

SISTEM DETEKSI UNSUR HARA MIKRO ESSENSIAL Fe DAN Mn PADA TANAH UNTUK PENGEMBANGAN SISTEM PERTANIAN CERDAS DAN PRESISI

A DETECTION SYSTEM FOR ESSENTIAL MICRONUTRIENTS Fe AND Mn FOR THE DEVELOPMENT OF SMART AND PRECISION AGRICULTURE

Ratih Kurniasih dan Herik Sugeru*

Fakultas Teknik Industri, Universitas Gunadarma, Kota Depok, Indonesia

* Corresponding Author. E-mail address: dulkarim@gmail.com

PERKEMBANGAN

ARTIKEL:

Diterima: 15 Desember 2023

Direvisi: 10 September 2024

Disetujui: 30 November 2024

KEYWORDS:

Detection system, EC, micronutrients, pH, redox potential.

ABSTRACT

Essential micronutrients in soil are very important for plant growth. Micronutrients are needed in small amounts, so they must be measured precisely in the soil to avoid deficiency or toxicity in plants. In the development of a smart and precise agricultural world, nutrient detection systems are one of the appropriate technologies. The purpose of the research conducted is to make a prototype of an essential micro-nutrient detection system in soil with high accuracy and get an optimization model for an essential micro-nutrient detection system in soil based on redox potential. The research stages carried out are designing hardware in the form of prototype micro-nutrient detection devices and software design. Furthermore, calibration and validation tests of the device were carried out in several stages, namely calibration and validation tests using portable pH and EC meters. The approximation of the calibration and validation test is used for the source code of the nutrient detection system. The approximation model used in this prototype is a cubic regression equation. From the approximation model which is used, it can produce a prototype of an essential micro-nutrient detection system with a high percentage of accuracy in the pH indicator which is 95.63%. In comparison, the EC indicator has an accuracy of 79.64%. Based on the Eh-pH value approach, it was found that at 7 observation locations it showed that there were 4 location points where the Fe element was in the form of Fe^{2+} and there were 3 observation location points where the Fe element was in the form of $Fe(OH)_3$. The pH-Eh diagram for the micronutrient Mn shows that the available Mn element is in the form of Mn^{2+} .

ABSTRAK

Unsur hara mikro esensial dalam tanah sangat penting untuk pertumbuhan tanaman. Unsur hara mikro dibutuhkan dalam jumlah sedikit sehingga harus terukur secara presisi di dalam tanah agar tidak terjadi defisiensi ataupun toksisitas pada tanaman. Dalam perkembangan dunia pertanian yang cerdas dan presisi maka sistem deteksi hara menjadi salah satu teknologi yang tepat guna untuk mengatasi permasalahan analisis di laboratorium yang mahal, lama dan tidak spesifik lokasi. Tujuan dari penelitian yang dilakukan yaitu mendapatkan model optimasi untuk sistem deteksi unsur hara mikro esensial dalam tanah berbasis potensial redoks. Tahapan penelitian yang dilakukan yaitu merancang hardware berupa prototipe alat deteksi unsur hara mikro dan perancangan software. Selanjutnya uji kalibrasi dan validasi alat dilakukan dalam beberapa tahap, yaitu uji kalibrasi dan validasi alat menggunakan alat ukur portabel pH dan EC meter. Aproksimasi dari uji kalibrasi dan validasi digunakan untuk *source code* pada sistem deteksi hara. Model aproksimasi yang digunakan pada prototipe ini adalah persamaan regresi kubik. Dari model aproksimasi yang digunakan maka dapat menghasilkan prototipe sistem deteksi unsur hara mikro esensial dengan persentase akurasi yang tinggi pada indikator pH yaitu sebesar 95.63% sedangkan pada indikator EC memiliki akurasi sebesar 79.64%. Berdasarkan pendekatan nilai Eh-pH maka didapatkan bahwa pada 7 lokasi pengamatan menunjukkan terdapat 4 titik lokasi yang unsur Fe berada dalam bentuk Fe^{2+} dan terdapat 3 titik lokasi pengamatan yang unsur Fe berada dalam bentuk $Fe(OH)_3$. Pada diagram pH-Eh untuk unsur hara mikro Mn menunjukkan bahwa unsur Mn tersedia berada dalam bentuk Mn^{2+} .

KATA KUNCI:

EC, pH, potensial redoks, sistem deteksi, unsur hara mikro.

1. PENDAHULUAN

Unsur hara mikro esensial dalam tanah dibutuhkan oleh tanaman meskipun dalam jumlah yang relatif sedikit. Defisiensi maupun toksisitas unsur hara mikro di dalam tanah berdampak negatif tidak hanya untuk lingkungan tetapi juga dapat mengganggu pertumbuhan tanaman. Kadar hara mikro harus terukur secara presisi di dalam tanah seperti yang disampaikan oleh Duhan *et al.*, (2017) agar tidak terjadi defisiensi ataupun toksisitas pada tanaman (Mikula *et al.*, 2020). Pendeteksian unsur hara mikro selama ini hanya dilakukan dengan uji di laboratorium, sedangkan pengujian di laboratorium membutuhkan waktu yang relatif lebih lama dan biaya yang mahal. Dalam perkembangan dunia pertanian yang cerdas dan presisi maka pemanfaatan sensor menjadi salah satu teknologi yang tepat guna.

