BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Pupuk merupakan komponen penting dalam menunjang produktivitas pertanian dan ketahanan pangan nasional. Pada tahun 2025, Pupuk Indonesia menargetkan penyaluran pupuk bersubsidi sebanyak 9,5 juta ton, dengan realisasi penyaluran hingga Maret 2025 mencapai 1,7 juta ton, terdiri dari pupuk Urea, NPK, formula khusus, dan pupuk organik. Pupuk organik dan pupuk lepas lambat semakin diminati karena dapat meningkatkan efisiensi pemupukan dan mengurangi dampak lingkungan negatif dari penggunaan pupuk kimia secara berlebihan. Pupuk lepas lambat berbasis selulosa memiliki sifat retensi air yang sangat baik, perilaku lepas lambat, dan biodegradabilitas bahan (Mamo dkk., 2024).

Mikronutrien, walaupun hanya diperlukan dalam konsentrasi rendah (biasanya <0,1% dari total nutrien), memainkan peran fundamental dalam metabolisme tanaman, khususnya untuk penguatan struktur jaringan, peningkatan ketahanan terhadap infeksi patogen melalui sintesis senyawa fenolik dan lignin, serta pemeliharaan kesehatan akar yang optimal untuk penyerapan air dan nutrien; delapan mikronutrien esensial utama bagi tanaman adalah boron (B) yang terlibat dalam pembentukan dinding sel, klorin (Cl) untuk osmoregulasi, tembaga (Cu) sebagai kofaktor enzim oksidasi, besi (Fe) dalam transport elektron, mangan (Mn) untuk fotolisis air, molibdenum (Mo) pada fiksasi nitrogen, nikel (Ni) untuk urease, serta seng (Zn) dalam sintesis auksin. Secara khusus, besi (Fe) dalam bentuk Fe(II) yang lebih bioavailable berfungsi krusial dalam biosintesis klorofil sebagai komponen heme dan non-heme, mengkatalisis reduksi ferredoksin dalam rantai transpor elektron fotosintesis, serta mengaktifkan enzim antioksidan seperti katalase, peroksidase, dan superoksida dismutase untuk melindungi membran sel dari stres oksidatif; defisiensi Fe menyebabkan klorosis interveinal pada daun muda akibat interupsi sintesis klorofil, inhibisi pertumbuhan vegetatif, dan penurunan hasil panen hingga 30-50% pada tanaman sensitif seperti padi atau jagung. Oleh karena itu, formulasi pupuk slow-release yang mengandung Fe(II) teradsorpsi pada

matriks nanomaterial seperti nanokitosan atau nanokarbon sangat direkomendasikan, karena memungkinkan pelepasan terkendali melalui difusi ionik lambat, erosi matriks berbasis pH tanah, dan kinetika orde satu atau dua, sehingga meningkatkan efisiensi penggunaan nutrien (nutrient use efficiency) hingga dua kali lipat, memperpanjang ketersediaan Fe di rhizosfer, dan meminimalkan leaching atau fiksasi Fe menjadi bentuk tidak larut ke lingkungan (Ardali *et al*., 2024).

Berbagai strategi telah dikembangkan untuk mencegah dan mengatasi defisiensi mikronutrien pada tanaman, di antaranya pemupukan foliar atau langsung ke akar menggunakan pupuk berbasis garam anorganik larut seperti sulfat besi ($FeSO_4$) atau chelat EDTA-Fe. Namun, aplikasi pupuk garam terlarut ini sering menimbulkan dampak lingkungan negatif yang signifikan, termasuk overdosis yang melebihi kapasitas penyerapan tanaman sehingga menyebabkan akumulasi ion logam berat di profil tanah, serta leaching nutrien melalui air hujan yang mengurangi ketersediaan hara di rhizosfer dan meningkatkan risiko toksisitas sekunder (Mangallo *et al*., 2020). Dalam dekade terakhir, pupuk lepas lambat (controlled-release fertilizer) muncul sebagai pendekatan pemupukan yang lebih populer dan efisien (Niemiec & Komorowska, 2018), karena dirancang untuk melepaskan nutrisi secara bertahap dan terkendali sepanjang siklus tanam cukup dengan satu kali aplikasi yang secara substansial mengurangi frekuensi pemupukan, biaya tenaga kerja, serta konsumsi energi produksi pupuk (Lubkowski *et al*., 2015). Mekanisme pelepasan pada pupuk jenis ini melibatkan retardasi difusi melalui lapisan polimer semipermeabel atau matriks biodegradasel, yang tertunda dan sinkron dengan pola kebutuhan nutrien tanaman berdasarkan fase fenologis, sehingga meningkatkan nutrient use efficiency (NUE) hingga 20-40%, mengoptimalkan hasil panen, dan meminimalkan kehilangan nutrien (Wesolowska *et al*., 2021).

