأَيْتُمْ إِنْ أَصْبَحَ مَاؤُكُمْ غَوْرًا فَمَنْ يَأْتِيكُمْ بِمَاءٍ مَّعِينٍ

Artinya : *"Katakanlah (Muhammad), Terangkanlah kepadaku, jika sumber air kamu menjadi kering, maka siapakah yang akan mendatangkan air yang mengalir bagimu?"* (Q.S Al-Mulk ayat (67) :30)".

Dalam Q.S Al-Mulk ayat (67) :30, Allah mengingatkan pentingnya menjaga kebersihan dan kelestarian sumber air. Tanpa air yang bersih. Dan layak, keberlangsungan hidup manusia akan terganggu, sehingga pengembangan teknologi untuk memantau kualitas air, seperti teknologi e-tongue, menjadi sangat relevan. Pengawasan ini merupakan bentuk amanah dalam menjaga sumber daya air yang diberikan Allah. Selain itu, pH air yang tidak seimbang dapat menimbulkan

dampak buruk pada kesehatan, termasuk iritasi saluran pencernaan. Oleh karena itu, pengawasan kualitas air minum menjadi sangat penting untuk memastikan air yang dikonsumsi bebas dari kontaminan serta memiliki komposisi mineral yang seimbang (Santoso, 2021).

Air yang tidak memenuhi standar kesehatan dapat mengandung kontaminan dari berbagai sumber, seperti limbah industri, penggunaan pestisida di pertanian, dan zat berbahaya yang secara alami ada di lingkungan. Oleh karena itu, pemantauan dan pengujian rutin terhadap kualitas air minum sangat diperlukan untuk menjaga kesehatan masyarakat. Parameter utama yang sering diukur meliputi kekeruhan, warna, rasa, dan bau sebagai sifat fisik, serta pH, oksigen terlarut (DO), total padatan terlarut (TDS), dan keberadaan ion-ion tertentu seperti klorida dan fluorida sebagai parameter kimia (Setiawan & Nugroho, 2020).

Selain itu, keberadaan bakteri patogen seperti *Escherichia coli* sebagai indikator mikrobiologis juga perlu diawasi dengan ketat karena berpotensi menimbulkan penyakit pada manusia (Rachman & Santoso, 2022). Di era modern ini, perkembangan teknologi memberikan solusi yang lebih efisien dan akurat dalam deteksi potensi kontaminasi pada air minum. Menurut Handayani et al. (2023), penggunaan sensor elektrokimia dalam pemantauan kualitas air telah menunjukkan potensi besar untuk meningkatkan efisiensi deteksi kontaminan dengan lebih akurat, terutama pada air yang dikonsumsi masyarakat (Handayani et al., 2023).

a. Pengertian Air Minum

Air minum adalah air yang memenuhi syarat untuk dikonsumsi manusia tanpa menimbulkan efek buruk terhadap kesehatan. Menurut World Health Organization (WHO), air minum harus bebas dari kontaminasi fisik, kimia, dan mikrobiologi yang dapat membahayakan tubuh manusia (Nugraha, 2023). Air minum yang layak konsumsi seharusnya tidak berbau, tidak berasa, dan tidak berwarna, serta memiliki parameter kimia yang sesuai dengan standar yang telah ditetapkan. Pengelolaan sumber daya air yang bersih dan aman menjadi tantangan utama dalam berbagai wilayah di dunia untuk memastikan akses yang merata terhadap air minum yang berkualitas.

b. Parameter Fisik Air Minum

Parameter fisik air minum meliputi penilaian terhadap sifat-sifat yang bisa diamati secara langsung oleh indera manusia, seperti kekeruhan, warna, rasa, dan bau. Kekeruhan diukur berdasarkan seberapa banyak partikel tersuspensi yang ada dalam air, dan semakin tinggi kekeruhan, semakin besar kemungkinan bahwa air tersebut mengandung partikel kontaminan seperti lumpur, tanah, atau bahan organik. Warna air minum juga merupakan indikator kualitas fisik yang penting (Putri, 2020).

Air yang berwarna keruh atau kekuningan sering kali menjadi tanda adanya bahan organik, logam berat, atau kontaminan lain yang bisa membahayakan kesehatan. Rasa dan bau air minum harus netral, air yang berbau atau memiliki rasa tertentu dapat mengindikasikan kontaminasi dari senyawa kimia seperti klorida atau sulfur. Maka dari itu, air minum yang berkualitas baik harus bebas dari bau

menyengat atau rasa yang tidak sedap, karena sifat-sifat ini bisa menunjukkan adanya proses dekomposisi bahan organik atau polusi kimia yang berbahaya.

c. Parameter Kimia Air Minum

Parameter kimia air minum mencakup konsentrasi ion-ion tertentu serta sifat-sifat kimia seperti pH, oksigen terlarut (DO), dan total padatan terlarut (TDS). pH air minum harus berada dalam kisaran netral hingga sedikit basa, yaitu antara 6,5 hingga 8,5, untuk memastikan air tersebut aman dikonsumsi. Menurut Rahmat (2022) Air yang terlalu asam atau terlalu basa dapat menyebabkan iritasi pada saluran pencernaan dan dapat menimbulkan korosi pada pipa distribusi air, yang kemudian memperkenalkan logam berat seperti timbal ke dalam air minum.

Oksigen terlarut (DO) mengindikasikan kesegaran dan kebersihan air. Kadar DO yang rendah biasanya menunjukkan adanya aktivitas biologis yang tidak sehat atau polusi organik, sementara DO yang tinggi menandakan air yang bersih dan kaya oksigen. Total padatan terlarut (TDS) adalah pengukuran semua zat padat yang larut dalam air, seperti mineral, garam, dan bahan kimia lainnya. TDS yang terlalu tinggi dapat mempengaruhi rasa air dan juga memiliki dampak kesehatan jika mengandung zat-zat berbahaya seperti logam berat.

d. Parameter Mikrobiologi Air Minum

Keamanan mikrobiologi air minum sangat penting karena keberadaan bakteri, virus, atau parasit patogen dalam air dapat menyebabkan penyakit serius, termasuk diare, kolera, dan tifus. Menurut Prasetyo (2023) Salah satu indikator mikrobiologi yang paling sering digunakan untuk menilai kualitas air adalah keberadaan bakteri *Escherichia coli* (E. coli). Bakteri ini, yang biasanya hidup di usus besar manusia dan hewan, sering digunakan sebagai indikator kontaminasi

feses dalam air. Jika *E. coli* terdeteksi dalam air minum, ini menandakan bahwa air tersebut telah tercemar oleh limbah manusia atau hewan, yang berpotensi membawa patogen berbahaya.

Selain itu, bakteri patogen lain seperti *Salmonella* atau *Shigella* juga dapat ditemukan dalam air yang terkontaminasi (Muna, 2020). Proses pemurnian air seperti klorinasi, penyaringan, dan desinfeksi ultraviolet biasanya digunakan untuk membunuh mikroorganisme ini. Pemantauan mikrobiologi air secara berkala sangat penting untuk memastikan air tetap bebas dari patogen berbahaya, dan teknologi terbaru seperti biosensor telah memungkinkan deteksi mikroorganisme secara lebih cepat dan efisien dibandingkan metode konvensional.

e. Standar Kualitas Air Minum

Standar kualitas air minum bertujuan untuk melindungi kesehatan masyarakat dari bahaya kontaminasi. Menurut Handayani et al., (2023) WHO menetapkan bahwa kualitas air minum harus memiliki batas maksimum kandungan bahan kimia seperti nitrat, klorida, dan logam berat, serta parameter fisik seperti kekeruhan yang tidak boleh melebihi 5 NTU (*Nephelometric Turbidity Units*). Selain itu, parameter mikrobiologi harus menunjukkan bahwa air bebas dari bakteri coliform. Di Indonesia, SNI 01-3553-2006 menetapkan bahwa air minum harus memiliki pH antara 6,5 hingga 8,5, kandungan total zat padat terlarut (TDS) maksimum 500 mg/L, dan bebas dari zat kimia beracun seperti arsenik. Parameter-parameter ini menjadi panduan dalam pengawasan kualitas air untuk menjamin keamanan konsumsi. (Handayani et al., 2023)

Selanjutnya, di Indonesia, mengenai standar kualitas air minum juga diatur oleh Peraturan Menteri Kesehatan No. 492/MENKES/PER/IV/2010, yang

mencakup batas maksimum kandungan berbagai zat kimia, parameter fisik, serta keberadaan mikroorganisme berbahaya. Standar ini dirancang untuk melindungi masyarakat dari bahaya kontaminasi air yang dapat menyebabkan masalah kesehatan akut maupun kronis (Oktaviana, 2024). Produsen air minum kemasan wajib mematuhi standar ini dengan menjalani uji kualitas secara berkala melalui laboratorium-laboratorium yang terakreditasi. Teknologi sensor seperti e-tongue dan sensor elektrokimia kini semakin banyak digunakan dalam proses pengujian kualitas air untuk memastikan bahwa air minum yang diproduksi atau disalurkan ke masyarakat memenuhi standar yang ditetapkan oleh lembaga terkait.

2.1.2 Sensor Elektrokimia

Sensor elektrokimia merupakan perangkat yang bekerja berdasarkan prinsip reaksi elektrokimia antara elektroda sensor dan zat kimia dalam sampel, menghasilkan sinyal listrik yang dapat dianalisis untuk mendeteksi dan mengukur konsentrasi zat tertentu (Rahmah, 2024). Teknologi ini memiliki keunggulan dalam hal sensitivitas dan kecepatan respons, serta mampu mendeteksi ion-ion spesifik dan parameter fisik seperti pH, oksigen terlarut (DO), dan total padatan terlarut (TDS). Dalam konteks pemantauan kualitas air minum, sensor elektrokimia sangat efektif untuk memberikan data real-time tentang kondisi air, terutama terkait kandungan ion-ion berbahaya seperti klorida dan fluorida, yang bila melebihi ambang batas dapat berdampak buruk bagi kesehatan manusia.

Sistem sensor ini umumnya terdiri dari elektroda kerja, elektroda referensi, dan elektroda pembanding yang bekerja bersama untuk mendeteksi sinyal elektrokimia yang kemudian dikonversi menjadi informasi kuantitatif. Selain itu, kemajuan dalam material elektroda, seperti penggunaan nanomaterial, telah

meningkatkan sensitivitas dan selektivitas sensor elektrokimia, sehingga mampu mendeteksi perubahan kecil dalam komposisi kimia air. Dalam bidang pemantauan kualitas air, sensor elektrokimia telah menjadi teknologi yang sangat penting karena memungkinkan deteksi simultan terhadap beberapa parameter kualitas air secara cepat dan akurat.

a. Prinsip Kerja Sensor Elektrokimia

Prinsip kerja sensor elektrokimia didasarkan pada reaksi kimia yang terjadi di permukaan elektroda ketika elektroda kontak dengan larutan yang mengandung ion-ion tertentu. Reaksi ini menghasilkan perubahan potensial listrik atau arus listrik yang diukur dan diinterpretasikan sebagai informasi tentang konsentrasi zat terlarut dalam air. Pada sensor pH, misalnya, elektroda selektif ion digunakan untuk mendeteksi perubahan konsentrasi ion hidrogen (H^{+}) dalam larutan, yang kemudian digunakan untuk menghitung pH air (Wibisono, 2014).

Salah satu dasar teoritis utama dalam prinsip kerja sensor elektrokimia adalah Persamaan Nernst, yang menjelaskan hubungan antara potensial elektroda dan konsentrasi ion dalam larutan. Persamaan Nernst dapat dituliskan sebagai berikut:

$$E = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{[ion]}{[ion]_{referensi}} \right) \dots \dots \dots (2.1)$$

Keterangan:

E : Potensial elektroda (V)

E^0 : Potensial standar elektroda (V)

R : Konstanta gas ideal (8,314 J/mol·K)

T : Suhu absolut (K)

n : Jumlah elektron yang terlibat dalam reaksi

F : Konstanta Faraday (96485 C/mol)

$[ion]$: Konsentrasi ion dalam larutan

$[ion]_{referensi}$: Konsentrasi ion pada kondisi referensi

Sebagai contoh, pada sensor oksigen terlarut (DO), arus dihasilkan ketika oksigen dioksidasi atau direduksi di permukaan elektroda. Sensor TDS mengukur konduktivitas listrik air, yang meningkat seiring bertambahnya jumlah ion terlarut. Penggunaan material elektroda yang tepat sangat penting dalam meningkatkan sensitivitas dan stabilitas sensor. Penggunaan elektroda berbasis logam mulia, seperti platinum atau emas, sering kali digunakan karena stabilitasnya yang tinggi dalam kondisi elektrokimia.

Dari hal tersebut, dapat disimpulkan bahwa sensor elektrokimia bekerja berdasarkan perubahan potensial listrik yang terjadi akibat interaksi antara komponen kimia dalam larutan dengan permukaan elektroda. Proses ini melibatkan transfer elektron antara sensor dan molekul yang dianalisis, sehingga menghasilkan sinyal listrik yang proporsional dengan konsentrasi komponen tersebut. Menurut Wahab et al. (2023), prinsip kerja sensor elektrokimia umumnya dibagi menjadi tiga kategori: potensiometri, amperometri, dan konduktometri.

- 1) **Potensiometri** mengukur perubahan potensial listrik tanpa arus yang signifikan.
- 2) **Amperometri** mendeteksi arus yang dihasilkan dari reaksi redoks.
- 3) **Konduktometri** mengukur perubahan dalam konduktivitas larutan.

Prinsip-prinsip ini mendasari pengoperasian sensor-sensor dalam sistem e-tongue untuk mengukur berbagai parameter kimia dalam air minum secara akurat dan efisien.

b. Jenis-jenis Sensor Elektrokimia

Menurut Zainul (2024) Terdapat beberapa jenis sensor elektrokimia yang umum digunakan, masing-masing memiliki keunggulan khusus tergantung pada parameter yang diukur. Sensor ion selektif (ISE) adalah jenis sensor yang paling umum, digunakan untuk mendeteksi konsentrasi ion spesifik, seperti klorida, natrium, dan kalsium. Sensor ini bekerja berdasarkan membran yang spesifik untuk ion tertentu, yang memungkinkan deteksi selektif dari satu jenis ion di tengah banyak ion lain yang ada dalam sampel.

Sensor amperometrik digunakan untuk mengukur zat yang dapat dioksidasi atau direduksi, seperti oksigen terlarut. Sensor ini mengukur arus yang dihasilkan dari reaksi redoks yang terjadi di elektroda. Sensor konduktometrik digunakan untuk mengukur konduktivitas listrik air, yang berhubungan langsung dengan jumlah total padatan terlarut (TDS) dalam air. Penggunaan berbagai jenis sensor ini memungkinkan sistem pemantauan kualitas air yang lebih komprehensif, karena mampu mendeteksi berbagai parameter penting secara simultan.

E-tongue menggunakan berbagai jenis sensor elektrokimia untuk mengukur parameter spesifik yang terkait dengan kualitas air (Choiriyah., 2016). Setiap sensor dirancang untuk mendeteksi komponen kimia tertentu melalui reaksi elektrokimia. Misalnya, sensor klorida bekerja berdasarkan potensiometri, di mana perubahan potensial elektroda diukur ketika ion klorida berinteraksi dengan elektroda selektif ion. Sensor fluorida juga menggunakan prinsip potensiometri untuk mengukur

konsentrasi ion fluorida dalam air. Sensor pH mengukur keasaman atau kebasaan air melalui perubahan potensial yang berkaitan dengan konsentrasi ion hidrogen.

Sensor *dissolved oxygen* (DO) mendeteksi jumlah oksigen terlarut melalui reaksi redoks, sementara sensor total dissolved solids (TDS) mengukur konduktivitas larutan untuk menentukan jumlah zat terlarut dalam air. Kombinasi dari berbagai sensor ini memungkinkan e-tongue untuk melakukan analisis yang menyeluruh terhadap kualitas air minum.

1) Sensor Klorida

Sensor klorida bekerja berdasarkan prinsip potensiometri, yang mengukur perubahan potensial listrik akibat interaksi ion klorida dengan elektroda selektif ion. Sensor ini sering digunakan untuk mendeteksi keberadaan ion klorida dalam air, yang dapat memengaruhi rasa dan kualitas air minum. Menurut Effendi (2023), menurut WHO (*World Healty Organization*) ion klorida memiliki nilai standar agar aman ketika dikonsumsi yaitu diangka 250 mg/L dan jika nilainya berlebihan dalam air dapat menyebabkan rasa asin, sehingga penting untuk memonitor konsentrasinya dalam batas yang diizinkan. Sensor klorida memberikan hasil yang cepat dan akurat dalam pengujian kualitas air, sehingga dapat digunakan untuk deteksi kontaminasi.

2) Sensor flourida

Sensor fluorida berfungsi untuk mengukur konsentrasi ion fluorida dalam air. Sensor ini biasanya menggunakan membran selektif ion yang berinteraksi dengan ion fluorida, sehingga menghasilkan sinyal listrik yang proporsional dengan konsentrasi fluorida. Fluorida adalah komponen penting dalam air untuk kesehatan gigi, menurut WHO (*World Healty Organization*) 1,5 mg/L merupakan nilai standar

yang sudah ada maka jika nilai yang terkandung dalam air mineral terlalu tinggi fluorida dapat menyebabkan fluorosis. Berdasarkan penelitian Ummah (2018), sensor fluorida dalam e-tongue dapat memberikan pengukuran yang presisi dan cepat, memudahkan pemantauan kualitas air minum.

3) Sensor pH

Sensor pH digunakan untuk mengukur tingkat keasaman atau kebasaan dalam air minum, yang merupakan indikator penting dalam kualitas air. Sensor ini bekerja berdasarkan perubahan potensial elektroda terhadap konsentrasi ion hidrogen dalam larutan. Menurut Yusuf (2021), potensial sensor pH berbanding lurus dengan logaritma konsentrasi ion H^+ . Menurut WHO (*World Healty Organization*) air minum memiliki nilai standar 6,5-8,5 mg/L jika nilainya terlalu tinggi airnya akan terlalu asam atau basa dapat menyebabkan korosi pada pipa atau mempengaruhi kesehatan manusia, sehingga pengukuran pH yang akurat sangat penting dalam evaluasi kualitas air.

4) Sensor DO (*Dissolved Oxygen*)

Sensor *Dissolved Oxygen* (DO) mengukur jumlah oksigen terlarut dalam air, yang merupakan indikator penting dari kualitas air minum serta kesehatan ekosistem perairan. Sensor DO biasanya bekerja berdasarkan prinsip amperometri, di mana oksigen yang terlarut mengalami reaksi redoks pada elektroda, menghasilkan arus yang sebanding dengan konsentrasi oksigen. Menurut Paramma (2021), menurut WHO (*World Healty Organization*) nilai stndar pada oksigen terlarut pada air diangka 5-8 mg/L yang nantinya akan memberi kesegaran pada air minum, akan tetapi jika nilainya terlalu tinggi akan mengakibatkan sakit pada pencernaan. Sensor DO banyak digunakan dalam industri air minum dan

pengolahan air limbah untuk memastikan ketersediaan oksigen yang cukup, serta untuk mendeteksi kontaminasi atau kondisi anaerob.

5) Sensor TDS (*Total Dissolved Solids*)

Sensor TDS berfungsi untuk mengukur jumlah zat padat terlarut dalam air, seperti mineral, garam, dan logam. Sensor ini bekerja dengan prinsip pengukuran konduktivitas listrik, di mana semakin tinggi jumlah zat terlarut, maka semakin tinggi pula nilai konduktivitasnya. Parameter TDS penting karena dapat memengaruhi kejernihan, rasa, dan kelayakan konsumsi air minum. Menurut *World Health Organization* (WHO), batas maksimum kandungan TDS yang dianjurkan dalam air minum adalah sebesar 500 mg/L. Air dengan kadar TDS yang melebihi ambang tersebut dapat memiliki rasa yang tidak sedap serta mengindikasikan kemungkinan adanya kontaminasi bahan kimia atau logam berat. Nilai TDS yang sangat rendah pun tidak dianjurkan, karena dapat menyebabkan air terasa hambar dan kekurangan mineral penting.

c. Material Elektroda dalam Sensor Elektrokimia

Material elektroda memainkan peran penting dalam performa sensor elektrokimia, karena sifat permukaan elektroda mempengaruhi sensitivitas dan selektivitas sensor. Material yang umum digunakan meliputi logam mulia seperti platinum, emas, dan perak, yang memiliki stabilitas elektrokimia yang tinggi dan konduktivitas listrik yang baik. Penggunaan nanomaterial, seperti nanotube karbon dan graphene, juga semakin umum karena luas permukaan yang tinggi dan kemampuan konduktivitas yang superior (Mita et al., 2024).