Pendeteksian hara pernah dilakukan oleh Dudala *et al.*, (2020) untuk mendeteksi unsur hara tanah dengan mengintegrasikan nilai nitrit, pH dan EC tanah menggunakan teknologi mikrofluida dengan sensor cahaya dan elektroda pH. Ketersediaan hara mikro bergantung pada pH, kesuburan tanah dan EC tanah sehingga sistem integrasi ini dirancang (Dudala *et al.*, 2020; Barker *et al.*, 2015). Namun metode ini hanya mendapatkan output berupa nilai pH, EC dan kadar nitrit dalam tanah.

Pendekatan nilai pH dan EC tanah untuk mendapatkan keluaran nilai Eh (redoks) dan ketersediaan unsur hara mikro esensial dalam tanah dapat dilakukan dengan pembuatan model optimasi. Sayekti (2012) menyatakan bahwa model optimasi merupakan penyusunan model suatu sistem berdasarkan keadaan sesungguhnya yang dapat diubah menjadi model matematis untuk mendapatkan pengambilan keputusan yang ingin dicapai.

Pendeteksian unsur hara mikro esensial dalam tanah secara cerdas dan presisi dapat tercapai dengan adanya sistem deteksi yang berbasis *Internet of Things* berupa sensor spesifik sehingga perlu mengembangkan algoritma untuk mendapatkan model dengan tingkat akurasi dan presisi terbaik. Penggunaan sensor spesifik sebagai pendekatan teknologi untuk menentukan ketersediaan unsur hara mikro masih belum banyak dilakukan. Dalam penelitian Pelegrino *et al.* (2019) menggunakan metode berupa pendekatan *proximal sensor portable X-ray fluorescence (pXRF) spectrometry* dengan menggunakan algoritma *random forest*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa output yang dihasilkan berupa ketersediaan Fe, Mn, Cu, dan Zn.

Sheeba *et al.*, (2022) mengklasifikasikan unsur hara mikro dalam tanah dengan menggunakan metode *Extreme Learning Method (ELM)* algoritma. Masukan data tanah berupa Fe, Mn, Cu, Zn, S, K, N, C, pH dan EC tanah didapatkan dari hasil analisis di laboratorium. Hasil penelitian menunjukkan tanah memiliki nilai EC yang normal, K sebanyak 35%, N sebanyak 80%, S sebanyak 75%, dan Mn, B, Zn dan Cu dalam jumlah sangat sedikit. Eh dan pH tanah juga secara bersama-sama berpengaruh terhadap ketersediaan unsur hara mikro Mn, Cu dan Zn baik secara langsung maupun tidak langsung (Husson, 2013). Kelarutan akan semakin menurun dengan peningkatan pH dari 4 ke 8, sehingga ion besi akan mengendap pada pH 6-8 (Gelyaman, 2018). Dengan demikian penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan model optimasi untuk sistem konsentrasi hara mikro esensial dalam tanah secara cerdas dan presisi.

2. BAHAN DAN METODE

2.1 Pengambilan Sampel Tanah

Penelitian dilakukan di Kebun Percobaan Kampus F7 Universitas Gunadarma, Ciracas, Jakarta Timur dan beberapa lokasi pengambilan sampel tanah. Pengambilan sampel tanah dilakukan pada 16 lokasi titik pengamatan untuk uji tanah awal dan 7 lokasi titik pengamatan pada uji tanah lanjutan. Pengambilan sampel tanah dilakukan dengan cara mengambil sampel tanah pada beberapa titik

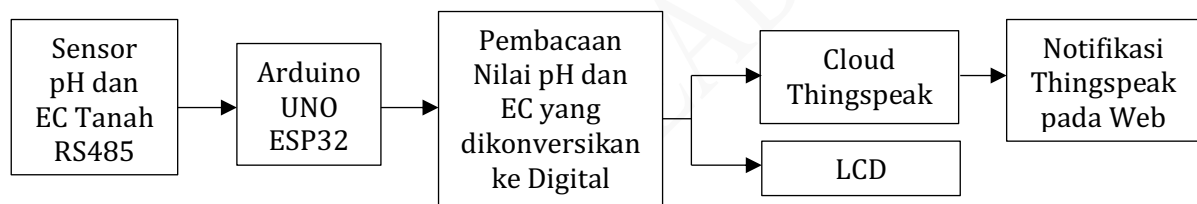
yang berbeda yang mewakili kondisi seluruh lahan tanah sedalam 10-20 cm, lalu sampel tanah dikompositkan atau dicampurkan hingga tercampur rata.

