

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Keamanan pangan merupakan salah satu aspek penting karena penggunaan bahan tambahan yang tidak sesuai ketentuan dapat menimbulkan risiko bagi kesehatan konsumen. Salah satu bahan yang masih mendapat perhatian adalah boraks. Boraks merupakan senyawa anorganik yang tidak diperuntukkan sebagai bahan tambahan pangan, tetapi masih dapat disalahgunakan untuk memperbaiki tekstur, kekenyalan, dan daya simpan makanan (Aisyah et al., 2023). Kondisi tersebut menunjukkan bahwa diperlukan metode pengujian yang dapat membantu mendeteksi keberadaan boraks pada pangan secara cepat, sederhana, dan menghasilkan informasi yang dapat diukur.

Berbagai metode telah dikembangkan untuk mendeteksi boraks, seperti uji perubahan warna menggunakan kurkumin, metode berbasis kertas, spektrofotometri UV-Vis, serta beberapa metode sensor optik. Setiap metode memiliki cara kerja, peralatan, batas deteksi, dan waktu pembacaan yang berbeda. Metode berbasis perubahan warna relatif mudah digunakan, tetapi hasilnya dapat dipengaruhi oleh pengamatan pengguna dan kondisi pencahayaan. Sementara itu, metode yang menggunakan instrumen laboratorium dapat menghasilkan data kuantitatif, tetapi memerlukan peralatan dan tahapan pengukuran tertentu. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan metode lain yang dapat memberikan keluaran berupa nilai terukur dengan waktu pembacaan yang relatif singkat.

Perbandingan waktu deteksi pada penelitian ini diarahkan pada waktu yang diperlukan sejak sampel siap uji diberikan pada sensor atau pereaksi hingga indikator akhir dapat dibaca. Waktu preparasi awal, seperti penghalusan, pelarutan, dan

penyaringan sampel, tidak dimasukkan dalam perhitungan tersebut. Pendekatan ini digunakan agar waktu pembacaan dari beberapa metode terdahulu dapat dibandingkan dengan waktu respons sistem sensor yang dikembangkan dalam penelitian ini.

Salah satu sensor yang berpotensi digunakan untuk pengukuran tersebut adalah sensor *Giant Magnetoresistance* (GMR). Sensor GMR bekerja berdasarkan perubahan resistansi elemen magnetik akibat pengaruh medan magnet luar. Perubahan resistansi tersebut dapat dikonversi menjadi tegangan keluaran dan selanjutnya diolah menjadi nilai medan magnet (Rifan et al., 2016). Sensor GMR memiliki ukuran yang relatif kecil, konsumsi daya rendah, waktu respons cepat, dan kemampuan mendeteksi perubahan medan magnet yang lemah. Karakteristik tersebut membuat sensor GMR sesuai dikembangkan sebagai bagian dari sistem instrumentasi berbasis label magnetik.

Pada penelitian ini digunakan nanofiber $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVA-GA}$ 14% sebagai label magnetik. Fe_3O_4 berperan sebagai material magnetik yang dapat memberikan pengaruh terhadap respons sensor GMR, sedangkan PVA digunakan sebagai matriks polimer dalam pembentukan nanofiber melalui proses *electrospinning* (Wu et al., 2023). Glutaraldehid atau GA digunakan sebagai agen pengikat silang untuk membantu meningkatkan kestabilan nanofiber ketika berinteraksi dengan larutan. Bentuk nanofiber dipilih karena memiliki luas permukaan yang besar sehingga mendukung interaksi antara material, bioreseptor, dan sampel uji (Fernandes., 2026).

Kurkumin dari hasil ekstraksi kunyit digunakan sebagai bioreseptor karena memiliki kemampuan berinteraksi dengan senyawa borat dan telah banyak dimanfaatkan sebagai indikator dalam pengujian boraks. Pada sistem yang dikembangkan, nanofiber $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVA-GA}$ dibasahi dengan larutan kurkumin, kemudian diberikan larutan sampel. Perubahan yang terjadi pada label magnetik selanjutnya diamati melalui respons medan magnet yang direkam oleh sensor GMR terhadap waktu. Dengan cara tersebut, hasil pengujian tidak hanya ditentukan berdasarkan perubahan warna secara visual, tetapi diperoleh dalam bentuk data numerik.

