

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik Awal Instrumentasi GMR

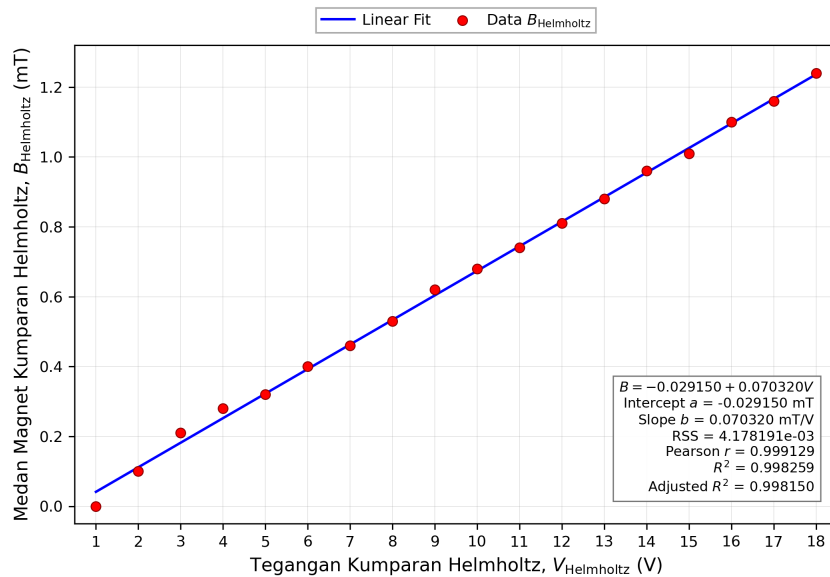
Instrumentasi GMR yang digunakan pada penelitian ini merupakan perangkat yang telah dikembangkan pada penelitian sebelumnya. Sistem tersebut terdiri atas sensor GMR, kumparan Helmholtz, rangkaian pengondisi sinyal, ADC, dan perangkat akuisisi data. Karena penelitian ini menggunakan perangkat dan susunan pengukuran yang sama, hasil karakterisasi sebelumnya digunakan sebagai acuan untuk menentukan kondisi medan magnet selama pengujian sampel.

Kalibrasi ini menunjukkan hubungan antara tegangan masukan, arus yang mengalir pada kumparan, dan medan magnet yang dihasilkan. Hasil kalibrasi tersebut disajikan pada Tabel 4.1 dan Gambar 4.1.



Tabel 4.1 Kalibrasi medan magnet eksternal kumparan Helmholtz

$V_{\text{Helmholtz}}$ (V)	$I_{\text{Helmholtz}}$ (A)	B (mT)
1	0,074	0,00
2	0,153	0,10
3	0,232	0,21
4	0,310	0,28
5	0,387	0,32
6	0,469	0,40
7	0,542	0,46
8	0,618	0,53
9	0,693	0,62
10	0,770	0,68
11	0,845	0,74
12	0,922	0,81
13	0,998	0,88
14	1,076	0,96
15	1,154	1,01
16	1,235	1,10
17	1,316	1,16
18	1,463	1,24



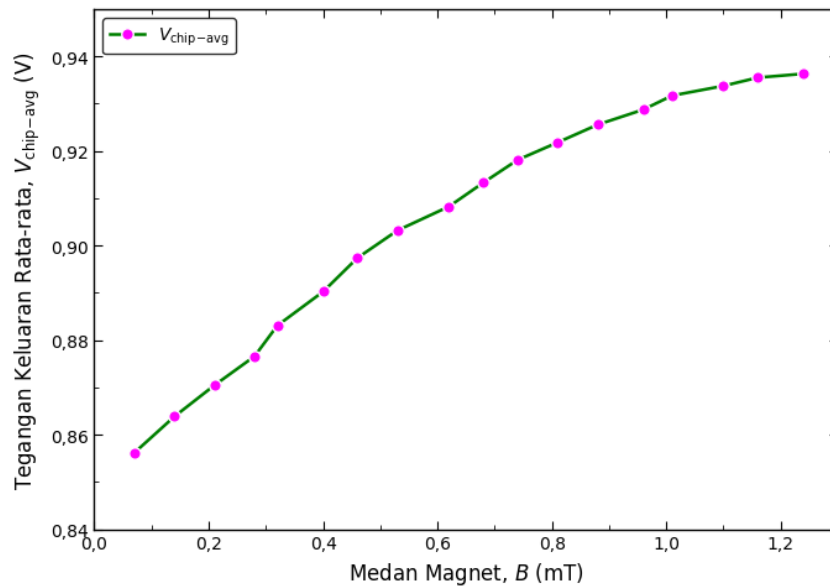
Gambar 4.1 Grafik kalibrasi medan magnet eksternal kumparan Helmholtz

Berdasarkan Tabel 4.1 dan Gambar 4.1, medan magnet yang dihasilkan kumparan meningkat seiring dengan kenaikan tegangan masukan dan arus. Pada tegangan 2 V, medan magnet yang terukur sebesar 0,10 mT. Nilai tersebut meningkat menjadi 0,46 mT pada tegangan 7 V dan mencapai 1,24 mT pada tegangan 18 V. Titik-titik hasil pengukuran pada Gambar 4.1 berada dekat dengan garis regresi linear. Hal ini menunjukkan bahwa tegangan masukan dapat digunakan untuk mengatur besar medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan Helmholtz.

Setelah karakteristik kumparan diketahui, pengujian berikutnya dilakukan untuk melihat perubahan tegangan keluaran sensor GMR terhadap medan magnet yang diberikan. Pengujian ini diperlukan untuk memastikan bahwa sensor masih memberikan respons pada rentang medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan. Hasil pengujian respons sensor disajikan pada Tabel 4.2 dan Gambar 4.2.

Tabel 4.2 Respons tegangan keluaran sensor GMR terhadap perubahan medan magnet

B (mT)	$V_{\text{chip-avg}}$ (V)
0,07	0,856172
0,14	0,863831
0,21	0,870448
0,28	0,876562
0,32	0,883074
0,40	0,890244
0,46	0,897378
0,53	0,903190
0,62	0,908250
0,68	0,913288
0,74	0,918108
0,81	0,921804
0,88	0,925563
0,96	0,928757
1,01	0,931706
1,10	0,933763
1,16	0,935520
1,24	0,936327



Gambar 4.2 Respons tegangan keluaran sensor GMR terhadap perubahan medan magnet eksternal

Tabel 4.2 dan Gambar 4.2 menunjukkan bahwa tegangan keluaran sensor meningkat ketika medan magnet dinaikkan. Pada medan magnet 0,07 mT, tegangan keluaran rata-rata sensor tercatat sebesar 0,856172 V. Tegangan tersebut meningkat menjadi 0,897378 V pada medan 0,46 mT dan mencapai 0,936327 V pada medan 1,24 mT. Kenaikan ini menunjukkan bahwa sensor GMR mampu memberikan respons terhadap perubahan medan magnet eksternal.

Bentuk kurva pada Gambar 4.2 juga memperlihatkan bahwa kenaikan tegangan cukup jelas pada medan rendah hingga menengah. Pada medan yang lebih tinggi, perubahan tegangan mulai mengecil sehingga kurva terlihat lebih landai. Dengan demikian, respons sensor tidak sepenuhnya linear pada seluruh rentang medan yang diuji.

