

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pertanian merupakan salah satu kegiatan dalam memenuhi dan mencukupi kebutuhan pangan. Kegiatan pertanian dapat dilakukan oleh petani dan pekebun yang memiliki tugas untuk membajak, memberikan pupuk dan mengairi lahan pertanian, menghalau adanya hama, memantau kebutuhan air untuk tanaman serta mengatur tingkat kesuburan pada tanah (Rouf & Agustiono, 2021).

Sektor pertanian adalah salah satu sumber kehidupan bagi sebagian dari penduduk di Indonesia dan dapat memberikan kontribusi terhadap perekonomian daerah (Martuali & Astuti, 2021). Sektor pertanian di Indonesia telah menjadi sumber mata pencaharian bagi lebih dari 32 juta jiwa penduduk dan telah memberikan sumbangan sebesar 8,39% dari total Produk Domestik Bruto (PDB) Indonesia pada tahun 2016. Pemanfaatan sumber daya alam seperti tanah memungkinkan kegiatan pertanian menghasilkan produk-produk yang esensial bagi kehidupan sehari-hari (Asir, et al., 2022). Dengan peran sektor pertanian terhadap perekonomian Indonesia yang besar, maka sektor tersebut perlu dikembangkan melalui pembangunan yang berwawasan lingkungan agar bersifat berkelanjutan pada masa mendatang (Yuriansyah, et al., 2020).

Sebagai tulang punggung ketahanan pangan nasional, tanaman padi (*Oryza sativa*) menjadi fokus utama dalam upaya peningkatan produktivitas tersebut. Pemerintah secara konsisten memprioritaskan komoditas ini untuk mencukupi kebutuhan pangan yang terus meningkat seiring dengan pertambahan populasi (Siregar, 2023). Dinamika produksi padi di Indonesia menunjukkan tren yang fluktuatif namun cenderung meningkat. Pada tahun 2022, total luas panen padi mencapai 10,45 juta hektar dengan produksi 54,75 juta ton Gabah Kering Giling (GKG), mengalami peningkatan tipis dari tahun sebelumnya. Puncak produksi terjadi pada bulan Maret dan April, sejalan dengan puncak luas panen. Namun, di balik angka nasional yang positif, beberapa daerah justru mengalami penurunan produktivitas, yang salah satunya diduga akibat ketidakseimbangan penggunaan input seperti pupuk kimia berlebih, yang berisiko menurunkan kesuburan tanah dalam jangka panjang.

Selain padi, tanaman jagung juga memegang peranan esensial sebagai komoditas pangan dan pakan ternak di Indonesia. Jagung tidak hanya menjadi bahan pangan alternatif setelah padi, tetapi pengembangannya dalam skala besar juga terbukti mampu meningkatkan perekonomian petani dan daerah (Nurnawati, Syarifuddin, & Samsu, 2022). Pola tanam jagung menunjukkan konsistensi dengan dua siklus panen tahunan. Pada tahun 2024, diperkirakan puncak panen pertama terjadi di bulan Maret (364 ribu hektar) dan kedua di bulan September (276 ribu hektar). Secara keseluruhan, luas panen jagung pada tahun 2024 diproyeksikan mencapai 2,55 juta hektar, sedikit meningkat dari 2,48 juta hektar pada tahun 2023. Peningkatan luas panen ini, meskipun positif dari sisi produksi, secara implisit juga menandakan peningkatan kebutuhan input pertanian seperti air dan pupuk.

Melengkapi portofolio komoditas strategis, tanaman tebu (*Saccharum officinarum* (L)) berfungsi sebagai bahan baku utama industri gula nasional, yang perannya sangat strategis dalam perekonomian Indonesia. Industri gula menjadi sumber pendapatan bagi ribuan petani dan pekerja, sementara produknya merupakan salah satu kebutuhan pokok dan sumber kalori bagi masyarakat (Priyatna & Ekawati, 2022). Dinamika produksi gula dari perkebunan rakyat (PR) menunjukkan tren positif, meningkat dari 1,19 juta ton pada tahun 2020 menjadi 1,38 juta ton pada 2021, dan kembali naik menjadi 1,51 juta ton pada tahun 2022. Tren peningkatan produksi yang konsisten pada ketiga komoditas ini menegaskan pentingnya sektor pertanian, sekaligus menyoroti tantangan pengelolaan sumber daya yang semakin besar.

