

PEMANFAATAN SENYAWA KOMPLEKS Fe KELAT (EDTA, DTPA, EDDHA, AMINO) DALAM BIDANG PERTANIAN: SEBUAH TINJAUAN

THE UTILIZATION OF Fe CHELATE COMPLEX COMPOUNDS (EDTA, DTPA, EDDHA, AMINO) IN AGRICULTURE: A REVIEW

Hanisah Hasibuan^{1*}, Anjany Tasya Surabika Br Tarigan¹, Iis Siti Jahro², dan Nurfajriani²

¹Chemistry Education, Postgraduate Program, Universitas Negeri Medan

²Department of Chemistry, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Universitas Negeri Medan
Jl. Willem Iskandar Pasar V, Medan (20221), Telp. 061-6613365

* Corresponding author, tel/fax: 082363079210, email: hanisahhasibuan@mhs.unimed.ac.id

Abstrak. Di daerah yang tanahnya berkapur dengan pH tinggi, tanaman sering mengalami kekurangan zat besi (Fe) yang ditandai dengan klorosis pada daun dan penurunan produktivitas. Untuk mengatasi kekurangan Fe tersebut dapat dimanfaatkan pupuk dengan kandungan senyawa kompleks Fe(III) dalam bentuk kelat dengan ligan EDTA, DTPA dan EDDHA. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah studi literatur, sumber yang diambil mencakup artikel tahun 2016 hingga 2025, dengan perhatian khusus pada artikel yang membahas penggunaan Fe-kelat pada tanaman. Temuan dari penelitian ini menunjukkan bahwa Fe-EDTA bekerja dengan baik pada pH rendah hingga sedang tetapi kurang stabil pada tanah alkalis. Fe-DTPA menunjukkan kestabilan yang moderat hingga pH sekitar 7, sementara Fe-EDDHA memiliki kestabilan yang tinggi bahkan pada pH sekitar 9, sehingga lebih cocok untuk tanah berkapur. Alternative yang lebih ramah lingkungan seperti Fe-amino kelat terbukti lebih mudah diserap, memiliki pengaruh positif terhadap lingkungan, dan juga berfungsi ganda sebagai biostimulan. Sehingga penelitian selanjutnya disarankan untuk mengeksplorasi pengembangan Fe-kelat yang ramah lingkungan dan efektif pada tanah alkalis guna mengurangi residu dari bahan sintesis..

Kata kunci: EDTA, DTPA, EDDHA, amino kelat

Abstract. In areas with calcareous soils and high pH levels, plants often suffer from iron (Fe) deficiency, which is characterized by leaf chlorosis and reduced productivity. To overcome this deficiency, fertilizers containing complex compounds of Fe(III) in the form of chelates with ligands such as EDTA, DTPA, and EDDHA can be utilized. The methods used in this study were literature studies, with data sources covering articles from 2016 to 2025, with a particular focus on articles discussing the use of Fe chelates in plants. The findings of this study indicated that Fe-EDTA works well at low to moderate pH levels but is less stable in alkaline soils. Fe-DTPA showed moderate stability up to pH 7, while Fe-EDDHA had high stability even at pH 9, making it more suitable for calcareous soils. More environmentally friendly alternatives such as Fe-amino chelates have been proven to be more easily absorbed, have a positive impact on the environment, and also function as biostimulants. Therefore, further research is recommended to explore the development of environmentally friendly and effective Fe-chelates in alkaline soils to reduce residues from synthetic materials.

Key words: EDTA, DTPA, EDDHA, amino chelate

PENDAHULUAN

Zat besi dalam bentuk ion Fe(II) merupakan mikronutrien yang sangat penting dalam proses fotosintesis dan metabolisme pada tanaman [1,2]. Fe berfungsi sebagai kofaktor dalam pembentukan klorofil dan juga dalam proses transfer elektron di rantai fotosintesis. Tanpa pasokan Fe yang cukup, pertumbuhan tanaman dan hasil produksinya akan terganggu [3,4]. Meskipun Fe melimpah di dalam tanah, seringkali unsur ini hadir dalam bentuk yang tidak larut, sehingga menyulitkan tanaman dalam menyerapnya. Akibatnya, tanaman mengalami gejala klorosis, yaitu daun berubah menjadi kuning sementara tulang daunnya tetap hijau [5]. Ketersediaan Fe sangat dipengaruhi oleh pH tanah, aerasi, dan bentuk oksidasi dari Fe itu sendiri [6].

Salah satu tanda jelas kekurangan zat besi (Fe) adalah klorosis pada daun, di mana warna daun menjadi kuning sementara tulang daun tetap berwarna hijau. Ini menunjukkan bahwa pembentukan klorofil tidak berjalan dengan baik akibat kurangnya ketersediaan besi yang diperlukan untuk proses sintesisnya [7]. Selain itu, kelebihan nitrogen dapat mengakibatkan tanaman terjebak dalam fase vegetatif, sehingga pembentukan bunga atau buah terhambat. Terlalu banyak nitrogen juga membuat tanaman menjadi lunak, yang membuatnya lebih rentan terhadap penyakit tertentu [8].