Pada pengujian sampel, kumparan dioperasikan pada tegangan 7 V dengan arus sekitar 0,542 A. Berdasarkan hasil kalibrasi, pengaturan tersebut menghasilkan medan magnet nominal sebesar 0,46 mT. Pada kondisi ini, sensor masih menunjukkan perubahan keluaran yang cukup jelas dan belum berada pada bagian kurva yang mulai melandai. Oleh karena itu, kondisi tersebut digunakan secara tetap

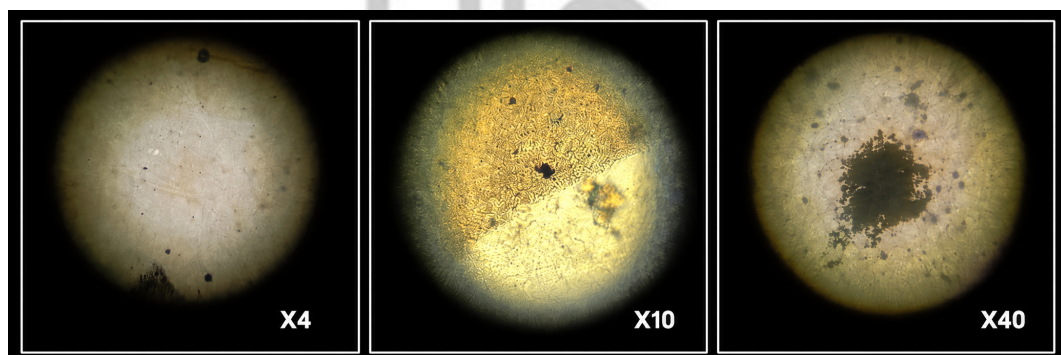
pada pengujian boraks, formalin, NaCl, MSG, dan ekstrak bakso yang dikondisikan dengan boraks.

Nilai medan magnet pada Tabel 4.1 merupakan medan eksternal yang dihasilkan oleh kumparan Helmholtz. Sementara itu, respons setiap sampel dianalisis dalam bentuk perubahan medan magnet terhadap kondisi awal pengukuran. Respons tersebut dinyatakan sebagai ΔB dan dihitung menggunakan Persamaan 3.1 yang telah dijelaskan pada Bab III. Nilai ΔB selanjutnya digunakan untuk membandingkan respons sensor pada setiap jenis dan variasi konsentrasi sampel.

4.2 Karakterisasi Material

4.2.1 Karakterisasi Morfologi Nanofiber $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVA-GA}$

Pengamatan morfologi dilakukan menggunakan mikroskop optik pada perbesaran $4\times$, $10\times$, dan $40\times$. Pengamatan ini bertujuan untuk melihat kondisi permukaan nanofiber $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVA-GA}$ setelah proses *crosslinking* menggunakan glutaraldehida dan stabilisasi termal. Hasil pengamatan ditunjukkan pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Hasil pengamatan nanofiber $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVA-GA}$ menggunakan mikroskop optik pada perbesaran $4\times$, $10\times$, dan $40\times$.

Pada perbesaran $4\times$, lembaran nanofiber terlihat masih menyatu dan tidak menunjukkan adanya robekan atau kerusakan yang besar. Permukaan sampel tampak relatif terang dengan beberapa titik gelap yang tersebar pada bagian tertentu.

Pengamatan pada perbesaran ini memberikan gambaran umum mengenai kondisi lembaran nanofiber setelah proses modifikasi.

Pada perbesaran 10×, bentuk permukaan mulai terlihat lebih jelas. Sebagian titik gelap tampak tersebar pada permukaan, sedangkan pada beberapa bagian terlihat daerah yang lebih rapat dan lebih gelap. Perbedaan tampilan tersebut menunjukkan bahwa penyebaran material pada lembaran nanofiber belum sepenuhnya seragam.

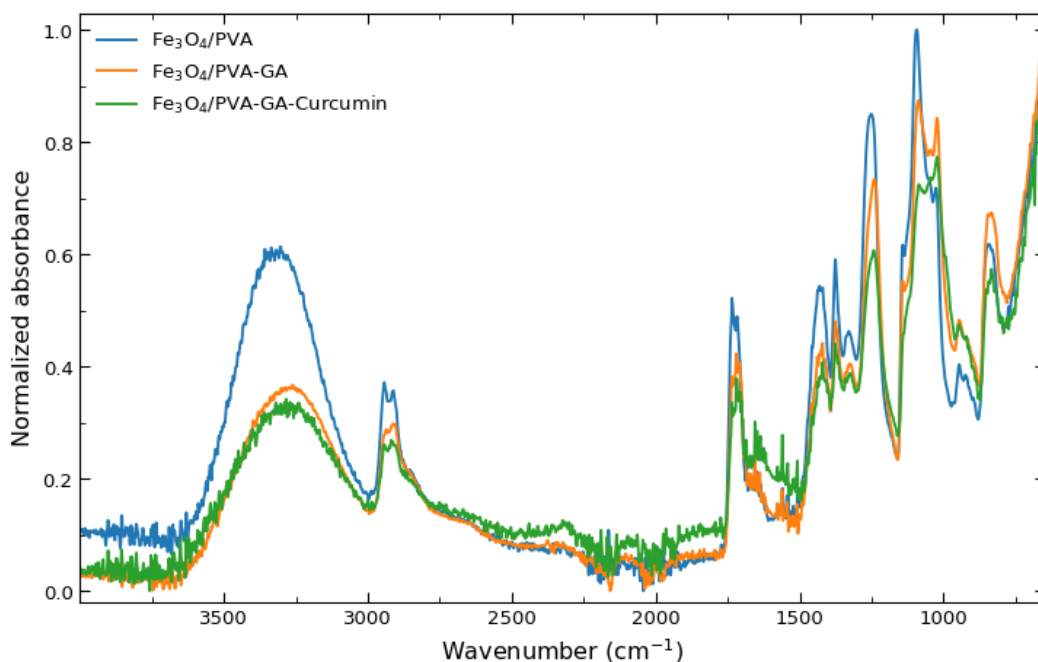
Pada perbesaran 40×, terlihat daerah gelap berukuran lebih besar yang dikelilingi oleh beberapa titik gelap berukuran lebih kecil. Karena Fe_3O_4 memiliki warna lebih gelap dibandingkan matriks PVA-GA, bagian tersebut diduga berkaitan dengan daerah yang memiliki kandungan atau penumpukan Fe_3O_4 lebih banyak. Namun, identitas bagian gelap tersebut tidak dapat dipastikan hanya melalui pengamatan mikroskop optik karena tampilannya juga dapat dipengaruhi oleh ketebalan sampel, pencahayaan, dan fokus pengamatan.

Secara umum, hasil pengamatan menunjukkan bahwa lembaran nanofiber Fe_3O_4 /PVA-GA tetap berada dalam kondisi utuh setelah proses *crosslinking* dan stabilisasi termal. Material yang diduga mengandung Fe_3O_4 terlihat tersebar pada sebagian permukaan, meskipun masih terdapat beberapa daerah dengan penumpukan lokal. Hasil ini digunakan sebagai pengamatan kualitatif terhadap kondisi fisik nanofiber sebelum dilanjutkan pada proses fungsionalisasi menggunakan kurkumin dan pengujian dengan sensor GMR.

4.2.1.1 Perbandingan Spektrum FTIR Ternormalisasi

Spektrum FTIR dari nanofiber Fe_3O_4 /PVA, Fe_3O_4 /PVA-GA, dan Fe_3O_4 /PVA-GA/kurkumin dibandingkan untuk mengamati perubahan pola serapan pada setiap tahap modifikasi material. Sebelum dibandingkan, nilai absorbansi dari masing-masing spektrum dinormalisasi terhadap nilai maksimumnya sehingga berada pada rentang 0–1. Normalisasi dilakukan agar perbedaan bentuk spektrum dan posisi pita serapan dapat diamati dengan lebih jelas. Hasil perbandingan ketiga spektrum ditunjukkan pada

Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Perbandingan spektrum FTIR ternormalisasi nanofiber Fe₃O₄/PVA, Fe₃O₄/PVA-GA, dan Fe₃O₄/PVA-GA/kurkumin.

Ketiga spektrum memiliki pola serapan utama yang relatif serupa, terutama pada daerah bilangan gelombang sekitar 3600–3000 cm⁻¹, 3000–2800 cm⁻¹, 1800–1500 cm⁻¹, dan daerah sidik jari di bawah 1500 cm⁻¹. Kemiripan pola tersebut menunjukkan bahwa matriks utama PVA masih dipertahankan setelah penambahan glutaraldehida dan kurkumin. Meskipun demikian, terdapat perbedaan pada posisi, bentuk, dan intensitas relatif beberapa pita serapan.