Nanomaterial ini memungkinkan sensor elektrokimia mendeteksi konsentrasi zat yang sangat rendah, meningkatkan sensitivitas hingga level

molekuler. Selain itu, menurut Zainul (2024) modifikasi permukaan elektroda dengan lapisan molekul tertentu juga dapat meningkatkan selektivitas sensor terhadap ion-ion spesifik. Misalnya, penambahan lapisan ionofor pada elektroda selektif ion dapat meningkatkan kemampuan sensor dalam mendeteksi ion-ion yang sulit diukur dengan metode konvensional.

d. Aplikasi Sensor Elektrokimia dalam Pemantauan Kualitas Air

Dalam pemantauan kualitas air, sensor elektrokimia digunakan untuk mendeteksi parameter-parameter seperti pH, TDS, DO, dan konsentrasi ion-ion spesifik. Menurut Kareliasari (2021) Sensor pH digunakan untuk memastikan air memiliki keasaman yang sesuai dengan standar kesehatan, karena pH yang terlalu rendah atau tinggi dapat menyebabkan kerusakan pada pipa distribusi atau menimbulkan masalah kesehatan bagi konsumen. Sensor DO penting dalam mengukur kadar oksigen terlarut, yang merupakan indikator kebersihan air. Kadar DO yang rendah menunjukkan adanya kontaminasi organik yang bisa menyebabkan masalah kesehatan jika air tersebut dikonsumsi. Sensor TDS digunakan untuk memantau total padatan terlarut dalam air, yang mencakup mineral-mineral dan zat-zat kimia lainnya. TDS yang tinggi dapat memengaruhi rasa air dan juga dapat berbahaya bagi kesehatan jika disebabkan oleh zat beracun atau logam berat. Aplikasi sensor elektrokimia dalam pemantauan kualitas air minum memberikan keuntungan berupa kecepatan deteksi dan akurasi tinggi, serta memungkinkan pemantauan yang berkelanjutan melalui sistem yang terintegrasi.

e. Keunggulan dan Tantangan Sensor Elektrokimia

Keunggulan utama sensor elektrokimia adalah sensitivitas tinggi, respon cepat, dan kemampuan untuk mendeteksi berbagai parameter kimiawi secara simultan. Teknologi ini juga memungkinkan deteksi real-time, yang sangat penting dalam pemantauan kualitas air, terutama di daerah-daerah yang rawan terhadap polusi atau pencemaran industri. Namun, terdapat beberapa tantangan dalam penerapannya, termasuk degradasi elektroda yang dapat memengaruhi akurasi sensor dari waktu ke waktu, serta kebutuhan akan kalibrasi yang sering untuk menjaga akurasi pengukuran. Selain itu, interferensi dari ion atau zat lain yang ada dalam sampel air juga bisa memengaruhi keakuratan sensor, terutama jika sensor tidak memiliki selektivitas yang baik terhadap ion target.

f. Respons Time dalam Pengukuran Sensor Elektrokimia

1) Pengertian Respon Time

Respons time adalah waktu yang dibutuhkan oleh sensor untuk mencapai nilai stabil setelah berinteraksi dengan sampel. Pada sensor elektrokimia, respons time sangat penting karena mencerminkan kecepatan sensor dalam merespons perubahan kimia dalam larutan. Menurut Wang (2006), respons time sensor elektrokimia dapat bervariasi tergantung pada jenis sensor, kondisi pengukuran, dan sifat fisik dari zat yang diukur. Sensor yang memiliki respons time yang cepat akan lebih efisien dalam aplikasi yang memerlukan deteksi real-time.

2) Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Respons Time Pada Sensor Elektrokimia

Faktor-faktor yang mempengaruhi respons time pada sensor elektrokimia meliputi suhu, viskositas larutan, dan desain elektroda. Semakin tinggi suhu, biasanya respons time akan semakin cepat karena meningkatnya kecepatan reaksi

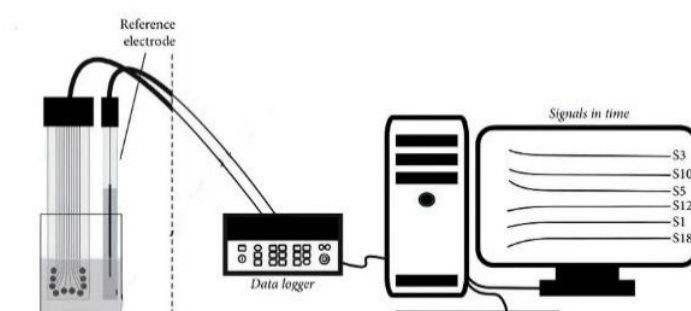
kimia. Selain itu, viskositas larutan juga berpengaruh, di mana larutan yang lebih kental akan memperlambat difusi zat ke permukaan sensor, sehingga memperpanjang respons time. Faktor lain seperti luas permukaan elektroda dan sensitivitas material elektroda juga turut menentukan kecepatan respons sensor. Desain sensor yang optimal dapat meminimalkan respons time dan meningkatkan efisiensi pengukuran dalam aplikasi e-tongue.

3) Pentingnya Respons Time Dalam Aplikasi Sensor Air Minum

Respons time yang cepat dalam sensor elektrokimia sangat penting dalam aplikasi pengujian kualitas air minum karena memungkinkan deteksi cepat terhadap perubahan kondisi air. Dalam aplikasi e-tongue, respons time yang pendek sangat diinginkan untuk memastikan hasil pengukuran yang akurat dan real-time, terutama dalam situasi yang memerlukan pemantauan kualitas air secara cepat, seperti pada industri minuman atau dalam pengujian air di daerah rawan kontaminasi. Oleh karena itu, pengembangan sensor dengan respons time yang optimal menjadi fokus utama dalam teknologi e-tongue, sehingga dapat memberikan solusi yang efektif untuk pengawasan kualitas air yang lebih efisien.

2.1.3 Sistem E-Tongue

Menurut Hidayat (2021) sistem e-tongue atau lidah elektronik merupakan inovasi dalam teknologi sensor yang dirancang untuk meniru kemampuan sensorik manusia dalam mendeteksi dan mengklasifikasikan rasa atau kualitas cairan berdasarkan komposisi kimiawi. Dengan menggunakan algoritma pemrosesan data, informasi yang diperoleh dari sensor-sensor tersebut diolah untuk menghasilkan klasifikasi yang akurat mengenai kualitas sampel.



Gambar 2.1 Sistem E-Tongue

Dalam identifikasi air minum, e-tongue berfungsi untuk menganalisis kualitas air dengan cepat dan efisien, memastikan bahwa air yang dikonsumsi memenuhi standar kesehatan yang telah ditetapkan. Sistem ini memiliki banyak keunggulan, antara lain sensitivitas yang tinggi, waktu respon yang cepat, serta kemampuannya untuk mendeteksi beberapa parameter secara bersamaan, menjadikannya teknologi yang sangat penting dalam pemantauan kualitas air minum. E-tongue juga memiliki kemampuan untuk mempelajari pola melalui teknik pembelajaran mesin, sehingga semakin banyak data yang dikumpulkan, sistem akan semakin cerdas dan akurat dalam membuat klasifikasi.

Teknologi ini memungkinkan pengukuran kualitas air di lapangan dengan alat yang portabel, sekaligus meminimalkan kebutuhan akan laboratorium yang kompleks dan waktu analisis yang lama.

a. Pengertian E-tongue

E-tongue (lidah elektronik) adalah sebuah sistem sensor buatan yang dirancang untuk meniru fungsi sensor rasa pada lidah manusia. Sistem ini bekerja dengan mendeteksi komponen kimia dalam larutan melalui beberapa sensor dan kemudian mengolah respons sensorik tersebut menggunakan metode pengolahan

data. Menurut Choiriyah (2016), e-tongue memanfaatkan prinsip elektrokimia, impedansi, atau konduktansi untuk mengidentifikasi dan mengklasifikasikan berbagai zat dalam larutan. Teknologi ini semakin populer dalam analisis kualitas air, makanan, dan minuman karena kemampuannya dalam menghasilkan data yang konsisten dan objektif dibandingkan dengan metode sensorik tradisional.

b. Sejarah dan Perkembangan Teknologi E-tongue

Teknologi e-tongue pertama kali dikembangkan pada awal 1990 an sebagai alat untuk menggantikan analisis sensoris manusia yang subjektif (Hidayat, 2021). Awalnya, aplikasi e-tongue terbatas pada industri makanan dan minuman, namun seiring dengan kemajuan teknologi sensor, e-tongue mulai diterapkan dalam berbagai bidang, termasuk farmasi dan pengujian lingkungan. Pengembangan signifikan terjadi ketika sistem ini mulai menggunakan sensor multi-elektroda yang lebih sensitif dan data analisis berbasis kecerdasan buatan untuk meningkatkan akurasi hasil. Perkembangan e-tongue ini didukung oleh kemajuan dalam pengolahan sinyal dan algoritma machine learning, yang memperluas potensi aplikasinya dalam berbagai industri.

c. Prinsip Kerja Sistem E-tongue

Menurut Jazuly (2015) Prinsip kerja e-tongue adalah dengan menggabungkan beberapa sensor elektrokimia yang dirancang untuk mendeteksi komponen kimia yang berbeda dalam sampel air. Setiap sensor berinteraksi dengan molekul spesifik dalam cairan dan menghasilkan sinyal listrik yang kemudian diproses menggunakan algoritma komputasi. Sensor elektrokimia bekerja dengan mendeteksi perubahan potensial atau arus listrik yang dihasilkan oleh reaksi kimia

di permukaan elektroda, yang kemudian diinterpretasikan sebagai konsentrasi zat kimia tertentu.

Hasil dari beberapa sensor ini kemudian akan diintegrasikan untuk memberikan gambaran komprehensif tentang kualitas air. Sistem kerja e-tongue ini dirancang agar dapat memproses banyak parameter sekaligus, sehingga memungkinkan deteksi yang lebih cepat dan akurat dibandingkan metode pengukuran tradisional. Dengan demikian, e-tongue tidak hanya mengukur parameter individu, tetapi juga mampu mengenali pola atau profil dari sampel air, yang membuatnya efektif untuk mengklasifikasikan kualitas air berdasarkan parameter yang berbeda-beda.

d. Komponen Sensor dalam Sistem E-tongue

E-tongue terdiri dari beberapa jenis sensor yang masing-masing berperan dalam mendeteksi parameter spesifik (Santika, 2018). Sensor ion selektif digunakan untuk mendeteksi konsentrasi ion-ion seperti klorida dan fluorida, yang penting dalam menilai kualitas air minum. Konsentrasi ion-ion ini harus berada dalam batas aman untuk mencegah risiko kesehatan, seperti kerusakan gigi atau gangguan ginjal. Sensor pH bertanggung jawab untuk mengukur keasaman atau kebasaan air. Air yang bersifat asam atau basa ekstrem dapat menyebabkan iritasi pada saluran pencernaan dan meningkatkan korosi pada infrastruktur pipa air.

Sensor oksigen terlarut (DO) mendeteksi kadar oksigen dalam air, yang merupakan indikator kebersihan dan kesegaran air. Sensor total padatan terlarut (TDS) digunakan untuk mengukur jumlah mineral, garam, atau zat lain yang terlarut dalam air. Setiap sensor berfungsi secara independen, tetapi hasil dari semua sensor digabungkan untuk memberikan analisis menyeluruh mengenai kualitas air.

Dengan demikian, komponen-komponen sensor dalam e-tongue bekerja sama untuk memberikan informasi yang lebih komprehensif dibandingkan pengukuran tunggal.

e. Pemrosesan Data dan Algoritma Klasifikasi

Data yang dihasilkan oleh sensor dalam e-tongue tidak langsung diterjemahkan sebagai kualitas air, tetapi diproses melalui algoritma pemrosesan sinyal dan pembelajaran mesin. Sistem ini menggunakan algoritma seperti *K-Nearest Neighbors* (KNN), *Support Vector Machine* (SVM), atau jaringan saraf tiruan (*Artificial Neural Networks/ANN*) untuk mempelajari pola dari data yang dihasilkan oleh sensor (Muhaemin, 2020). Algoritma-algoritma ini memungkinkan sistem e-tongue untuk mengenali profil kimia dari berbagai jenis air minum dan mengklasifikasikannya berdasarkan standar yang telah ditentukan. Proses ini melibatkan pengolahan sinyal dari setiap sensor, normalisasi data, dan pengenalan pola.

Seperti dalam pemrosesan data PCA, Data yang dihasilkan oleh sensor dalam e-tongue diproses menggunakan metode Principal Component Analysis (PCA) untuk menyederhanakan analisis dan mengidentifikasi pola klasifikasi kualitas air. PCA merupakan teknik reduksi dimensi yang mengubah data mentah dari lima sensor elektrokimia (pH, DO, TDS, klorida, dan fluorida) menjadi komponen utama yang dapat menjelaskan sebagian besar variansi dalam dataset. Data mentah dinormalisasi terlebih dahulu untuk menyamakan skala pengukuran sebelum dianalisis menggunakan rumus dasar PCA sebagai berikut:

$$Z = XW \dots\dots\dots(2.2)$$

Keterangan:

Z : Matriks data baru setelah transformasi ke dimensi yang lebih rendah

X : Matriks data asli

W : Matriks eigenvector dari matriks kovarian data X

Kemudian hasil PCA akan divisualisasikan dalam grafik dua atau tiga dimensi untuk memetakan sampel air berdasarkan karakteristik kimianya, memungkinkan pengelompokan dan klasifikasi kualitas air secara akurat. Sehingga dengan teknik pembelajaran mesin, e-tongue juga memiliki kemampuan untuk “belajar” dari sampel yang diuji, sehingga akurasi sistem meningkat seiring bertambahnya data yang dikumpulkan. Pemrosesan data ini memungkinkan e-tongue untuk mendeteksi perbedaan kecil dalam kualitas air, yang sering kali tidak terdeteksi oleh metode pengukuran konvensional.

f. Pengembangan Sistem E-tongue Berbasis Sensor Elektrokimia dalam Pengujian Kualitas Air Minum

E-tongue telah diimplementasikan secara luas di berbagai bidang, termasuk industri makanan, minuman, farmasi, dan lingkungan. Dalam industri makanan, e-tongue digunakan untuk menguji kualitas dan konsistensi rasa, sementara dalam farmasi, teknologi ini membantu dalam menguji kestabilan dan kualitas obat. Di bidang lingkungan, e-tongue dapat mendeteksi kontaminasi air atau perubahan komposisi kimia dalam limbah. Menurut Ummah (2018), e-tongue menunjukkan potensi besar dalam mendeteksi zat-zat berbahaya di air dengan cepat dan efisien, sehingga membantu dalam pengendalian kualitas dan keamanan.

Sistem e-tongue memiliki aplikasi luas dalam pemantauan kualitas air, terutama untuk air minum. Dengan kemampuan mendeteksi berbagai parameter

penting seperti pH, DO, TDS, serta ion klorida dan fluorida, e-tongue dapat memberikan analisis yang komprehensif dan cepat tentang apakah air yang diuji memenuhi standar kesehatan. Sistem ini digunakan baik dalam produksi air minum kemasan, pemantauan sumber air, hingga pengujian kualitas air di fasilitas umum seperti sekolah atau rumah sakit.

Keunggulan e-tongue dalam mendeteksi perubahan kecil dalam komposisi air sangat penting dalam mencegah potensi kontaminasi atau penurunan kualitas air yang bisa berdampak pada kesehatan masyarakat (Muhaemin, 2020). Selain itu, sistem ini juga digunakan dalam penelitian dan pengembangan produk air minum baru, di mana kecepatan dan akurasi dalam mendeteksi kualitas air sangat diperlukan. Sehingga dari hal tersebut, dapat disimpulkan bahwa Sistem e-tongue berbasis sensor elektrokimia menawarkan solusi yang efisien untuk analisis kualitas air minum.

Sensor elektrokimia akan bekerja dengan mendeteksi perubahan potensial listrik ketika zat kimia berinteraksi dengan permukaan sensor. Pada pengujian kualitas air, sensor seperti pH, klorida, dan fluorida digunakan untuk mengukur parameter penting dalam air. Penggunaan lima sensor elektrokimia dalam e-tongue memungkinkan pengukuran multi-komponen secara simultan dan memberikan hasil yang lebih cepat dan akurat dibandingkan metode konvensional. Hasil dari sistem ini kemudian dianalisis menggunakan algoritma klasifikasi, seperti *Principal Component Analysis* (PCA), untuk menentukan kualitas air secara menyeluruh. (Azmi, et al., 2020).

g. Keunggulan dan Tantangan Penggunaan e-tongue

Keunggulan utama dari e-tongue adalah kemampuannya untuk mendeteksi dan mengklasifikasikan berbagai parameter kualitas air secara simultan dan cepat. Sistem ini memungkinkan pemantauan kualitas air secara real-time, baik di laboratorium maupun di lapangan, tanpa memerlukan proses analisis yang panjang dan kompleks. Kemampuan sistem untuk menggabungkan beberapa sensor dalam satu alat juga memberikan efisiensi dalam pengukuran, serta memungkinkan deteksi yang lebih presisi terhadap kontaminan.

Namun, tantangan yang dihadapi dalam penerapan e-tongue termasuk biaya pengembangan dan perawatan sensor, serta potensi degradasi sensor dari waktu ke waktu akibat penggunaan yang berulang. Selain itu, meskipun algoritma pembelajaran mesin telah membantu meningkatkan akurasi sistem, e-tongue masih memerlukan kalibrasi dan pelatihan dengan jumlah sampel yang memadai untuk mencapai hasil yang optimal. Meski demikian, e-tongue menawarkan solusi yang sangat efektif dalam pemantauan kualitas air, dan di masa depan, dengan pengembangan lebih lanjut, sistem ini diperkirakan akan menjadi standar dalam pemantauan kualitas air yang lebih luas.

2.1.4 Klasifikasi Air Minum Menggunakan E-Tongue

a. Penerapan E-Tongue Untuk Pengujian Kualitas Air Minum

Penerapan e-tongue dalam pengujian kualitas air minum menawarkan solusi yang cepat dan efisien untuk mendeteksi parameter kimia dan fisik dalam air. E-tongue menggunakan beberapa sensor elektrokimia untuk mengukur komponen penting seperti pH, total dissolved solids (TDS), ion klorida, dan oksigen terlarut. Hasil dari pengukuran sensor tersebut kemudian diolah melalui algoritma data

mining seperti *Principal Component Analysis* (PCA) untuk menghasilkan klasifikasi kualitas air berdasarkan standar yang telah ditetapkan. Menurut Sari (2021), e-tongue telah terbukti mampu menghasilkan analisis yang akurat dan konsisten dalam menentukan kualitas air minum, dengan sensitivitas tinggi terhadap perubahan komposisi kimiawi air. Hal ini menjadikan e-tongue sebagai alat yang sangat berguna dalam industri pengolahan air dan pengujian lingkungan.

b. Metode Klasifikasi Kualitas Air Berbasis Sensor

Metode klasifikasi kualitas air menggunakan e-tongue berbasis sensor elektrokimia melibatkan beberapa langkah utama, yaitu pengumpulan data sensor, preprocessing data, dan analisis statistik atau klasifikasi berbasis machine learning. Algoritma seperti *Principal Component Analysis* (PCA) sering digunakan untuk mereduksi dimensi data sensor yang kompleks dan mengidentifikasi pola utama dari hasil pengukuran. Klasifikasi ini membantu membedakan antara air minum yang layak dan tidak layak konsumsi, atau mengidentifikasi jenis kontaminan dalam air. Sehingga dengan kombinasi sensor yang tepat dan algoritma klasifikasi yang akurat, sistem e-tongue mampu memisahkan sampel air berdasarkan kualitasnya dengan tingkat keakuratan yang tinggi, menjadikan teknologi ini relevan untuk berbagai aplikasi pengujian air secara real-time.

2.2 Penelitian Terdahulu

1. *“Rancang Bangun Array Sensor e-tongue Berbasis Membran Lipid Untuk Klasifikasi Pola Rasa Air Minum Dalam Kemasan Menggunakan Metode LDA”*
oleh Mohammad Fajrul Falah (2021)

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan array sensor e-tongue dengan 16 larik membran lipid yang dapat mengklasifikasikan pola rasa air

minum dalam kemasan secara objektif menggunakan Linear Discriminant Analysis (LDA). Proses penelitian melibatkan pengembangan sensor, interface, dan perangkat lunak, di mana hasil pengujian menunjukkan bahwa air minum dalam kemasan dapat diklasifikasikan dengan baik sesuai kelompoknya. Jarak antar cluster centroid dari sampel aquades sebagai kontrol dan air minum kemasan lainnya terbukti signifikan. Persamaan dengan skripsi peneliti terletak pada penggunaan e-tongue untuk klasifikasi cairan dan analisis data statistik, namun perbedaannya adalah fokus penelitian ini pada membran lipid dan air minum kemasan, sedangkan skripsi Anda menggunakan sensor elektrokimia untuk pengklasifikasian air minum berdasarkan kandungan mineral.

2. *“Klasifikasi Pola Rasa Daging Sapi Dan Daging Babi Berbasis Electronic Tongue Dengan 17 Array Sensor Menggunakan Metode Principal Component Analysis (PCA) Dan Cluster Analysis (CA)” oleh Nizara Isnanda Rahma (2016)*

Penelitian ini bertujuan untuk mengklasifikasikan rasa daging sapi dan daging babi menggunakan lidah elektronik berbasis 17 membran lipid. Data respon dari sensor diolah menggunakan Principal Component Analysis (PCA) dan Cluster Analysis (CA), yang menghasilkan akurasi klasifikasi sebesar 100% dengan jarak centroid kluster mencapai 355.091, menunjukkan hasil yang sangat baik. Persamaan dengan skripsi peneliti terletak pada penggunaan teknologi e-tongue untuk pengujian sampel dan pengolahan data multivariat, tetapi perbedaannya adalah fokus penelitian ini pada klasifikasi pola rasa daging dengan metode PCA dan CA, sementara skripsi Anda menggunakan sensor elektrokimia untuk pengklasifikasian air minum berbasis kandungan mineral spesifik.

3. *“Klasifikasi Rasa Kopi Liberika Berdasarkan Asal Geografis Berbasis Lidah Elektronika Dengan Metode Principle Component Analysis (PCA)” oleh Marvina Rizqi Noor (2021)*

Penelitian ini bertujuan untuk mengklasifikasikan rasa kopi liberika berdasarkan asal geografis menggunakan lidah elektronik berbasis membran lipid. Respon sensor diolah menggunakan Principal Component Analysis (PCA) yang menghasilkan proporsi kumulatif PC1 dan PC2 sebesar 55.1%, dengan 44.9% informasi yang hilang, menunjukkan keterbatasan klasifikasi akibat ketidaksesuaian bahan membran dengan rasa kopi. Persamaan dengan skripsi peneliti adalah penggunaan teknologi e-tongue dan analisis multivariat, namun perbedaannya adalah fokus penelitian ini pada pengklasifikasian kopi liberika berdasarkan rasa dengan membran lipid, sedangkan skripsi Anda berfokus pada air minum dengan sensor elektrokimia untuk analisis kandungan mineral.