2.2 Perancangan *Hardware*

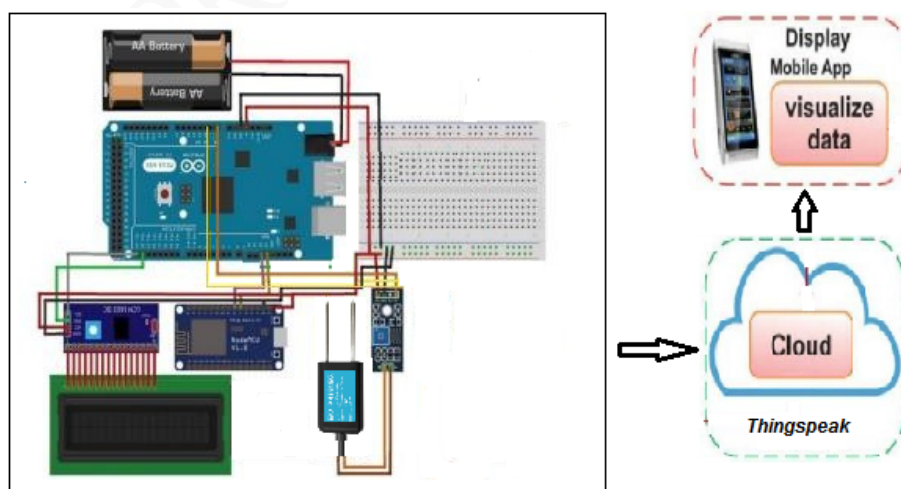
Pada penelitian ini dilakukan perancangan *hardware* dengan menggunakan sensor pH dan EC. Langkah selanjutnya yaitu pembacaan nilai pH dan EC yang kemudian dikonversikan dalam bentuk nilai digital, dan kemudian nilai numerik dikirimkan ke *Thingspeak*. Data input yang dikirimkan melalui *Thingspeak* dapat diunduh dan dikonversikan kembali untuk memprediksi nilai potensial redoks dan unsur hara mikro esensial Fe dan Mn. Diagram blok arsitektur penelitian dapat dilihat pada Gambar 1. Pada tahap perancangan *hardware* dibutuhkan peralatan dan bahan yang setiap komponen rangkaiannya dirancang seperti pada Gambar 2.

2.3 Uji Kalibrasi Perancangan *Hardware*

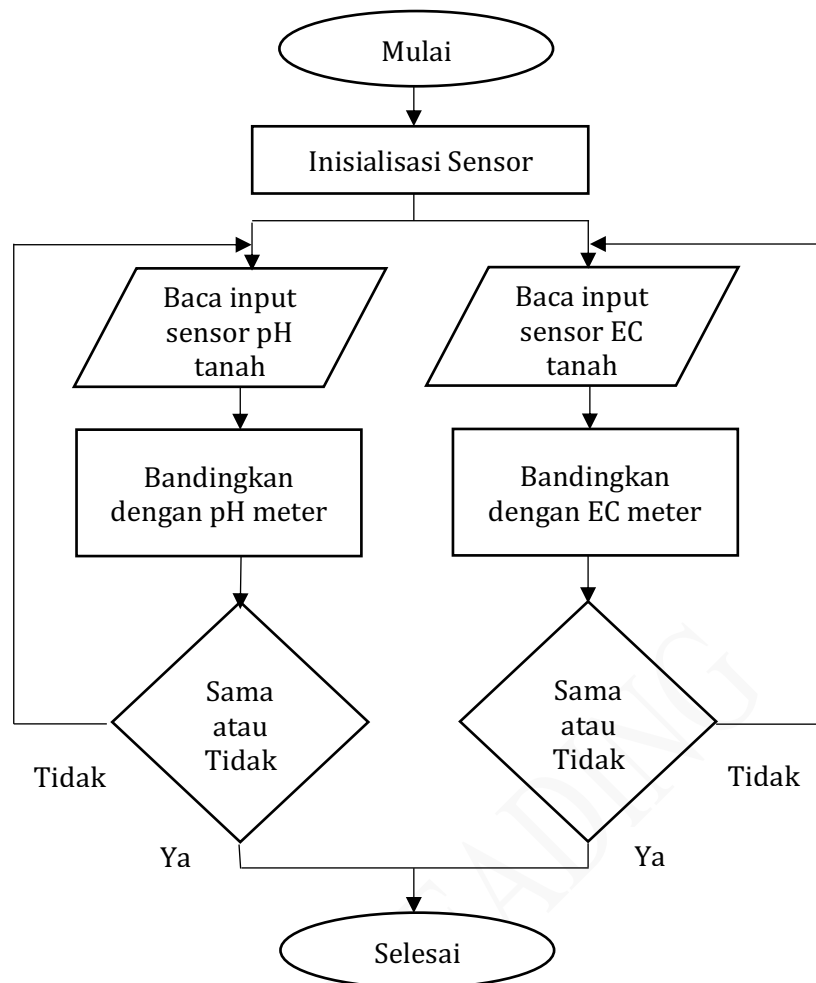
Uji kalibrasi awal dilakukan dengan membandingkan pembacaan nilai pH dan EC tanah pada prototipe dengan nilai pH dan EC tanah yang diambil menggunakan pH meter dan EC meter portabel/manual. Pembacaan nilai pH dan EC tanah dilakukan bersamaan pada 16 lokasi sampel tanah yang telah ditentukan. Tahap kalibrasi dilakukan untuk mengetahui akurasi dan presisi sensor. Tahap kalibrasi pertama dilakukan untuk mendapatkan model aproksimasi terbaik. Tahap selanjutnya dilakukan dengan uji tanah pada 7 titik lokasi pengamatan dan menghitung persentase error.