Pada spektrum Fe₃O₄/PVA, terlihat pita serapan lebar pada daerah sekitar 3306 cm⁻¹. Pita ini berkaitan dengan vibrasi regangan gugus O–H dari PVA dan kemungkinan molekul air yang masih berada di dalam material. Spektrum tersebut juga memperlihatkan pita pada daerah sekitar 2900 cm⁻¹ yang berkaitan dengan vibrasi regangan C–H. Pita lain terlihat pada daerah sekitar 1728 cm⁻¹ serta daerah 1092 cm⁻¹ yang masing-masing berkaitan dengan gugus karbonil dan vibrasi C–O dari matriks polimer.

Setelah penambahan glutaraldehida, pita lebar O–H bergeser dari sekitar 3306 cm^{-1} menjadi 3263 cm^{-1} . Pergeseran ini disertai perubahan bentuk dan penurunan intensitas relatif pita dibandingkan dengan $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVA}$. Perubahan tersebut diduga berkaitan dengan berubahnya lingkungan ikatan hidrogen pada gugus hidroksil PVA setelah proses *crosslinking*. Pada daerah karbonil juga terlihat pergeseran dari sekitar 1728 cm^{-1} menjadi 1715 cm^{-1} , sedangkan pita pada daerah C–O/C–O–C bergeser dari sekitar 1092 cm^{-1} menjadi 1087 cm^{-1} .

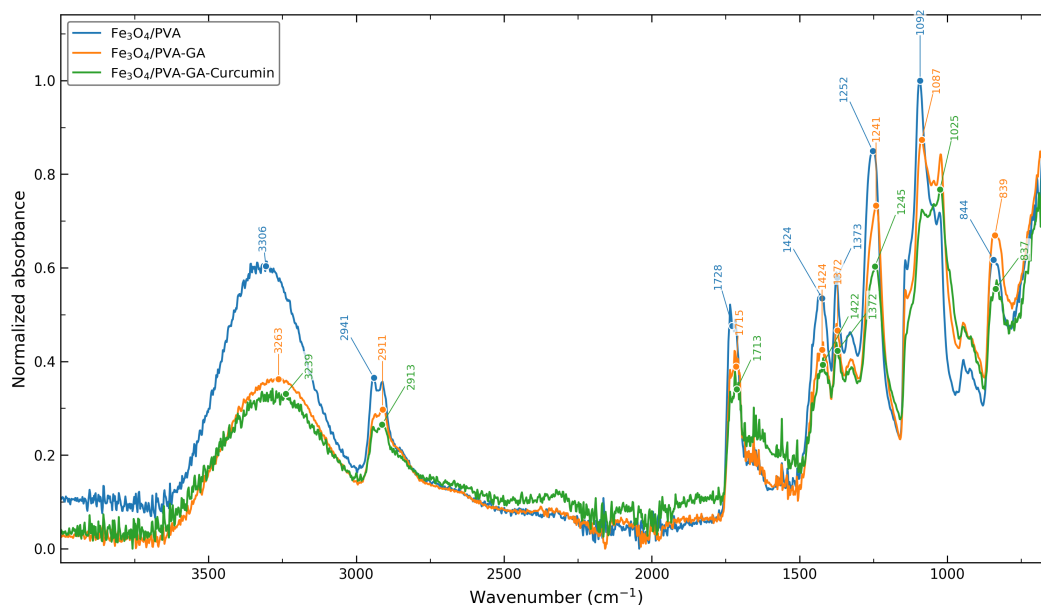
Pada spektrum $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVA-GA/kurkumin}$, pita O–H kembali mengalami pergeseran ke bilangan gelombang yang lebih rendah, yaitu sekitar 3239 cm^{-1} . Pergeseran ini dapat berkaitan dengan interaksi gugus hidroksil pada kurkumin dengan gugus fungsi yang terdapat pada matriks PVA-GA. Perubahan juga terlihat pada daerah karbonil sekitar 1713 cm^{-1} dan pada daerah C–O/C–O–C sekitar 1025 cm^{-1} . Selain itu, daerah sidik jari pada spektrum $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVA-GA/kurkumin}$ menunjukkan pola yang lebih kompleks dibandingkan dua sampel sebelumnya. Hal ini dapat dipengaruhi oleh adanya gugus fungsi tambahan yang berasal dari kurkumin.

Secara umum, pergeseran dan perubahan bentuk pita serapan setelah penambahan glutaraldehida dan kurkumin mendukung adanya perubahan lingkungan gugus fungsi pada nanofiber. Hasil tersebut menunjukkan adanya interaksi antara PVA, glutaraldehida, dan kurkumin di dalam material. Namun, perubahan spektrum FTIR ini tidak digunakan sebagai bukti tunggal terbentuknya ikatan kimia baru, melainkan sebagai indikasi adanya perubahan interaksi antargugus fungsi pada setiap tahap modifikasi.

Karena spektrum telah dinormalisasi, perbedaan tinggi kurva tidak merepresentasikan perbedaan absorbansi absolut atau jumlah gugus fungsi pada masing-masing sampel. Oleh sebab itu, pembahasan lebih difokuskan pada perubahan posisi, bentuk, dan pola pita serapan.

4.2.1.2 Identifikasi dan Pergeseran Pita Serapan

Puncak-puncak utama pada ketiga spektrum ditandai untuk mempermudah pengamatan perubahan posisi pita serapan setelah penambahan glutaraldehida dan kurkumin. Spektrum gabungan beserta posisi pita serapan utama ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Identifikasi dan perbandingan pita serapan utama pada spektrum FTIR ternormalisasi nanofiber Fe₃O₄/PVA, Fe₃O₄/PVA-GA, dan Fe₃O₄/PVA-GA/kurkumin.

Berdasarkan Gambar 4.5, ketiga sampel memiliki pola spektrum yang secara umum masih serupa. Perbedaannya terlihat pada beberapa posisi pita serapan setelah penambahan GA dan kurkumin. Pada daerah bilangan gelombang tinggi, pita lebar Fe₃O₄/PVA yang berada di sekitar 3306 cm⁻¹ bergeser menjadi 3263 cm⁻¹ pada Fe₃O₄/PVA-GA dan 3239 cm⁻¹ pada Fe₃O₄/PVA-GA/kurkumin. Pita tersebut dikaitkan dengan vibrasi regangan gugus O–H pada matriks PVA. Pergeseran yang terjadi menunjukkan adanya perubahan lingkungan gugus hidroksil setelah proses modifikasi material.

Pita pada daerah regangan C–H juga mengalami sedikit perubahan, yaitu

dari 2941 cm^{-1} pada $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVA}$ menjadi 2911 cm^{-1} pada $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVA-GA}$ dan 2913 cm^{-1} pada $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVA-GA/kurkumin}$. Perubahan pada daerah ini relatif kecil sehingga lebih menunjukkan adanya perubahan kondisi di sekitar rantai polimer daripada perubahan struktur utama material.

Pada daerah sekitar karbonil, pita serapan bergeser dari 1728 cm^{-1} pada $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVA}$ menjadi 1715 cm^{-1} setelah penambahan GA dan 1713 cm^{-1} setelah penambahan kurkumin. Pergeseran tersebut menunjukkan bahwa proses modifikasi memengaruhi lingkungan gugus yang menyerap pada daerah tersebut. Pita di sekitar $1424\text{--}1422\text{ cm}^{-1}$ dan $1373\text{--}1372\text{ cm}^{-1}$ tetap terlihat pada ketiga sampel dengan perubahan posisi yang kecil.

Perubahan yang lebih jelas tampak pada daerah sidik jari. Pita pada 1252 cm^{-1} bergeser menjadi 1241 cm^{-1} setelah penambahan GA dan 1245 cm^{-1} setelah penambahan kurkumin. Sementara itu, pita pada 1092 cm^{-1} bergeser menjadi 1087 cm^{-1} dan kemudian 1025 cm^{-1} . Daerah tersebut berkaitan dengan vibrasi gugus C–O atau C–O–C pada matriks material. Pada bilangan gelombang yang lebih rendah, pita 844 cm^{-1} juga mengalami sedikit pergeseran menjadi 839 cm^{-1} dan 837 cm^{-1} .