Karakterisasi awal dilakukan menggunakan larutan boraks murni dengan beberapa variasi konsentrasi. Larutan boraks murni digunakan untuk mengetahui pola dasar hubungan antara konsentrasi boraks dan respons medan magnet tanpa pengaruh komponen pangan lainnya. Data tersebut digunakan untuk mengevaluasi arah respons, konsistensi pengukuran, sensitivitas, serta bentuk hubungan antara konsentrasi dan keluaran sensor. Pengujian terhadap formalin, NaCl, dan MSG juga dilakukan pada rentang konsentrasi yang sama sebagai bahan pembanding. Pengujian tersebut bertujuan untuk mengetahui apakah respons sensor terhadap boraks dapat dibedakan dari respons terhadap senyawa lain yang mungkin ditemukan atau digunakan pada pangan.

Selain larutan murni, penelitian ini menggunakan ekstrak bakso yang kondisikan dengan penambahan boraks pada konsentrasi tertentu. Pengujian ini dilakukan karena judul penelitian membahas deteksi boraks pada pangan. Bakso digunakan sebagai model matriks pangan yang mengandung berbagai komponen, seperti protein, lemak, garam, dan bahan terlarut lainnya. Komponen-komponen tersebut dapat memengaruhi interaksi antara boraks, kurkumin, nanofiber, dan sensor. Oleh karena itu, pengujian pada ekstrak bakso digunakan untuk mengevaluasi kemampuan awal sensor dalam mendeteksi boraks pada kondisi yang lebih mendekati sampel pangan nyata.

Sampel bakso yang digunakan bukan merupakan sampel pasar dengan kadar boraks yang belum diketahui, melainkan ekstrak bakso yang sengaja dikondisikan dengan penambahan boraks. Pengondisian tersebut dilakukan agar konsentrasi boraks dalam larutan uji dapat ditentukan dan dikendalikan. Dengan demikian, respons sensor pada matriks bakso dapat dibandingkan dengan respons larutan boraks murni. Pengujian ini digunakan sebagai tahap awal atau *proof of concept*, sehingga hasilnya belum dimaksudkan untuk menyatakan bahwa sensor telah tervalidasi untuk seluruh jenis pangan.

Hubungan antara konsentrasi sampel dan respons medan magnet dianalisis menggunakan regresi linear dan regresi polinomial orde dua. Regresi linear digu-

nakan sebagai model awal dan sebagai dasar untuk menilai kecenderungan respons serta sensitivitas pada bagian data yang masih linear. Regresi polinomial digunakan untuk menggambarkan respons yang menunjukkan kelengkungan atau kecenderungan saturasi pada konsentrasi tertentu. Pemilihan model dilakukan berdasarkan bentuk grafik, koefisien determinasi (R^2), galat pemodelan, dan pola residual. Pendekatan *machine learning*, termasuk *Support Vector Regression*, tidak digunakan karena penelitian difokuskan pada karakterisasi kinerja sensor dan hubungan langsung antara konsentrasi dengan respons medan magnet.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini diarahkan pada pengembangan metode deteksi boraks menggunakan sensor GMR berbasis nanofiber $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVA-GA}$ dengan kurkumin sebagai bioreseptor. Penelitian mencakup karakterisasi respons terhadap larutan boraks murni, pengujian selektivitas terhadap formalin, NaCl , dan MSG, serta pengujian awal pada ekstrak bakso yang dikondisikan dengan boraks. Kinerja sistem dianalisis berdasarkan respons medan magnet, sensitivitas, konsistensi pengukuran, kesesuaian model regresi, selektivitas, dan waktu respons sensor.

Kontribusi yang diajukan dalam penelitian ini adalah penggunaan pembacaan magnetik berbasis sensor GMR untuk mendeteksi boraks dengan label nanofiber $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVA-GA}/\text{kurkumin}$. Berbeda dengan metode sederhana yang umumnya mengandalkan perubahan warna, sistem ini menghasilkan data medan magnet yang dapat direkam secara kuantitatif terhadap waktu. Kebaruan penelitian juga didukung oleh pengujian terhadap beberapa bahan pembanding dan penerapan awal pada matriks bakso. Meskipun demikian, pernyataan mengenai kebaruan tetap perlu didukung oleh penelusuran penelitian terdahulu yang menggunakan metode, material, dan sampel yang sejenis.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas maka permasalahan yang dapat dirumuskan adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana respons medan magnet sensor *Giant Magnetoresistance* (GMR) berbasis nanofiber Fe_3O_4 /PVA-GA/kurkumin terhadap variasi konsentrasi larutan boraks murni?
2. Bagaimana selektivitas respons sensor GMR terhadap boraks jika dibandingkan dengan formalin, NaCl, dan MSG pada rentang konsentrasi pengujian yang sama?
3. Bagaimana respons sensor GMR terhadap ekstrak bakso yang dikondisikan dengan penambahan boraks pada beberapa variasi konsentrasi?
4. Bagaimana kesesuaian regresi linear dan regresi polinomial orde dua dalam menggambarkan hubungan antara konsentrasi sampel dan respons medan magnet sensor GMR?