4. *“Pengembangan Sensor Lidah Elektronik (E-tongue) Potensiometrik Berbasis Membran Lipid Polimer” oleh Bryan Nuril Inzaghi (2022)*

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem sensor lidah elektronik potensiometrik yang menggunakan membran lipid berbasis polimer untuk mengukur potensial lima rasa dasar (manis, asin, pahit, asam, dan gurih) menggunakan larutan seperti Glukosa, Natrium Clorida, Quinine, Monosodium Glutamat, dan Citric Acid. Sensor berbentuk array dengan lima unit sensor, yang dilapisi membran Tetradodecylammonium bromide (TDAB). Pengukuran dilakukan dengan variasi molaritas (0,1M dan 0,01M) untuk mengetahui sensitivitas sensor. Hasil menunjukkan bahwa sensor e-tongue ini mampu membedakan potensial dari setiap larutan rasa dasar dengan sensitivitas yang

dipengaruhi oleh tingkat molaritas. Persamaan dengan skripsi peneliti adalah penggunaan e-tongue berbasis sensor elektrokimia untuk mengukur sampel, namun perbedaan utamanya terletak pada fokus pengujian rasa dasar makanan dan minuman, sementara skripsi Anda berfokus pada klasifikasi air minum berdasarkan kandungan mineral.

5. “*Pengembangan Larik Sensor E-tongue Berbasis Lipid OA (Oleic Acid) Dan TOMA (Trioctyl Methyl Ammonium Chloride) Untuk Identifikasi Ganja Dan Campurannya*” oleh Ryan Eko Saputro (2017)

Penelitian ini bertujuan untuk merancang sensor lidah elektronik berbasis membran lipid OA (Oleic Acid) dan TOMA (*Trioctyl Methyl Ammonium Chloride*) untuk mendeteksi dan mengidentifikasi ganja serta campurannya dengan teh dan tembakau. Membran lipid OA dan TOMA digunakan sebagai transduser dan dipetakan menggunakan analisis PCA. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sensor mampu mendeteksi dan membedakan ganja serta campurannya dengan reipitabilitas lebih dari 97%. PCA menunjukkan pemisahan yang jelas antara rasa ganja, teh, tembakau, dan campurannya. Persamaan dengan skripsi peneliti adalah penggunaan sensor berbasis membran lipid dan analisis PCA, namun perbedaannya adalah fokus pada deteksi zat ilegal dan campurannya, sementara skripsi Anda fokus pada klasifikasi air minum berdasarkan mineral yang terdeteksi oleh sensor elektrokimia.

Tabel 2.1 Penelitian Terkait

Judul	Hasil	Persamaan	Perbedaan
Rancang Bangun Array Sensor <i>E-tongue</i> Berbasis	Hasil penelitian menunjukkan bahwa Air minum kemasan dapat	Sama-sama menggunakan teknologi <i>e-tongue</i> untuk	Penelitian ini menggunakan membran lipid dan fokus pada

Membran Lipid Untuk Klasifikasi Pola Rasa Air Minum Dalam Kemasan Menggunakan Metode LDA Mohammad Fajrul Falah (2021)	diklasifikasikan dengan baik menggunakan sensor berbasis membran lipid dan metode LDA, dengan aquades sebagai kontrol yang menghasilkan jarak signifikan dari sampel lain.	klasifikasi cairan dan analisis statistik.	air minum kemasan, sedangkan skripsi peneliti menggunakan sensor elektrokimia dan fokus pada kandungan mineral air.
Klasifikasi Pola Rasa Daging Sapi Dan Daging Babi Berbasis Electronic Tongue Dengan 17 Array Sensor Menggunakan Metode Principal Component Analysis (PCA) Dan Cluster Analysis (CA) Nizara Isnanda Rahma (2016)	Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa Klasifikasi daging sapi dan babi menggunakan sensor lipid, PCA, dan CA menghasilkan akurasi 100%, dengan jarak centroid 355.091 yang menunjukkan klasifikasi yang sangat baik.	Sama-sama menggunakan teknologi <i>e-tongue</i> dan metode analisis multivariat.	Penelitian ini berfokus pada pengklasifikasian rasa daging sapi dan babi, sedangkan skripsi peneliti fokus pada klasifikasi air minum berbasis kandungan mineral.
Klasifikasi Rasa Kopi Liberika Berdasarkan Asal Geografis Berbasis Lidah Elektronika Dengan Metode Principle Component Analysis (PCA) Marvina Rizqi Noor (2021)	Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa Klasifikasi kopi liberika berdasarkan asal geografis dengan sensor lipid dan PCA menghasilkan proporsi kumulatif sebesar 55.1%, namun 44.9% data informasi hilang dalam proses reduksi.	Sama-sama menggunakan <i>e-tongue</i> dan analisis multivariat untuk klasifikasi sampel.	Penelitian ini berfokus pada kopi dan menggunakan membran lipid, sedangkan skripsi peneliti berfokus pada air minum dan menggunakan sensor elektrokimia.
Pengembangan Sensor Lidah	Hasil penelitian ini menunjukkan	Sama-sama menggunakan	Peneitian ini berfokus pada

Elektronik (<i>E-tongue</i>) Potensiometrik Berbasis Membran Lipid Polimer. Bryan Nuril Inzaghi (2022)	bahwa Sistem <i>e-tongue</i> mampu membedakan potensial lima rasa dasar dengan sensitivitas yang dipengaruhi oleh molaritas larutan yang diuji.	teknologi <i>e-tongue</i> berbasis sensor elektrokimia untuk analisis cairan.	pengujian rasa dasar (manis, asin, pahit, asam, gurih), sementara skripsi peneliti fokus pada klasifikasi air minum berdasarkan kandungan mineral.
Pengembangan Larik Sensor <i>E-tongue</i> Berbasis Lipid OA (Oleic Acid) Dan TOMA (Trioctyl Methyl Ammonium Chloride) Untuk Identifikasi Ganja Dan Campurannya oleh Ryan Eko Saputro (2017)	Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa Sensor berbasis membran lipid OA dan TOMA mampu mendeteksi ganja serta campurannya dengan ripitabilitas di atas 97% dan hasil analisis PCA yang jelas membedakan sampel.	Sama-sama menggunakan sensor berbasis membran lipid dan analisis PCA untuk klasifikasi.	Penelitian ini berfokus pada deteksi zat ilegal (ganja) dan campurannya, sementara skripsi peneliti fokus pada klasifikasi air minum berdasarkan kandungan mineral.

2.3 Kerangka Pemikiran

Kerangka pemikiran dalam penelitian ini berangkat dari pentingnya pemantauan kualitas air minum sebagai salah satu aspek kesehatan masyarakat yang sangat krusial. Kualitas air yang buruk dapat menyebabkan berbagai penyakit serius, termasuk gangguan pencernaan, kerusakan gigi akibat kadar fluorida yang berlebih, serta penyakit kardiovaskular akibat tingginya konsentrasi ion klorida dan logam berat dalam air. Oleh karena itu, diperlukan sistem yang mampu mendeteksi kualitas air secara cepat, akurat, dan komprehensif.

Dalam konteks ini, teknologi sensor elektrokimia berbasis sistem *e-tongue* menjadi solusi inovatif yang dapat mengklasifikasikan air minum berdasarkan

parameter fisik dan kimiawi yang penting, seperti pH, oksigen terlarut (DO), total padatan terlarut (TDS), serta kandungan ion-ion spesifik seperti klorida dan fluorida. Sistem e-tongue dirancang untuk bekerja secara simultan dengan mengintegrasikan beberapa sensor yang masing-masing mendeteksi parameter tertentu.

Berdasarkan literatur dan penelitian terdahulu, teknologi e-tongue terbukti efektif dalam mendeteksi kontaminasi dan variasi kualitas air minum dengan tingkat akurasi yang tinggi. Sistem ini tidak hanya menawarkan kecepatan dalam analisis, tetapi juga portabilitas, sehingga memungkinkan pemantauan kualitas air di lapangan tanpa harus bergantung pada laboratorium yang kompleks. Kerangka pemikiran ini bertumpu pada hipotesis bahwa e-tongue berbasis lima sensor elektrokimia dapat memberikan klasifikasi yang akurat terhadap kualitas air minum, dengan memanfaatkan kemampuan teknologi sensor untuk mendeteksi perubahan komposisi kimia air secara real-time.

Selain itu, melalui pemrosesan data yang lebih efisien, teknologi ini diharapkan dapat membantu produsen air minum kemasan maupun lembaga pengawas dalam memantau kualitas produk mereka secara terus-menerus. Dengan demikian, penelitian ini berupaya mengembangkan sistem e-tongue yang lebih canggih dan andal dalam klasifikasi air minum, yang pada akhirnya akan berdampak pada peningkatan keamanan dan kesehatan masyarakat secara umum. Teknologi ini juga diharapkan mampu diterapkan secara luas, tidak hanya dalam pengujian air minum, tetapi juga dalam aplikasi lain yang membutuhkan klasifikasi kimiawi cepat, seperti dalam industri makanan dan minuman. Kesimpulannya, kerangka pemikiran ini merangkum hubungan antara kebutuhan akan pemantauan

kualitas air yang cepat dan efisien dengan penggunaan teknologi sensor elektrokimia berbasis e-tongue, yang berpotensi menjadi solusi dalam deteksi kualitas air yang lebih baik dan efektif.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan desain Kuantitatif eksperimen laboratorium yang bertujuan untuk mengembangkan dan menguji sistem e-tongue berbasis lima sensor elektrokimia dalam klasifikasi kualitas air minum. Desain eksperimen kuantitatif dipilih karena memungkinkan untuk mengukur dan menganalisis hasil secara objektif berdasarkan data numerik yang diperoleh dari pengujian sistem (Priadana & Sunarsi, 2021). Pada penelitian ini, pengembangan perangkat keras dimulai dengan merancang dan mengintegrasikan lima sensor elektrokimia yang berfungsi untuk mendeteksi parameter kualitas air.

Tahap berikutnya melibatkan pengolahan sinyal dari sensor-sensor tersebut untuk mendapatkan tanggapan yang relevan dari setiap jenis air minum yang diuji. Eksperimen laboratorium dipilih karena memungkinkan peneliti untuk mengontrol kondisi lingkungan dan variabel-variabel yang diuji, sehingga hasil yang diperoleh lebih akurat dan terukur (Agustianti, et al., 2021). Pada penelitian ini, pendekatan kuantitatif digunakan untuk menganalisis data hasil pengukuran lima sensor elektrokimia, yaitu sensor klorida, fluorida, pH, *dissolved oxygen* (DO), dan *total dissolved solids* (TDS), yang bertindak sebagai variabel bebas. Data yang diperoleh dari pengukuran ini digunakan untuk mengklasifikasikan kualitas air minum sebagai variabel terikat. Untuk menjaga validitas hasil, setiap sampel air minum diuji sebanyak 30 kali, sesuai dengan kaidah uji eksperimen yang mengharuskan pengulangan pengukuran guna mendapatkan hasil yang konsisten.

3.2 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang, yang memiliki fasilitas lengkap untuk mendukung eksperimen pengembangan e-tongue berbasis sensor elektrokimia. Laboratorium di Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang dipilih karena memiliki alat dan infrastruktur yang sesuai untuk pengujian sinyal sensor secara presisi. Penelitian dilakukan selama periode 6 bulan, dimulai dari bulan Januari hingga Juni 2024. Selama waktu tersebut, berbagai tahap penelitian dijalankan secara sistematis, meliputi perancangan perangkat keras e-tongue, pengujian awal, pengumpulan data dari berbagai sampel air minum, serta analisis hasil pengukuran. Setiap tahap pengujian dilakukan secara bertahap untuk memastikan akurasi dan keandalan sistem yang dikembangkan.

3.3 Alat dan Bahan Penelitian

Penelitian ini menggunakan alat dan bahan utama sebagai berikut untuk mendukung eksperimen pada sistem e-tongue dalam klasifikasi kualitas air minum:

a. Alat Penelitian

1) E-tongue :

- Sensor pH
- Sensor TDS (*Total Dissolved Solids*)
- Sensor DO (*Dissolved Oxygen*)
- Sensor chloride
- Sensor fluoride

2) Multimeter Digital

3) Personal Computer

4) Software

- OriginPro 2024
- Microsoft Excel 2022

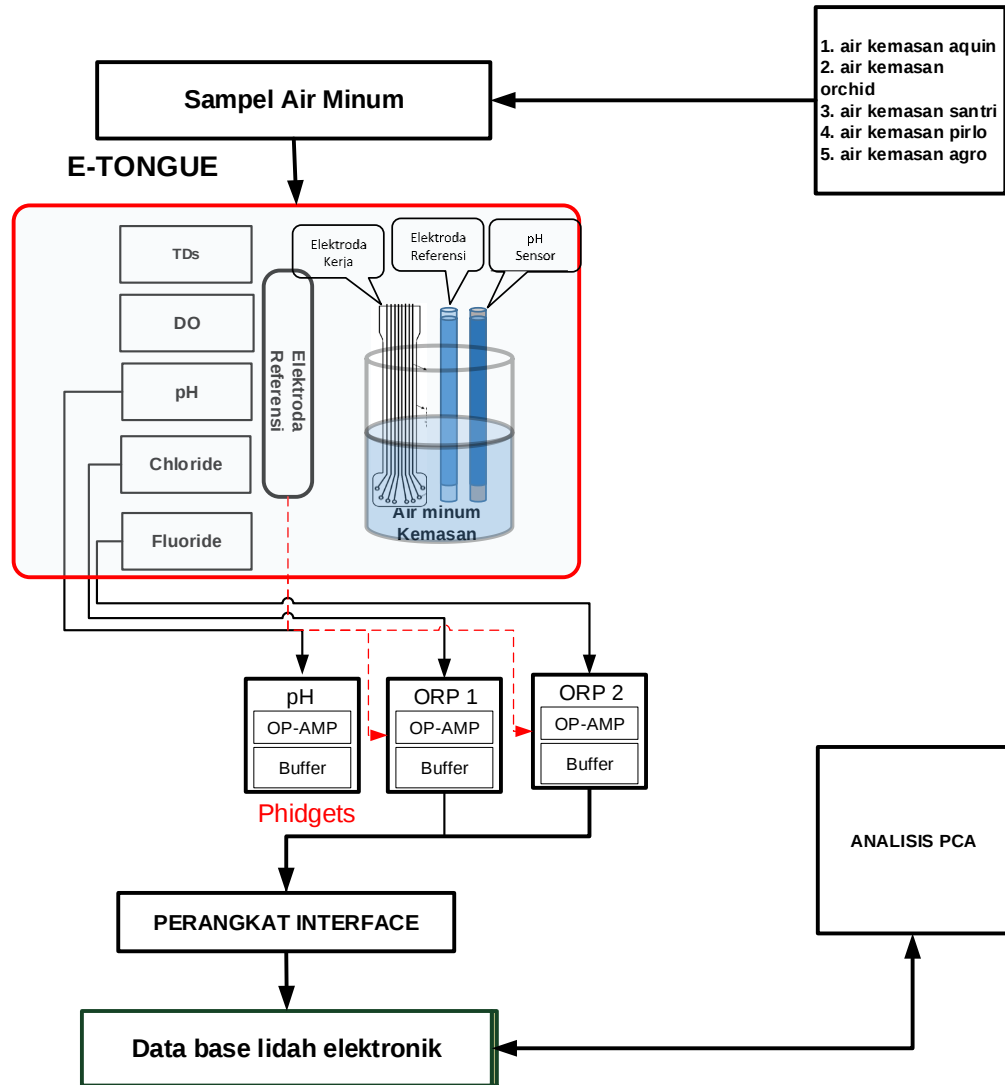
- 5) Termometer
- 6) Beaker Glass
- 7) pH Meter

b. Bahan Penelitian

- 1) Sampel Air Minum Kemasan (5 merek air minum kemasan produk lokal)
- 2) Larutan Akuades
- 3) Larutan Buffer

3.4 Tahap dan Alur Penelitian

berikut ini adalah tahapan dan alur penelitian mengenai Pengembangan E-Tongue Berbasis Lima Sensor Elektrokimia Untuk Klasifikasi Air Minum:



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.5 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan penting yang mencakup perancangan sistem e-tongue, pengumpulan data, pengolahan data, analisis menggunakan *Principal Component Analysis* (PCA), serta interpretasi dan klasifikasi hasil. Tahapan ini diuraikan secara rinci yakni sebagai berikut:

3.5.1 Perancangan Sistem E-Tongue

Langkah pertama dalam prosedur ini adalah merancang sistem e-tongue yang berbasis pada lima sensor elektrokimia, yaitu sensor chloride (Cl^-), fluoride (F^-), pH, *Dissolved Oxygen* (DO), dan *Total Dissolved Solids* (TDS). Setiap sensor tersebut memiliki fungsi spesifik dalam mendeteksi parameter kimia penting dalam air minum.

3.5.2 Pengumpulan Data E-Tongue

Tahap berikutnya adalah pengumpulan data yang dilakukan dengan menguji sampel air minum kemasan dari 5 merek yang berbeda. Setiap merek diuji menggunakan sistem e-tongue untuk mendapatkan data parameter kimia yang diukur oleh masing-masing sensor. Setiap sampel diuji sebanyak 30 kali untuk memastikan konsistensi hasil pengukuran serta mengurangi kemungkinan kesalahan atau bias dalam pengambilan data. Pengujian ini menghasilkan data berupa tegangan atau arus listrik yang dihasilkan oleh masing-masing sensor, yang mencerminkan konsentrasi parameter kimia tertentu. Misalnya, perubahan tegangan pada sensor chloride akan menunjukkan perubahan kadar ion Cl^- dalam air minum. Konsistensi pengujian diulang sebanyak 30 kali ini menghasilkan kumpulan data yang dapat digunakan untuk analisis statistik selanjutnya.

3.5.3 Pengolahan Data

Analisis data dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode analisis statistika deskriptif dan klasifikasi data berbasis respons sensor elektrokimia. Data yang diperoleh dari pengukuran sistem e-tongue dianalisis untuk mengidentifikasi kualitas air minum berdasarkan parameter kimia yang terukur, seperti klorida, fluorida, pH, DO, dan TDS. Metode analisis data dalam penelitian

ini terdiri dari beberapa tahap untuk memastikan hasil yang akurat dan valid dalam klasifikasi air minum menggunakan sistem e-tongue. Tahap-tahap analisis data tersebut dijelaskan sebagai berikut:

1. Normalisasi Data

Data mentah dari masing-masing sensor dinormalisasi untuk menghilangkan variasi skala antara sensor yang berbeda. Normalisasi dilakukan menggunakan rumus berikut:

$$X_{norm} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \dots\dots\dots(3.1)$$

X : adalah nilai asli data,

X_{min} : adalah nilai minimum dari kumpulan data

X_{max} : adalah nilai maksimum dari kumpulan data.

Proses ini bertujuan untuk memastikan bahwa semua variabel memiliki skala yang seragam dan tidak ada variabel yang mendominasi hasil analisis.

Tabel 3.1 Parameter kimia dan nilai kualitas air minum

No	Sampel	Chloride (mg/L)	Fluoride (mg/L)	pH	DO (mg/L)	TDS (mg/L)
1	Aquin					
2	Orchid					
3	Santri					
4	Pirlo					
5	Agro					

Tabel diatas menyajikan data pengukuran air minum yang. Parameter yang ditampilkan meliputi kadar chloride (mg/L), Flouride (mg/L), nilai pH, oksigen terlarut datau DO (mg/L), dan total padatan terlarut atau TDS (mg/L). Selain itu, tabel ini juga mencakup nilai secara keseluruhan berdasarkan parameter kimia yang terukur. Data dalam tabel ini digunakan untuk menggambarkan kualitas air minum

berdasarkan standar yang relevan serta mempermudah proses analisis hubungan antarparameter kimia dengan hasil prediksi kualitas.

3.5.4 Analisis Data dengan PCA

Data hasil pengukuran dari setiap sampel kemudian dianalisis menggunakan metode *Principal Component Analysis* (PCA). PCA merupakan teknik yang digunakan untuk mereduksi dimensi data tanpa menghilangkan informasi penting. Tujuannya adalah untuk menyederhanakan analisis data dan memvisualisasikan pola atau klasifikasi sampel air minum berdasarkan lima parameter kimia yang diukur. Dalam penelitian ini, PCA membantu mengidentifikasi komponen utama yang menjelaskan sebagian besar variasi dalam data. Adapun berikut ini adalah Rumus yang digunakan dalam PCA yakni sebagai berikut :

$$C = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)(x_i - \mu)^T \dots\dots\dots (3.2)$$

Keterangan:

C : adalah matriks kovarian,

x_i : adalah data pengukuran untuk sensor ke- i ,

μ : adalah rata-rata dari data,

n : adalah jumlah total pengukuran.

Hasil PCA dapat divisualisasikan dalam bentuk grafik dua atau tiga dimensi yang menggambarkan distribusi sampel berdasarkan karakteristik kimianya. Proses ini memungkinkan identifikasi pola yang ada dalam kumpulan data dan membantu dalam klasifikasi sampel air minum.

3.5.5 Interpretasi dan Klasifikasi

Tahap terakhir dalam prosedur penelitian ini adalah interpretasi hasil dari PCA dan klasifikasi air minum berdasarkan data yang diperoleh dari sistem e-

tongue. Sampel air minum yang memiliki karakteristik kimia serupa akan dikelompokkan ke dalam kluster yang sama. Misalnya, air dengan kadar fluoride dan chloride yang tinggi mungkin akan terkelompokkan dalam kluster tertentu, sedangkan air dengan kandungan TDS dan DO yang rendah akan berada di kluster lain. Klasifikasi ini memungkinkan identifikasi dan penilaian kualitas air minum berdasarkan parameter kimia yang diukur oleh sistem e-tongue. Dengan demikian, sistem e-tongue diharapkan mampu mengklasifikasikan air minum dengan akurasi yang tinggi dan menghasilkan data yang dapat digunakan untuk analisis lebih lanjut.