Secara keseluruhan, perubahan posisi pita terutama terlihat pada daerah O–H, karbonil, serta C–O/C–O–C. Hasil tersebut menunjukkan adanya perubahan lingkungan gugus fungsi setelah penambahan glutaraldehid dan kurkumin. Meskipun demikian, hasil FTIR ini digunakan sebagai indikasi perubahan interaksi antargugus fungsi dan tidak dijadikan satu-satunya dasar untuk menyatakan terbentuknya ikatan kimia baru.

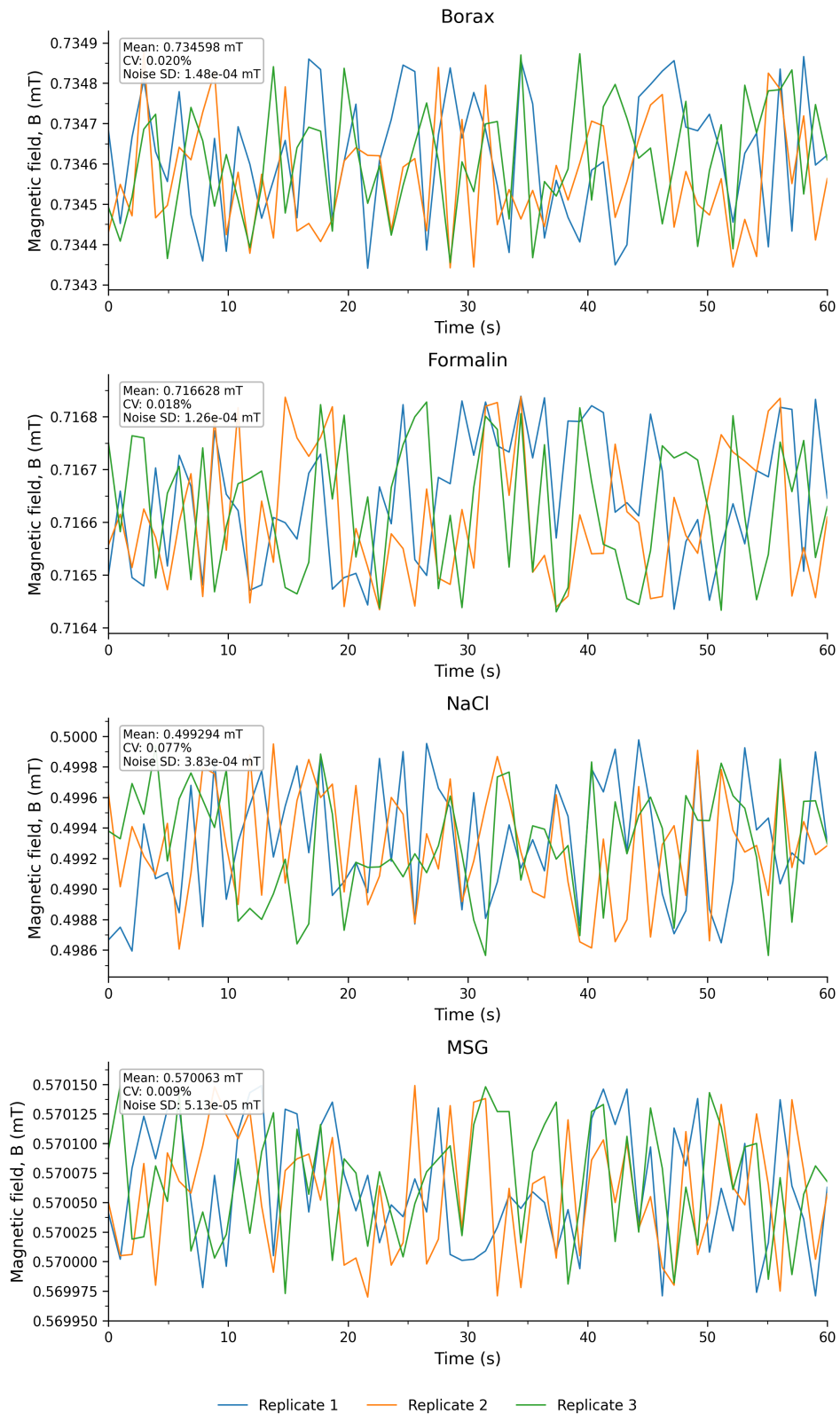
Karena seluruh spektrum telah dinormalisasi, perbedaan tinggi kurva pada Gambar 4.5 tidak digunakan untuk membandingkan jumlah gugus fungsi secara langsung. Pembahasan lebih difokuskan pada posisi dan pergeseran pita serapan.

4.3 Pengujian Respons Sensor GMR

4.3.1 Kestabilan dan Koreksi Baseline Sinyal

Sebelum respons sensor terhadap variasi konsentrasi dianalisis, kestabilan sinyal awal diperiksa terlebih dahulu. Baseline digunakan sebagai kondisi acuan untuk menentukan perubahan medan magnet pada setiap rangkaian pengukuran. Pemeriksaan dilakukan selama 60 detik dengan tiga kali pengulangan pada kelompok pengujian boraks, formalin, NaCl, dan MSG. Hasil perekaman baseline ditunjukkan pada Gambar 4.6.





Gambar 4.6 Kestabilan sinyal baseline medan magnet pada kelompok pengujian boraks, formalin, NaCl, dan MSG selama 60 detik dengan tiga kali pengulangan.

Berdasarkan Gambar 4.6, sinyal pada setiap kelompok berfluktuasi dalam rentang yang relatif sempit selama periode pengukuran. Ketiga pengulangan juga menunjukkan pola yang berdekatan dan tidak memperlihatkan kecenderungan kenaikan atau penurunan yang jelas terhadap waktu. Hal ini menunjukkan bahwa sinyal awal cukup stabil untuk digunakan sebagai acuan dalam perhitungan perubahan medan magnet.

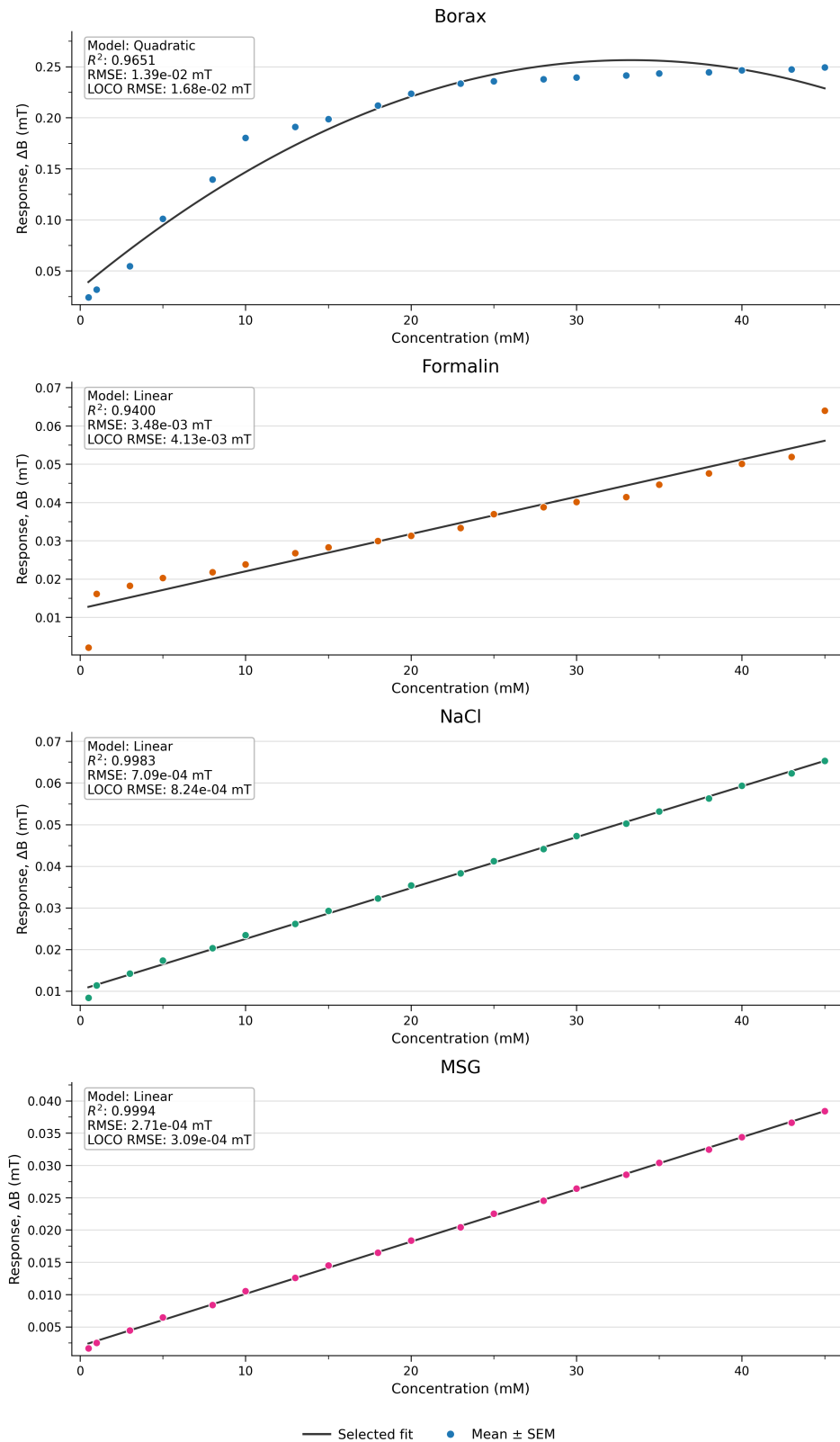
Kestabilan baseline selanjutnya dilihat berdasarkan nilai koefisien variasi (CV) dan simpangan baku derau (*noise SD*). Ringkasan nilai yang diperoleh ditampilkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Ringkasan parameter kestabilan baseline