Penggunaan pupuk Fe dalam bentuk anorganik, seperti FeSO_4 , sering kali tidak efektif untuk tanah yang memiliki pH tinggi. Fe cenderung teroksidasi menjadi bentuk yang tidak larut (Fe^{3+}) pada tanah dengan pH tinggi atau berkapur, sehingga akar sulit menyerapnya. Maka dari itu, pemberian Fe dalam bentuk anorganik seperti FeSO_4 sering kali tidak berhasil karena cepat mengendap [9]. Untuk meningkatkan ketersediaan Fe bagi tanaman, para peneliti dan praktisi pertanian menggunakan senyawa kompleks (kelat) yaitu ligan organik yang mengikat ion Fe sehingga tetap dalam bentuk larut dan lebih mudah diserap oleh tanaman.

Salah satu kelat yang paling umum digunakan adalah Fe-EDTA (*Iron Ethylenediaminetetraacetate*). EDTA berfungsi sebagai ligan sintesis heksadentat yang membentuk kompleks stabil dengan Fe, terutama dalam kondisi pH rendah hingga sedang. Namun, Fe-EDTA memiliki kelemahan, pada pH tinggi kompleks ini cepat terurai atau Fe dilepaskan dalam bentuk teroksidasi dan tidak larut. Selain

itu, EDTA sulit terurai secara biologis di tanah, sehingga dapat terakumulasi dan berisiko menimbulkan masalah lingkungan. Sebagai alternatif, terdapat kelat berbasis asam amino atau ligan amina, yang lebih dikenal sebagai Fe kelat asam amino atau kelat Fe-amina. Ligan amina atau asam amino lebih mudah terdegradasi dan sering kali lebih ramah terhadap lingkungan [10].

Jalali, (2020), melakukan perbandingan antara penggunaan berbagai jenis Fe amina kelat dengan Fe-EDTA dalam larutan nutrisi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kelat amina memberikan peningkatan yang berarti dalam kadar besi, kandungan protein, aktivitas antioksidan, serta hasil biji jika dibandingkan dengan Fe-EDTA. Zuluaga, *et al.*, (2023) menilai kelat Fe yang dibuat secara sintesis dan biokelat. Penelitian ini menyimpulkan bahwa biokelat mampu memberikan kinerja yang sebanding dengan kelat sintesis seperti Fe-EDDHA, bahkan di lingkungan dengan pH netral dan alkalis, sehingga bisa menjadi pilihan yang lebih berkelanjutan [11]. Dalam studi yang dilakukan oleh Perez-Labrada, *et al.*, (2020) ditemukan bahwa kombinasi asam organik dengan Fe kelat meningkatkan ketersediaan Fe di tanah kapur dan membantu tanaman tomat mengatasi kekurangan Fe [12]. Goos, (2021) juga telah meneliti efektivitas berbagai sumber pupuk Fe di lingkungan laboratorium dan rumah kaca, termasuk kelat Fe-EDTA [13]. Temuan menunjukkan bahwa dalam kondisi tertentu, kelat Fe dapat mempercepat proses pemulihan warna hijau atau regreening lebih cepat dibandingkan dengan sumber Fe yang bersifat anorganik.

Berdasarkan hasil-hasil yang telah ada, penelitian ini akan mengulas berbagai senyawa kompleks yang umum dipakai dalam sektor pertanian, metode sintesis, fungsi, cara penggunaan, serta keuntungan dan risiko penggunaan senyawa kompleks dalam pertanian.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode tinjauan pustaka. Langkah-langkah yang dilakukan meliputi:

Identifikasi Sumber Data

Menentukan database dan portal jurnal baik nasional maupun internasional yang relevan, seperti ScienceDirect, Springer, Taylor and Francis, Google Scholar, dan Garuda menggunakan bantuan aplikasi Publish or Perish.

Penyusunan Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Artikel jurnal ilmiah yang diterbitkan antara tahun 2016 hingga 2025, yang membahas penggunaan Fe-kelat (EDTA, DTPA, EDDHA, amino kelat) pada tanaman, serta menyertakan data tentang sintesis, mekanisme kerja, efektivitas dalam pertanian, dan dampak lingkungan dianalisis ke tahap berikutnya. Sedangkan, artikel yang dipublikasikan sebelum tahun 2016, hanya membahas Fe anorganik bukan kelat, tidak dianalisis (dibuang).

Seleksi dan Evaluasi Artikel

Selanjutnya, artikel dipilih kembali berdasarkan judul dan abstrak kemudian dianalisis secara keseluruhan artikel yang memenuhi syarat untuk memastikan relevansinya dengan fokus penelitian.

Analisis Data

Isi artikel dianalisis mengenai aspek sintesis, cara kerja, molekul penyusun, keefektifan senyawa kelat dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman, serta potensi pengaruh terhadap lingkungan dari penggunaan Fe-kelat.

Sintesis Temuan

Hasil analisis disusun ke dalam format narasi yang terstruktur, kemudian dibandingkan dan diintegrasikan temuan dari berbagai artikel untuk menghasilkan kesimpulan yang menyeluruh.