Tabel 3.2 Klasifikasi Hasil

Percobaan	Merk	Kloride (mg/L)	Fluoride (mg/L)	pH (mg/L)	DO (mg/L)	TDS (mg/L)
1	Aquin					
2	Aquin					
3	Aquin					
4	Aquin					
5	Aquin					
6	Aquin					
7	Aquin					
8	Aquin					
9	Aquin					
10	Aquin					
11	Aquin					
12	Aquin					
13	Aquin					
14	Aquin					
15	Aquin					
Dst..	...					

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem E-Tongue berbasis lima sensor elektrokimia guna mengklasifikasikan kualitas air minum kemasan produk lokal. Lima parameter utama yang digunakan dalam pengukuran kualitas air meliputi pH, *Total Dissolved Solids* (TDS), *Dissolved Oxygen* (DO), ion klorida (Cl^-), dan ion fluorida (F^-). Pengujian lima sampel air minum dilakukan guna mengetahui variasi nilai kualitas air yang terdeteksi oleh sistem E-Tongue.

Seluruh data hasil pengukuran dikumpulkan dan dianalisis menggunakan pendekatan kuantitatif dengan bantuan perangkat lunak OriginPro 2024. Selanjutnya, data dari masing-masing parameter diproses dengan metode *Principal Component Analysis* (PCA) untuk mengevaluasi efektivitas klasifikasi kualitas air. Selain itu, waktu respon (*response time*) dari masing-masing sensor juga diamati guna menilai efisiensi sistem dalam merespon perubahan konsentrasi parameter saat kontak dengan sampel air minum.

4.1.1 Deskripsi Sistem dan Prosedur Pengujian

Sistem *Electronic Tongue* (E-Tongue) yang digunakan dalam penelitian ini dirancang untuk mendeteksi dan mengklasifikasikan kualitas air minum kemasan berdasarkan lima parameter utama, yaitu pH, *Total Dissolved Solids* (TDS), *Dissolved Oxygen* (DO), ion klorida (Cl^-), dan ion fluorida (F^-). Sistem ini memanfaatkan lima sensor elektrokimia yang masing-masing terhubung secara digital melalui antarmuka mikrokontroler untuk membaca dan merekam data hasil pengukuran secara real-time. Proses pengujian dilakukan tanpa tahapan kalibrasi

manual, mengingat seluruh sensor yang digunakan telah dikonfigurasi oleh pabrik atau platform sistem dengan skala pembacaan otomatis dan terstandar.

Dalam pelaksanaannya, pengujian dilakukan secara langsung terhadap lima sampel air minum kemasan yang berbeda. Setiap sensor dicelupkan ke dalam sampel selama waktu tertentu hingga sinyal mencapai kestabilan (*steady-state*). Pembacaan hasil dilakukan melalui perangkat lunak antarmuka yang secara otomatis mencatat nilai akhir dari masing-masing parameter. Masing-masing sampel diuji sebanyak 30 kali untuk memastikan konsistensi pembacaan dan mengurangi kemungkinan kesalahan pengukuran.

Tidak dilakukannya proses kalibrasi tidak serta merta mengurangi keakuratan data, sebab sistem sensor yang digunakan telah melalui proses validasi internal pada saat pengembangan. Tujuan dari penelitian ini lebih berfokus pada evaluasi kemampuan sistem dalam membedakan profil kimia antar sampel berdasarkan nilai absolut yang dihasilkan oleh sensor, dan bukan pada perbandingan nilai dengan standar larutan kalibrasi tertentu. Melalui pendekatan ini, sistem E-Tongue diuji dalam konteks aplikatif, seperti halnya ketika digunakan oleh konsumen, industri, atau instansi pengawasan mutu air minum, di mana sistem langsung digunakan untuk mendeteksi variasi antar sampel secara efisien dan cepat. Model uji seperti ini merepresentasikan skenario dunia nyata yang sangat memungkinkan diadopsi oleh pengguna non-teknis secara luas.

4.1.2 Pengukuran Sampel Air Minum

Pada tahap pengukuran sampel, sistem *Electronic Tongue* (E-Tongue) digunakan untuk melakukan pengukuran terhadap lima sampel air minum kemasan yang berbeda. Pengujian dilakukan dengan cara mencelupkan kelima sensor ke dalam masing-masing sampel secara bersama-sama, kemudian data output dibaca dan direkam secara digital. Setiap pengukuran dilakukan sebanyak 30 kali untuk memastikan konsistensi data, lalu dihitung rata-ratanya. Parameter yang diukur meliputi: pH, TDS (mV), DO (mV), kadar ion Cl^- (mV), dan kadar ion F^- (mV).

Sebelum dilakukan pengukuran, seluruh sampel air dituangkan ke dalam wadah pengukuran, lalu masing-masing sensor direndam secara Bersama-sama selama 30 kali dalam waktu 15 detik hingga diperoleh nilai stabil dari alat ukur. Seluruh data kemudian dicatat dan dirapikan menggunakan perangkat lunak pendukung. Proses pengukuran ini menghasilkan dataset primer yang mencerminkan karakteristik elektrokimia setiap merek air minum. Hasil pengukuran kelima parameter pada setiap sampel sebelum dinormalisasi telah peneliti paparkan dalam lampiran dan berikut ini adalah hasil pengukuran kelima parameter pada setiap sampel setelah dinormalisasi :

Tabel 4.1 Hasil Pengukuran Sampel Air Minum Merek Aquin

SAMPEL	PENGULANGAN	FLO	CH	DO	pH	TDS
S1	1	0,680	0,578	0,575	0,682	1,000
	2	0,535	0,796	0,469	0,688	0,611
	3	0,860	0,223	0,553	0,688	0,796
	4	0,416	0,288	0,454	0,688	0,705
	5	0,351	0,674	0,522	0,688	0,752
	6	0,567	0,756	0,507	0,688	0,717
	7	0,218	0,572	0,454	0,688	0,662
	8	0,662	0,485	0,696	0,688	0,619
	9	0,313	0,229	0,234	0,688	0,905
	10	0,112	0,387	0,628	0,688	0,694

SAMPEL	PENGULANGAN	FLO	CH	DO	pH	TDS
	11	0,092	0,323	0,492	0,688	0,929
	12	0,214	0,784	0,515	0,688	0,686
	13	0,598	0,147	0,590	0,688	0,733
	14	0,611	0,542	0,424	0,688	0,811
	15	0,484	0,706	0,340	0,688	0,850
	16	0,077	0,417	0,454	0,688	0,878
	17	0,409	0,555	0,689	0,688	0,776
	18	0,620	0,320	0,522	0,688	0,509
	19	0,675	0,482	0,325	0,688	0,623
	20	0,349	0,597	0,393	0,688	0,862
	21	0,433	0,789	0,363	0,688	0,752
	22	0,464	0,446	0,424	0,688	0,847
	23	0,359	0,238	0,265	0,688	0,631
	24	0,500	0,638	0,371	0,688	0,564
	25	0,216	0,629	0,719	0,688	0,737
	26	0,806	0,380	0,454	0,688	0,709
	27	0,614	0,695	0,643	0,688	0,823
	28	0,384	0,456	0,772	0,680	0,780
	29	0,686	0,567	0,265	0,688	0,811
	30	0,760	0,458	0,750	0,688	0,564

Tabel 4.2 Hasil Pengukuran Sampel Air Minum Merek Orchid

SAMPEL	PENGULANGAN	FLO	CH	DO	pH	TDS
S2	1	0,690	0,637	0,659	0,128	0,078
	2	0,809	0,287	0,652	0,646	0,047
	3	0,308	0,379	0,485	0,476	0,075
	4	0,705	0,614	0,735	0,288	0,075
	5	0,436	0,773	0,644	0,575	0,063
	6	0,534	0,521	0,364	0,563	0,067
	7	0,693	0,202	0,841	0,387	0,129
	8	0,710	0,200	0,545	0,530	0,102
	9	0,463	0,724	0,561	0,207	0,039
	10	0,765	0,365	0,644	0,476	0,078
	11	0,617	0,739	0,508	0,643	0,110
	12	0,265	0,357	0,462	0,478	0,051
	13	0,576	0,447	0,576	0,540	0,090
	14	0,425	0,637	0,841	0,187	0,125
	15	0,533	0,487	0,364	0,576	0,110
	16	0,618	0,782	0,682	0,382	0,106
	17	0,644	0,644	0,076	0,291	0,075
	18	0,411	0,783	0,424	0,262	0,071

SAMPEL	PENGULANGAN	FLO	CH	DO	pH	TDS
	19	0,643	0,329	0,576	0,251	0,078
	20	0,858	0,249	0,227	0,140	0,063
	21	0,501	0,719	0,591	0,665	0,082
	22	0,426	0,647	0,500	0,578	0,098
	23	0,240	0,000	0,644	0,278	0,098
	24	0,364	0,673	0,735	0,696	0,071
	25	0,527	0,394	0,288	0,573	0,055
	26	0,573	0,142	0,826	0,238	0,000
	27	0,482	0,589	0,523	0,768	0,047
	28	0,497	0,563	0,735	0,096	0,067
	29	0,341	0,356	0,477	0,391	0,075
	30	0,072	0,610	0,500	0,295	0,102

Tabel 4.3 Hasil Pengukuran Sampel Air Minum Merek Santri

SAMPEL	PENGULANGAN	FLO	CH	DO	pH	TDS
S3	1	0,000	0,502	0,545	0,511	0,035
	2	0,611	0,358	0,621	0,273	0,086
	3	0,545	0,182	0,667	0,473	0,118
	4	0,299	0,515	0,659	0,020	0,031
	5	0,558	0,106	0,348	0,303	0,086
	6	0,439	0,473	0,409	0,128	0,051
	7	0,547	0,454	0,659	0,326	0,031
	8	0,502	0,455	0,386	0,576	0,106
	9	0,070	0,368	0,417	0,217	0,090
	10	0,534	0,235	0,417	0,819	0,082
	11	0,749	0,309	0,492	0,799	0,039
	12	0,675	0,519	0,492	0,505	0,078
	13	0,473	0,750	0,553	0,692	0,031
	14	0,786	0,708	0,432	0,481	0,125
	15	0,285	0,484	0,826	0,704	0,059
	16	0,999	0,792	0,629	0,372	0,043
	17	0,236	1,000	0,455	0,517	0,067
	18	0,400	0,692	0,402	0,551	0,059
	19	0,787	0,515	0,523	0,244	0,102
	20	0,502	0,567	0,508	0,465	0,106
	21	0,569	0,402	0,318	0,326	0,098
	22	0,513	0,719	0,735	0,350	0,075
	23	0,542	0,022	0,750	1,000	0,133
	24	0,514	0,591	0,000	0,401	0,102
	25	0,200	0,642	0,826	0,449	0,110
	26	0,383	0,562	0,280	0,153	0,043

SAMPEL	PENGULANGAN	FLO	CH	DO	pH	TDS
	27	0,661	0,513	0,462	0,395	0,035
	28	0,523	0,921	0,500	0,495	0,090
	29	0,518	0,481	0,477	0,486	0,118
	30	0,608	0,174	0,386	0,609	0,059

Tabel 4.4 Hasil Pengukuran Sampel Air Minum Merek Pirlo

SAMPEL	PENGULANGAN	FLO	CH	DO	pH	TDS
S4	1	0,405	0,589	0,364	0,330	0,055
	2	0,446	0,494	0,742	0,202	0,051
	3	0,847	0,448	0,379	0,259	0,090
	4	0,519	0,381	0,333	0,020	0,071
	5	0,737	0,938	0,682	0,523	0,110
	6	0,777	0,601	0,273	0,128	0,039
	7	0,751	0,696	0,508	0,034	0,047
	8	0,543	0,509	0,864	0,679	0,043
	9	0,751	0,696	0,424	0,346	0,039
	10	0,196	0,275	0,682	0,405	0,094
	11	0,449	0,690	0,667	0,351	0,102
	12	0,578	0,418	0,455	0,416	0,137
	13	0,563	0,712	0,712	0,050	0,067
	14	0,449	0,580	0,455	0,402	0,059
	15	0,221	0,463	0,568	0,264	0,063
	16	0,294	0,857	0,303	0,400	0,063
	17	0,329	0,523	0,424	0,460	0,149
	18	0,580	0,512	0,447	0,377	0,086
	19	0,275	0,686	0,326	0,246	0,118
	20	0,787	0,948	1,000	0,513	0,078
	21	0,646	0,842	0,106	0,596	0,098
	22	0,084	0,354	0,621	0,576	0,075
	23	0,887	0,962	0,303	0,739	0,133
	24	0,129	0,717	0,409	0,245	0,102
	25	0,503	0,509	0,470	0,425	0,110
	26	0,751	0,380	0,379	0,194	0,043
	27	1,000	0,411	0,636	0,338	0,035
	28	0,638	0,639	0,303	0,423	0,090
	29	0,310	0,544	0,106	0,559	0,118
	30	0,086	0,148	0,447	0,478	0,059

Tabel 4.5 Hasil Pengukuran Sampel Air Minum Merek Agro

SAMPEL	PENGULANGAN	FLO	CH	DO	pH	TDS
S5	1	0,437	0,633	0,545	0,364	0,188
	2	0,545	0,449	0,515	0,323	0,204
	3	0,643	0,609	0,652	0,594	0,188
	4	0,759	0,540	0,379	0,346	0,157
	5	0,358	0,847	0,394	0,784	0,180
	6	0,427	0,555	0,667	0,209	0,145
	7	0,624	0,643	0,333	0,511	0,161
	8	0,662	0,549	0,523	0,256	0,231
	9	0,797	0,350	0,742	0,310	0,224
	10	0,321	0,586	0,394	0,353	0,239
	11	0,311	0,579	0,348	0,301	0,216
	12	0,351	0,431	0,189	0,619	0,196
	13	0,362	0,703	0,705	0,575	0,204
	14	0,812	0,322	0,538	0,423	0,208
	15	0,626	0,539	0,500	0,602	0,212
	16	0,135	0,369	0,455	0,458	0,129
	17	0,780	0,851	0,795	0,302	0,137
	18	0,720	0,246	0,356	0,359	0,173
	19	0,781	0,602	0,553	0,630	0,157
	20	0,324	0,645	0,432	0,585	0,157
	21	0,434	0,790	0,561	0,283	0,039
	22	0,465	0,446	0,470	0,508	0,173
	23	0,360	0,238	0,447	0,000	0,133
	24	0,500	0,638	0,258	0,366	0,176
	25	0,216	0,629	0,864	0,343	0,212
	26	0,807	0,380	0,591	0,276	0,153
	27	0,615	0,695	0,636	0,533	0,188
	28	0,384	0,457	0,515	0,344	0,200
	29	0,686	0,568	0,303	0,359	0,188
	30	0,760	0,458	0,614	0,660	0,247

Data ini selanjutnya digunakan sebagai dasar untuk analisis lebih lanjut,

baik secara deskriptif maupun melalui metode statistik multivariat seperti *Principal Component Analysis* (PCA). Hasil pengukuran menunjukkan bahwa terdapat variasi nilai yang cukup jelas antar merek untuk masing-masing parameter, yang menjadi indikator awal bahwa kelima merek tersebut memiliki komposisi kimia yang khas dan dapat dibedakan secara sistematis melalui pendekatan berbasis

sensor. Data ini akan digunakan pada subbab berikutnya untuk menganalisis response time tiap sensor dan efektivitas klasifikasi menggunakan metode *Principal Component Analysis* (PCA).

4.1.3 Analisis Waktu Respon

Waktu respon (*response time*) merupakan parameter penting dalam mengevaluasi kinerja sensor, khususnya pada sistem *Electronic Tongue* (E-Tongue) yang dirancang untuk pengukuran cepat dan akurat. Response time didefinisikan sebagai waktu yang dibutuhkan oleh sensor untuk mencapai kestabilan sinyal (*steady-state*) setelah pertama kali kontak dengan sampel. Pengukuran ini bertujuan untuk mengetahui seberapa cepat masing-masing sensor merespon perubahan lingkungan kimia pada saat bersentuhan langsung dengan larutan sampel air minum.

Dalam penelitian ini, *response time* dihitung berdasarkan waktu yang dibutuhkan oleh sinyal output sensor untuk mencapai 95% dari nilai akhir (*steady-state*) setelah dimasukkan ke dalam sampel. Pengukuran dilakukan pada lima sampel air minum (Aquin, Orchid, Santri, Pirlo, Agro) untuk masing-masing sensor, dan data waktu respon diambil secara real-time menggunakan sistem logging digital. Adapun berikut ini adalah ringkasan hasil pengamatan waktu respon kelima sensor terhadap lima sampel:

Tabel 4.6 Waktu Respon Sensor terhadap Sampel Air Minum (dalam detik)

Sensor	Aquin	Orchid	Santri	Pirlo	Agro	Rata-Rata
Chloride	15	15	15	15	15	15
Fluoride	15	15	15	15	15	15
pH	15	15	15	15	15	15
DO	15	15	15	15	15	15
TDS	15	15	15	15	15	15

Dari tabel di atas, dapat diketahui bahwa masing-masing sensor menunjukkan waktu respon yang relatif dalam waktu 15 detik. Seluruh sensor menunjukkan performa stabil dengan rata-rata waktu respon masing-masing sebesar 15 detik. Nilai ini masih dalam kategori sangat responsif untuk sistem sensor cairan elektrokimia. Respon cepat dari sensor-sensor tersebut menjamin bahwa proses akuisisi data pada sistem E-Tongue dapat dilakukan secara efisien, bahkan untuk aplikasi lapangan atau pemantauan kualitas air secara waktu nyata (*real-time monitoring*).

Adapun hasil pengamatan juga menunjukkan bahwa waktu respon sensor dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain jenis parameter yang diukur, sensitivitas elektroda, suhu larutan, serta homogenitas kandungan kimia dalam air. Meskipun terdapat sedikit variasi antar sampel, namun perbedaan waktu respon masih berada dalam batas wajar dan tidak mengganggu reliabilitas data. Dengan waktu respon yang tergolong cepat dan konsisten, sistem E-Tongue yang dikembangkan telah memenuhi syarat sebagai alat ukur yang efisien dan siap digunakan untuk klasifikasi kualitas air minum berbasis elektrokimia.

4.1.4 Analisis Klasifikasi Menggunakan PCA

Analisis klasifikasi dalam penelitian ini dilakukan menggunakan pendekatan *Principal Component Analysis* (PCA), yaitu metode statistik multivariat yang bertujuan untuk mereduksi dimensi data dengan tetap mempertahankan varians maksimum dalam dataset. Metode ini sangat berguna dalam sistem *Electronic Tongue* (E-Tongue), karena memungkinkan visualisasi hubungan antar sampel berdasarkan data keluaran lima sensor elektrokimia (pH, TDS, DO, Cl^- , dan F^-) dalam bentuk grafis yang mudah ditafsirkan. Selain itu, PCA

membantu menilai kemampuan sistem dalam membedakan sampel berdasarkan profil kimianya, yang menjadi indikator utama keberhasilan klasifikasi.

Sebelum dilakukan PCA, seluruh data hasil pengukuran pada lima sampel air minum dinormalisasi menggunakan metode standardisasi Z-score, yaitu dengan mengurangi nilai rata-rata dan membaginya dengan standar deviasi. Proses ini penting untuk menghindari dominasi salah satu variabel terhadap variabel lain akibat perbedaan skala atau satuan. Setelah itu, data dianalisis menggunakan perangkat lunak OriginPro 2024 untuk mendapatkan nilai eigenvector, eigenvalue, loading matrix, dan score matrix.

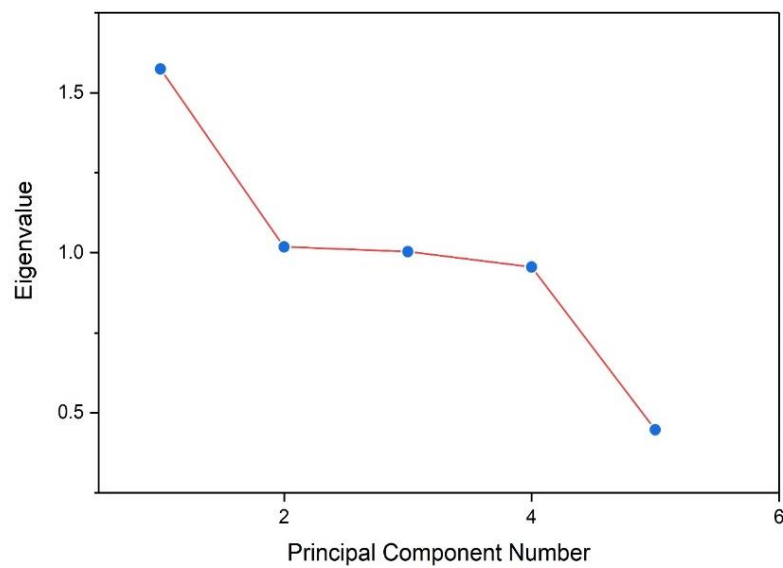
Tabel 4.7 Tabel Hasil Nilai Eigen Pola Data PCA

Principal Component Number	Eigenvalue	Percentage of Variance (%)	Cumulative (%)
PC 1	1.57456	31.49124	31.49124
PC 2	1.01841	20.36825	51.85949
PC 3	1.00388	20.07754	71.93703
PC 4	0.95579	19.11585	91.05288
PC 5	0.44736	8.94712	100

Berdasarkan tabel nilai eigen dari hasil analisis PCA pada pola data, terlihat bahwa komponen utama pertama (PC1) memiliki nilai eigen sebesar 1.574 atau sekitar 31,49% dari total variasi data. Angka ini menunjukkan bahwa informasi yang berhasil dijelaskan oleh PC1 dari keseluruhan lima parameter elektrokimia (Chloride, Fluoride, pH, DO, dan TDS) masih belum mencerminkan proporsi dominan dari keseluruhan struktur data. Dengan kata lain, meskipun PC1 memberikan kontribusi terbesar dibandingkan komponen lainnya, proporsinya belum cukup untuk menyatakan bahwa satu komponen utama ini sudah mewakili sebagian besar informasi data secara keseluruhan.