Kelompok	Mean (mT)	CV (%)	Noise SD (mT)
Boraks	0,734598	0,004	$1,49 \times 10^{-4}$
Formalin	0,716628	0,002	$1,27 \times 10^{-4}$
NaCl	0,499294	0,002	$3,86 \times 10^{-4}$
MSG	0,570063	0,001	$5,18 \times 10^{-5}$

Nilai CV pada seluruh kelompok berada pada rentang 0,001–0,004%, sedangkan nilai *noise SD* berada pada orde 10^{-5} – 10^{-4} mT. Nilai tersebut menunjukkan bahwa perubahan sinyal selama perekaman baseline relatif kecil. Rata-rata baseline pada Tabel 4.3 digunakan sebagai acuan untuk rangkaian pengukuran masing-masing dan tidak ditafsirkan sebagai respons sensor terhadap sampel.

Setelah baseline ditentukan, respons pengukuran dinyatakan sebagai perubahan medan magnet terhadap kondisi awal, yaitu ΔB , sesuai dengan Persamaan 3.1. Penerapan koreksi ini bertujuan agar hasil pengukuran menunjukkan perubahan relatif setelah material aktif berinteraksi dengan sampel. Contoh sinyal terkoreksi pada konsentrasi 0,5 mM, 15 mM, dan 45 mM ditunjukkan pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Sinyal perubahan medan magnet terkoreksi baseline pada konsentrasi 0,5 mM, 15 mM, dan 45 mM untuk boraks, formalin, NaCl, dan MSG.

Sinyal terkoreksi pada Gambar 4.7 terlihat relatif stabil selama waktu akuisisi. Pada setiap kelompok, perubahan tingkat konsentrasi diikuti oleh perbedaan nilai ΔB . Konsentrasi yang lebih tinggi secara umum menghasilkan perubahan medan magnet yang lebih besar. Pola ini menunjukkan bahwa respons yang diperoleh tidak hanya berasal dari fluktuasi sinyal awal, tetapi berkaitan dengan perubahan kondisi pengukuran setelah sampel diberikan.

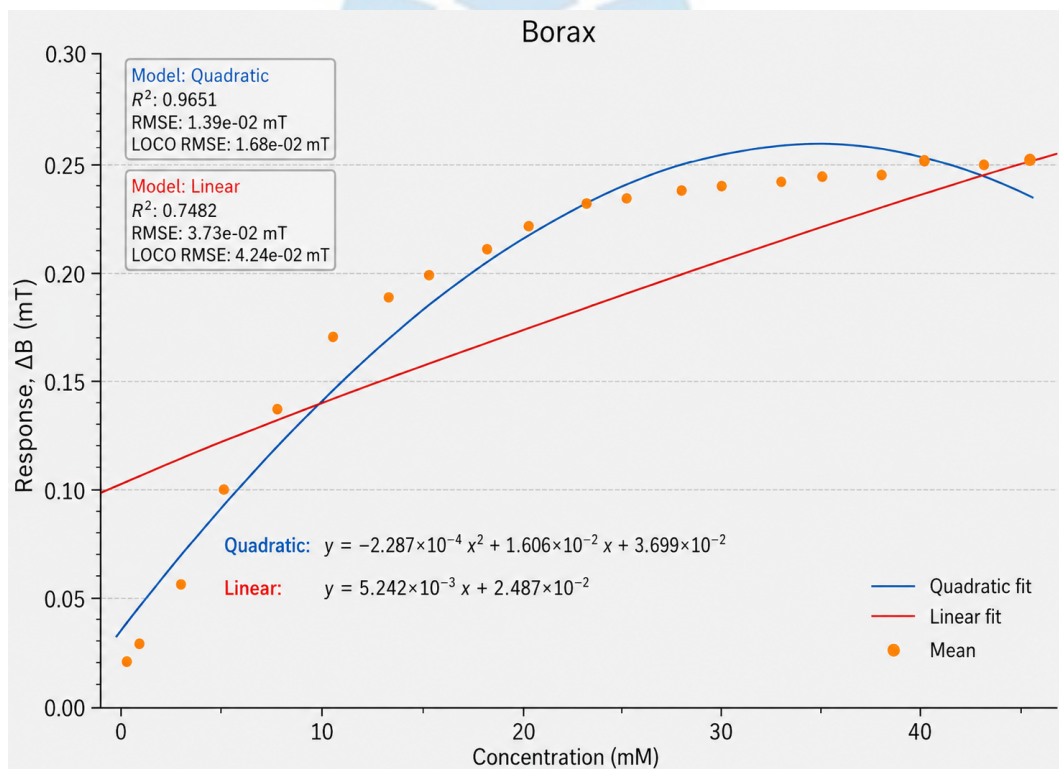
Fluktuasi kecil masih terlihat pada setiap kurva, tetapi besarnya lebih rendah dibandingkan perbedaan respons antar tingkat konsentrasi. Dengan demikian, nilai rata-rata ΔB selama periode akuisisi dapat digunakan untuk menyusun hubungan antara konsentrasi dan respons sensor. Perbedaan besar respons antara boraks dan bahan pembanding selanjutnya dibahas secara khusus pada bagian selektivitas sensor.

4.3.2 Respons Sensor GMR terhadap Variasi Konsentrasi Boraks

Pengujian larutan boraks dilakukan pada 20 variasi konsentrasi dengan rentang 0,5–45 mM. Setiap konsentrasi diukur sebanyak tiga kali menggunakan nanofiber $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVA-GA/kurkumin}$ sebagai material aktif pada sensor. Respons sensor dinyatakan dalam bentuk perubahan medan magnet (ΔB) terhadap *baseline*. *Baseline* merupakan nilai awal medan magnet sebelum sampel diberikan dan digunakan sebagai nilai acuan dalam pengukuran. Nilai dari tiga kali pengulangan kemudian dirata-ratakan untuk memperoleh respons pada masing-masing konsentrasi.

