

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

1.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil kalibrasi dan validasi multi sensor RS485 menggunakan larutan standar pH dan EC, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Perbedaan pembacaan sensor RS485 terhadap nilai referensi laboratorium berbeda secara signifikan antara parameter pH dan EC. Sensor pH menunjukkan perbedaan yang sangat kecil: selisih maksimum hanya 0,10 unit pada buffer pH 7,00 (error 1,43%), sedangkan pada buffer pH 4,00 dan 10,00 tidak terdapat perbedaan sama sekali (error 0,00%). Sebaliknya, sensor EC menunjukkan perbedaan yang besar dan meningkat seiring konsentrasi: pada EC 84 $\mu\text{S/cm}$ selisih berkisar 19–24 $\mu\text{S/cm}$ (error 23–29%), pada EC 1.413 $\mu\text{S/cm}$ selisih 175–181 $\mu\text{S/cm}$ (error 12–13%), dan pada EC 12.880 $\mu\text{S/cm}$ selisih melonjak hingga lebih dari 7.000 $\mu\text{S/cm}$ (error 58–60%). Pola ini mengindikasikan keterbatasan rentang linear sensor EC pada konsentrasi ion yang sangat tinggi.
2. Model kalibrasi regresi linear yang diperoleh berbeda karakteristiknya antara sensor pH dan EC. Untuk sensor pH, persamaan kalibrasi adalah $Y = 0,0359 + 0,9996X$: nilai slope 0,9996 (mendekati 1) menunjukkan tidak adanya gain error yang berarti, dan intercept 0,0359 mencerminkan systematic bias yang dapat diabaikan secara praktis, sehingga sensor pH tidak memerlukan koreksi besar di lapangan. Untuk sensor EC, persamaan kalibrasi adalah $Y = 2,5487X - 863,036$: nilai slope 2,5487

mengindikasikan gain error yang besar — sensor secara sistematis membaca nilai EC jauh lebih rendah dari nilai aktual dan memerlukan faktor koreksi $\pm 2,5\times$, sedangkan intercept negatif $-863,036$ menunjukkan offset besar yang mengisyaratkan model linear kurang representatif di rentang konsentrasi sangat rendah mendekati nol.

3. Evaluasi statistik menunjukkan perbedaan kelayakan yang nyata antara sensor pH dan EC. Sensor pH memiliki akurasi sangat baik ($R^2 = 0,9996$; MAPE = 0,48%; RMSE = 0,058 unit pH; akurasi 99,52%), memenuhi kategori sangat akurat berdasarkan kriteria (Helsel et al., 2020) dan sangat baik berdasarkan kriteria (Kurnia Informatika et al., 2022a), sehingga layak digunakan langsung sebagai instrumen pengukuran pH tanah di lapangan pertanian presisi. Sensor EC secara keseluruhan berkategori layak ($R^2 = 0,9865$; MAPE = 32%; RMSE = 4.369 $\mu\text{S}/\text{cm}$; akurasi 68%), namun analisis per titik konsentrasi menunjukkan kinerja yang sangat berbeda: baik pada rentang konsentrasi menengah (MAPE 12–13% untuk EC 1.413 $\mu\text{S}/\text{cm}$), layak pada konsentrasi rendah (MAPE 23–29% untuk EC 84 $\mu\text{S}/\text{cm}$), dan buruk pada konsentrasi tinggi (MAPE 58–60% untuk EC 12.880 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Sensor EC direkomendasikan digunakan pada rentang $\leq 2.000 \mu\text{S}/\text{cm}$ setelah dikoreksi dengan persamaan kalibrasi $Y = 2,5487X - 863,036$, dan tidak disarankan untuk tanah dengan salinitas sangat tinggi tanpa pengembangan model kalibrasi lanjutan.

1.2. Saran

Berdasarkan hasil dan keterbatasan penelitian ini, disampaikan saran-saran sebagai berikut:

1. Pengembangan model kalibrasi non-linear untuk sensor EC. Mengingat respons sensor EC bersifat non-linear pada konsentrasi tinggi, penelitian lanjutan disarankan mengeksplorasi model kalibrasi polinomial orde-2 atau fungsi eksponensial guna mengakomodasi saturasi respons sensor di atas 2.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.
2. Penambahan kompensasi suhu secara real-time. Suhu larutan dicatat namun belum diintegrasikan ke dalam model kalibrasi dalam penelitian ini. Penelitian lanjutan disarankan memasukkan variabel suhu sebagai kovariat, mengingat konduktivitas listrik sangat sensitif terhadap perubahan suhu.
3. Validasi menggunakan data independen. Penelitian lanjutan sebaiknya memisahkan data kalibrasi dan data validasi, atau menerapkan metode k-fold cross-validation, untuk menghasilkan evaluasi akurasi model yang lebih representatif.
4. Pengujian pada sampel tanah langsung. Untuk memvalidasi persamaan kalibrasi pada kondisi nyata, disarankan melakukan pengujian pada sampel tanah dengan berbagai jenis tekstur dan tingkat salinitas yang mewakili kondisi lahan di NTT, khususnya pada musim kemarau ketika nilai EC tanah cenderung meningkat.

5. Penambahan titik kalibrasi EC pada rentang menengah-tinggi. Disarankan menambahkan minimal satu titik kalibrasi antara 1.413 dan 12.880 $\mu\text{S}/\text{cm}$ untuk mendeteksi lebih awal titik di mana respons sensor mulai mengalami saturasi dan meningkatkan presisi model kalibrasi.
6. Penelitian ini hanya menguji parameter **pH dan Electrical Conductivity (EC)**. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan melakukan **kalibrasi dan validasi terhadap parameter Nitrogen (N), Fosfor (P), dan Kalium (K)** yang juga tersedia pada multi sensor RS485, sehingga kinerja seluruh parameter sensor dapat diketahui secara menyeluruh sebelum diterapkan pada pengukuran di lapangan.