Gambar 1. Diagram Blok Arsitektur Penelitian



Gambar 2. Desain *Hardware*



Gambar 3. Diagram Alir Kalibrasi Sensor

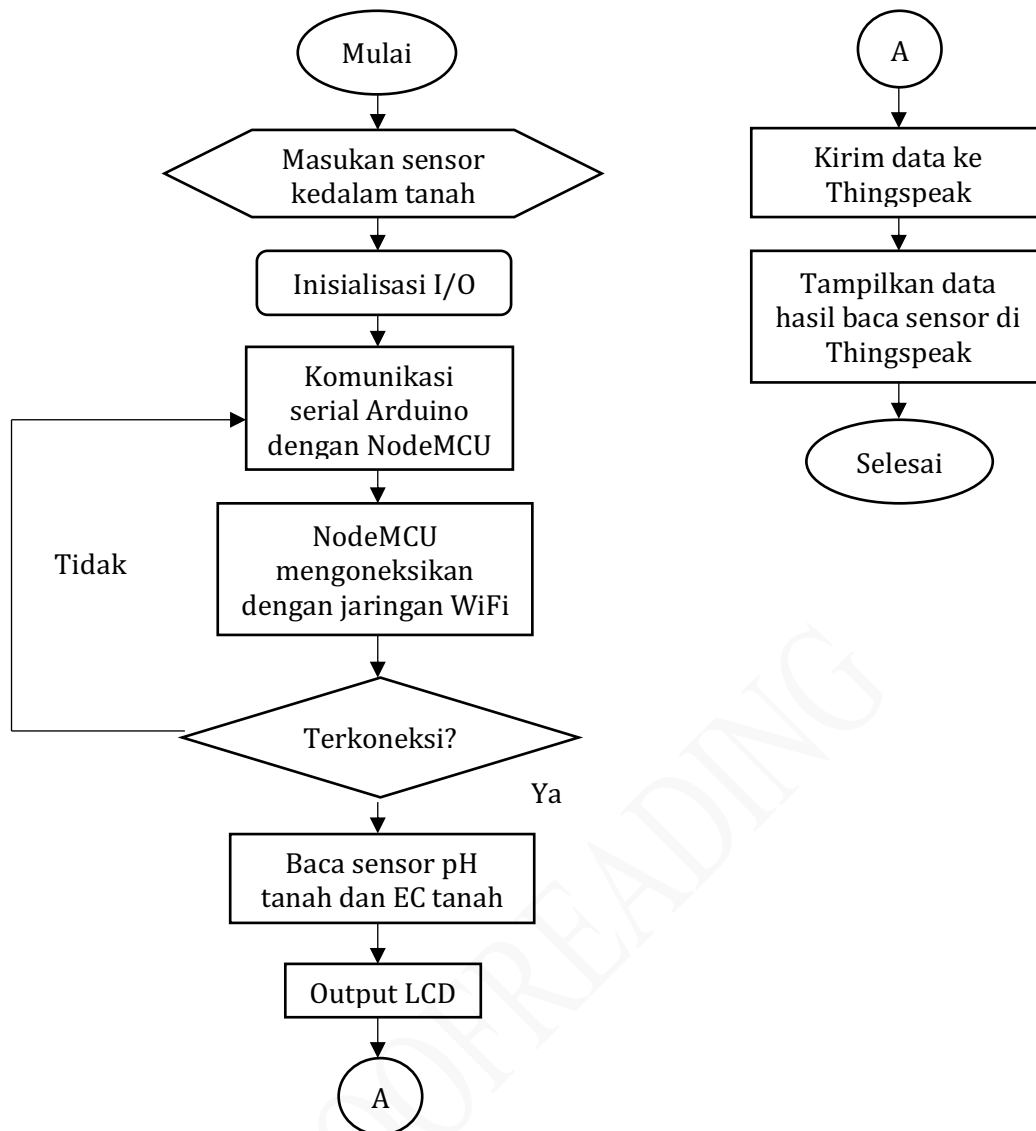
Untuk memulai proses pembacaan sensor, inisialisasi sensor dilakukan pada WEMOS ESP32 Arduino Uno. Sensor dihubungkan ke WEMOS ESP32 Arduino Uno yang terkoneksi satu sama lain. Pembacaan sensor tanah akan ditampilkan melalui LCD. Pembacaan nilai pH tanah dan EC tanah dari sensor akan dibandingkan dengan data hasil analisis pH meter dan EC meter sistem dengan alat manual. Jika nilai yang dihasilkan sama atau memiliki error dibawah 5%, maka hardware memiliki akurasi yang cukup tinggi sehingga prototipe bisa digunakan lebih lanjut. Tahap pengujian dan validasi ditunjukkan pada diagram alir kalibrasi sensor (Gambar 3).

2.4 Perancangan Software

Perancangan software dilakukan dengan melakukan pemograman untuk beberapa parameter yang digunakan dalam penelitian ini (Gambar 4). Tahapan ini dilakukan dengan tujuan memastikan hardware yang dirancang dapat digunakan dan dapat dihubungkan dengan *cloud Thingspeak*. Pada tahapan ini dilakukan uji sensor yang dimasukkan ke dalam tanah. Alur pembacaan sensor pH dan EC tanah yang dikoneksikan ke internet, lalu data hasil baca sensor ditampilkan melalui LCD. Data tersebut kemudian dikirim ke aplikasi *Thingspeak* yang bisa diakses secara *real time* jika terkoneksi WiFi.