Keberhasilan peningkatan produksi pada ketiga komoditas tersebut, sayangnya, seringkali dicapai melalui praktik yang sangat bergantung pada input eksternal seperti air dan terutama pupuk kimia. Ketergantungan ini, terutama jika tidak dikelola secara efisien, dapat menimbulkan masalah serius baik dari sisi ekonomi maupun lingkungan (Widowati, et al., 2022). Dua aspek krusial yang menyoroti masalah ini adalah penggunaan pupuk dan air yang berlebihan. Dari sisi pupuk, data Kementerian Pertanian (2021) mengindikasikan bahwa penggunaan pupuk urea oleh petani padi rata-rata sebesar 278 kg/ha, melampaui anjuran pemerintah sebesar 11,2%. Praktik ini tidak hanya meningkatkan biaya produksi bagi petani (BPS, 2021), tetapi juga menyebabkan

penumpukan residu kimia yang menurunkan kualitas tanah. Dari sisi air, manajemen irigasi yang tidak efisien dan limpasan air pertanian yang terkontaminasi residu pupuk berkontribusi terhadap pencemaran badan air, di mana lebih dari 50% sungai di Indonesia kini berstatus tercemar (Farhan, Lauren, & Fuzain, 2023).

Permasalahan inefisiensi dan dampak lingkungan ini menunjukkan keterbatasan model ekonomi "coklat" yang berorientasi pada eksploitasi sumber daya. Sebagai respons, konsep ekonomi hijau hadir sebagai paradigma alternatif yang bertujuan menyelaraskan pertumbuhan ekonomi dengan kelestarian lingkungan melalui efisiensi sumber daya dan pengurangan emisi karbon (Santy & Alam, 2022; Ardianingsih & Meliana, 2021). Implementasi ekonomi hijau di sektor pertanian menjadi langkah strategis jangka panjang untuk mengatasi krisis lingkungan sambil tetap mendorong pemulihan ekonomi dan pengentasan kemiskinan.

Kompleksitas masalah ini semakin dalam ketika adanya interaksi hierarkis antara dua tingkat pengambil keputusan dengan tujuan yang berbeda. Di tingkat atas, *leader* memiliki tujuan makro untuk memaksimalkan total produksi pangan demi menjaga ketahanan pangan nasional. Di tingkat bawah, *follower* secara rasional bertujuan untuk memaksimalkan keuntungan finansial mereka, yang seringkali mendorong penggunaan input berlebih. Permasalahan konkret yang muncul adalah belum adanya pendekatan kuantitatif yang mampu memodelkan dan mengoptimalkan interaksi hierarkis ini secara simultan.

Pendekatan bi-level programming sangat relevan untuk memodelkan interaksi dua tingkat pengambil keputusan ini. Dalam konteks pertanian padi, jagung, dan tebu, model ini dapat merepresentasikan *leader* sebagai pengambil kebijakan tingkat atas yang bertujuan untuk memaksimalkan total hasil produksi pangan. Tujuan ini merupakan cerminan dalam menjamin ketahanan pangan (*food security*), stabilitas pasokan untuk industri, dan pemenuhan target produksi nasional, serta *follower* sebagai pelaku di tingkat bawah yang bertujuan memaksimalkan keuntungan finansial bersih (laba) dari kegiatan pertanian padi, jagung dan tebu. Beberapa penelitian sebelumnya, seperti penelitian oleh Cheraghalipour et al. (2019) telah menghasilkan model optimasi bi-level untuk rantai pasok padi, dengan tujuan meminimalkan total biaya berdasarkan perspektif