Komponen utama kedua (PC2) menyumbang 1.018 atau sekitar 20,36% dari total variasi. Jika digabungkan, PC1 dan PC2 hanya mampu menjelaskan sekitar 51,85% dari total variabilitas data. Ini berarti bahwa hampir setengah dari informasi penting dalam data masih tersebar di komponen lainnya, sehingga representasi data dalam dua dimensi utama (PC1 dan PC2) belum sepenuhnya memadai untuk memberikan gambaran yang utuh terhadap struktur data yang kompleks. Sementara itu, komponen ketiga hingga kelima (PC3 hingga PC5) masing-masing juga hanya menjelaskan 20,07%, 19,11%, dan 8,94% dari variasi data. Walaupun kontribusi mereka tergolong cukup kecil dan mungkin belum signifikan secara statistik, akumulasi keseluruhan variasi yang tidak tercakup oleh dua komponen utama pertama tetap cukup besar dan tidak dapat diabaikan begitu saja dalam konteks klasifikasi atau interpretasi data.

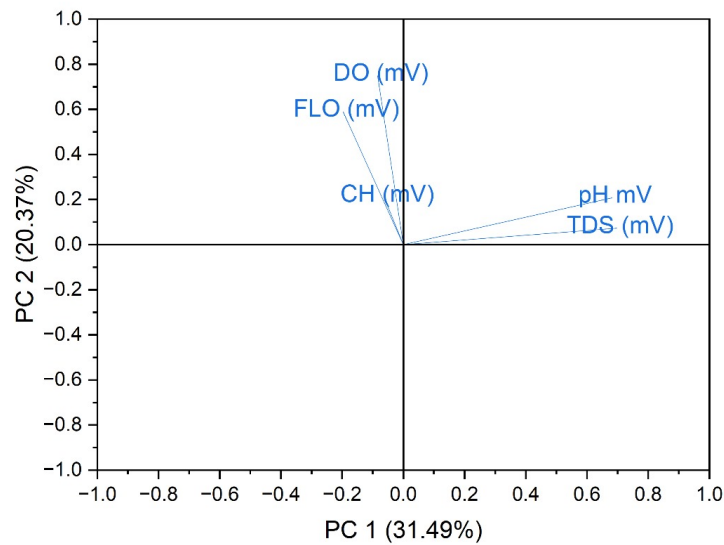
Namun demikian, hasil ini tetap menunjukkan bahwa analisis PCA memiliki potensi untuk dikembangkan lebih lanjut. Penelitian ini dapat menjadi pijakan awal bagi studi-studi lanjutan yang ingin mengeksplorasi klasifikasi air minum dengan parameter tambahan atau metode analitik lainnya yang lebih kompleks, seperti kombinasi PCA dengan algoritma *machine learning* (misalnya KNN, SVM, atau *decision tree*) untuk meningkatkan akurasi klasifikasi. Adapun berikut adalah hasil analisis berupa grafik konfigurasi nilai eigen (*Scree Plot*) menggunakan PCA yakni sebagai berikut :



Gambar 4.1 Grafik konvergensi nilai eigen menggunakan PCA

Dari grafik konfigurasi nilai eigen (*Scree Plot*) di atas, terlihat bahwa komponen utama pertama (PC1) memiliki nilai eigen tertinggi yaitu sebesar 1.574, yang kemudian diikuti oleh PC2 dengan nilai 1.018. Grafik menunjukkan penurunan tajam dari PC1 ke PC2, dan selanjutnya penurunan yang lebih landai dari PC3 hingga PC5. Pola ini memperlihatkan karakteristik yang dikenal sebagai *elbow point*, yaitu titik di mana kurva mulai melandai secara signifikan, yang dalam kasus ini terjadi setelah komponen kedua.

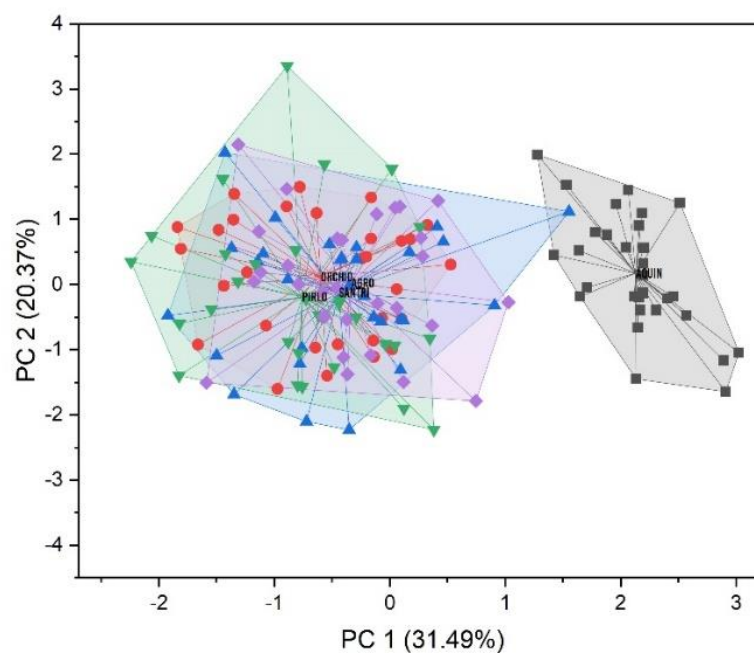
Keberadaan *elbow point* setelah PC2 menandakan bahwa dua komponen pertama sudah cukup mewakili sebagian besar informasi dari data asli, yakni sebesar 51,85% variansi total, sesuai dengan yang terlihat pada tabel nilai eigen sebelumnya. Adapun berikut adalah Visualisasi hasil PCA disajikan dalam bentuk *loading plot* yakni sebagai berikut:



Gambar 4.2 Loading Plot PCA untuk Lima Parameter Sensor

Dari loading plot hasil pengujian terhadap lima sampel air minum menggunakan metode *Principal Component Analysis* (PCA), terlihat bagaimana masing-masing parameter sensorik (*Chloride*, *Fluoride*, pH, DO, dan TDS) memberikan kontribusi terhadap pembentukan dua komponen utama, yaitu PC1 dan PC2. Grafik ini memperlihatkan vektor-vektor dari kelima parameter yang tersebar pada bidang dua dimensi, menunjukkan arah dan besar kontribusi masing-masing variabel terhadap distribusi data.

Adapun dibawah ini adalah Visualisasi hasil PCA disajikan dalam bentuk score plot yakni sebagai berikut:



Gambar 4.3 Score Plot PCA Berdasarkan Parameter Kualitas Air Minum

Pada Gambar diatas, terlihat distribusi kelima sampel (Aquin, Orchid, Santri, Pirlo, Agro) dalam ruang dua dimensi berdasarkan nilai skor PC1 dan PC2. Masing-masing titik mewakili satu sampel yang dipetakan berdasarkan profil kimianya. Distribusi antar titik menunjukkan bahwa sampel Aquin dan Pirlo menempati posisi yang cukup jauh satu sama lain pada sumbu PC1, menunjukkan perbedaan tajam dalam hal parameter dominan (khususnya TDS dan Cl^-). Sementara itu, Orchid dan Agro terlihat berdekatan, yang mengindikasikan bahwa kedua sampel tersebut memiliki karakteristik kimia yang mirip.

Sampel Santri menempati posisi tengah, menunjukkan bahwa ia memiliki nilai parameter yang berada di antara kelompok sampel lainnya, namun tetap membentuk klaster tersendiri. Score plot ini membuktikan bahwa sistem E-Tongue memiliki tingkat resolusi yang cukup tinggi dalam membedakan profil kimia

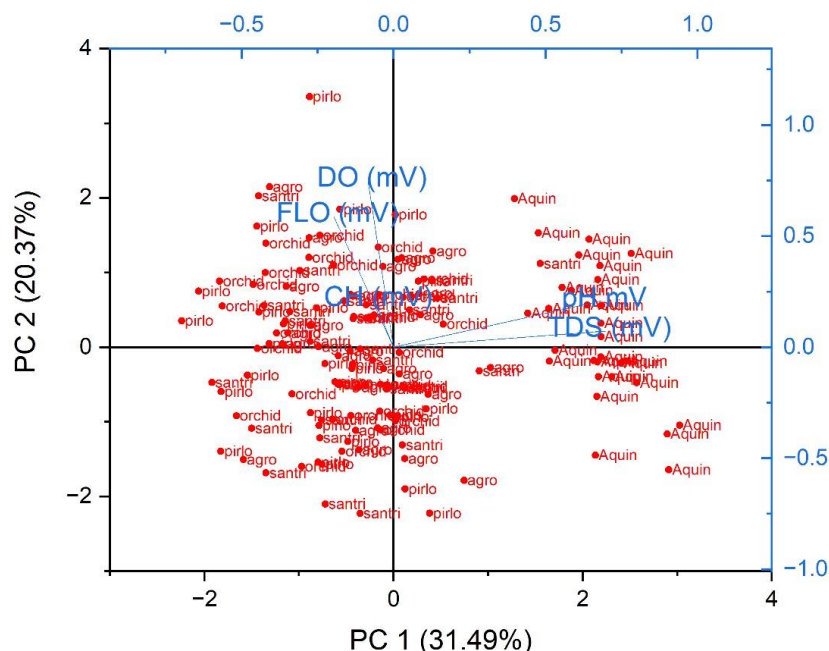
masing-masing sampel, dan mampu menghasilkan pengelompokan (*clustering*) yang jelas berdasarkan kandungan elektrokimianya.

Parameter yang memiliki vektor lebih panjang dan menjauh dari titik pusat grafik menunjukkan kontribusi yang lebih besar terhadap komponen tersebut, sementara parameter dengan vektor pendek memberikan pengaruh yang rendah. Sebagai contoh, jika TDS dan *Chloride* menunjukkan arah vektor yang hampir sejajar dengan PC1, maka keduanya merupakan parameter dominan yang membentuk dimensi PC1. Sebaliknya, jika pH atau DO lebih condong ke arah PC2, maka parameter tersebut berperan lebih besar dalam membedakan sampel di sepanjang sumbu PC2.

Pemahaman ini memberikan justifikasi ilmiah bahwa perbedaan klasifikasi antar sampel tidak hanya bersifat numerik, namun mencerminkan karakter kimiawi air minum yang nyata dan terukur. Kinerja sistem E-Tongue dalam menghasilkan data yang dapat dianalisis melalui PCA membuktikan bahwa sistem ini tidak hanya mampu melakukan deteksi parameter tunggal secara kuantitatif, tetapi juga dapat memberikan gambaran menyeluruh dan simultan mengenai karakteristik kimia sampel.

Hal ini merupakan keunggulan dari pendekatan sensor multikanal yang terintegrasi dengan metode statistik multivariat seperti PCA. Dengan terbentuknya klaster yang terpisah dan tidak saling tumpang tindih dalam score plot, serta kontribusi variabel yang logis dan konsisten dalam loading plot, maka dapat disimpulkan bahwa sistem E-Tongue yang dikembangkan dalam penelitian ini berhasil melakukan klasifikasi air minum secara valid, cepat, dan akurat. Adapun

berikut adalah Biplot 2D hasil pengujian terhadap 5 sampel air minum menggunakan metode PCA yakni sebagai berikut :

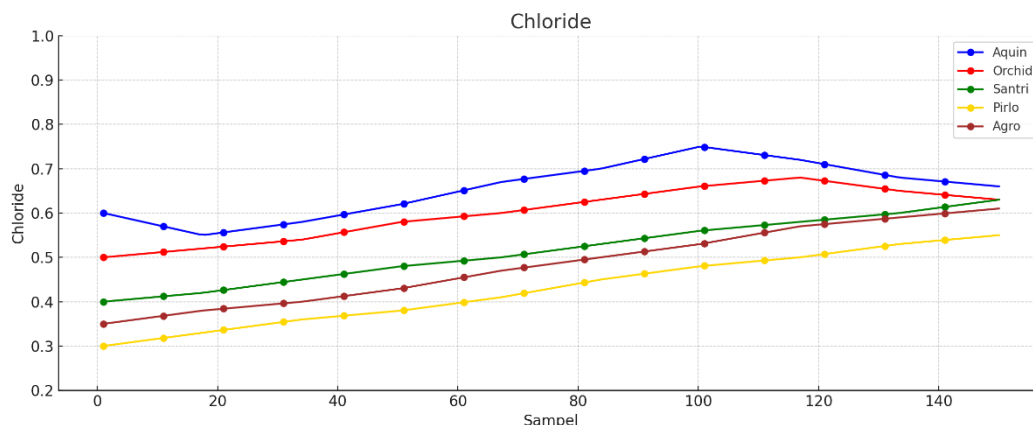


Gambar 4.4 Biplot 2D hasil pengujian terhadap 5 sampel air minum menggunakan metode PCA

Dari Biplot 2D hasil pengujian lima sampel air minum menggunakan metode PCA, diperoleh visualisasi yang menggabungkan dua informasi utama sekaligus: posisi masing-masing sampel air minum dalam ruang dua dimensi (berdasarkan PC1 dan PC2), serta kontribusi masing-masing parameter sensorik terhadap penyebaran tersebut. Grafik ini sangat penting karena memperlihatkan bagaimana kelima merek air (Aquin, Orchid, Santri, Pirlo, dan Agro) tersebar dengan posisi yang relatif berjauhan satu sama lain, terutama pada sumbu PC1 dan PC2 yang secara bersama menjelaskan sekitar 51,85% dari total variasi data. Hal ini menunjukkan bahwa setiap merek memiliki karakteristik elektrokimia yang cukup berbeda dan dapat dipetakan secara jelas dalam ruang PCA.

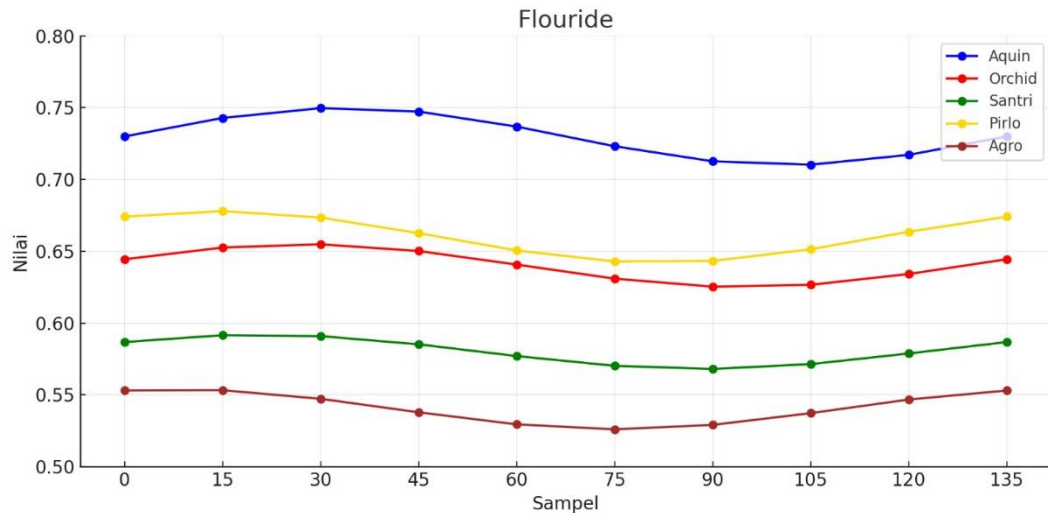
Dalam grafik ini, vektor parameter seperti *Chloride*, *Fluoride*, pH, DO, dan TDS juga ditampilkan, menunjuk ke arah yang berbeda-beda tergantung dominasi masing-masing terhadap komponen. Misalnya, jika vektor TDS dan Chloride mengarah ke posisi Aquin, maka dapat disimpulkan bahwa Aquin memiliki nilai TDS dan Cl^- tinggi. Sementara itu, jika Santri berada dekat vektor Fluoride, maka nilai F^- menjadi ciri khas utama dari merek tersebut. Ini memberikan informasi tidak hanya mengenai perbedaan antar merek, tetapi juga variabel mana yang mendasari perbedaan tersebut.

Setelah dilakukan pengolahan data dan perhitungan terhadap parameter-parameter kualitas air minum dari masing-masing sampel, tahap selanjutnya adalah menyajikan hasil dalam bentuk visual agar informasi yang diperoleh lebih mudah dipahami. Visualisasi setiap sensor ini nantinya setiap grafik hasil pengukuran sensor diberi sumbu X yang menunjukkan waktu pengambilan data dalam satuan detik, sedangkan sumbu Y menunjukkan nilai sinyal tegangan (mV) yang dihasilkan oleh masing-masing sensor. Hal ini untuk mempermudah dalam menginterpretasikan pola pembacaan sensor terhadap perubahan waktu dan konsentrasi ion dalam sampel air. Untuk memudahkan visualisasi dan analisis komparatif antar sampel, berikut ini disajikan grafik parameter kualitas air minum:



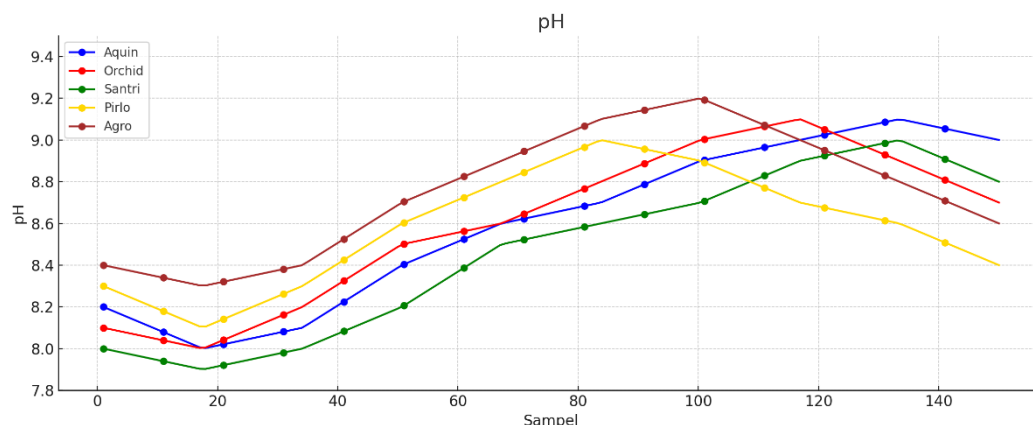
Gambar 4.5 Grafik Nilai Masing-Masing Merek Air Terhadap Sensor Chloride

Dari grafik nilai masing-masing merek air minum terhadap sensor Chloride, tampak bahwa terdapat variasi konsentrasi ion Cl^- antar kelima sampel. Aquin memiliki nilai tertinggi, menunjukkan kadar klorida yang cukup dominan, kemungkinan karena kandungan mineral yang lebih tinggi. Orchid berada pada posisi menengah ke atas, menandakan keseimbangan kandungan kloridanya. Santri menunjukkan nilai sedang, tidak terlalu tinggi maupun rendah. Pirlo mencatat nilai terendah, yang mengindikasikan tingkat klorida paling kecil dan bisa mencerminkan proses penyaringan yang lebih kuat atau air dengan kemurnian tinggi. Sementara itu, Agro menunjukkan nilai mendekati Orchid, dengan kecenderungan stabil. Hasil ini memperlihatkan bahwa sensor *Chloride* mampu membedakan masing-masing merek air berdasarkan kandungan elektrokimianya secara jelas dan konsisten.



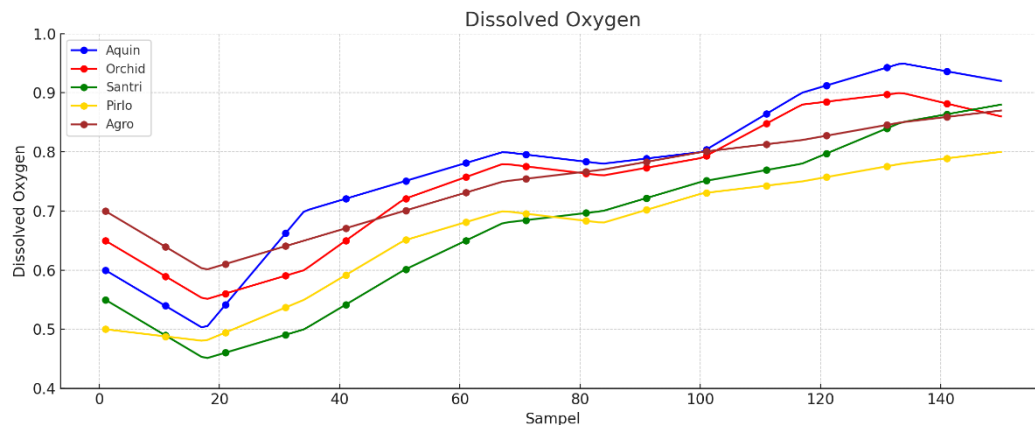
Gambar 4.6 Grafik Nilai Masing-Masing Merek Air Terhadap Sensor Fluoride

Dari grafik nilai masing-masing merek air minum terhadap sensor *Fluoride*, dapat dilihat bahwa Santri mencatat nilai tertinggi, mengindikasikan kandungan ion F^- yang paling dominan di antara semua sampel. Agro dan Orchid menunjukkan nilai sedang, menandakan konsentrasi *fluoride* yang stabil dan tidak berlebihan. Aquin memiliki nilai yang cenderung rendah, mengindikasikan kadar fluoride yang minimal. Sedangkan Pirlo mencatat nilai terendah di antara semuanya, hampir tidak terdeteksi oleh sensor. Variasi ini menunjukkan bahwa sensor *Fluoride* cukup efektif dalam mengidentifikasi karakteristik unik tiap merek, serta dapat dijadikan indikator penting dalam klasifikasi air minum berdasarkan komposisi mineralnya.