Untuk mengetahui pola hubungan antara konsentrasi boraks dan respons sensor, data hasil pengukuran dibandingkan menggunakan dua model, yaitu regresi linear dan regresi polinomial orde dua. Regresi linear menggambarkan hubungan data dalam bentuk garis lurus, sedangkan regresi polinomial orde dua menghasilkan kurva sehingga dapat mengikuti perubahan pola data yang tidak sepenuhnya linear. Hasil perbandingan kedua model ditunjukkan pada Gambar 4.8.

Berdasarkan Gambar 4.8, peningkatan konsentrasi boraks secara umum diikuti



Gambar 4.8 Respons sensor GMR terhadap variasi konsentrasi boraks dengan perbandingan regresi linear dan regresi polinomial orde dua. Titik berwarna oranye menunjukkan nilai rata-rata hasil pengukuran, garis merah menunjukkan regresi linear, dan garis biru menunjukkan regresi polinomial orde dua.

oleh peningkatan nilai ΔB . Pada konsentrasi 0,5 mM diperoleh respons sebesar 0,0240 mT. Respons meningkat menjadi 0,1803 mT pada konsentrasi 10 mM dan 0,2236 mT pada konsentrasi 20 mM. Pada konsentrasi 45 mM diperoleh respons sebesar 0,2494 mT. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan konsentrasi boraks memberikan perubahan medan magnet yang dapat diamati oleh sensor GMR.

Meskipun nilai ΔB terus meningkat, besar peningkatannya tidak sama pada seluruh rentang konsentrasi. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.8. Pada konsentrasi rendah hingga menengah, titik-titik hasil pengukuran menunjukkan peningkatan respons yang cukup besar. Setelah konsentrasi mencapai sekitar 20–25 mM, respons masih meningkat, tetapi perubahan antar konsentrasi menjadi semakin kecil. Pola tersebut menyebabkan respons tidak membentuk garis lurus pada seluruh rentang pengukuran dan mulai menunjukkan kecenderungan melandai pada konsentrasi yang lebih tinggi.

Sebagai pembandingan awal, data dimodelkan menggunakan regresi linear. Model ini digunakan untuk melihat kemampuan garis lurus dalam menggambarkan hubungan antara konsentrasi boraks dan respons sensor. Persamaan regresi linear yang diperoleh adalah

$$\Delta B = 0,00455C + 0,09019, \quad (4.1)$$

dengan C merupakan konsentrasi boraks dalam satuan mM. Model linear menghasilkan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,7482. Koefisien determinasi merupakan nilai yang menunjukkan seberapa baik suatu model dapat mengikuti pola data hasil pengukuran. Nilai R^2 yang semakin mendekati 1 menunjukkan bahwa model semakin mampu menggambarkan data eksperimen.

Model linear juga menghasilkan nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) sebesar 0,0373 mT. RMSE merupakan ukuran rata-rata kesalahan antara nilai yang dihitung oleh model dan nilai hasil pengukuran. Semakin kecil nilai RMSE, maka semakin kecil pula perbedaan antara model dengan data eksperimen. Selain itu,

diperoleh nilai *Leave-One-Concentration-Out Root Mean Square Error* (LOCO RMSE) sebesar 0,0424 mT. LOCO merupakan pengujian model dengan mengeluarkan satu tingkat konsentrasi secara bergantian, kemudian model digunakan untuk memperkirakan data pada konsentrasi yang dikeluarkan tersebut. Nilai ini digunakan untuk melihat kemampuan model ketika digunakan pada data yang tidak ikut membentuk model.

Secara visual, keterbatasan regresi linear dapat dilihat dari garis merah pada Gambar 4.8. Pada beberapa bagian, terutama pada konsentrasi rendah hingga menengah, garis linear berada cukup jauh dari titik hasil pengukuran. Pada konsentrasi yang lebih tinggi, garis linear juga tetap meningkat dengan kemiringan yang sama, sedangkan data eksperimen mulai menunjukkan pola yang melandai. Hal tersebut menunjukkan bahwa satu garis lurus belum dapat mengikuti keseluruhan bentuk respons boraks pada rentang konsentrasi yang diuji.

Data yang sama kemudian dimodelkan menggunakan regresi polinomial orde dua. Model ini digunakan karena bentuk kurvanya dapat mengikuti perubahan respons yang meningkat cukup besar pada konsentrasi rendah hingga menengah dan kemudian mulai melandai pada konsentrasi yang lebih tinggi. Persamaan regresi polinomial orde dua yang diperoleh adalah

$$\Delta B = -2,02 \times 10^{-4} C^2 + 0,01345C + 0,03236. \quad (4.2)$$

Regresi polinomial orde dua menghasilkan nilai R^2 sebesar 0,9651, RMSE sebesar 0,0139 mT, dan LOCO RMSE sebesar 0,0168 mT. Pada Gambar 4.8, kurva polinomial yang ditunjukkan oleh garis biru terlihat lebih mengikuti perubahan titik-titik hasil pengukuran dibandingkan garis regresi linear.

Perbandingan kedua model menunjukkan bahwa regresi polinomial orde dua lebih sesuai untuk menggambarkan hubungan antara konsentrasi boraks dan respons sensor pada rentang 0,5–45 mM. Nilai R^2 model polinomial sebesar 0,9651 lebih tinggi dibandingkan model linear sebesar 0,7482. Sebaliknya, nilai RMSE dan

LOCO RMSE pada model polinomial lebih rendah dibandingkan model linear. Hasil tersebut menunjukkan bahwa perbedaan antara hasil perhitungan model polinomial dan data eksperimen lebih kecil.

Perbedaan kedua model juga terlihat secara langsung pada Gambar 4.8. Garis regresi linear hanya menunjukkan kecenderungan kenaikan secara umum, sedangkan kurva polinomial lebih mampu mengikuti perubahan respons mulai dari konsentrasi rendah hingga bagian yang mulai melandai pada konsentrasi tinggi. Dengan demikian, pemilihan regresi polinomial orde dua tidak hanya didasarkan pada bentuk grafik, tetapi juga didukung oleh nilai R^2 , RMSE, dan LOCO RMSE.

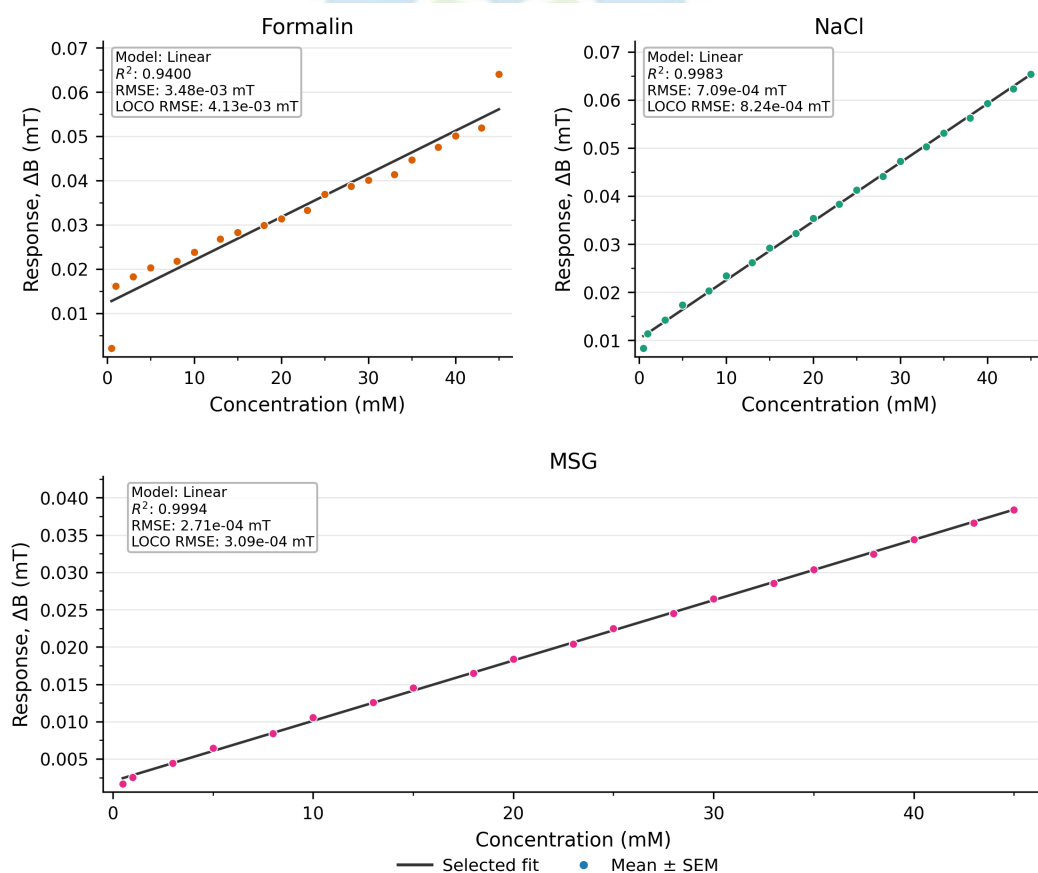
Kecenderungan kurva yang melandai menunjukkan bahwa penambahan konsentrasi boraks pada konsentrasi tinggi tidak lagi menghasilkan peningkatan ΔB sebesar pada konsentrasi rendah hingga menengah. Nilai kemiringan regresi linear sebesar 0,00455 mT/mM digunakan untuk menunjukkan sensitivitas rata-rata sensor berdasarkan pendekatan linear. Sementara itu, regresi polinomial orde dua digunakan untuk menggambarkan bentuk hubungan antara konsentrasi dan respons pada keseluruhan rentang pengujian karena lebih mampu mengikuti pola data eksperimen.