2.5 Uji dan Validasi Software

Pengujian sistem meliputi unit testing, *performance testing*, *regression testing*, dan *UI testing*. Validasi *software* yang dilakukan dengan membandingkan data yang dihasilkan dari *software* yang telah dirangkai lalu dibandingkan dengan hasil uji tanah menggunakan alat portabel.



Gambar 4. Diagram Alir Sistem pada Software

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

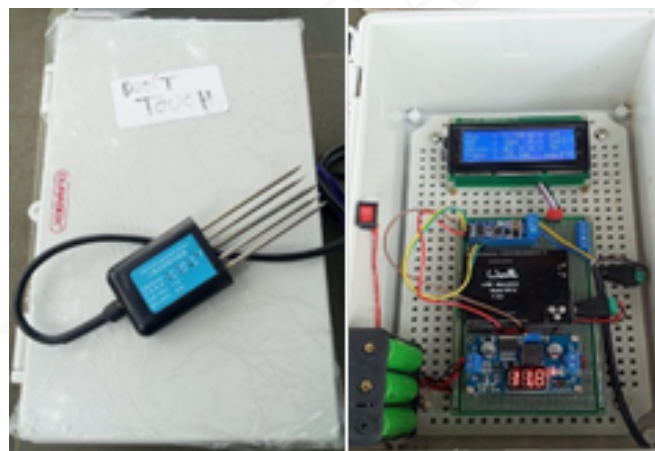
Sensor yang digunakan pada prototipe sistem deteksi hara ini adalah sensor RS485 7in1 soil (Gambar 5). Sensor yang sudah dirancang dihubungkan dengan *cloud Thingspeak* lalu data yang terbaca ditampilkan melalui website. Salah satu *platform open source* untuk monitoring pada "Internet of Things" aplikasi dan API untuk menyimpan dan mengambil data dari hal-hal yang menggunakan HTTP melalui Internet atau melalui *Local Area Network*. Thingspeak berfungsi sebagai pengumpul data yang berasal dari perangkat node berupa sensor-sensor yang sudah terhubung ke internet dan juga memungkinkan pengambilan data dari perangkat lunak untuk keperluan visualisasi, notifikasi, kontrol dan analisis historis data.

Prototipe alat/sistem berhasil mendeteksi beberapa indikator kesuburan tanah yang digunakan sebagai pendekatan ketersediaan unsur hara mikro esensial Fe dan Mn antara lain pH dan EC. Hasil pengujian prototipe alat terhadap beberapa indikator kesuburan tanah (Tabel 1).

Tabel 1. Hasil Pengukuran Beberapa pH dan EC Menggunakan Alat Manual dan Prototipe Sistem Deteksi pada 2 Titik Lokasi Pengamatan Sebagai Sampel.

No	pH		EC	
	M	S	M	S
1	5	4,2	2311	1898
2	4,5	5,2	1401	1640
3	4	4,2	2120	1117
4	4,5	4,2	2166	1278
5	5	4,1	1741	1670
6	5	3,7	1857	1659
7	4	3,7	1594	1653
8	4	4,8	2683	1760
9	4	5	1699	1928
10	4	4,4	1963	1858
11	4	4,1	1965	1741
12	4,5	3,9	1819	2399
13	4	4	1962	3422
14	4,5	4	2024	2720
15	5	5,2	1807	1570
16	5	4,7	1750	1751
17	5	4	2040	1898
18	4	4,6	2205	2185
19	3,5	4,4	1916	2306
20	4	4,3	1926	1727

Keterangan: M= alat ukur manual, S= prototipe alat dan sistem yang dibuat.



Gambar 5. Prototipe alat dan sistem deteksi indikator sifat kimia tanah.

3.1 Uji Kalibrasi dan Validasi Sistem Deteksi Menggunakan Aproksimasi Berbagai Model

Terdapat perbedaan nilai hasil pengukuran antara sensor manual dengan prototipe sistem deteksi yang dibuat. Untuk itu dilakukan aproksimasi dengan berbagai model. Pada parameter pH didapatkan model aproksimasi dengan koefisien determinasi dan koefisien korelasi tinggi adalah model persamaan regresi kubik dengan persamaan berikut:

$$\hat{y} = ax^3 + bx^2 + cx + d \quad (1)$$

Sistem persamaan untuk mendapatkan variabel a, b, c, dan d adalah sebagai berikut:

$$\begin{cases} a \sum x_i^3 + b \sum x_i^2 + c \sum x_i + nd = \sum y_i, \\ a \sum x_i^4 + b \sum x_i^3 + c \sum x_i^2 + d \sum x_i = \sum x_i y_i, \\ a \sum x_i^5 + b \sum x_i^4 + c \sum x_i^3 + d \sum x_i^2 = \sum x_i^2 y_i, \\ a \sum x_i^6 + b \sum x_i^5 + c \sum x_i^4 + d \sum x_i^3 = \sum x_i^3 y_i; \end{cases} \quad (2)$$