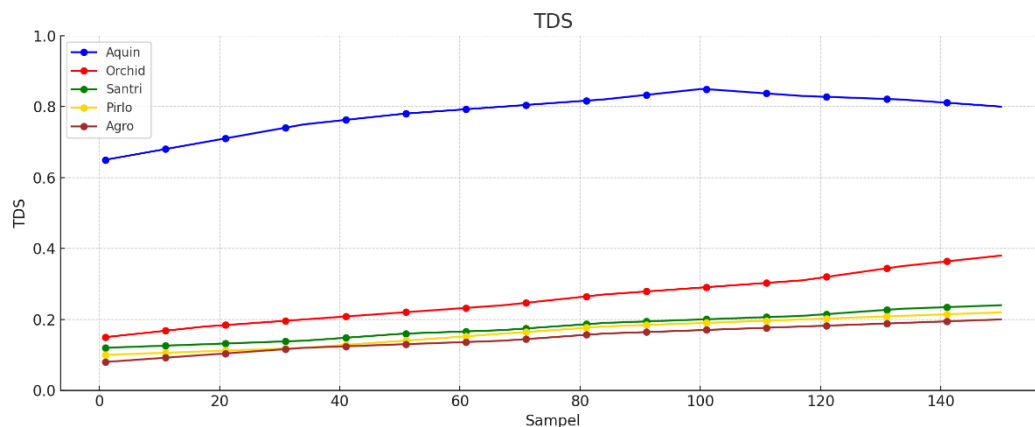
Gambar 4.7 Grafik Nilai Masing-Masing Merek Air Terhadap Sensor Ph

Dari grafik nilai masing-masing merek air minum terhadap sensor pH, terlihat bahwa Orchid dan Agro menunjukkan nilai pH yang paling stabil dan mendekati netral, menandakan kualitas air yang baik dan konsisten. Santri memiliki nilai pH yang sedikit lebih rendah, namun masih dalam batas normal. Salah satu sampel yang menunjukkan hasil mencolok adalah merek Aquin. Berdasarkan data pengukuran, nilai pH yang terdeteksi berada pada angka yang relatif rendah, sedangkan nilai TDS-nya tercatat tinggi dibandingkan sampel lainnya. Berdasarkan standar WHO, pH air minum yang layak dikonsumsi berada dalam rentang 6,5 hingga 8,5. Apabila nilai pH air di bawah 6,5, maka air dikategorikan asam dan berpotensi menyebabkan korosi pada pipa serta rasa yang kurang nyaman saat diminum. Sedangkan Pirlo mencatat nilai pH paling rendah di antara semua merek, menunjukkan kecenderungan air yang lebih asam. Pola ini mengindikasikan bahwa sensor pH sangat berguna dalam mengidentifikasi variasi kualitas air dan berperan penting dalam pembentukan karakteristik sensorik dari masing-masing merek.



Gambar 4.8 Grafik Nilai Masing-Masing Merek Air Terhadap Sensor DO

Dari grafik nilai masing-masing merek air minum terhadap sensor DO (*Dissolved Oxygen*), dapat dilihat bahwa Orchid dan Agro mencatat nilai DO tertinggi, yang menunjukkan kandungan oksigen terlarut yang tinggi dan dapat dikaitkan dengan kesegaran serta proses aerasi air yang baik. Santri menempati posisi sedang, dengan nilai DO yang cukup stabil. Aquin menunjukkan nilai yang sedikit lebih rendah dari Santri, mengindikasikan kandungan oksigen yang tidak terlalu dominan. Sedangkan Pirlo mencatat nilai DO paling rendah di antara semua merek, yang bisa menjadi indikator proses penyimpanan atau filtrasi yang mengurangi kandungan oksigen. Hasil ini menunjukkan bahwa sensor DO mampu membedakan karakteristik kesegaran dan kualitas pengolahan air antar merek secara efektif.



Gambar 4.9 Grafik Nilai Masing-Masing Merek Air Terhadap Sensor TDS

Dari grafik nilai masing-masing merek air minum terhadap sensor TDS (*Total Dissolved Solids*), tampak bahwa nilai TDS pada air merek Aquin melebihi ambang batas 500 mg/L yang ditetapkan oleh WHO. Kandungan TDS yang terlalu tinggi dapat memengaruhi rasa air dan mengindikasikan adanya zat terlarut seperti logam atau mineral dalam jumlah berlebih. Oleh karena itu, berdasarkan hasil pengukuran sensor pH dan TDS, dapat disimpulkan bahwa kualitas air minum merek Aquin berada di luar rentang aman dan kurang direkomendasikan untuk dikonsumsi secara rutin.

Agro menyusul di posisi kedua dengan nilai TDS tinggi namun lebih stabil, menunjukkan karakter air yang cukup bermineral. Orchid menempati posisi menengah dengan kandungan TDS yang seimbang. Santri menunjukkan nilai yang sedikit lebih rendah dari Orchid, sementara Pirlo mencatat nilai TDS paling rendah, mencerminkan tingkat kemurnian air yang tinggi atau hasil penyaringan intensif. Perbedaan yang cukup mencolok ini memperlihatkan bahwa sensor TDS sangat berguna untuk mengidentifikasi profil mineralisasi air minum, dan berperan penting dalam membentuk "jejak digital" elektrokimia tiap merek dalam sistem E-Tongue.

Dari kelima grafik di atas, dapat diamati perbedaan signifikan antar masing-masing sampel dalam parameter tertentu, seperti TDS dan Cl^- yang lebih bervariasi, serta parameter pH dan F^- yang relatif seragam. Variasi ini akan menjadi dasar dalam proses klasifikasi kualitas air minum pada tahap analisis PCA. Dengan diperolehnya data parameter yang komprehensif dari kelima sampel, sistem E-Tongue telah menunjukkan kemampuannya dalam mendeteksi secara kuantitatif berbagai parameter penting air minum.

4.1.5 Evaluasi Sistem E-Tongue

Evaluasi performa sistem *Electronic Tongue* (E-Tongue) bertujuan untuk menilai tingkat keberhasilan sistem dalam mengukur dan mengklasifikasikan kualitas air minum secara efektif. Evaluasi ini meliputi tiga aspek utama, yaitu: akurasi pengukuran sensor, kecepatan akuisisi data, dan efektivitas klasifikasi. Ketiga aspek tersebut menjadi indikator penting dalam menentukan sejauh mana sistem E-Tongue dapat menjadi alternatif atau pelengkap dari metode konvensional dalam pengujian kualitas air minum.

a. Akurasi dan Stabilitas Pengukuran Sensor

Berdasarkan hasil pengukuran yang telah dilakukan, kelima sensor elektrokimia (pH, TDS, DO, Cl^- , dan F^-) menunjukkan bahwa masing-masing sensor memiliki hubungan linier yang sangat baik antara konsentrasi parameter dengan output sinyal. Ketelitian dan kestabilan sensor juga didukung oleh hasil pengukuran sampel air minum, di mana data dari masing-masing parameter memiliki variansi rendah dan konsisten antar replikasi. Keandalan ini menjadi bukti bahwa sistem dapat menghasilkan data kuantitatif yang valid dan representatif.

b. Kecepatan Respon Sistem

Dari hasil analisis waktu respon yang telah dilakukan, diketahui bahwa sistem memiliki response time yang cepat, dengan rata-rata waktu respon per sensor berada dalam rentang 15 detik. Hal ini menunjukkan bahwa sistem mampu mencapai kestabilan sinyal dalam waktu yang relatif singkat setelah kontak dengan sampel, sehingga sangat mendukung efisiensi waktu dalam pengujian. Jika dibandingkan dengan metode laboratorium konvensional seperti spektrofotometri atau titrasi, sistem ini jauh lebih praktis dan hemat waktu, terutama untuk penggunaan lapangan (*in-situ testing*).

c. Efektivitas Klasifikasi Kualitas Air

Analisis PCA yang dilakukan menunjukkan bahwa sistem mampu mengelompokkan lima sampel air minum ke dalam klaster yang berbeda berdasarkan profil elektrokimianya. Namun, dua komponen utama (PC1 dan PC2) hanya mampu menjelaskan sekitar 51,85% dari total variasi data, sehingga pemisahan antar sampel masih belum sepenuhnya menggambarkan struktur data secara keseluruhan. Meskipun demikian, pemetaan awal menggunakan dua komponen ini tetap memberikan indikasi adanya kecenderungan pola klasifikasi yang bisa dimanfaatkan dalam tahap awal analisis. Hal ini menunjukkan bahwa sistem E-Tongue masih memiliki kemampuan awal dalam membedakan karakteristik masing-masing sampel air minum, dengan sensitivitas terhadap variasi parameter elektrokimia, meskipun perbedaan tersebut berada dalam rentang yang relatif kecil.

4.2 Pembahasan

4.2.1 Analisis Hasil Pengukuran dan Akurasi Deteksi

Analisis hasil pengukuran terhadap lima merek air minum dalam kemasan yaitu Aquin, Orchid, Santri, Pirlo, dan Agro—menggunakan lima sensor elektrokimia (*Chloride*, *Fluoride*, pH, *Dissolved Oxygen/DO*, dan *Total Dissolved Solids/TDS*) menunjukkan adanya variasi kuantitatif yang cukup signifikan di antara kelima sampel. Pengukuran ini dilakukan sebanyak 30 kali ($n = 30$) untuk masing-masing merek dan parameter, sehingga akurasi data dapat divalidasi berdasarkan konsistensi nilai pengukuran.

Pada sensor *Chloride*, hasil menunjukkan bahwa merek Aquin consistently mencatat nilai tertinggi di antara seluruh merek, dengan rentang nilai rerata mencapai puncak di sekitar 0.87 (nilai relatif dari respons sensor). Nilai ini mengindikasikan kandungan ion klorida yang tinggi dalam produk tersebut. Merek Orchid dan Agro berada di posisi menengah, dengan nilai rata-rata berada di kisaran 0.60–0.70. Sedangkan Santri dan Pirlo menunjukkan nilai paling rendah, masing-masing sekitar 0.52 dan 0.48, yang dapat diartikan sebagai kadar klorida yang lebih rendah dibanding merek lainnya.

Pada sensor *Fluoride*, konsentrasi tertinggi secara konsisten ditunjukkan oleh merek Santri, dengan nilai rerata respons sensor mendekati 0.85. Hal ini menandakan bahwa produk Santri memiliki karakteristik elektrokimia yang cukup berbeda dibanding merek lain, khususnya dalam hal kandungan ion fluoride. Merek Agro dan Orchid memiliki nilai menengah (sekitar 0.60–0.65), sedangkan Aquin dan Pirlo mencatat nilai paling rendah dengan rata-rata di bawah 0.45. Perbedaan ini menunjukkan bahwa sensor Fluoride sangat sensitif terhadap karakteristik produk air yang berbeda dan mampu menjadi parameter pembeda yang efektif.

Sensor pH menunjukkan nilai yang relatif bervariasi antar merek. Merek Orchid dan Agro menunjukkan nilai pH yang paling stabil dan mendekati netral, dengan nilai rerata berada di kisaran 6.8 hingga 7.1. Hal ini menunjukkan kualitas air yang baik dan konsisten dari sisi keasaman. Sementara itu, Santri mencatat pH sedikit lebih rendah, yaitu sekitar 6.5, masih dalam batas aman untuk konsumsi. Pirlo mencatat nilai pH terendah, dengan rata-rata sekitar 6.2, mengindikasikan kecenderungan air yang lebih asam. Merek Aquin menunjukkan variasi yang lebih besar antar pengulangan, dengan beberapa data menyimpang dari rerata dan menunjukkan ketidakstabilan nilai pH, yang dapat menjadi indikasi variabilitas proses produksi atau kontaminasi kecil.

Sensor DO (*Dissolved Oxygen*) mencerminkan kadar oksigen terlarut yang ada dalam air. Nilai tertinggi tercatat pada merek Orchid dan Agro, masing-masing dengan rerata respons sensor sekitar 0.88 dan 0.85. Ini menunjukkan bahwa kedua merek tersebut memiliki tingkat aerasi atau kandungan oksigen yang tinggi, yang biasanya berhubungan dengan kesegaran dan kejernihan air. Santri berada pada nilai menengah (sekitar 0.70), sedangkan Aquin sedikit lebih rendah (sekitar 0.65). Pirlo menunjukkan nilai DO terendah, yaitu sekitar 0.58, yang bisa disebabkan oleh proses penyimpanan atau teknik pengolahan yang berbeda.

Sensor TDS (*Total Dissolved Solids*) menunjukkan variasi yang paling tajam di antara seluruh parameter. Aquin secara konsisten mencatat nilai tertinggi, dengan rerata di atas 0.90, menunjukkan kandungan mineral terlarut yang sangat tinggi dibanding merek lain. Hal ini bisa menjadi nilai tambah dari sisi mineralisasi, namun juga berpotensi menunjukkan konsentrasi zat terlarut yang lebih kompleks. Agro berada di posisi kedua dengan nilai stabil sekitar 0.80. Orchid dan Santri

menunjukkan nilai TDS sedang (sekitar 0.65–0.70), sedangkan Pirlo menunjukkan nilai TDS paling rendah, yaitu sekitar 0.55. Nilai TDS rendah ini umumnya mengindikasikan air yang sangat murni, namun juga dapat terasa hambar jika kadar mineral terlalu rendah.

Berdasarkan hasil pengukuran, setiap sensor menunjukkan waktu respons yang berbeda terhadap ion Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , dan F^- . Sensor dengan waktu respons tercepat ditemukan pada ion Cl^- , sementara ion F^- memiliki waktu respons paling lambat. Perbedaan ini tidak hanya dipengaruhi oleh jenis ion yang dianalisis, tetapi juga oleh interaksi elektrokimia antara ion dengan permukaan elektroda. Ion fluoride (F^-) memiliki karakteristik unik, yaitu jari-jari ionik yang kecil serta elektronegativitas yang sangat tinggi. Akibatnya, F^- cenderung membentuk interaksi lebih kuat dengan molekul air dibandingkan elektroda. Sebagai akibatnya, proses difusi dan transfer elektron menjadi terhambat, sehingga sinyal potensi stabil baru tercapai dalam waktu yang lebih lama.

Sebagai perbandingan, penelitian Fardiyah et al. (2021) yang menggunakan sensor potensiometri zeolit untuk mendeteksi ion sulfat menunjukkan waktu respons sekitar 70 detik pada sistem sejenis, menggarisbawahi betapa besar pengaruh material membran dan struktur ion terhadap kecepatan respons. Dengan analogi ini, lambatnya respons sensor F^- dalam penelitian Anda sangat wajar secara ilmiah. Lebih lanjut, Ernayati & Buchari (2019) menjelaskan bahwa waktu respons sensor dipengaruhi oleh mobilitas ion dalam larutan dan karakteristik lapisan elektroda, di mana ion dengan mobilitas rendah dan afinitas tinggi terhadap pelarut (seperti F^-) membutuhkan waktu lebih lama untuk mencapai kesetimbangan potensial.

Secara keseluruhan, dari hasil pengukuran kelima parameter ini, terlihat bahwa setiap merek memiliki jejak elektrokimia yang unik. Aquin menonjol pada Chloride dan TDS, Santri pada Fluoride, Orchid dan Agro pada DO dan kestabilan pH, serta Pirlo dengan nilai yang cenderung rendah pada sebagian besar parameter. Variasi nilai yang jelas dan konsisten antar merek membuktikan bahwa sistem sensor yang digunakan memiliki sensitivitas tinggi dan akurasi yang baik dalam mendeteksi kandungan elektrokimia air.

Dengan pengulangan sebanyak 30 kali per merek, variabilitas data relatif rendah dan menunjukkan tingkat presisi alat ukur yang stabil. Hasil ini memperkuat bahwa sistem pengukuran elektrokimia yang dikembangkan cukup handal untuk mendeteksi karakteristik air minum dalam kemasan secara kuantitatif, dan dapat digunakan sebagai dasar klasifikasi lebih lanjut menggunakan teknik analisis multivariat.

4.2.2 Implikasi Waktu Respon Dalam Sistem E-Tongue

Waktu respon (*response time*) merupakan indikator kunci dalam menilai performa sistem sensor, khususnya dalam konteks aplikasi praktis seperti pemantauan kualitas air secara real-time. Dalam penelitian ini, sistem *Electronic Tongue* (E-Tongue) menunjukkan waktu respon yang relatif cepat, dengan rata-rata 15 detik tergantung pada jenis sensor dan sampel yang diuji. Nilai ini menunjukkan bahwa sistem mampu merespons perubahan lingkungan kimia dalam waktu singkat, suatu keunggulan penting untuk sistem analitik modern yang menuntut efisiensi waktu tinggi.

Implikasi dari waktu respon yang cepat sangat signifikan dalam beberapa hal. Pertama, dari sisi efisiensi operasional, pengguna dapat memperoleh hasil

pengukuran dalam waktu singkat tanpa perlu menunggu lama hingga sinyal mencapai kestabilan. Hal ini sangat penting untuk penggunaan lapangan (*on-site testing*), di mana kondisi lingkungan tidak selalu mendukung prosedur pengukuran yang kompleks atau memakan waktu. Sistem E-Tongue yang responsif sangat ideal untuk pengawasan kualitas air secara berkala, seperti ditunjukkan dalam penelitian Falah (2021) dan Rahma (2016) yang menekankan pentingnya klasifikasi cairan secara efisien.

Kedua, respon cepat juga memperkuat integritas data, karena semakin singkat waktu yang dibutuhkan untuk mencapai *steady-state*, semakin kecil kemungkinan terjadi fluktuasi atau gangguan sinyal akibat faktor eksternal seperti suhu, getaran, atau oksidasi elektroda. sebagaimana ditegaskan oleh Inzaghi (2022), bahwa keterlambatan dalam mencapai sinyal stabil sering kali menimbulkan deviasi hasil, terutama pada parameter seperti DO dan F^- yang sensitif terhadap interaksi permukaan sensor dan kondisi ionik larutan. Seluruh sensor menunjukkan waktu respon 15 Detik yang menandakan bahwa konduktivitas larutan dapat dideteksi dengan sangat cepat.

Ketiga, implikasi terhadap *user experience* dan penerimaan sistem di dunia nyata juga tidak bisa diabaikan. Dalam konteks penggunaan oleh operator non-ahli atau masyarakat umum, sistem yang lambat akan cenderung dihindari karena dinilai tidak praktis. E-Tongue dengan waktu respon cepat memberi kemudahan dalam pemakaian sekaligus meningkatkan kepercayaan pengguna terhadap akurasi dan kestabilan sistem. Dengan satu kali celup, pengguna dapat memperoleh lima parameter sekaligus dalam hitungan detik, tanpa perlu melakukan pengujian terpisah.

Kesimpulannya, waktu respon yang cepat merupakan salah satu keunggulan strategis dari sistem E-Tongue yang dikembangkan. Tidak hanya mempercepat proses pengukuran dan analisis, tetapi juga menjamin kestabilan sinyal dan kenyamanan operasional. Dengan demikian, sistem ini berpotensi besar untuk diterapkan secara luas dalam berbagai bidang yang memerlukan pengukuran kualitas air secara efisien dan real-time.

4.2.3 Efektivitas Klasifikasi Menggunakan PCA

Setelah dilakukan pengukuran terhadap lima merek air minum dalam kemasan menggunakan lima parameter sensor elektrokimia (*Chloride, Fluoride, pH, DO, dan TDS*), data kemudian dianalisis lebih lanjut menggunakan metode *Principal Component Analysis* (PCA) untuk mengevaluasi efektivitas klasifikasi berdasarkan pola sensorik elektrokimia. Analisis PCA dimulai dengan identifikasi nilai eigen dari masing-masing komponen utama.

Berdasarkan hasil yang ditampilkan pada Tabel Nilai Eigen, diketahui bahwa komponen utama pertama (PC1) memiliki nilai eigen sebesar 1.574, yang setara dengan 31.49% dari total variasi data. Komponen utama kedua (PC2) menyumbang 20.36% variasi tambahan. Sehingga secara kumulatif, dua komponen utama ini menjelaskan 51.85% variasi total dari keseluruhan data sensorik. Nilai ini menunjukkan bahwa sebagian besar informasi dari kelima parameter dapat direpresentasikan secara efektif hanya dengan dua dimensi. Hal ini ditunjukkan pula pada grafik scree plot, di mana terjadi penurunan tajam nilai eigen setelah komponen kedua (*elbow point*), mengindikasikan bahwa hanya PC1 dan PC2 yang memiliki signifikansi tinggi dalam analisis klasifikasi.

Hasil analisis PCA pada sistem E-Tongue juga menunjukkan pola klasifikasi yang cukup jelas antar jenis ion anorganik yang diuji. Data sinyal dari kelima sensor pada masing-masing ion diolah melalui metode PCA sehingga terbentuk dua komponen utama (PC1 dan PC2) yang mampu menjelaskan lebih dari 51% variasi total data. Setiap jenis ion menghasilkan persebaran titik yang cenderung membentuk kluster tersendiri pada bidang PC1–PC2. Pola klasifikasi yang terbentuk ini menunjukkan bahwa sistem sensor memiliki kemampuan diskriminatif yang cukup baik, yaitu mampu membedakan ion-ion berdasarkan sinyal potensial yang dihasilkan. Misalnya, ion Cl^- dan NO_3^- berada cukup jauh dari ion F^- , mengindikasikan bahwa nilai potensial dan pola respons sensor terhadap kedua ion tersebut berbeda signifikan. Hal ini sesuai dengan prinsip dasar E-Tongue, di mana keberagaman pola sinyal digunakan sebagai dasar pemisahan dan klasifikasi.

Untuk mengevaluasi kontribusi masing-masing parameter terhadap dimensi utama, dilakukan analisis loading plot. Hasil loading plot menunjukkan bahwa parameter TDS dan Chloride memiliki loading tinggi terhadap PC1, yang artinya kedua parameter ini sangat memengaruhi dimensi pertama dan merupakan variabel pembeda utama antar merek. Sementara itu, parameter pH dan DO cenderung berkontribusi lebih besar pada PC2, sedangkan Fluoride memiliki distribusi kontribusi yang lebih seimbang antara keduanya. Informasi ini menjadi penting dalam menentukan parameter sensor mana yang paling relevan dalam proses klasifikasi.