Model polinomial yang diperoleh merupakan model empiris, yaitu model yang dibentuk berdasarkan data hasil pengukuran. Oleh karena itu, persamaan tersebut hanya digunakan untuk menggambarkan respons sensor pada rentang konsentrasi yang diuji, yaitu 0,5–45 mM. Model tersebut tidak digunakan untuk memperkirakan respons sensor di luar rentang pengujian karena karakteristik sensor pada konsentrasi yang lebih rendah maupun lebih tinggi belum diuji dalam penelitian ini.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor GMR berbasis nanofiber $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVA-GA/kurkumin}$ memberikan respons yang meningkat terhadap penambahan konsentrasi boraks. Namun, peningkatan respons mulai melandai pada konsentrasi tinggi sehingga hubungan antara konsentrasi boraks dan respons sensor lebih sesuai digambarkan menggunakan regresi polinomial orde dua dibandingkan regresi linear. Perbandingan respons boraks dengan formalin, NaCl, dan MSG selanjutnya dibahas pada pengujian selektivitas sensor.

4.3.3 Selektivitas Sensor GMR terhadap Formalin, NaCl, dan MSG

Pengujian terhadap formalin, NaCl, dan MSG dilakukan untuk melihat respons sensor terhadap bahan lain selain boraks. Ketiga bahan tersebut diuji pada rentang konsentrasi yang sama, yaitu 0,5–45 mM, dengan tiga kali pengulangan pada setiap konsentrasi. Respons dinyatakan sebagai perubahan medan magnet terkoreksi baseline (ΔB). Hasil pengujian ditampilkan pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9 Respons sensor GMR terhadap variasi konsentrasi formalin, NaCl, dan MSG

Berdasarkan Gambar 4.9, formalin, NaCl, dan MSG tetap menghasilkan perubahan respons sensor seiring dengan kenaikan konsentrasi. Hal ini menunjukkan bahwa material aktif tidak hanya memberikan respons terhadap boraks. Meskipun demikian, besar respons yang dihasilkan ketiga bahan pembanding lebih rendah

dibandingkan respons boraks pada rentang konsentrasi yang sama.

Respons formalin menunjukkan kecenderungan meningkat dengan bertambahnya konsentrasi. Regresi linear menghasilkan nilai R^2 sebesar 0,9400, RMSE sebesar $3,48 \times 10^{-3}$ mT, dan LOCO RMSE sebesar $4,13 \times 10^{-3}$ mT. Pada konsentrasi tertinggi, respons formalin berada di sekitar 0,064 mT. Sebaran titik formalin terlihat lebih besar dibandingkan NaCl dan MSG, tetapi kecenderungan peningkatan respons masih dapat diamati.

Pada pengujian NaCl, hubungan antara konsentrasi dan ΔB terlihat lebih mendekati garis linear. Model yang digunakan menghasilkan nilai R^2 sebesar 0,9983, RMSE sebesar $7,09 \times 10^{-4}$ mT, dan LOCO RMSE sebesar $8,24 \times 10^{-4}$ mT. Respons NaCl pada konsentrasi 45 mM berada di sekitar 0,065 mT. Meskipun nilai akhirnya hampir sama dengan formalin, peningkatan respons NaCl berlangsung lebih teratur pada rentang konsentrasi yang diuji.

MSG menghasilkan respons paling rendah di antara ketiga bahan pembanding. Nilai ΔB meningkat secara bertahap hingga sekitar 0,038 mT pada konsentrasi 45 mM. Regresi linear memberikan nilai R^2 sebesar 0,9994, RMSE sebesar $2,71 \times 10^{-4}$ mT, dan LOCO RMSE sebesar $3,09 \times 10^{-4}$ mT. Nilai tersebut menunjukkan bahwa pola respons MSG terhadap konsentrasi dapat digambarkan dengan baik oleh model linear.

““latex

4.3.4 Respons Sensor GMR pada Ekstrak Bakso yang Dikondisikan dengan Boraks

Pengujian pada ekstrak bakso dilakukan untuk melihat apakah sensor masih dapat memberikan respons ketika boraks berada di dalam sampel pangan. Kondisi ini berbeda dengan pengujian larutan boraks murni karena ekstrak bakso mengandung komponen lain, seperti protein, lemak, garam, dan bahan terlarut lainnya. Kumpulan komponen tersebut disebut sebagai matriks pangan. Matriks pangan dapat memen-

garuhi hasil pengukuran karena komponen di dalam sampel ikut berada di sekitar material aktif dan sensor selama proses pengujian.

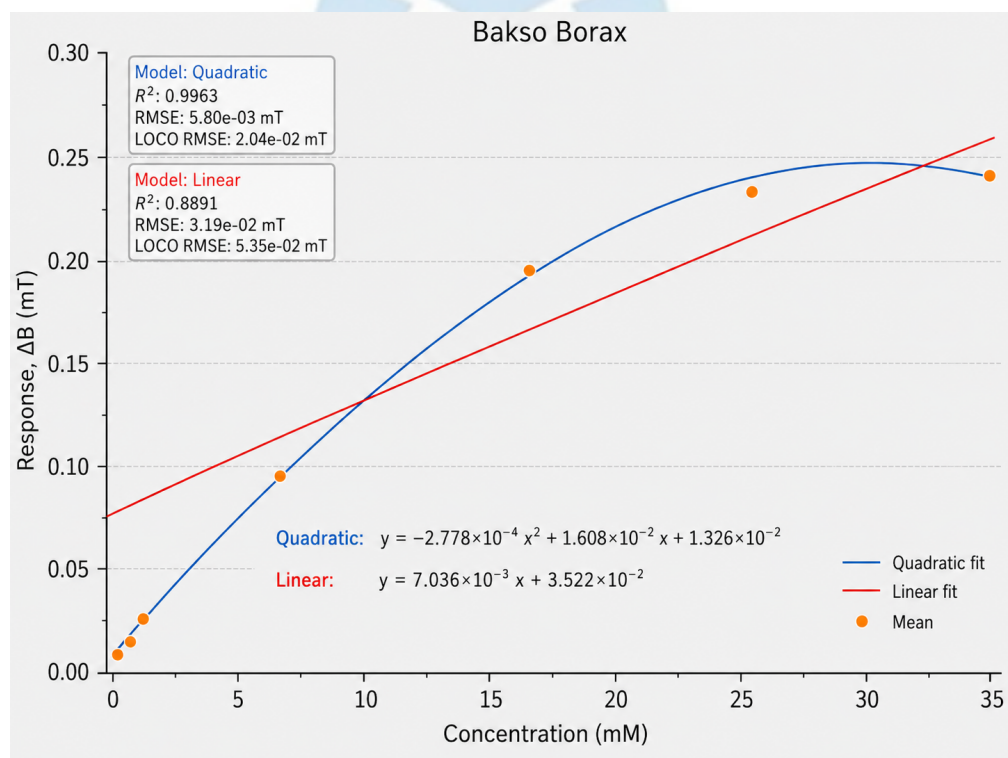
Sampel yang digunakan terdiri atas ekstrak bakso tanpa penambahan boraks sebagai kontrol 0 mM, kemudian ekstrak bakso yang dikondisikan dengan boraks pada konsentrasi 0,5; 1; 5; 15; 25; dan 35 mM. Sampel kontrol digunakan untuk melihat respons awal yang berasal dari ekstrak bakso sebelum boraks ditambahkan. Respons sensor dinyatakan sebagai perubahan medan magnet (ΔB) terhadap *baseline*. *Baseline* merupakan nilai medan magnet awal yang digunakan sebagai acuan sebelum perubahan akibat sampel diamati.