Sehingga didapatkan bahwa:

$$y = 0.041085x^3 - 0.779127x^2 + 5.168464x - 5.914162 \quad (3)$$

Dengan y = nilai yang diukur dan x = nilai pembacaan sistem. Koefisien determinasinya (R^2) yaitu 0.46 yang artinya variabel x berpengaruh terhadap variabel y sebesar 46%, sedangkan koefisien korelasinya 0.68 yang menunjukkan bahwa ada korelasi yang kuat dan positif antara variabel x dan y. Dari beberapa model yang digunakan diperoleh untuk parameter EC model aproksimasi yang memiliki koefisien determinasi dan korelasi tinggi adalah model persamaan regresi kubik dengan persamaan sebagai berikut:

$$\hat{y} = ax^3 + bx^2 + cx + d \quad (4)$$

Sistem persamaan untuk mendapatkan variabel a, b, c, dan d adalah sebagai berikut:

$$\begin{cases} a \sum x_i^3 + b \sum x_i^2 + c \sum x_i + nd = \sum y_i, \\ a \sum x_i^4 + b \sum x_i^3 + c \sum x_i^2 + d \sum x_i = \sum x_i y_i, \\ a \sum x_i^5 + b \sum x_i^4 + c \sum x_i^3 + d \sum x_i^2 = \sum x_i^2 y_i, \\ a \sum x_i^6 + b \sum x_i^5 + c \sum x_i^4 + d \sum x_i^3 = \sum x_i^3 y_i; \end{cases} \quad (5)$$

Sehingga didapatkan bahwa:

$$y = 0.0000002476x^3 - 0.0016559580x^2 + 3.4618933651x - 324.2275689291 \quad (6)$$

Dengan y = nilai yang diukur dan x = nilai pembacaan sistem. Koefisien determinasi pada indikator ini adalah 0.92 yang artinya variabel x berpengaruh terhadap variabel y sebesar 92%, sedangkan koefisien korelasinya yaitu 0.96 yang menunjukkan bahwa ada korelasi yang sangat kuat dan positif antara variabel x dan y.

Dengan nilai koefisien korelasi dan determinasi yang cukup tinggi pada parameter pH dan EC, maka dilakukan tahap pemograman pada prototipe sistem deteksi untuk menghasilkan nilai uji yang lebih akurat dan presisi dengan memasukkan model persamaan regresi kubik yang dihasilkan pada parameter pH dan EC.

3.2 Uji Kalibrasi Sistem Deteksi dengan Pendekatan pH dan EC

Uji kalibrasi tahap akhir yaitu dengan melakukan uji tanah pada 7 titik lokasi pengamatan yang telah ditentukan. Parameter yang digunakan untuk menentukan persentase error dari sistem deteksi yaitu pH dan EC. Rerata hasil uji tanah pada pH dan EC dengan menggunakan prototipe sistem deteksi dibandingkan dengan nilai pH dan EC dengan menggunakan alat portabel/manual. Hasil dari uji tanah pada rerata nilai pH dan EC ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Rerata Nilai pH dan EC

No	Uji	Nilai pH	EC (mS/cm)	Eh (Volt)
1	Manual	6.07	237.68	0.164
2	Sistem	6.34	189.30	0.149

Nilai persentase (galat) error didapatkan dari rumus sebagai berikut:

$$\text{Persentase error} = \left(\frac{\text{nilai perkiraan} - \text{nilai riil}}{\text{nilai riil}} \right) \times 100\% \quad (7)$$

Persentase akurasi didapatkan dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\text{Persen akurasi} = 100\% - \text{persentase error} \quad (8)$$

Berdasarkan Tabel 2. dan perhitungan menggunakan rumus diatas menunjukkan bahwa nilai pH pada tanah yang diuji secara manual dan sistem memiliki persentase error sebesar 4.37% dan persentase akurasi yaitu sebesar 95.63%. Nilai pH pada prototipe sistem deteksi ini memiliki nilai error yang kecil (< 5%) dan persentase akurasi yang tinggi. Dengan demikian prototipe untuk parameter pH dapat digunakan lebih lanjut. Berdasarkan Tabel 2. menunjukkan bahwa nilai EC pada tanah yang diuji secara manual dan sistem memiliki persentase error sebesar 20.36% dan persentase akurasi yaitu sebesar 79.64%. Nilai error pada parameter EC masih termasuk besar, sehingga perlu dilakukan kalibrasi lebih lanjut untuk parameter ini dengan menggunakan model aproksimasi atau algoritma lainnya.