Tandan kosong kelapa sawit (TKKS) merupakan limbah padat terbesar yang dihasilkan dari industri kelapa sawit, di mana setiap pengolahan 1 ton buah segar kelapa sawit (fresh fruit bunches) menghasilkan sekitar 230-240 kg TKKS, atau setara 23-24% dari total berat buah. Komposisi TKKS didominasi oleh fraksi lignoselulosa tinggi, meliputi selulosa (35-45%), hemiselulosa (20-30%), dan lignin (20-30%), yang menyebabkan degradasi alami sangat lambat karena resistensi

lignin terhadap mikroba dan enzim hidrolitik. Meskipun demikian, TKKS memiliki potensi tinggi sebagai bahan baku biomassa untuk bioenergi atau prekursor karbon aktif melalui proses pirolisis, aktivasi kimia, atau fisik, dengan luas permukaan tinggi (>1000 m^2/g) yang cocok untuk adsorben. Sayangnya, pemanfaatan TKKS secara optimal masih terbatas, sehingga limbah ini sering menimbulkan pencemaran lingkungan berupa emisi metana dari pembusukan anaerobik, limpasan nutrien ke badan air, dan degradasi tanah jika dibakar atau dibuang sembarangan (Nia dkk., 2024).

Karbon Aktif, alginat, dan nanoselulosa merupakan bahan yang memiliki kemampuan adsorpsi dan pelepasan nutrien secara terkontrol. Karbon aktif dari limbah biomassa seperti TKKS memiliki porositas tinggi dan kapasitas adsorpsi yang baik untuk logam seperti Fe(II). Alginat, polisakarida alami yang diperoleh dari rumput laut, dapat membentuk matriks gel yang mampu mengontrol pelepasan nutrien secara perlahan. Nanoselulosa sebagai bahan nanokomposit memiliki sifat mekanik dan permukaan yang besar sehingga dapat meningkatkan stabilitas dan efisiensi pelepasan pupuk. Kombinasi ketiga bahan ini dalam pembuatan pupuk lepas lambat dapat meningkatkan efektivitas pemupukan dan ramah lingkungan (Muchtar *et al*., 2025).

Beberapa studi tentang pupuk lepas lambat yang mengandung Fe antara lain sebagai berikut: (1) Sukma dkk., (2016) melakukan sintesis komposit Alginat/ Zeolit/Fe dan meneliti sifat pelepasan Fe(III). Namun, komposit yang dihasilkan memperlihatkan interaksi antara alginat dengan dirinya sendiri dan dengan zeolit, yang mengurangi kemampuan komposit dalam mengikat Fe(III). (2) Wang (2021) meneliti sintesis komposit nanoselulosa-Fe untuk mengatasi klorosis pada tanaman buah pir, dengan hasil bahwa nanoselulosa memiliki potensi besar dalam meningkatkan parameter dan indikator fotosintesis, tetapi penelitian ini hanya dilakukan pada tanaman buah pir. (3) Prastiwi (2019) mengkaji pemanfaatan karbon aktif sebagai media pembawa mikronutrien dalam pupuk lepas lambat dan melaporkan bahwa unsur seperti Fe cukup kuat terserap oleh karbon aktif sehingga tidak mudah hilang akibat pencucian, meskipun jumlah Fe yang teradsorpsi oleh karbon aktif relatif lebih rendah dibandingkan logam lain . (4) Cahyati (2023) melakukan penelitian mengenai sintesis dan uji kinetika lepas lambat komposit

karbon aktif/alginat/ nanoselulosa-Fe . Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mensintesis dan mengkarakterisasi karbon aktif dan nanoselulosa dari Tandan Kosong Kelapa Sawit dan akan dicampurkan dengan alginat kemudian dibentuk menjadi komposit yang akan diuji sebagai pembawa dalam pupuk lepas lambat Fe.