Hubungan antara konsentrasi boraks dalam ekstrak bakso dan respons sensor ditunjukkan pada Gambar 4.10. Pada gambar tersebut, data hasil pengukuran dibandingkan menggunakan regresi linear dan regresi polinomial orde dua. Regresi linear menggambarkan hubungan data menggunakan garis lurus, sedangkan regresi polinomial orde dua menggunakan garis berbentuk kurva sehingga dapat mengikuti pola data yang mengalami pelandaian.

Berdasarkan Gambar 4.10, nilai ΔB meningkat ketika konsentrasi boraks di dalam ekstrak bakso ditambah. Pada sampel kontrol 0 mM, sensor masih memberikan respons kecil. Respons tersebut menunjukkan bahwa ekstrak bakso tanpa penambahan boraks tetap memberikan pengaruh terhadap medan magnet yang terbaca. Setelah boraks ditambahkan, nilai ΔB meningkat dengan cukup jelas.

Peningkatan respons terlihat cukup besar dari konsentrasi rendah sampai sekitar 15 mM. Pada konsentrasi 25 mM dan 35 mM, respons masih bertambah, tetapi kenaikannya tidak sebesar pada bagian awal pengujian. Pola tersebut dapat dilihat dari titik hasil pengukuran yang mulai membentuk bagian yang lebih landai pada konsentrasi tinggi. Dengan demikian, hubungan antara konsentrasi boraks dalam ekstrak bakso dan respons sensor tidak membentuk garis lurus pada seluruh rentang pengujian.

Untuk melihat kemampuan model garis lurus dalam mengikuti data, hasil



Gambar 4.10 Respons sensor GMR terhadap ekstrak bakso yang dikondisikan dengan boraks menggunakan regresi linear dan regresi polinomial orde dua. Titik berwarna oranye menunjukkan nilai rata-rata hasil pengukuran, garis merah menunjukkan regresi linear, dan garis biru menunjukkan regresi polinomial orde dua.

pengukuran terlebih dahulu dibandingkan menggunakan regresi linear. Persamaan regresi linear yang diperoleh adalah

$$\Delta B = 7,036 \times 10^{-3} C + 3,522 \times 10^{-2}, \quad (4.3)$$

dengan C merupakan konsentrasi boraks dalam satuan mM. Regresi linear menghasilkan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,8891. Koefisien determinasi menunjukkan seberapa dekat pola yang dibuat oleh model terhadap data hasil pengukuran. Nilai yang semakin mendekati 1 menunjukkan bahwa model semakin mampu mengikuti perubahan data.

Model linear menghasilkan nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) sebesar $3,19 \times 10^{-2}$ mT. RMSE merupakan nilai yang menunjukkan besar rata-rata selisih antara hasil perhitungan model dan hasil pengukuran. Nilai RMSE yang lebih kecil menunjukkan bahwa hasil perhitungan model semakin dekat dengan data eksperimen. Selain itu, diperoleh *Leave-One-Concentration-Out Root Mean Square Error* (LOCO RMSE) sebesar $5,35 \times 10^{-2}$ mT. LOCO RMSE digunakan untuk melihat kemampuan model ketika salah satu tingkat konsentrasi tidak digunakan saat model dibentuk, kemudian konsentrasi tersebut diperkirakan menggunakan data konsentrasi lainnya.

Pada Gambar 4.10, garis regresi linear yang berwarna merah hanya dapat menunjukkan kecenderungan kenaikan respons secara umum. Pada konsentrasi rendah hingga menengah, beberapa titik hasil pengukuran berada cukup jauh dari garis tersebut. Pada konsentrasi yang lebih tinggi, garis linear tetap naik dengan kemiringan yang sama, sedangkan hasil pengukuran mulai menunjukkan kecenderungan melandai. Hal ini menunjukkan bahwa regresi linear belum dapat mengikuti keseluruhan bentuk respons ekstrak bakso yang dikondisikan dengan boraks.

Data yang sama kemudian dimodelkan menggunakan regresi polinomial orde dua. Persamaan yang diperoleh adalah

$$\Delta B = -2,778 \times 10^{-4} C^2 + 1,608 \times 10^{-2} C + 1,326 \times 10^{-2}. \quad (4.4)$$

Regresi polinomial orde dua menghasilkan nilai R^2 sebesar 0,9963, RMSE sebesar $5,80 \times 10^{-3}$ mT, dan LOCO RMSE sebesar $2,04 \times 10^{-2}$ mT. Nilai R^2 model polinomial lebih tinggi dibandingkan model linear, yaitu 0,9963 dibandingkan 0,8891. Sementara itu, nilai RMSE dan LOCO RMSE pada model polinomial lebih kecil dibandingkan model linear.

Perbedaan tersebut juga dapat dilihat langsung pada Gambar 4.10. Kurva polinomial yang berwarna biru lebih dekat dengan titik-titik hasil pengukuran mulai dari konsentrasi rendah hingga konsentrasi tinggi. Kurva tersebut juga dapat mengikuti bagian respons yang mulai melandai, sedangkan garis linear tidak dapat mengikuti perubahan tersebut dengan baik. Berdasarkan bentuk grafik dan hasil perhitungan, regresi polinomial orde dua lebih sesuai untuk menggambarkan hubungan antara konsentrasi boraks dalam ekstrak bakso dan respons sensor pada rentang konsentrasi yang diuji.

Jika dibandingkan dengan pengujian larutan boraks murni, respons pada ekstrak bakso menunjukkan kecenderungan yang serupa. Pada kedua pengujian, respons meningkat cukup besar pada konsentrasi rendah hingga menengah, kemudian kenaikannya menjadi lebih kecil pada konsentrasi tinggi. Meskipun polanya serupa, nilai respons antara larutan boraks murni dan ekstrak bakso tidak sama. Perbedaan tersebut dapat terjadi karena pada ekstrak bakso terdapat matriks pangan yang tidak ditemukan pada larutan boraks murni.

Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa keberadaan komponen lain di dalam ekstrak bakso tidak menghilangkan respons sensor terhadap penambahan boraks. Sensor masih dapat membedakan perubahan respons ketika konsentrasi boraks ditingkatkan. Namun, hasil ini belum dapat digunakan untuk menyatakan bahwa sensor dapat menentukan kadar boraks pada seluruh jenis pangan. Pengujian yang dilakukan masih menggunakan ekstrak bakso yang sengaja dikondisikan dengan

konsentrasi boraks yang telah diketahui, sehingga hasilnya lebih tepat digunakan sebagai pengujian awal kemampuan sensor pada sampel pangan.

Model polinomial yang diperoleh juga hanya digunakan pada rentang konsentrasi 0–35 mM yang diuji dalam penelitian ini. Model tersebut tidak digunakan untuk memperkirakan respons pada konsentrasi di luar rentang pengujian karena perilaku sensor pada kondisi tersebut belum diketahui. Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor GMR berbasis nanofiber $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVA-GA/kurkumin}$ masih memberikan respons yang terukur terhadap penambahan boraks meskipun pengujian dilakukan pada ekstrak bakso. ““