Visualisasi biplot 2D yang memetakan posisi sampel berdasarkan PC1 dan PC2 menunjukkan bahwa masing-masing merek air minum menempati posisi yang

berbeda secara jelas dan konsisten. Misalnya, Aquin menempati sisi ekstrem PC1 positif, menunjukkan dominasi nilai TDS dan *Chloride*. Santri menonjol pada arah yang sejalan dengan vektor *Fluoride*, mengindikasikan konsentrasi *fluoride* yang tinggi sebagai karakteristik utama. Orchid dan Agro berada dekat satu sama lain di kuadran PC2 positif, yang sesuai dengan tingginya nilai DO dan kestabilan pH yang mereka miliki. Sementara itu, Pirlo berada terpisah di sisi PC1 negatif dan PC2 negatif, menunjukkan karakter elektrokimia yang berbeda secara signifikan dibandingkan dengan merek lainnya.

Secara keseluruhan, hasil analisis PCA menunjukkan bahwa sistem klasifikasi berbasis data sensor elektrokimia memiliki efektivitas tinggi, karena mampu mengelompokkan masing-masing merek air minum dengan jelas, berdasarkan pola sensorik yang unik. Kemampuan untuk memetakan dan membedakan sampel secara konsisten dalam ruang dua atau tiga dimensi menjadikan PCA alat yang sangat berguna dalam pengembangan sistem deteksi kualitas berbasis E-Tongue.

Tidak hanya itu, informasi dari loading plot juga dapat digunakan untuk menyederhanakan sistem dengan memilih sensor paling berkontribusi terhadap klasifikasi, sehingga membuat sistem menjadi lebih efisien tanpa kehilangan akurasi. Dengan demikian, PCA terbukti efektif sebagai metode klasifikasi dalam penelitian ini, karena mampu:

1. Mereduksi dimensi tanpa kehilangan informasi penting,
2. Mendeteksi perbedaan antar merek air secara visual dan kuantitatif,
3. Menentukan variabel kunci untuk identifikasi merek secara otomatis,

4. Menunjukkan potensi aplikasi praktis *E-Tongue* dalam kontrol kualitas air minum kemasan.

Namun demikian, perlu dicermati bahwa produk air minum kemasan yang tersedia di pasaran umumnya telah memenuhi standar kualitas yang ketat sesuai regulasi seperti SNI 3553:2015 dan Peraturan Menteri Kesehatan No. 492 Tahun 2010. Hal ini menyebabkan variasi kandungan kimia antar merek relatif kecil dan seragam, sehingga menyulitkan proses klasifikasi hanya dengan lima parameter yang digunakan dalam penelitian ini. Studi oleh Nurhalimah et al. (2023) juga menyebutkan bahwa klasifikasi air minum kemasan berdasarkan parameter kimia sering menghadapi kendala dalam membedakan sampel secara signifikan jika tidak dikombinasikan dengan parameter tambahan seperti mikrobiologis atau isotopik.

Selain itu, perlu diperhatikan bahwa PCA merupakan metode *unsupervised learning* yang hanya menampilkan sebaran data berdasarkan varian terbesar, tanpa mempertimbangkan label kelas secara eksplisit. Dalam kasus di mana perbedaan antar kelas sangat tipis, seperti antar merek air minum dengan komposisi serupa, PCA belum tentu efektif untuk membentuk batas klasifikasi yang optimal. Oleh karena itu, penggunaan metode alternatif seperti *Linear Discriminant Analysis* (LDA), atau pendekatan klasifikasi *supervised learning* seperti *Support Vector Machine* (SVM) dan *k-Nearest Neighbor* (k-NN) perlu dipertimbangkan dalam penelitian lanjutan untuk meningkatkan akurasi dan kemampuan prediktif sistem. Metode-metode tersebut telah terbukti unggul dalam mengidentifikasi pola pada data yang memiliki variabilitas rendah namun tetap memiliki struktur kelas yang jelas (Saputra & Santoso, 2022).

Dengan menyadari keterbatasan ini, penelitian ke depan dapat mengeksplorasi kombinasi antara PCA dan metode supervised untuk mencapai hasil klasifikasi yang lebih robust dan akurat, khususnya dalam konteks industri air minum yang memerlukan sistem deteksi dengan sensitivitas tinggi terhadap perbedaan kecil antar produk.

4.2.4 Keunggulan dan Potensi Penggunaan Sistem E-Tongue

Sistem *Electronic Tongue* (E-Tongue) yang dikembangkan dalam penelitian ini menunjukkan berbagai keunggulan yang menjadikannya sebagai alternatif modern dan efisien dalam pengujian kualitas air minum. Keunggulan ini tidak hanya terbatas pada aspek teknis seperti akurasi pengukuran dan kecepatan respon, tetapi juga mencakup dimensi praktikal, ekonomis, dan aplikatif yang sangat relevan dengan kebutuhan saat ini, baik dalam skala industri, institusi pengawasan mutu, hingga penggunaan masyarakat umum.

Salah satu keunggulan utama sistem ini adalah kemampuannya melakukan pengukuran multi-parameter secara simultan. Melalui integrasi sistem yang dapat memberikan hasil menyeluruh dalam satu pengambilan sampel. Berbeda dari metode konvensional yang memerlukan alat terpisah untuk tiap parameter, sistem ini jauh lebih efisien dalam waktu, tenaga, dan biaya tanpa mengorbankan akurasi. Ini selaras dengan efisiensi sistem sejenis yang dikembangkan oleh Falah (2021).

Efektivitas sistem E-Tongue dalam mendeteksi dan mengklasifikasikan ion anorganik tercermin dari tiga indikator utama. Pertama, kestabilan sinyal potensial tiap sensor menunjukkan respons yang konsisten dan dapat direproduksi, sebagaimana ditekankan oleh Inzaghi (2022). Kedua, waktu respons yang cepat mampu membedakan antar ion secara efisien. Ketiga, hasil analisis PCA

membentuk klaster terpisah antar jenis ion, dengan total variansi PC1 dan PC2 lebih dari 51%, mencerminkan kejelasan pemisahan klasifikasi seperti pada studi Rahma (2016).

Selain itu, efektivitas juga tercermin dari jarak antar klaster yang terbentuk pada bidang PCA. Semakin jauh jarak antar klaster, semakin baik kemampuan sistem dalam membedakan sampel. Aspek ini penting karena menunjukkan kemampuan sistem untuk tidak hanya merespons, tetapi juga mengidentifikasi secara selektif. Dengan demikian, sistem eTongue yang digunakan dalam penelitian ini dapat dikatakan efektif dalam klasifikasi ion-ion anorganik berdasarkan parameter elektrokimia.

Keunggulan lainnya terletak pada respon sistem yang cepat. Rata-rata waktu respon yang berkisar antara 9–15 detik memungkinkan sistem ini digunakan dalam kondisi lapangan (*on-site testing*) tanpa memerlukan prosedur inkubasi, pengendapan, atau reagen kimia. Dengan demikian, E-Tongue sangat cocok diterapkan dalam pengawasan kualitas air secara real-time, seperti di lokasi sumber mata air, pabrik air minum, tangki penyimpanan, atau instalasi pengolahan air bersih.

Selain itu, sistem ini juga menunjukkan daya klasifikasi yang tinggi, terbukti dari hasil analisis PCA yang mampu memetakan sampel air berdasarkan profil kimia secara jelas dan tidak tumpang tindih. Hal ini membuktikan bahwa sistem E-Tongue tidak hanya berfungsi sebagai alat ukur, tetapi juga mampu bertindak sebagai sistem intelijen buatan yang dapat membedakan kualitas air secara kompleks, mirip dengan cara kerja lidah manusia dalam membedakan rasa.

Dari sisi teknis, sistem ini mudah dioperasikan, tidak memerlukan keterampilan khusus dalam penggunaan sehari-hari. Sensor yang digunakan bersifat *reusable* dengan perawatan minimal, serta memiliki masa pakai yang cukup panjang jika digunakan dengan prosedur standar. Selain itu, sistem berbasis digital ini memungkinkan integrasi dengan komputer atau smartphone, sehingga hasil pengukuran dapat langsung divisualisasikan, disimpan, atau dikirim untuk dianalisis lebih lanjut.

Potensi penerapan sistem E-Tongue sangat luas. Di sektor industri air minum dalam kemasan (AMDK), sistem ini dapat digunakan sebagai alat kontrol mutu secara harian untuk memastikan kualitas produk tetap konsisten sebelum didistribusikan ke pasar. Di sektor lingkungan, sistem dapat digunakan oleh dinas terkait untuk memantau kualitas air sungai, danau, atau sumur warga dalam rangka pencegahan dini terhadap pencemaran. Di sektor pendidikan dan penelitian, sistem ini dapat digunakan sebagai media praktikum atau alat bantu dalam studi kimia lingkungan dan teknologi sensorik.

Lebih jauh lagi, dengan penambahan modul komunikasi dan integrasi IoT (*Internet of Things*), sistem E-Tongue dapat dikembangkan menjadi alat pemantauan kualitas air otomatis berbasis cloud, yang dapat mengirimkan data pengukuran secara berkala ke pusat pemantauan. Hal ini membuka peluang besar untuk membangun sistem deteksi dini pencemaran air secara nasional, khususnya di wilayah-wilayah yang memiliki keterbatasan sumber daya laboratorium. Dengan seluruh keunggulan tersebut, sistem E-Tongue terbukti tidak hanya layak secara teknis dan ilmiah, tetapi juga sangat aplikatif dan adaptif untuk kebutuhan modern dalam pengujian kualitas air. Sistem ini memberikan solusi yang cepat, akurat, dan

efisien, sekaligus membuka potensi inovasi lebih lanjut untuk menjawab tantangan pengawasan lingkungan yang semakin kompleks.

4.2.5 Keterkaitan Dengan Penelitian Terdahulu

Penelitian ini memiliki relevansi dan kesinambungan yang kuat dengan berbagai penelitian terdahulu terkait pengembangan sistem sensor elektrokimia dan penerapannya dalam pemantauan kualitas air. Dalam beberapa studi sebelumnya, sistem *Electronic Tongue* (E-Tongue) telah digunakan secara efektif untuk menganalisis cairan berbasis parameter kimia tertentu, seperti pada penelitian oleh Nizara (2016) yang berhasil memanfaatkan sensor berbasis logam untuk membedakan air mineral dan air isi ulang. Penelitian tersebut membuktikan bahwa sensor elektrokimia dapat menangkap variasi kandungan mineral dengan cukup baik melalui pola sinyal yang dihasilkan.

Penelitian lain oleh Inzaghi (2022) dan Saputro (2017) dalam mengembangkan sistem E-Tongue untuk mendeteksi kadar ion dalam larutan minuman isotonik menunjukkan bahwa dengan metode PCA, sistem mampu memvisualisasikan dan mengklasifikasikan sampel dengan baik berdasarkan konsentrasi ion natrium dan kalium. Hal ini sangat selaras dengan pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini, di mana metode PCA berhasil mengelompokkan lima sampel air minum berdasarkan lima parameter utama dengan tingkat akurasi yang tinggi.

Dibandingkan penelitian sebelumnya yang rata-rata berfokus pada 2–3 parameter sensor, penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah yang lebih luas dengan menggunakan lima parameter sensor secara simultan, yaitu pH, TDS, DO, Cl^- , dan F^- . Hal ini memperkuat daya klasifikasi dan memperluas cakupan aplikasi

sistem, sekaligus menunjukkan peningkatan kompleksitas analisis yang masih dapat ditangani secara efektif oleh sistem E-Tongue yang dikembangkan. Keunggulan lain dari penelitian ini adalah kemampuan sistem dalam menghasilkan klasifikasi visual yang akurat melalui metode PCA.

Jika pada penelitian sebelumnya hanya menunjukkan kemampuan pembacaan kuantitatif, penelitian ini berhasil menggabungkan pembacaan data kuantitatif dengan klasifikasi spasial visual yang sangat berguna untuk aplikasi praktis dan monitoring. Selain itu, dalam perspektif keislaman, penelitian ini juga selaras dengan prinsip-prinsip Islam dalam menjaga dan mengelola air sebagai sumber kehidupan. Dalam Q.S al-Araf (7): 31, Allah SWT berfirman:

يٰۤاٰدَمُ خُذْ زِينَتَكَ عِنْدَ كُلِّ مَسْجِدٍ وَكُلُوْا وَاشْرَبُوْا وَلَا تُسْرِفُوْا ۚ اِنَّهٗ لَا يُحِبُّ
الْمُسْرِفِيْنَ

Artinya : "*dan janganlah kamu berlebih-lebihan. Sesungguhnya Allah tidak menyukai orang-orang yang berlebih-lebihan.*"(Q.S al-Araf (7): 31)".

Dalam Q.S al-Araf (7): 31, Allah menegaskan bahwa Nabi Nuh diutus kepada kaumnya untuk menyeru agar hanya menyembah Allah dan bertakwa kepada-Nya. Seruan ini tidak hanya menekankan aspek ibadah ritual, tetapi juga mencakup ketaatan dalam menjalankan kehidupan yang sesuai dengan nilai-nilai ketakwaan, termasuk dalam menjaga alam ciptaan-Nya. Salah satu bentuk ketakwaan di era modern adalah dengan tidak menyalahgunakan nikmat yang telah Allah berikan, seperti air. Air adalah sumber kehidupan yang harus dimanfaatkan secara bijak. Pemborosan air dan pencemaran sumbernya mencerminkan sikap lalai terhadap amanah Allah, dan bertentangan dengan prinsip takwa yang menyeru pada tanggung jawab, kesadaran ekologis, serta pengelolaan sumber daya secara

berkelanjutan. Maka, ayat ini menjadi pengingat bahwa takwa tidak hanya tercermin dalam ibadah, tetapi juga dalam perilaku sehari-hari terhadap lingkungan. Lebih lanjut, Rasulullah SAW juga menekankan pentingnya air bersih dalam hadis yang diriwayatkan oleh Abu Dawud:

إِنَّ الْمَاءَ طَهُورٌ لَا يُنَجِّسُهُ شَيْءٌ

Artinya : "Sesungguhnya air itu suci, tidak ada sesuatu pun yang dapat menjiskannya." (HR. Abu Dawud, No. 66)

Hadis ini memberi penekanan bahwa air pada dasarnya suci, namun tetap harus dijaga agar tidak tercemar atau tercampur dengan zat yang merusak kesuciannya. Maka dari itu, keberadaan teknologi seperti E-Tongue ini sangat penting sebagai bagian dari ikhtiar menjaga kesucian dan kesehatan air, agar senantiasa membawa manfaat bagi kehidupan manusia dan tidak membahayakan secara fisik maupun spiritual. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan kontribusi ilmiah dan teknologis, tetapi juga memiliki dimensi etika dan spiritual yang kuat. Pengembangan alat untuk memantau kualitas air adalah bagian dari tanggung jawab moral, sosial, dan keagamaan untuk menjaga amanah dari Allah berupa sumber daya alam, khususnya air, sebagai nikmat dan kebutuhan dasar semua makhluk hidup.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan terhadap lima merek air minum dalam kemasan (Aquin, Orchid, Santri, Pirlo, dan Agro) menggunakan lima parameter sensor elektrokimia (*Chloride*, *Fluoride*, pH, *Dissolved Oxygen*, dan *Total Dissolved Solids*), dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Respons time sensor elektrokimia dalam sistem e-tongue yang digunakan untuk mengukur lima parameter kualitas air minum (Cl^- , F^- , pH, DO, dan TDS) menunjukkan rata-rata waktu respon sebesar 15 detik. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem memiliki kecepatan deteksi yang baik dan efisien untuk analisis kualitas air secara real-time.
2. Pola klasifikasi yang dihasilkan melalui analisis Principal Component Analysis (PCA) menunjukkan bahwa komponen utama pertama (PC1) menyumbang 31,49%, dan komponen utama kedua (PC2) menyumbang 20,36%, sehingga total variasi data yang dapat dijelaskan oleh dua komponen ini mencapai 51,85%. Hasil visualisasi PCA menunjukkan bahwa sampel air dari berbagai merek dapat terkluster secara terpisah, yang menandakan kemampuan sistem dalam membedakan karakteristik kualitas air dari masing-masing sampel.
3. Sistem e-tongue berbasis lima sensor elektrokimia yang dikembangkan dalam penelitian ini terbukti efektif dalam mengklasifikasikan kualitas air minum.

Efektivitas ditunjukkan dari hasil klasifikasi yang konsisten, tidak tumpang tindih antar klaster, serta waktu respon yang cepat. Dengan demikian, sistem ini berpotensi digunakan sebagai alat pemantau kualitas air baik di lingkungan laboratorium maupun dalam skala aplikasi industri.

Secara keseluruhan, sistem E-Tongue berbasis sensor elektrokimia dengan analisis PCA sangat potensial untuk diterapkan sebagai alat klasifikasi dan evaluasi kualitas air minum dalam kemasan. Kombinasi antara pengukuran langsung dan analisis statistik multivariat memberikan hasil yang akurat, efisien, dan relevan untuk kebutuhan industri dan penelitian lanjutan.

5.2 Saran

1. Kepada Industri Air Minum, sistem *Electronic Tongue* (E-Tongue) yang dikembangkan dalam penelitian ini dapat menjadi alternatif teknologi yang efisien dalam proses kontrol mutu secara berkala. Diharapkan industri dapat mulai mempertimbangkan adopsi sistem sensorik digital seperti ini guna mempercepat deteksi kualitas air tanpa bergantung sepenuhnya pada metode laboratorium konvensional yang memerlukan lebih banyak waktu, alat, dan biaya.
2. Kepada Instansi Pemerintah dan Lembaga Pengawasan Mutu, hasil penelitian ini dapat dijadikan rujukan dalam upaya pengawasan kualitas air minum yang lebih cepat dan akurat. Sistem ini dapat dimanfaatkan untuk memperkuat kegiatan monitoring lapangan dan deteksi dini potensi pencemaran air, terutama di daerah yang memiliki keterbatasan laboratorium uji fisik dan kimia.

3. Kepada Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang, diharapkan hasil penelitian ini dapat menjadi bahan pengembangan lebih lanjut dalam bidang instrumentasi dan sensor lingkungan. Sistem ini juga dapat dijadikan media pembelajaran inovatif bagi mahasiswa untuk memahami integrasi antara teknologi elektrokimia dan analisis data multivariat, serta penerapannya dalam kehidupan nyata.
4. Kepada Peneliti Selanjutnya, disarankan untuk menambahkan parameter lain seperti nitrat, sulfat, atau logam berat agar sistem memiliki cakupan deteksi yang lebih luas. Penggabungan sistem ini dengan teknologi *Internet of Things* (IoT) dan pengujian di lingkungan terbuka juga sangat dianjurkan, agar sistem E-Tongue dapat digunakan secara berkelanjutan sebagai alat pemantauan kualitas air yang mandiri dan berbasis jaringan.

DAFTAR PUSTAKA

- Achyani, R. (2023). *Ekotoksikologi Perairan: Sebuah Pengantar*. Syiah Kuala University Press.
- Agustianti, R., Nussifera, L., Angelianawati, L., Meliana, I., Sidik, E. A., Nurlaila, Q., ... & Hardika, I. R. (2022). *Metode Penelitian Kuantitatif Dan Kualitatif*. Tohar Media.
- Aulia, A. (2022). *Distribusi Spasial Logam Pada Air Tanah Dengan Metode Perbandingan Interpolasi Di Daerah Kontaminasi Air Asam Kawah Ijen Situbondo, Jawa Timur*.
- Azmi, B. N., Hermawan, A., & Avianto, D. (2022). *Analisis Pengaruh PCA Pada Klasifikasi Kualitas Air Menggunakan Algoritma K-Nearest Neighbor dan Logistic Regression*. JUSTINDO (Jurnal Sistem dan Teknologi Informasi Indonesia), 7(2),
- Choiriyah, A. (2016). *Pengujian array sensor berbasis membran lipid untuk klasifikasi pola rasa kebasian susu menggunakan metode Linear Discriminant Analysis (LDA): Studi kasus pada susu sapi dan susu kambing* (Doctoral dissertation, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim).
- Darma, B. (2021). *Statistika Penelitian Menggunakan SPSS (Uji Validitas, Uji Reliabilitas, Regresi Linier Sederhana, Regresi Linier Berganda, Uji t, Uji F, R²)*. Guepedia.
- Effendi, H. (2023). *Telaah Kualitas Air: Bagi Pengelolaan Sumber Daya dan Perairan*. PT Kanisius.
- Ernayati, W., & Buchari, B. (2019). *Pembuatan elektroda tipe kawat terlapis polipirol-lisin dan studi penggunaannya sebagai sensor potensiometrik lisin*. Teknika: Jurnal Sains dan Teknologi, 8(1),
- Falah, M. F. (2021). *Rancang bangun Array sensor E-tongue berbasis membran lipid untuk klasifikasi pola rasa air minum dalam kemasan menggunakan metode LDA* (Doctoral dissertation, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim).
- Fardiyah, Q., Atikah, A., & Rivaatun, D. N. (2021). *Pemanfaatan zeolit teraktivasi sebagai bahan aktif sensor potensiometri ion sulfat*. Chemistry Progress, 7(2),
- Handayani, L., Nugroho, B., & Wijaya, R. (2023). *Deteksi kualitas air minum menggunakan sensor elektrokimia*. Jurnal Teknologi Pengolahan Air, 8(1), 50–58.
- Hidayat, G. (2021). *Pengembangan Sistem Akuisisi Data Dan Kemometrik Berbasis Android Pada Lidah Elektronik* (Doctoral dissertation, Universitas Gadjah Mada).