Pemanfaatan limbah tandan kosong kelapa sawit sebagai bahan baku pembuatan pupuk lepas lambat yang mengandung mikronutrien Fe(II) sejalan dengan tujuan pembangunan berkelanjutan (SDGs), khususnya SDG 12 (Konsumsi dan Produksi yang Bertanggung Jawab) dan SDG 15 (Ekosistem Daratan). Dengan mengolah limbah biomassa menjadi produk bernilai tambah seperti pupuk, dapat mengurangi limbah dan pencemaran lingkungan serta meningkatkan efisiensi sumber daya alam. Berdasarkan uraian yang telah disampaikan di atas, maka peneliti tertarik untuk menggabungkan ketiga material tersebut menjadi pupuk lepas lambat pupuk lepas lambat yang dapat teradsopsi Fe(II) dari limbah tandan kosong kelapa sawit sebagai sumber mikronutrien tanaman.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan sebelumnya, maka identifikasi masalah yang dijadikan sebagai bahan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Limbah tandan kosong kelapa sawit (TKKS) yang melimpah belum dimanfaatkan secara optimal dan berpotensi mencemari lingkungan.
2. Defisiensi mikronutrien besi (Fe) pada tanaman sering terjadi, berdampak negatif pada pertumbuhan dan hasil tanaman.
3. Pupuk mikronutrien berbasis garam anorganik memiliki masalah lingkungan akibat pencucian dan akumulasi logam berat di tanah.

1.3 Ruang Lingkup

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Kimia FMIPA Universitas Negeri Medan selama 4 bulan, meliputi proses karbonisasi TKKS, isolasi nanoselulosa, sintesis dan karakterisasi komposit karbon aktif/alginat/ nanoselulosa sebagai pupuk lepas lambat mengandung Fe(II), serta pengujian efektivitasnya pada tanaman pakcoy.

1.4 Batasan Masalah

Penelitian ini dibatasi pada penggunaan TKKS sebagai bahan baku dalam pembuatan karbon aktif, nanoselulosa, dan alginat untuk komposit pupuk lepas lambat. Fokus penelitian pada Fe(II) sebagai mikronutrien dalam pupuk lepas lambat. Pengujian dilakukan pada tanaman pakcoy sebagai tanaman target untuk mengevaluasi efek pupuk.

1.5 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan sebelumnya, maka dapat disusun rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana mengembangkan komposit karbon aktif /alginat/nanoselulosa dari limbah TKKS yang mampu mengadsorpsi Fe(II)?
2. Bagaimana mengoptimalkan adsorpsi Fe(II) pada komposit untuk pupuk lepas lambat?
3. Bagaimana pelepasan bertahap Fe(II) dari komposit dapat meningkatkan efisiensi nutrisi dan pertumbuhan tanaman pakcoy?

1.6 Tujuan Penelitian

Berdasarkan masalah diatas, maka tujuan dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Mengembangkan komposit karbon aktif /alginat/nanoselulosa dari limbah TKKS sebagai bahan ramah lingkungan.
2. Mengoptimalkan adsorpsi Fe(II) pada komposit untuk digunakan sebagai mikronutrien pupuk lepas lambat.
3. Mengevaluasi kemampuan komposit dalam pelepasan bertahap Fe(II) untuk meningkatkan efisiensi nutrisi bagi tanaman.

1.7 Manfaat Penelitian

Penelitian ini bermanfaat secara teoriti dan praktis. Adapun manfaat secara teoritis dari penelitian ini yaitu (1) Menambah wawasan dan kontribusi ilmiah terkait pemanfaatan limbah biomassa TKKS menjadi nanokomposit pupuk lepas lambat. (2) Mengembangkan teknologi pupuk lepas lambat dengan adsorpsi dan pelepasan terkendali mikronutrien Fe(II). Manfaat praktis dari penelitian ini antara lain (1) Memberikan solusi ramah lingkungan dalam pengelolaan limbah TKKS

sekaligus meningkatkan ketersediaan mikronutrien Fe bagi tanaman. (2) Meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk dan produktivitas tanaman pakcoy, sekaligus mengurangi pencemaran lingkungan akibat penggunaan pupuk kimia berlebih.

UNIVERSITAS NEGERI MEDAN
UNIMED
THE Character Building UNIVERSITY