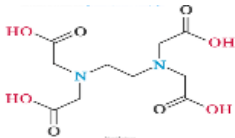
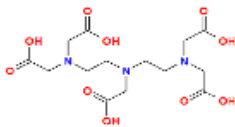
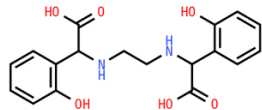
HASIL DAN PEMBAHASAN

Sifat Kimia dan Aplikasi Fe-EDTA, Fe-DTPA, dan Fe-EDDHA

Senyawa kompleks merupakan struktur yang terbentuk dari ion logam pusat yang terhubung dengan satu atau lebih ligan. Ligan berfungsi untuk menstabilkan ion logam melalui ikatan koordinasi [14]. Dalam konteks pertanian, kompleksasi unsur hara mikro dengan ligan sangat krusial karena dapat meningkatkan kelarutan, mobilitas, dan ketersediaan unsur tersebut bagi tanaman. Kelat adalah tipe khusus dari kompleks di mana ligan mengaitkan ion logam melalui dua atau lebih titik donor elektron, membentuk cincin yang stabil [15]. Kelat telah lama digunakan untuk meningkatkan aksesibilitas unsur hara mikro (Fe, Zn, Mn, Cu) dalam pupuk pertanian. Tingkat efektivitas kelat ditentukan oleh stabilitas kompleks pada pH tanah, karakteristik ligan, serta cara penyerapan oleh akar [16].

Kelat, yang merupakan ligan dengan ketertarikan tinggi untuk menarik kation logam, meningkatkan kelarutan mikronutrien dengan menurunkan reaktivitas dan mencegah interaksi serta pembentukan endapan dengan unsur lain seperti kalsium [17], [18]. Kelat sintesis telah digunakan dalam hortikultura selama puluhan tahun untuk meningkatkan ketersediaan mikronutrien [19]. Berbagai senyawa khelat besi telah tersedia dengan variasi harga. Fe-EDTA, Fe-EDDHA, dan Fe-DTPA merupakan senyawa kelat sintesis yang banyak digunakan [20-23]. Tabel 1 menunjukkan temuan karakterisasi kompleks Fe-EDTA, Fe-DTPA, dan Fe-EDDHA.

Tabel 1. Karakteristik kompleks Fe-EDTA, Fe-DTPA, dan Fe-EDDHA

Aspek	Senyawa Kompleks		
	Fe-EDTA	Fe-DTPA	Fe-DDHA
Nama ligan	Ethylenediaminetetraacetate	Diethylenetriaminepentaacetate	Ethylenediamine-N,N'-bis (2-hydroxyphenylacetic acid)
Geometri			
Formula ligan	$C_{10}H_{16}N_2O_8^{4-}$	$C_{14}H_{23}N_3O_{10}^{4-}$	$C_{18}H_{20}N_2O_6^{4-}$
Jumlah donor elektron	6 donor (4 O, 2 N), heksadentat	8 donor (5 O, 3 N), okta-/nonadentat	6 donor (2 O fenolat, 2 O karboksilat, 2 N), heksadentat aromatik
Struktur utama	Alifatik, fleksibel	Lebih panjang, fleksibel dengan tambahan $-CH_2-NH$	Aromatik (cincin benzena), lebih kaku dan rigid
Kestabilan (log K)	25	28	33

Aspek	Senyawa Kompleks		
	Fe-EDTA	Fe-DTPA	Fe-DDHA
Konfigurasi Fe^{3+}	d^5 (oktahedral, biasanya spin tinggi: $t_2g^3e_g^2$)	d^5 , ikatan lebih kuat karena lebih banyak donor	d^5 , ikatan paling kuat karena donor aromatik dan mempunyai nilai log K tinggi
Sifat magnetik	Paramagnetik	Paramagnetik	Paramagnetik
Warna kompleks	Kuning	Kuning-oranye	Merah tua-ungu

Berdasarkan analisis pada Tabel 1, Fe-EDTA dan Fe-DTPA adalah ligan alifatik yang memiliki rantai fleksibel. Di sisi lain, Fe-EDDHA memiliki ligan aromatik yang terdiri dari cincin benzena yang kaku. Struktur aromatik ini memberikan kestabilan lebih karena adanya efek resonansi dan delokalisasi elektron, yang membuat ikatan antara Fe dan ligan menjadi lebih kuat dan lebih tahan terhadap penguraian pada pH tinggi. Fe-EDTA berfungsi sebagai ligan heksadentat dengan enam situs donor (empat O dan dua N). Hal ini telah disampaikan oleh Klem-Marciniak, *et al.*, (2021), mengungkapkan bahwa Fe-DTPA memiliki jumlah donor yang lebih banyak (delapan atom donor: lima O dan tiga N), sehingga menghasilkan kompleks yang lebih stabil dibandingkan Fe-EDTA [24]. Meskipun Fe-EDDHA juga heksadentat, karakter donor elektron dari kelompok aromatik (dua O fenolat) jauh lebih kuat dibandingkan dengan donor alifatik biasa. Ini menjelaskan mengapa Fe-EDDHA memiliki stabilitas yang lebih tinggi ($\log K = 33$) dibandingkan dengan Fe-DTPA ($\log K = 28$) dan Fe-EDTA ($\log K = 25$).

Nilai konstanta kestabilan ($\log K$) menunjukkan seberapa kuat ion Fe^{3+} membentuk ikatan dengan ligan. Fe-EDTA yang memiliki $\log K$ 25 tergolong lemah pada pH tinggi, sehingga ion Fe mudah terlepas dan mengendap sebagai $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Fe-DTPA dengan $\log K$ 28 lebih stabil hingga mendekati pH netral. Sementara itu, Fe-EDDHA dengan $\log K$ 33 mampu menjaga Fe dalam kondisi larut meskipun berada pada lingkungan yang bersifat alkalis. Ini menjadikannya pilihan utama untuk tanah dengan pH tinggi atau berkapur.