1.3 Batasan Masalah

Penelitian ini memiliki batasan masalah agar penelitian memiliki batasan demi tercapainya suatu tujuan penelitian, di antaranya yaitu :

1. Penelitian difokuskan pada boraks sebagai senyawa utama yang dideteksi. Formalin, NaCl, dan MSG hanya digunakan sebagai bahan pembanding dalam pengujian selektivitas sensor.
2. Larutan boraks, formalin, NaCl, dan MSG diuji pada rentang konsentrasi 0,5–45 mM, sedangkan ekstrak bakso yang dikondisikan dengan boraks diuji pada rentang 0–35 mM.

3. Pengukuran dilakukan menggunakan instrumentasi sensor *Giant Magnetoresistance* (GMR), dengan keluaran data berupa medan magnet dalam satuan militesla terhadap waktu dalam satuan sekon. Setiap kondisi pengujian dilakukan sebanyak tiga kali pengulangan.
4. Analisis data dibatasi pada respons medan magnet, nilai rata-rata, simpangan baku, konsistensi pengukuran, sensitivitas selektivitas, serta pemodelan menggunakan regresi linear dan regresi polinomial orde dua.
5. Penelitian tidak membahas pengaruh perubahan suhu, kelembapan, penyimpanan jangka panjang, ketahanan mekanik nanofiber, sertifikasi keamanan pangan, maupun validasi menggunakan metode laboratorium standar.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis respons medan magnet sensor *Giant Magnetoresistance* (GMR) berbasis nanofiber $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVA-GA/kurkumin}$ terhadap variasi konsentrasi larutan boraks.
2. Menganalisis selektivitas respons sensor GMR terhadap boraks melalui perbandingan dengan respons formalin, NaCl, dan MSG pada rentang konsentrasi pengujian yang sama.
3. Menganalisis respons sensor GMR terhadap ekstrak bakso yang dikondisikan dengan penambahan boraks pada beberapa variasi konsentrasi.
4. Membandingkan kesesuaian regresi linear dan regresi polinomial orde dua dalam menggambarkan hubungan antara konsentrasi sampel dan respons medan magnet sensor GMR.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini akan memberikan beberapa manfaat, di antaranya:

1. Memberikan informasi mengenai karakteristik respons sensor *Giant Magnetoresistance* (GMR) berbasis nanofiber $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVA-GA}$ /kurkumin terhadap perubahan konsentrasi boraks.
2. Memberikan informasi awal mengenai selektivitas sensor terhadap boraks melalui perbandingan respons dengan formalin, NaCl, dan MSG sebagai bahan pembanding.
3. Memberikan gambaran mengenai kemampuan awal sensor dalam mendeteksi boraks pada matriks pangan melalui pengujian ekstrak bakso yang kondisikan dengan penambahan boraks.
4. Menjadi bahan acuan untuk pengembangan sistem instrumentasi deteksi boraks berbasis sensor magnetik yang lebih sederhana, terukur, dan dapat dikembangkan lebih lanjut.

1.6 Metode Pengumpulan Data

Untuk mencapai tujuan dari penelitian, dilaksanakan serangkaian metode pengumpulan data sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Bab ini memuat latar belakang penelitian, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, metode pengumpulan data, dan sistematika penulisan. Bagian ini menjelaskan alasan perlunya pengembangan metode deteksi boraks pada pangan menggunakan sensor *Giant Magnetoresistance* (GMR) berbasis nanofiber $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVA-GA}$ dengan kurkumin sebagai bioreseptor. Bab ini juga menjelaskan posisi penelitian terhadap metode deteksi boraks yang telah dilakukan sebelumnya.

2. Observasi dan Tinjauan Pustaka

Bab ini membahas teori-teori yang mendukung penelitian, meliputi boraks pada pangan, prinsip kerja sensor *Giant Magnetoresistance* (GMR), kumparan Helmholtz, rangkaian pengondisi sinyal, *Analog-to-Digital Converter* (ADC), proses *electrospinning*, sifat Fe_3O_4 , PVA, glutaraldehid, dan kurkumin. Bab ini juga membahas sensitivitas, selektivitas, konsistensi pengukuran, regresi linear, regresi polinomial, serta penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan metode deteksi boraks.