3.3 Ketersediaan Unsur Hara Mikro Fe dan Mn Berdasarkan Pendekatan Potensial Redoks

Tahapan selanjutnya adalah menentukan nilai Eh (potensial redoks) dari hasil uji tanah menggunakan sistem deteksi yang sudah dikalibrasi. Dari hasil uji tanah yang dilakukan, nilai Eh (potensial redoks) dapat diduga dengan pendekatan $Eh = 0.059 \text{ pe}$, dimana nilai pe dihitung dengan pendekatan : $\text{pe} = 8.86 - \text{pH}$ (Sposito, 2008). Dengan demikian didapatkan rumus persamaan sebagai berikut:

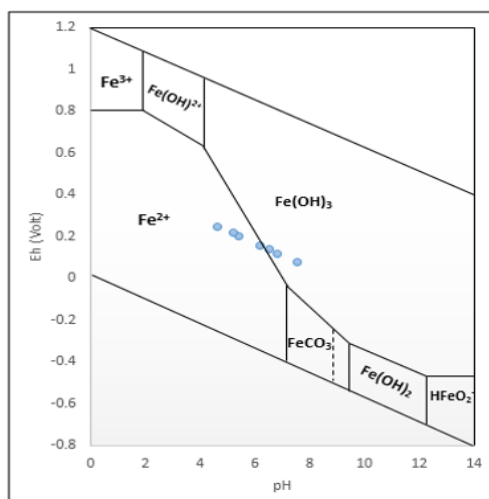
$$Eh = 0,059 (8.86 - \text{pH}) \text{ dengan satuan Volt} \quad (9)$$

Rerata nilai Eh pada hasil uji sampel tanah dari 7 lokasi yang dilakukan dengan menggunakan prototipe sistem deteksi ditunjukkan pada Tabel 3. Nilai Eh pada tanah yang diuji menunjukkan nilai pH dan potensial redoks yang berbeda. Kisaran rerata nilai Eh pada 7 titik lokasi pengamatan berkisar antara 0.119-0.249 Volt yang menunjukkan bahwa status potensial redoks termasuk reduksi sedang. Pada kondisi tanah seperti ini reaksi yang terjadi dalam tanah adalah Fe^{3+} direduksi dan senyawa organik yang terdapat di dalam tanah direduksi. Namun hal ini tetap bergantung pada nilai pH yang terukur di dalam tanah.

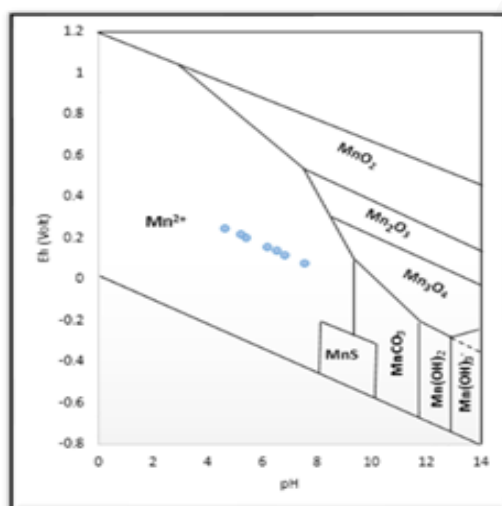
Berdasarkan Gambar 6. menunjukkan bahwa tanah dengan kondisi pH dan Eh yang berbeda memiliki ketersediaan bentuk Fe aktif terlarut yang berbeda. Dari hasil uji tanah pada 7 lokasi pengamatan menunjukkan bahwa terdapat 4 titik lokasi yang unsur Fe berada dalam bentuk ion Fe^{2+} dan terdapat 3 titik lokasi pengamatan yang unsur Fe berada dalam bentuk senyawa $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Hal ini menunjukkan bahwa perbedaan nilai pH dan kondisi potensial redoks pada tanah dapat mempengaruhi bentuk Fe tersedia yang larut dalam tanah.

Tabel 3. Rerata nilai pH dan Eh pada 7 titik lokasi pengamatan

No	Lokasi Pengamatan	Nilai pH	Eh (Volt)
1	Titik 1	7.53	0.079
2	Titik 2	6.84	0.119
3	Titik 3	5.42	0.203
4	Titik 4	4.64	0.249
5	Titik 5	6.51	0.139
6	Titik 6	5.19	0.216
7	Titik 7	6.19	0.157



Gambar 6. Diagram Eh–pH terhadap ketersediaan Fe pada 7 titik lokasi pengamatan (Modifikasi dari Monhemius, 2017).



Gambar 7. Diagram Eh–pH terhadap ketersediaan Mn pada 7 titik lokasi pengamatan (Modifikasi dari Monhemius, 2017).

Nilai potensial redoks berhubungan erat dengan pH dimana semakin tinggi nilai pH maka semakin rendah potensial redoks (Kusumaningtyas *et al.*, 2015). Hal ini dapat terjadi karena reaksi reduksi yang mengambil ion H^+ kemudian melepaskan ion OH^- sehingga Fe^{3+} berubah menjadi Fe^{2+} (Barry *et al.*, 2023). Peningkatan aktivitas ion Fe^{2+} dalam tanah dipengaruhi oleh peningkatan potensial redoks. Gambar 6. menunjukkan terdapat Fe di dalam tanah yang mengalami perubahan bentuk menjadi $Fe(OH)_3$ dikarenakan pH meningkat sehingga mengalami proses oksidasi yang bisa disebabkan karena adanya kontak dengan oksigen (Febrina dan Ayuna, 2014).