Hershkowitz, *et al.*, (2025) melakukan penelitian mengenai efektivitas tiga tipe khelat besi (Fe-EDTA, Fe-DTPA, dan Fe-EDDHA) dalam mencegah klorosis besi pada tanaman yang rentan yang ditempatkan di media tanpa tanah dengan pH tinggi [25]. Penelitian ini menunjukkan bahwa stabilitas khelat besi terhadap pH sangat memengaruhi ketersediaan Fe untuk tanaman. Fe-

EDDHA terbukti sebagai yang paling efektif karena dapat mempertahankan ketersediaan Fe pada kondisi pH netral hingga alkalis. Fe-DTPA memiliki tingkat efektivitas yang sedang dan masih dapat bermanfaat hingga sekitar pH 7, sedangkan Fe-EDTA hanya berfungsi baik pada pH rendah dan kehilangan efektivitasnya pada pH yang lebih tinggi. Oleh karena itu, pemilihan jenis khelat yang tepat sangat penting dalam sistem budidaya, terutama di media atau tanah dengan pH tinggi, agar tanaman tetap sehat dan terhindar dari klorosis.

Ketiga kompleks tersebut memiliki konfigurasi d^5 (oktahedral, spin tinggi) dan menunjukkan sifat paramagnetik. Perbedaan yang paling menonjol bukanlah pada sifat magnetik, tetapi pada kekuatan ikatan antara Fe dan ligan yang dipengaruhi oleh jenis donor elektron serta kerangka ligan. Variasi warna (Fe-EDTA: kuning, Fe-DTPA: kuning-oranye, Fe-EDDHA: merah tua-ungu) mencerminkan perbedaan pada transisi d-d dan perpindahan muatan yang dipengaruhi oleh lingkungan ligan. Warna merah tua-ungu pada Fe-EDDHA menunjukkan adanya ikatan yang kuat dengan donor fenolat aromatik, menandakan kestabilan tinggi dari kompleks ini.

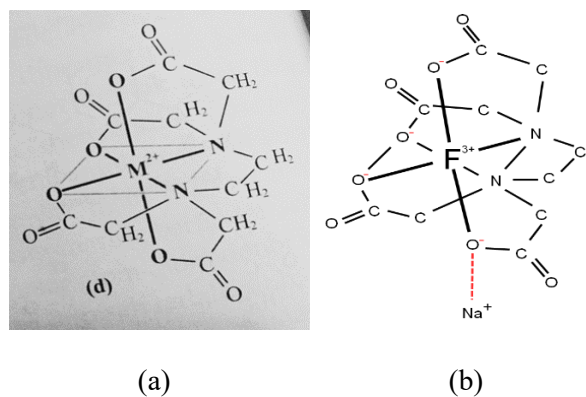
Secara keseluruhan, efektivitas Fe-EDDHA dalam mencegah klorosis besi pada tanah dengan pH tinggi disebabkan oleh: 1) adanya cincin benzena aromatik yang memberikan ikatan yang lebih kuat dan stabil; 2) kekuatan donor fenolat aromatik yang lebih baik dibandingkan dengan donor alifatik, yang meningkatkan konstanta kestabilan; dan 3) nilai $\log K$ yang tinggi (33), yang memastikan bahwa Fe tetap tersedia dalam bentuk larutan tanah meskipun pada pH yang bersifat alkalis. Hal ini didukung oleh penelitian oleh Arcas *et al.*, (2025) yang menunjukkan bahwa khelat aromatik (fenolik) lebih stabil daripada khelat alifatik dalam kondisi stres (seperti paparan UV), yang berhubungan dengan kekuatan ikatan ligan dan stabilitas strukturnya [26].

Dengan demikian, Fe-EDDHA menjadi khelat Fe yang paling efektif dibandingkan dengan Fe-

EDTA dan Fe-DTPA pada lahan dengan kondisi basa atau berkapur. Namun, di sisi lingkungan, kelat aromatik seperti Fe-EDDHA bersifat sintetis dan kurang ramah lingkungan, sehingga penelitian terbaru mulai berfokus pada pengembangan biochelate berbasis ligan alami sebagai alternatif yang lebih berkelanjutan.

Struktur dan Kestabilan Kompleks Fe-EDTA

Ethylenediaminetetraasetat (EDTA) adalah ligan heksadentat yang dapat mengikat ion logam dengan memanfaatkan dua atom nitrogen dan empat atom oksigen dari kelompok karboksilatnya. Dengan enam titik yang menyediakan elektron, EDTA bisa membentuk ikatan koordinasi yang sangat kuat dengan ion logam, seperti Fe^{3+} . Ikatan tersebut membentuk struktur kompleks oktahedral, yang sejalan dengan teori koordinasi Werner (Gambar 1b).



Gambar 1. Struktur senyawa kompleks: a) $[\text{M}(\text{EDTA})]$, b) $\text{Na} [\text{Fe} (\text{EDTA})]$ yang sesuai dengan Struktur Werner

Sumber: (a) Sugiyarto, (2012), (b) Dokumentasi Penulis

Dalam berbagai penelitian, kompleks Fe-EDTA umumnya ditulis hanya sebagai $[\text{Fe}(\text{EDTA})]^-$, tanpa menyebutkan adanya ion penyeimbang. Namun, dalam praktik sebenarnya, senyawa ini hampir selalu dipakai dalam bentuk

garam natrium, yaitu $\text{Na}[\text{Fe}(\text{EDTA})]$. Keberadaan ion Na^+ sangat penting untuk menjaga stabilitas kompleks serta untuk meningkatkan kelarutannya dalam air. Hal ini membuat Fe-EDTA lebih mudah digunakan dalam pertanian.