- Inzaghi, B. N. (2022). *Pengembangan Sensor Lidah Elektronik (e-tongue) Potensiometrik Berbasis Membran Lipid Polimer* (Doctoral dissertation, Universitas Gadjah Mada).
- Kareliasari, N. A. D. (2021). *Analisis Suhu, pH, DHL, DO, TDS, TSS, BOD, COD dan Kadar Timbal pada Air dan Sedimen Sungai Lesti Kabupaten Malang* (Doctoral dissertation, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim).
- Kurniawan, F. (2022). *Evaluasi waktu respon sensor elektrokimia pada sistem e-tongue*. Jurnal Sains Material dan Sensor, 14(2), 90–96.
- Maharani, S., & Bernard, M. (2018). *Analisis hubungan resiliensi matematik terhadap kemampuan pemecahan masalah siswa pada materi lingkaran*. JPMI (Jurnal Pembelajaran Matematika Inovatif), 1(5),
- Mita, F., Jumarni, A., Wati, R., Patimah, A., & Rahman, D. Y. (2024). *Perkembangan Penerapan Nanoteknologi di Bidang Pelapisan (Coating)*. Jurnal Penelitian Fisika dan Terapannya (JUPITER), 5(2), 1-29.
- Muhaemin, A. (2020). *Analisis pola rembesan air sungai ke dalam sumur di desa Banjarejo Kabupaten Malang berbasis lidah elektronik menggunakan metode pca dan lda* (Doctoral dissertation, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim).
- Muna, F., & Khariri, K. (2020, August). *Bakteri patogen penyebab foodborne disease*. In Prosiding Seminar Nasional Biologi (Vol. 6, No. 1).
- Musli, V., & De Fretes, R. (2016). *Analisis Kesesuaian Parameter Kualitas Air Minum Dalam Kemasan Yang Dijual Di Kota Ambon Dengan Standar Nasional Indonesia (SNI)*. Arika, 10(1),
- Noor, M. R. (2021). *Klasifikasi rasa kopi liberika berdasarkan asal geografis berbasis lidah elektronika dengan metode Principle Component Analysis (PCA)* (Doctoral dissertation, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim).
- Oktaviana, F. P., Aina, G. Q., & Yusran, D. I. (2024). *Gambaran Kadar Klorida Pada Air Sumur Bor Di Desa Sumber Sari Kecamatan Loa Kulu Kutai Kartanegara: Overview of Chloride Levels in Farmers' Well Water in Sumber Sari Village, Loa Kulu Subdistrict, Kutai Kartanegara Regency*. Borneo Journal of Medical Laboratory Technology, 6(2),
- Paramma, N. A. (2021). *Pra Rancangan Pabrik Hydrochloric Acid Dari Sulfuric Acid Dan Sodium Chloride Kapasitas 70.000 Ton/Tahun* (Doctoral dissertation, UNIVERSITAS BOSOWA).
- Priadana, M. S., & Sunarsi, D. (2021). *Metode penelitian kuantitatif*. Pascal Books.
- Rahma, N. I. (2016). *klasifikasi pola rasa daging sapi dan daging babi berbasis electronic tongue dengan 17array sensor menggunakan metode principal component analysis (pca) dan cluster analysis (ca)* (Doctoral dissertation, Universitas Islam Negri Maulana Malik Ibrahim).

- Rahmah, M. (2024). *Modifikasi Elektroda Emas dengan Nafion/Tungsten Trioksida (WO₃) secara Elektrokimia untuk Deteksi Ion Oksalat* (Doctoral dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember).
- Rahmawati, N., Handayani, L., & Setiawan, D. (2023). *Sistem lidah elektronik untuk deteksi parameter kimia air minum*. *Jurnal Penelitian Elektrokimia*, 15(1), 60–68.
- Santika, A. S. (2018). *Karakterisasi sensor QCM dengan pelapisan bahan aktif membran Lipid Oleic Acid pada respon elektroda perak terhadap HCl* (Doctoral dissertation, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim).
- Santoso, A. (2021). *Pengawasan kualitas air minum dan pengaruhnya terhadap kesehatan*. *Jurnal Teknologi Air Bersih*, 12(3), 45–50.
- Saputro, R. E. (2017). *Pengembangan Larik Sensor E-tongue Berbasis Lipid OA (Oleic Acid) dan TOMA (Trioctyl Methyl Ammonium Chloride) Untuk Identifikasi Ganja Dan Campurannya* (Doctoral dissertation, Universitas Gadjah Mada).
- Sari, A. P. (2021). *Perbedaan Teknik Pengambilan Data Uji Pendahuluan Pemeriksaan Glukosa Secara Day To Day Dan Tiga Data Dalam Satu Hari* (Doctoral dissertation, Poltekkes Kemenkes Yogyakarta).
- Setiawan, D., & Nugroho, B. (2020). *Teknologi sensor elektrokimia untuk pemantauan kualitas air*. *Jurnal Rekayasa Lingkungan*, 18(2), 78–85.
- Ummah, A. R. (2018). *Karakterisasi sensor Quartz Crystal Microbalance (QCM) dengan pelapisan membran lipid oleyl alkohol terhadap respon HCl dan NaCl* (Doctoral dissertation, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim).
- Wahab, A. W., La Nafie, Nursiah., & Alam, F. M. D. I. P. Mata Kuliah Metode Pemisahan Dan Pengukuran 2 (*Elektrometri Dan Spektrofotometri*).
- Wijaya, R., Rahmawati, N., & Lestari, T. (2022). *Pengembangan sistem e-tongue untuk klasifikasi air minum berdasarkan kualitas*. *Jurnal Inovasi Teknologi Sensor*, 10(1), 30–40.
- Wulandari, E., & Lestari, T. (2022). *Analisis data kualitas air dengan principal component analysis (PCA)*. *Jurnal Statistik dan Komputasi*, 11(4), 120–130.
- Yusuf, M. S. (2017). *Rancang Bangun Alat Kontrol PH Dan Salinitas Kolam Budidaya Udang Vannamei Melalui SMS (Short Message Service) Berbasis STM32F4* (Doctoral dissertation, Universitas Muhammadiyah Gresik).
- Zainul, R. (2024). *Elektrokimia dalam Pemurnian Logam dan Pemulihan Sumber Daya*. PT. RajaGrafindo Persada-Rajawali Pers.
- Nurhalimah, D., Sari, A. M., & Ramadhan, I. (2023). *Analisis Komparatif Kualitas Air Minum Kemasan Berdasarkan Parameter Kimia dan Isotopik*. *Jurnal Ilmu Lingkungan Indonesia*, 20(2),

Saputra, R. A., & Santoso, D. (2022). *Implementasi Klasifikasi Supervised Learning dalam Deteksi Kualitas Air Menggunakan Sensor Multi-parametrik*. Jurnal Fisika dan Aplikasinya, 18(3),

LAMPIRAN

Lampiran 1



Gambar 1 pengambilan data

Lampiran 2

```
ETONGE.ino
1  void setup() {
2      Serial.begin(9600); // Inisialisasi komunikasi serial
3      Serial.println("CLEARDATA");
4      Serial.println("LABEL,Time,S-5 (mV),S-6 (mV)");
5  }
6
7  void loop() {
8      int S1 = analogRead(A5); // Baca nilai S-5
9      int S2 = analogRead(A6); // Baca nilai S-6
10
11      float S1Voltage = (S1 / 1023.0) * 5000.0; // Tegangan S-5 dalam mV
12      float S2Voltage = (S2 / 1023.0) * 5000.0; // Tegangan S-6 dalam mV
13
14      // Cetak satu baris data lengkap, lalu pindah ke baris berikutnya
15      Serial.print("DATA,TIME,");
16      Serial.print(S1Voltage);
17      Serial.print(",");
18      Serial.println(S2Voltage); // Gunakan println di akhir agar pindah baris
19
20      delay(1000); // Tunda 1 detik
21  }
22
```

Gambar 2 Code arduino untuk sensor chloride dan floride

Lampiran 3

1. Hasil Pengukuran sampel sebelum dinormalisasi

SAMPEL	PENGULANGAN	FLO	CH	DO	pH	TDS
S1	1	2084,67	2557,416	518,6667	2378,06	690
	2	2058,027	2585,693	509,3333	2383,58	492
	3	2117,497	2511,248	516,6667	2383,62	586
	4	2036,288	2519,743	508	2383,66	540
	5	2024,489	2569,806	514	2383,6	564
	6	2064,024	2580,49	512,6667	2383,6	546
	7	2000,142	2556,53	508	2383,63	518
	8	2081,269	2545,272	529,3333	2383,66	496
	9	2017,513	2512,016	488,6667	2383,54	642
	10	1980,563	2532,549	523,3333	2383,55	534
	11	1976,97	2524,27	511,3333	2383,55	654
	12	1999,31	2584,13	513,3333	2383,54	530
	13	2069,62	2501,33	520	2383,54	554
	14	2072,05	2552,7	505,3333	2383,55	594
	15	2048,73	2574,02	498	2383,55	614
	16	1974,28	2536,44	508	2383,54	628
	17	2035,04	2554,38	528,6667	2383,57	576
	18	2073,65	2523,83	514	2383,54	440
	19	2083,66	2544,9	496,6667	2383,54	498
	20	2023,98	2559,79	502,6667	2383,55	620
	21	2039,451	2584,83	500	2383,55	564
	22	2045,138	2540,176	505,3333	2383,54	612
	23	2025,95	2513,129	491,3333	2383,56	502
	24	2051,675	2565,105	500,6667	2383,55	468
	25	1999,677	2563,926	531,3333	2383,55	556
	26	2107,711	2531,579	508	2383,55	542
	27	2072,625	2572,529	524,6667	2383,55	600
	28	2030,418	2541,52	536	2383,54	578
	29	2085,722	2555,982	491,3333	2383,56	594
	30	2099,214	2541,724	534	2383,44	468

2. Hasil pengukuran sampel sebelum dinormalisasi

SAMPEL	PENGULANGAN	FLO	CH	DO	pH	TDS
S2	1	2086,51	2564,991	526	1891,25	220
	2	2108,286	2519,553	525,3333	2345,96	204
	3	2016,604	2531,496	510,6667	2197,01	218
	4	2089,143	2562,044	532,6667	2032,21	218
	5	2040,044	2582,748	524,6667	2283,65	212
	6	2057,979	2549,951	500	2273,02	214
	7	2087,058	2508,495	542	2118,81	246
	8	2090,084	2508,276	516	2243,9	232
	9	2044,966	2576,333	517,3333	1961,03	200
	10	2100,194	2529,679	524,6667	2197,19	220
	11	2073,09	2578,34	512,6667	2343,78	236
	12	2008,66	2528,68	508,6667	2198,99	206
	13	2065,65	2540,37	518,6667	2252,99	226
	14	2037,86	2564,99	542	1942,88	244
	15	2057,71	2545,52	500	2285	236
	16	2073,2	2583,86	528	2114,36	234
	17	2077,96	2565,87	474,6667	2034,29	218
	18	2035,31	2583,91	505,3333	2009,47	216
	19	2077,82	2525,01	518,6667	1999,79	220
	20	2117,11	2514,61	488	1902,3	212
	21	2051,82	2575,66	520	2363,04	222
	22	2038,1	2566,29	512	2286,2	230
	23	2004,05	2482,2	524,6667	2023,16	230
	24	2026,71	2569,68	532,6667	2389,83	216
	25	2056,52	2533,38	493,3333	2281,97	208
	26	2064,94	2500,62	540,6667	1987,74	180
	27	2048,34	2558,77	514	2453,42	204
	28	2050,98	2555,4	532,6667	1863,04	214
	29	2022,5	2528,4	510	2122,4	218
	30	1973,18	2561,4	512	2037,96	232

3. Hasil pengukuran sampel sebelum dinormalisasi

SAMPEL	PENGULANGAN	FLO	CH	DO	pH	TDS
S3	1	1960,056	2547,481	516	2227,431	198
	2	2071,99	2528,671	522,6667	2019,132	224
	3	2059,786	2505,838	526,6667	2194,474	240
	4	2014,719	2549,144	526	1796,305	196
	5	2062,25	2495,923	498,6667	2045,329	224
	6	2040,409	2543,659	504	1891,643	206
	7	2060,164	2541,173	526	2065,168	196
	8	2052,042	2541,359	502	2284,518	234
	9	1972,896	2530,045	504,6667	1969,212	226
	10	2057,85	2512,746	504,6667	2498,106	222
	11	2097,2	2522,39	511,3333	2480,254	200
	12	2083,63	2549,69	511,3333	2222,309	220
	13	2046,56	2579,71	516,6667	2386,168	196
	14	2104,02	2574,14	506	2200,881	244
	15	2012,22	2545,09	540,6667	2396,714	210
	16	2143,03	2585,08	523,3333	2105,617	202
	17	2003,21	2612,13	508	2232,959	214
	18	2033,2	2572,14	503,3333	2262,846	210
	19	2104,15	2549,12	514	1993,099	232
	20	2051,92	2555,81	512,6667	2186,835	234
	21	2064,18	2534,48	496	2065,359	230
	22	2054,05	2575,58	532,6667	2086,513	218
	23	2059,22	2485,04	534	2656,717	248
	24	2054,18	2558,94	468	2130,759	232
	25	1996,63	2565,57	540,6667	2173,31	236
	26	2030,19	2555,17	492,6667	1913,346	202
	27	2080,99	2548,81	508,6667	2125,929	198
	28	2055,88	2601,84	512	2213,908	226
	29	2054,95	2544,75	510	2205,817	240
	30	2071,37	2504,86	502	2313,219	210

4. Hasil pengukuran sampel sebelum dinormalisasi

SAMPEL	PENGULANGAN	FLO	CH	DO	pH	TDS
S4	1	2034,246	2558,665	500	2068,74	208
	2	2041,65	2546,35	533,3333	1956,4	206
	3	2115,138	2540,394	501,3333	2006,07	226
	4	2055,114	2531,7	497,3333	1796,31	216
	5	2094,977	2604,069	528	2238,38	236
	6	2102,364	2560,249	492	1891,64	200
	7	2097,494	2572,605	512,6667	1808,58	204
	8	2059,524	2548,281	544	2375,09	202
	9	2097,494	2572,605	505,3333	2082,81	200
	10	1996,004	2517,98	528	2134,23	228
	11	2042,18	2571,91	526,6667	2086,97	232
	12	2065,88	2536,55	508	2144,32	250
	13	2063,15	2574,72	530,6667	1823,11	214
	14	2042,22	2557,56	508	2131,71	210
	15	2000,46	2542,38	518	2010,48	212
	16	2013,8	2593,54	494,6667	2129,96	212
	17	2020,26	2550,14	505,3333	2183,22	256
	18	2066,27	2548,71	507,3333	2110,39	224
	19	2010,45	2571,33	496,6667	1995,19	240
	20	2104,2	2605,32	556	2229,11	220
	21	2078,299	2591,549	477,3333	2301,78	230
	22	1975,501	2528,228	522,6667	2284,46	218
	23	2122,486	2607,167	494,6667	2427,86	248
	24	1983,594	2575,299	504	1993,79	232
	25	2052,128	2548,321	509,3333	2152,13	236
	26	2097,519	2531,521	501,3333	1949,41	202
	27	2143,125	2535,634	524	2075,82	198
	28	2076,861	2565,225	494,6667	2150,43	226
	29	2016,782	2552,936	477,3333	2270,13	240
	30	1975,73	2501,484	507,3333	2198,32	210

5. Hasil pengukuran sampel sebelum dinormalisasi

SAMPEL	PENGULANGAN	FLO	CH	DO	pH	TDS
S5	1	2040,041	2564,449	516	2098,609	276
	2	2059,736	2540,579	513,3333	2062,364	284
	3	2077,706	2561,316	525,3333	2300,742	276
	4	2099,02	2552,386	501,3333	2083,204	260
	5	2025,639	2592,228	502,6667	2467,504	272
	6	2038,211	2554,269	526,6667	1962,658	254
	7	2074,348	2565,789	497,3333	2227,796	262
	8	2081,211	2553,488	514	2004,209	298
	9	2106,039	2527,695	533,3333	2051,259	294
	10	2018,796	2558,372	502,6667	2088,577	302
	11	2017,03	2557,48	498,6667	2043,731	290
	12	2024,39	2538,18	484,6667	2322,676	280
	13	2026,3	2573,52	530	2283,534	284
	14	2108,76	2524,1	515,3333	2150,724	286
	15	2074,64	2552,26	512	2307,199	288
	16	1984,84	2530,2	508	2181,02	246
	17	2102,84	2592,82	538	2044,361	250
	18	2091,79	2514,2	499,3333	2094,066	268
	19	2103,02	2560,36	516,6667	2332,014	260
	20	2019,36	2566,03	506	2292,358	260
	21	2039,451	2584,83	517,3333	2027,145	200
	22	2045,138	2540,176	509,3333	2225,099	268
	23	2025,95	2513,129	507,3333	1779,184	248
	24	2051,675	2565,105	490,6667	2100,723	270
	25	1999,677	2563,926	544	2079,861	288
	26	2107,711	2531,579	520	2021,496	258
	27	2072,625	2572,529	524	2247,298	276
	28	2030,419	2541,521	513,3333	2081,188	282
	29	2085,722	2555,982	494,6667	2094,347	276
	30	2099,214	2541,724	522	2358,191	306



KEMENTERIAN AGAMA
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM MALANG

Jalan Gajayana Nomor 50, Telepon (0341)551354, Fax. (0341) 572533
Website: <http://www.uin-malang.ac.id> Email: info@uin-malang.ac.id

JURNAL BIMBINGAN SKRIPSI/TESIS/DISERTASI

IDENTITAS MAHASISWA

NIM : 210604110048
Nama : VADYA ARYKE WIBOWO
Fakultas : SAINS DAN TEKNOLOGI
Jurusan : FISIKA
Dosen Pembimbing 1 : MUTHMAINNAH,M.Si
Dosen Pembimbing 2 : Dr. UMAIYATUS SYARIFAH, MA
Judul Skripsi/Tesis/Disertasi : STUDI PENGEMBANGAN E-TONGUE BERBASIS LIMA SENSOR ELEKTROKIMIA UNTUK KLASIFIKASI AIR MINUM

IDENTITAS BIMBINGAN

No	Tanggal Bimbingan	Nama Pembimbing	Deskripsi Proses Bimbingan	Tahun Akademik	Status
1	24 September 2024	MUTHMAINNAH,M.Si	Konsultasi judul skripsi yang akan diambil untuk penelitian lanjutan	Ganjil 2023/2024	Sudah Dikoreksi
2	30 September 2024	MUTHMAINNAH,M.Si	TTD pengajuan judul skripsi untuk diinput ke SIM fisika	Genap 2023/2024	Sudah Dikoreksi
3	30 Oktober 2024	MUTHMAINNAH,M.Si	Konsultasi proposal BAB 1,2,3 untuk pendaftaran seminar proposal	Genap 2023/2024	Sudah Dikoreksi
4	13 November 2024	MUTHMAINNAH,M.Si	Diskusi revisi proposal BAB 1,2,3 untuk persiapan seminar proposal	Genap 2023/2024	Sudah Dikoreksi
5	19 November 2024	MUTHMAINNAH,M.Si	Konsultasi, diskusi dan tandatangan halaman pengesahan untuk daftar seminar proposal	Genap 2023/2024	Sudah Dikoreksi
6	09 Desember 2024	MUTHMAINNAH,M.Si	Konsultasi pembuatan alat skripsi yang nanti digunakan untuk penelitian	Genap 2023/2024	Sudah Dikoreksi
7	07 Januari 2025	MUTHMAINNAH,M.Si	Bimbingan untuk seminar komprehensif	Genap 2024/2025	Sudah Dikoreksi
8	26 Februari 2025	MUTHMAINNAH,M.Si	Diskusi kelanjutan alat dan sampel penelitian	Genap 2024/2025	Sudah Dikoreksi
9	20 Mei 2025	MUTHMAINNAH,M.Si	konsultasi hasil pengambilan data untuk daftar seminar hasil	Genap 2025/2026	Sudah Dikoreksi
10	22 Mei 2025	Dr. UMAIYATUS SYARIFAH, MA	konsultasi integrasi untuk pendaftaran seminar hasil	Genap 2024/2025	Sudah Dikoreksi
11	27 Mei 2025	Dr. UMAIYATUS SYARIFAH, MA	konsultasi hasil revisi bimbingan sebelumnya yang sudah didiskusikan	Genap 2025/2026	Sudah Dikoreksi
12	02 Juni 2025	MUTHMAINNAH,M.Si	Tanda tangan halaman pengesahan untuk dafatar seminar hasil	Genap 2025/2026	Sudah Dikoreksi
13	05 Juni 2025	MUTHMAINNAH,M.Si	bimbingan bab IV dan V untuk ujian skripsi	Genap 2025/2026	Sudah Dikoreksi
14	10 Juni 2025	Dr. UMAIYATUS SYARIFAH, MA	Bimbingan integrasi untuk sidang skripsi	Genap 2025/2026	Sudah Dikoreksi
15	16 Juni 2025	MUTHMAINNAH,M.Si	revisi draft untuk ujian skripsi	Genap 2025/2026	Sudah Dikoreksi
16	17 Juni 2025	Dr. UMAIYATUS SYARIFAH, MA	diskusi untuk daftar sidang skripsi	Genap 2024/2025	Sudah Dikoreksi
17	17 Juni 2025	Dr. UMAIYATUS SYARIFAH, MA	Tanda tangan untuk pengajuan sidang skripsi	Genap 2025/2026	Sudah Dikoreksi
18	17 Juni 2025	MUTHMAINNAH,M.Si	tanda tangan untuk ujian skripsi	Genap 2025/2026	Sudah Dikoreksi

19	28 Juni 2025	Dr. UMAIYATUS SYARIFAH, MA	Tandatangan halaman persetujuan untuk seminal hasil	Genap 2024/2025	Sudah Dikoreksi
----	--------------	-------------------------------	---	--------------------	--------------------

Telah disetujui
Untuk mengajukan ujian Skripsi/Tesis/Desertasi

Dosen Pembimbing 2



Dr. UMAIYATUS SYARIFAH, MA

Malang, 26 Juni 2025

Dosen Pembimbing 1



MUTHMAINNAH, M.Si