Berdasarkan Gambar 7. menunjukkan bahwa tanah dengan kondisi pH dan Eh yang berbeda memiliki ketersediaan bentuk Mn aktif terlarut yang berbeda. Dari hasil uji tanah pada 7 lokasi pengamatan menunjukkan bahwa unsur Mn tersedia berada dalam bentuk Mn^{2+} . Bentuk Mn^{2+} merupakan bentuk unsur Mn yang tersedia bagi tanaman. Kelarutan Mn dipengaruhi oleh potensial redoks dan pH tanah. Semakin tinggi pH maka semakin rendah tingkat kelarutan Mn-nya (Darlita *et al.*, 2017).

4. KESIMPULAN

Model aproksimasi yang digunakan pada prototipe ini adalah persamaan regresi kubik yang digunakan sebagai *source code* pada sistem deteksi hara mikro. Dari model aproksimasi yang digunakan maka dapat menghasilkan prototipe sistem deteksi unsur hara mikro esensial dengan persentase akurasi yang tinggi pada parameter pH yaitu sebesar 95.63% sedangkan pada parameter EC memiliki akurasi sebesar 79.64%. Berdasarkan pendekatan nilai Eh – pH maka didapatkan bahwa pada 7 lokasi pengamatan menunjukkan terdapat 4 titik lokasi yang unsur Fe berada dalam bentuk Fe^{2+} dan terdapat 3 titik lokasi pengamatan yang unsur Fe berada dalam bentuk $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Pada diagram pH-Eh untuk unsur hara mikro Mn menunjukkan bahwa unsur Mn tersedia berada dalam bentuk Mn^{2+} .

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Kemdikbudristek yang telah mendanai penelitian ini melalui pendanaan pada hibah PDP dan Universitas Gunadarma yang telah memfasilitasi beberapa kegiatan yang dilakukan selama penelitian ini dilaksanakan.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Barker, A.V., D.J. Pilbeam. 2015. *Handbook of Plant Nutrition*. CRC Press.
- Barry, D.S.P.A., G.Z. Anshari, dan W.N. Rossie. 2023. Analisis besi (Fe) terlarut dalam air tanah pada lahan gambut dengan sekat kanal. *Jurnal Sains Pertanian Equator*.
- Darlita, R.R., B. Joy, dan R. Sudirja. 2017. Analisis beberapa sifat kimia tanah terhadap peningkatan produksi kelapa sawit pada tanah pasir di perkebunan kelapa sawit Selangkun. *Jurnal Agrikultura*. 28(1):15-20.
- Dudala, S., S.K. Dubey, S. Gel. 2020. Microfluiding soil nutrient detection sistem: integrating nitrite, pH and electrical conductivity detection. *IEEE Sensors J*. 20(8):4504-4511.
- Duhan, J.S., R. Kumar, N. Kumar, P. Kaur, K. Nehra, S. Duhan. 2017. Nanotechnology: the new perspective in precision agriculture. *Biotechnology Reports*. (15):11-23.
- Febrina, L., A. Ayuna. 2014. Studi penurunan kadar besi (Fe) dan mangan (Mn) dalam air tanah menggunakan saringan keramik. *Jurnal Teknologi*. (7): 1.
- Gelyaman, G.D. 2018. Faktor-faktor yang mempengaruhi bioavailabilitas besi bagi tumbuhan. *Jurnal Saintek Lahan Kering*. 1(1):17-19.
- Husson, O. 2013. Redox potential (Eh) and pH as drivers of soil/plant/microorganism systems: a transdisciplinary overview pointing to integrative opportunities for agronomy. *Plant Soil*. 362: 389-417.
- Kusumaningtyas, A.S., P. Cahyono, Sudarto, dan R. Suntari. 2015. Pengaruh tinggi muka air tanah terhadap pH, Eh, Fe, Al^{dd} , Mn dan P terlarut pada tanaman nanas klon GP3 di ultisol. *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan*. 2(1): 103-109.
- Mikula, K., G. Izydorczyk, D. Skrzypczak, M. Mironiuk, K. Moustakas, A. WitekKrowiak, K. Chojnacka. 2020. Controlled release micronutrient fertilizers for precision agriculture – a review. *Journal Science of the Total Environment*. (712): 1-9.
- Monhemius, J. 2017. The iron elephant: A brief history of hydrometallurgists' struggles with element no. 26. *CIM Journal*. 8. 197-206. 10.15834/cimj.2017.21.
- Pelegriño, M.H.P., D.C. Weindorf, S.H.G Silva. 2019. Synthesis of proximal sensing, terrain analysis, and parent material information for available micronutrient prediction in tropical soils. *Precision Agric*. (20): 746–766.
- Sayekti, R.W. 2012. Model optimasi alternatif pola tanam, untuk mendapatkan luas tanam dan

- keuntungan yang optimum (studi kasus di Dam Jatimlerek, Kabupaten Jombang). *Jurnal Teknik Pengairan : Journal of Water Resources Engineering*. 1(2):115–126.
- Sheeba, T.B., L.D.V. Anand, G. Manohar, S. Selvan, C.B. Wilfred, K. Muthukumar. 2022. Machine learning algorithm for soil analysis and classification of micronutrients in iot-enabled automated farms. *J. Nanomaterials*. 1-7.
- Sposito, G. 2008. *The Chemistry of Soils*. 2nd Edition. Oxford University Press. New York.

PROOFREADING