Sayangnya, keberadaan ion penyeimbang ini jarang dibahas secara khusus dalam banyak publikasi ilmiah. Namun, informasi ini sangat penting untuk memahami mengapa $\text{Na}[\text{Fe}(\text{EDTA})]$ lebih stabil dan mudah larut dibandingkan dengan $[\text{Fe}(\text{EDTA})]^-$ yang tidak memiliki kation penyeimbang. Oleh karena itu, pemahaman mengenai struktur asli dari $\text{Na}[\text{Fe}(\text{EDTA})]$ sangat penting, terutama dalam konteks efektivitas pupuk besi dalam pertanian. Secara praktis, stabilitas kompleks $\text{Na}[\text{Fe}(\text{EDTA})]$ menjadikannya sangat bermanfaat pada tanah dengan pH rendah hingga sedang. Dalam kondisi ini, besi tetap terlarut sehingga dapat diserap oleh tanaman dan mencegah terjadinya klorosis. Namun, di tanah dengan pH tinggi, $\text{Fe}(\text{EDTA})$ mudah terurai, dan Fe^{3+} akan mengendap menjadi bentuk hidroksida yang tidak larut. Dengan kata lain, fungsi EDTA bukan hanya sebagai ligan yang mengikat Fe^{3+} , tetapi juga sebagai agen pengkelat yang memastikan bahwa ion logam tetap terlarut, stabil, dan siap digunakan oleh tanaman. Kehadiran ion Na^+ meningkatkan kelarutan kompleks ini sehingga sangat praktis untuk digunakan dalam formulasi pupuk mikro.

Perbandingan Fe kelat sintesis dan Fe-amino kelat

Fe-amino kelat adalah suatu kompleks yang terbentuk antara ion Fe^{3+} dan asam amino yang berfungsi sebagai ligan. Asam amino berperan ganda, yakni mempertahankan ion Fe dalam larutan agar tidak mengendap, dan juga berfungsi sebagai biostimulan karena berfungsi sebagai bahan dasar untuk protein, hormon, dan metabolit sekunder. Tabel 2 menunjukkan perbandingan Fe kelat sintesis dan Fe-amino kelat.

Tabel 2. Perbandingan Fe kelat sintesis dan Fe-amino kelat

Aspek	Fe-EDTA (sintetis)	Fe-DTPA (sintetis)	Fe-EDDHA (sintetis)	Fe-Amino Kelat (Alami)
Stabilitas pH	Stabil hanya pada pH < 6	Stabil hingga pH 7,5	Stabil hingga pH 9	Stabil di pH netral–alkalis
Bioavailabilitas	Sedang, tergantung kondisi tanah	Lebih baik daripada EDTA	Tinggi pada tanah alkalin	Sangat tinggi, mudah dikenali tanaman

Aspek	Fe-EDTA (sintetis)	Fe-DTPA (sintetis)	Fe-EDDHA (sintetis)	Fe-Amino Kelat (Alami)
Ramah lingkungan	Persisten, sulit terurai	Persisten, sulit terurai	Persisten, sulit terurai	Biodegradable, ramah lingkungan
Fungsi tambahan	Hanya pembawa Fe	Hanya pembawa Fe	Hanya pembawa Fe	Biostimulan dan metabolit organik
Harga	Relatif mahal, tergantung impor	Lebih mahal dari EDTA	Paling mahal di antara sintetis	Potensial lebih murah bila berbasis limbah protein
Kelemahan	Residu di tanah, impor tinggi	Masih meninggalkan residu	Biaya tinggi, impor tinggi	Stabilitas jangka panjang masih diteliti

Keterangan: Data dalam tabel merupakan hasil analisis penulis

Besi di dalam tanah biasanya ditemukan dalam dua bentuk, yaitu Fe^{2+} (ferro) dan Fe^{3+} (ferri). Fe^{2+} mudah teroksidasi menjadi Fe^{3+} , yang kemudian mengendap sebagai $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Oleh karena itu, ligan diperlukan untuk menjaga agar Fe tetap dalam bentuk larutan. Asam amino memiliki dua gugus donor elektron yang penting, yaitu $-\text{NH}_2$ (amin) dari nitrogen dan $-\text{COOH}$ (karboksilat, yang terionisasi menjadi $-\text{COO}^-$) dari oksigen. Dengan kedua atom donor ini, asam amino bersifat bidentat dan mampu mengikat ion logam dari dua sisi.

Ram, *et al.*, (2024) memberikan penjelasan rinci mengenai amino kelat dalam nutrisi tanaman. Penelitian ini membahas cara sintesisnya, stabilitas, penggunaan, serta keunggulannya dibandingkan kelat sintetis, termasuk bahwa aminochelates dapat “meningkatkan penyerapan nutrisi” dan “mengurangi stres nutrisi” pada tanaman [27]. Niharika, *et al.*, (2025) menyoroti bahwa kelat logam yang menggunakan asam amino (*aminochelates*) dapat meningkatkan efektivitas penyerapan mikro-nutrien, serta membantu tanaman menghadapi stres lingkungan (seperti kekeringan, salinitas, dan suhu ekstrem) melalui aktivitas antioksidan, pengaturan osmosis, dan fungsi enzim [28].