3. **Eksperimen Laboratorium** Merancang dan menguji instrumen sensor GMR berbasis nanofiber Fe_3O_4 /PVA-GA/Kurkumin untuk mendeteksi Kandungan Boraks pada Pangan. Eksperimen dilakukan dengan variasi konsentrasi Larutan Boraks Murni, serta pengukuran Formalin, MSG, dan NaCl sebagai pembanding, lalu uji terhadap pangan dengan menghadirkan sampel bakso yang telah dikondisikan dengan boraks. Data yang diperoleh berupa perubahan resistansi magnetik sebagai respons terhadap variasi konsentrasi boraks murni dengan sampel uji pembanding juga sampel pangan yang telah dikondisikan dengan boraks.

4. Hasil dan Analisis

Data hasil pengukuran disusun dan diolah untuk memperoleh nilai rata-rata, simpangan baku, serta perubahan respons medan magnet pada setiap konsentrasi. Respons boraks dibandingkan dengan respons formalin, NaCl, dan MSG untuk mengevaluasi selektivitas sensor.

Hubungan antara konsentrasi sampel dan respons medan magnet dianalisis menggunakan regresi linear dan regresi polinomial orde dua. Hasil kedua model dibandingkan berdasarkan bentuk kurva, nilai koefisien determinasi (R^2), serta galat pemodelan. Hasil pengujian pada larutan boraks murni juga dibandingkan dengan pengujian pada ekstrak bakso yang dikondisikan dengan boraks untuk mengetahui adanya pengaruh matriks pangan.

1.7 Sistematika Penulisan

BAB I: PENDAHULUAN

Bab ini memuat latar belakang penelitian, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, metode pengumpulan data, dan sistematika penulisan. Bagian ini menjelaskan alasan perlunya pengembangan metode deteksi boraks pada pangan menggunakan sensor *Giant Magnetoresistance* (GMR) berbasis nanofiber $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVA-GA}$ dengan kurkumin sebagai bioreseptor. Bab ini juga menjelaskan posisi penelitian terhadap metode deteksi boraks yang telah dilakukan sebelumnya.

BAB II: TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini membahas teori-teori yang mendukung penelitian, meliputi boraks pada pangan, prinsip kerja sensor *Giant Magnetoresistance* (GMR), kumparan Helmholtz, rangkaian pengondisi sinyal, *Analog-to-Digital Converter* (ADC), proses *electrospinning*, sifat Fe_3O_4 , PVA, glutaraldehida, dan kurkumin. Bab ini juga membahas sensitivitas, selektivitas, konsistensi pengukuran, regresi linear, regresi polinomial, serta penelitian terdahulu yang berkaitan dengan metode deteksi boraks.

BAB III: METODE PENELITIAN

Bab ini menjelaskan waktu dan tempat penelitian, alat dan bahan yang digunakan, serta tahapan pelaksanaan penelitian. Tahapan tersebut meliputi persiapan sistem instrumentasi GMR, persiapan nanofiber $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVA-GA}$ 14%, pembuatan larutan kurkumin, pembuatan larutan sampel, dan persiapan ekstrak bakso. Bab ini juga menjelaskan prosedur pengujian larutan boraks, formalin, NaCl, MSG, dan ekstrak bakso yang dikondisikan dengan boraks. Selain itu, dijelaskan pula prosedur pengambilan data medan magnet terhadap waktu, pengulangan pengukuran, serta metode pengolahan data menggunakan regresi linear dan regresi polinomial orde dua.

BAB IV: HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil pengukuran dan pembahasan berdasarkan data eksperimen. Pembahasan meliputi respons medan magnet sensor GMR terhadap variasi konsentrasi boraks murni, konsistensi hasil pengukuran, sensitivitas sensor, serta perbandingan kesesuaian regresi linear dan regresi polinomial. Respons sensor terhadap formalin, NaCl, dan MSG dibahas sebagai bagian dari pengujian selektivitas. Bab ini juga membahas respons sensor pada ekstrak bakso yang dikondisikan dengan boraks serta kemungkinan pengaruh matriks pangan terhadap hasil pengukuran. Hasil penelitian kemudian dibandingkan dengan teori dan penelitian terdahulu untuk menjelaskan kemampuan dan keterbatasan sistem yang digunakan.

BAB V: PENUTUP

Bab ini memuat kesimpulan yang disusun berdasarkan rumusan masalah, tujuan penelitian, serta hasil dan pembahasan yang telah diperoleh. Kesimpulan menjelaskan respons sensor GMR terhadap boraks, selektivitas terhadap bahan pembanding, hasil pengujian pada ekstrak bakso, dan kesesuaian model regresi yang digunakan. Bab ini juga memuat saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya, seperti pengujian pada sampel pangan lain, validasi dengan metode laboratorium standar, pengembangan material sensor, dan peningkatan kestabilan sistem pengukuran.