Proses pembentukan Fe amino kelat terjadi ketika ion Fe^{3+} yang memiliki orbital kosong menerima pasangan elektron dari gugus $-\text{NH}_2$ dan $-\text{COO}^-$. Beberapa molekul asam amino kemudian mengelilingi Fe, menciptakan kompleks yang stabil (kelat) dengan geometri yang umumnya berbentuk oktahedral. Salah satu contohnya yaitu Fe-glycinate, di mana tiga molekul glisin berikatan dengan Fe melalui gugus $-\text{NH}_2$ dan $-\text{COO}^-$ sehingga terbentuk tiga cincin kelat yang stabil. Ikatan ini membuat Fe tetap larut, tidak

mengendap, dan mudah diserap oleh tanaman. Reaksi dapat ditunjukkan sebagai berikut:

- Tanpa kelat (FeSO_4): $\text{Fe}^{2+} + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3$ (mengendap, tidak larut)
- Dengan amino kelat (seperti glisin): $\text{Fe}^{3+} + 3 (\text{H}_2\text{N}-\text{CH}_2-\text{COO}^-) \rightarrow [\text{Fe}(\text{gly})_3]^{3-}$ (kompleks stabil, larut)

Penelitian Zuluaga, *et al.*, (2023) menunjukkan bahwa hidrolisat protein dari tumbuhan bisa dijadikan sumber Fe-biokelat, yang tidak hanya berfungsi untuk mengikat Fe, tetapi juga meningkatkan penyerapan nutrisi pada tanaman. Baik Fe-EDDHA maupun Fe-biokelat (baik pada dosis penuh maupun dosis yang lebih rendah) terbukti sama-sama efektif dalam mendukung ketersediaan Fe pada tanaman tomat di tanah alkalis. Penggunaan Fe-biokelat pada dosis yang lebih rendah bahkan tetap memberikan kinerja agronomis yang setara, sehingga berpotensi mengurangi kebutuhan akan pupuk Fe sintetis [29]

Cara Penggunaan Senyawa Kompleks dalam Bidang Pertanian

Senyawa kompleks besi-kelat banyak digunakan dalam sektor pertanian untuk mengatasi kekurangan zat besi (Fe) pada tanaman. Penggunaan senyawa ini dapat dilakukan dengan berbagai cara, tergantung pada keadaan tanah, jenis tanaman, dan tingkat keparahan tanda-tanda klorosis.

a) Penyemprotan Daun (*Foliar Spray*)

Metode penyemprotan daun bertujuan untuk memberikan Fe dengan cepat, sehingga gejala kekurangan dapat segera diatasi. Fe-EDTA dilarutkan dalam air dengan dosis sekitar 0,1-0,5 g/L. Larutan ini kemudian disemprotkan pada sisi bawah daun, khususnya pada daun muda yang aktif dalam fotosintesis. Penyemprotan sebaiknya

dilakukan pada pagi atau sore hari untuk menghindari penguapan dan kerusakan pada jaringan daun. Perbandingan antara *Fe-glycinat foliar* (1%) dan Fe-EDTA pada black gram menunjukkan bahwa aplikasi 1% *ferrous glycinat* pada 25 dan 45 hari setelah tanam (DAS) menghasilkan peningkatan signifikan dalam kadar Fe pucuk dibandingkan dengan kontrol atau Fe-EDTA. Dosis yang terlalu tinggi atau frekuensi penyemprotan yang berlebihan dapat mengakibatkan keracunan pada logam mikro atau menyebabkan interaksi negatif, seperti mengganggu keseimbangan unsur lain seperti mangan. Studi Arcas, *et al.*, (2025) juga menekankan pentingnya mempertimbangkan efek samping lokal dan konsentrasi yang ideal saat melakukan pengujian *foliar* [6].

b) Aplikasi Akar melalui Irigasi atau Kocor

Metode pemberian melalui akar bertujuan untuk meningkatkan ketersediaan Fe di area sekitar akar, terutama pada tanah alkali dengan pH tinggi yang membuat Fe sulit tersedia. Pupuk kelat sebelumnya dilarutkan, lalu diterapkan melalui sistem irigasi tetes, fertigasi, atau dikocorkan langsung ke dalam tanah di sekitar tanaman. Pemilihan jenis kelat sangat krusial, contohnya Fe-EDDHA yang lebih stabil dalam kondisi pH basa dibandingkan Fe-EDTA. Ay, *et al.*, (2022) melakukan penelitian dengan menambahkan dua jenis Fe-EDDHA (dengan rasio ligan yang berbeda) ke dalam tanah, bukan melalui irigasi tetes secara khusus, tetapi dengan perlakuan langsung pada akar di dalam tanah [30].

c) Penggunaan dalam Sistem Hidroponik

Dalam praktik budidaya hidroponik, Fe-EDTA atau Fe-DTPA ditambahkan langsung ke larutan nutrisi. Konsentrasi harus disesuaikan dengan kebutuhan tanaman dan stabilitas ligan, biasanya dalam kisaran pH 5,5-6,5. Pengaturan pH sangat penting, karena di luar kisaran tersebut, khelat dapat terurai sehingga Fe tidak dapat digunakan oleh tanaman. Keskin, *et al.*, (2025) melakukan studi pada selada iceberg dengan menggunakan biostimulan asam amino (tanpa kelat logam) bersamaan dengan perlakuan lain, menunjukkan peningkatan dalam pertumbuhan dan kualitas tanaman [31]. Sebuah penelitian dalam konteks hidroponik menemukan bahwa penerapan biostimulan (termasuk asam amino) bersamaan dengan pupuk mikro dapat meningkatkan performa tomat [32].

Pemanfaatan metode aplikasi senyawa kompleks Fe yang tepat dapat mencegah klorosis dan mendukung pertumbuhan optimal tanaman dalam berbagai kondisi lingkungan.

KESIMPULAN

Pemakaian senyawa kompleks Fe dalam bentuk kelat terbukti dapat meningkatkan ketersediaan besi di tanah yang biasanya tidak mendukung, terutama di tanah alkali dan berkapur. Fe-EDDHA memiliki tingkat kestabilan tertinggi jika dibandingkan dengan Fe-DTPA dan Fe-EDTA, tetapi penggunaan Fe-amino kelat memberikan pilihan alternatif yang lebih ramah lingkungan dan memiliki banyak fungsi. Pemilihan jenis kelat dan cara aplikasinya menjadi faktor penting untuk keberhasilan dalam mengatasi kekurangan Fe serta meningkatkan hasil tanaman. Di masa depan, penting untuk mendorong pengembangan biokelat yang berbasis bahan alami untuk mencapai pertanian yang lebih berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. A. Hasyiyati, N. Nurmi, and Z. Ilahude, "Analisis kandungan unsur hara mikro (Mn, Fe, Zn), C-organik dan kadar air pada lahan jagung (*Zea mays* L.) di Kecamatan Tabongo Kabupaten Gorontalo," *Jurnal Lahan Pertanian Tropis (JLPT)*, vol. 2, no. 2, pp. 104–109, 2023.
- [2] D. Saprudin, C. A. Palupi, and E. Rohaeti, "Evaluasi pemberian unsur hara besi pada kandungan asam amino dan mineral dalam biji jagung," *Jurnal Kimia Riset*, vol. 4, no. 1, pp. 49–61, 2019.
- [3] H. Furqoni, "Pengaruh pemberian pupuk Fe terhadap pertumbuhan, produksi, dan kelayakan ekonomi tanaman tomat (*Solanum lycopersicum*)," *Agrivet: Jurnal Ilmu-Ilmu Pertanian dan Peternakan (Journal of Agricultural Sciences and Veteriner)*, vol. 13, no. 1, pp. 130–139, 2025.
- [4] A. M. Ashari and R. K. Apindiati, "Determination of The Essential Micro Element Content of *Padina* sp from Lemukutan Waters as a Biostimulant Candidate," *Jurnal Biologi Tropis*, vol. 24, no. 2, pp. 476–481, 2024.

- [5] V. K. Jain, *Fundamentals of Plants Physiology Nineteenth Edition*. New Delhi: S Chand & Company Limited, 2022.
- [6] A. Arcas, S. Valverde, J. J. Lucena, and S. López-Rayó, "Photocatalytic degradation of iron chelates fertilizers under UV light: a rapid evaluation for hydroponic growing systems," *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, vol. 12, no. 1, Dec. 2025, doi: 10.1186/s40538-025-00817-8.
- [7] S. Sumiati, A. Chofifawati, and N. A. R. Al Faroqi, "Nutrient Deficiency Analysis on Maize Plant Morphology," *Jurnal Biologi Tropis*, vol. 24, no. 2b, pp. 327–339, 2024.
- [8] I. Priyono and S. E. S. H. MM, *Nutrisi Bagi Tanaman*. Surakarta: Unisri Press, 2020.
- [9] M. C. López-Pérez, J. L. Espinoza-Acosta, and F. Pérez-Labrada, "Iron Nutrition Management in Calcisol Soils as a Tool to Mitigate Chlorosis and Promote Crop Quality—An Overview," *J Appl Biol Biotechnol*, vol. 12, pp. 17–29, 2024.
- [10] E. Hertrampf and M. Olivares, "Iron amino acid chelates," in *International Journal for Vitamin and Nutrition Research*, Nov. 2004, pp. 435–443. doi: 10.1024/0300-9831.74.6.435.
- [11] M. Jalali, "Effect of iron-amino acid chelates on antioxidant capacity and nutritional value of soybean," *Journal of Plant Productions*, vol. 43, no. 4, pp. 477–486, 2020.
- [12] M. Y. A. Zuluaga, M. Cardarelli, Y. Rouphael, S. Cesco, Y. Pii, and G. Colla, "Iron nutrition in agriculture: From synthetic chelates to biochelates," *Sci Horti*, vol. 312, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.scienta.2023.111833.
- [13] F. Pérez-Labrada, A. Benavides-Mendoza, A. Juárez-Maldonado, S. Solís-Gaona, and S. González-Morales, "Organic acids combined with Fe-chelate improves ferric nutrition in tomato grown in calcisol soil," *J Soil Sci Plant Nutr*, vol. 20, no. 2, pp. 673–683, 2020, doi: 10.1007/s42729-019-00155-3.
- [14] R. J. Goos, "Laboratory and greenhouse evaluation of four iron fertilizer sources," 2021, *John Wiley and Sons Inc*. doi: 10.1002/ael2.20052.
- [15] M. S. K. Nasution, "Peranan Senyawa Kompleks dalam Bidang Medis: Literatur Studi," *Jurnal Impresi Indonesia*, vol. 1, no. 5, pp. 546–554, 2022.
- [16] İ. Gulcin and S. H. Alwasel, "Metal ions, metal chelators and metal chelating assay as antioxidant method," *Processes*, vol. 10, no. 1, p. 132, 2022.
- [17] A. K. Yadav, G. G. Gurnule, N. I. Gour, U. There, and V. C. Choudhar, "Micronutrients and fertilizers for improving and maintaining crop value: a review," *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, vol. 7, no. 1, pp. 125–140, 2022.
- [18] D. Madhupriya *et al.*, "Efficacy of chelated micronutrients in plant nutrition," *Commun Soil Sci Plant Anal*, vol. 55, no. 22, pp. 3609–3637, 2024.
- [19] S. López-Rayó, S. Valverde, and J. J. Lucena, "[S, S]-EDDS ligand as a soil solubilizer of Fe, Mn, Zn, and Cu to improve plant nutrition in deficient soils," *J Agric Food Chem*, vol. 71, no. 25, pp. 9728–9737, 2023.
- [20] M. Loporino, P. Bonini, M. Cardarelli, Y. Rouphael, and G. Colla, "Biochelat as an eco-friendly alternative to synthetic chelate for micronutrients supply in tomato grown under alkaline conditions: A multi-omics approach," *Sci Horti*, vol. 346, p. 114166, 2025.
- [21] E. Mathuthu, A. Janse van Rensburg, D. Du Plessis, and S. Mason, "EDTA as a chelating agent in quantitative ¹H-NMR of biologically important ions," *Biochemistry and Cell Biology*, vol. 99, no. 4, pp. 465–475, 2021.
- [22] J. Xiao *et al.*, "Diethylenetriaminepentaacetic acid (DTPA)-reinforced fenton-like process for efficient abatement of sulfamethazine at circumneutral pH in simulated groundwater," *Sep Purif Technol*, vol. 336, p. 126266, 2024.
- [23] S. Rajabi Hamedani, M. Cardarelli, Y. Rouphael, P. Bonini, A. Colantoni, and G. Colla, "Comparative environmental assessment of the iron fertilisers' production: Fe-Biochelat versus Fe-EDDHA," *Sustainability*, vol. 15, no. 9, p. 7488, 2023.
- [24] A. Mirbolook, M. Alikhani, J. Sadeghi, and A. Lakzian, "Synthesis and characterization of the Schiff base Fe (II) complex as a new iron source in nutrient solution," *Rhizosphere*, vol. 25, p. 100664, 2023.

- [25] E. Klem-Marciniak, J. Hoffmann, M. Huculak-Maczka, K. Marecka, and K. Hoffmann, "Chemical stability of the fertilizer chelates fe-eddha and fe-eddhsa over time," *Molecules*, vol. 26, no. 7, Apr. 2021, doi: 10.3390/molecules26071933.
- [26] J. A. Hershkowitz, M. G. Dey, R. Heins, and B. Bugbee, "Fertigation with Fe-EDTA, Fe-DTPA, and Fe-EDDHA Chelates to Prevent Iron Chlorosis of Sensitive Species in High-pH Soilless Media," *HortScience*, vol. 60, no. 3, pp. 404–410, Mar. 2025, doi: 10.21273/HORTSCI17892-24.
- [27] A. Arcas, S. Valverde, J. J. Lucena, and S. López-Rayó, "Photocatalytic degradation of iron chelates fertilizers under UV light: a rapid evaluation for hydroponic growing systems," *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, vol. 12, no. 1, Dec. 2025, doi: 10.1186/s40538-025-00817-8.
- [28] K. Ram, A. R. Ninama, R. Choudhary, and B. P. Solanki, "A Comprehensive Review on Aminochelates: Advances and Applications in Plant Nutrition," *International Journal of Environment and Climate Change*, vol. 14, no. 1, pp. 120–127, Jan. 2024, doi: 10.9734/ijecc/2024/v14i13814.
- [29] P. Niharika *et al.*, "Amino acid-chelated micronutrients: A new frontier in crop nutrition and abiotic stress mitigation," 2025, *Horizon e-Publishing Group*. doi: 10.14719/pst.8302.
- [30] A. Ay, S. Demirkaya, R. Kızılkaya, and C. Gülser, "The effects of two Fe-EDDHA chelated fertilizers on dry matter production and Fe uptake of tomato seedlings and Fe forms of a calcareous soil," *Eurasian Journal of Soil Science*, vol. 11, no. 3, pp. 259–265, Jul. 2022, doi: 10.18393/ejss.1085194.
- [31] B. Keskin, Y. Akhoundnejad, H. Y. Dasgan, and N. S. Gruda, "Fulvic Acid, Amino Acids, and Vermicompost Enhanced Yield and Improved Nutrient Profile of Soilless Iceberg Lettuce," *Plants*, vol. 14, no. 4, Feb. 2025, doi: 10.3390/plants14040609.
- [32] H. Y. Dasgan, K. S. Aksu, K. Zikaria, and N. S. Gruda, "Biostimulants Enhance the Nutritional Quality of Soilless Greenhouse Tomatoes," *Plants*, vol. 13, no. 18, Sep. 2024, doi: 10.3390/plants13182587.