dua tingkat pengambilan keputusan. Penelitian oleh Kazemi & Samouei (2024) telah mengembangkan model matematis bi-level untuk interaksi antara pemerintah dan petani dalam pertanian padi. Dimana pemerintah bertindak sebagai pemimpin yang bertujuan untuk meminimalkan kerusakan lingkungan akibat pestisida dan pupuk, sedangkan petani bertindak sebagai pengikut yang bertujuan untuk memaksimalkan produksi melalui penanaman ganda untuk meningkatkan keuntungan. Penelitian oleh Kazemi et al. (2022) telah merancang model matematik bi-objektif untuk rantai pasok padi, dengan tujuan meminimalkan biaya total dan erosi tanah akibat konsumsi air untuk budidaya padi. Dan penelitian oleh Ziliaskopoulos & Papalamprou (2022), mengembangkan model bi-level linear programming dalam mengembangkan kebijakan subsidi dengan tujuan untuk meminimalkan dampak lingkungan dari sektor pertanian.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini mengembangkan model matematis menggunakan pendekatan *bi-level programming* yang berfokus pada efisiensi sistem pertanian padi, jagung dan tebu dengan mengatur penggunaan input pupuk kimia dan penggunaan air secara optimal. Penelitian ini menawarkan pendekatan alternatif dengan mengintegrasikan dua tingkat pengambil keputusan yaitu tingkat atas bertujuan untuk memaksimalkan total hasil produksi pangan dan tingkat bawah bertujuan untuk memaksimalkan keuntungan finansial bersih (laba) dari kegiatan pertanian padi, jagung dan tebu. Dengan mempertimbangkan hal tersebut, model ini diharapkan dapat menjadi dasar pengambilan keputusan yang lebih objektif, efisien dan berorientasi pada keberlanjutan serta mendukung pembangunan ekonomi hijau di sektor pertanian padi, jagung dan tebu nasional. Dengan demikian, penelitian ini berjudul **“Optimasi Sistem Pertanian dalam Mendukung Ekonomi Hijau Menggunakan Pendekatan Bi-Level Programming”**.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah yang telah diuraikan diatas, maka identifikasi masalah yang akan dibahas sebagai berikut:

1. Ketergantungan tinggi terhadap pupuk kimia dalam sistem pertanian padi, jagung dan tebu dapat menyebabkan degradasi kesuburan tanah.

2. Penggunaan pupuk kimia yang melebihi dosis anjuran pemerintah dan penggunaan air yang tidak optimal, dalam jangka panjang dapat mengurangi efisiensi produksi akibat degradasi tanah dan meningkatkan resiko lingkungan.
3. Diperlukannya model matematis berbasis *bi-level programming* yang dapat merepresentasikan fungsi tujuan tingkat atas untuk memaksimalkan total hasil produksi pangan dan fungsi tujuan tingkat bawah untuk memaksimalkan keuntungan finansial bersih (laba) dari kegiatan pertanian padi, tebu dan jagung.

1.3 Batasan Masalah

Penelitian ini dibatasi pada beberapa aspek, yaitu:

1. Penelitian ini berfokus pada sistem pertanian padi, jagung dan tebu di Indonesia.
2. Fungsi kendala meliputi kendala alokasi lahan, kendala alokasi air, kendala batas penggunaan pupuk kimia, kendala total produksi minimum, kendala ketersediaan sumber daya air dan kendala penggunaan pupuk kimia.
3. Jenis pupuk yang dibahas adalah pupuk urea dan NPK, sebagai representasi pupuk kimia utama dalam pertanian.
4. Model tidak mempertimbangkan aspek cuaca, bencana alam, dan faktor lainnya yang dapat mempengaruhi keoptimalan model.

1.4 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah yang telah diuraikan di atas, maka rumusan masalah yang dikaji dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana merancang model matematis menggunakan pendekatan *bi-level programming* dalam permasalahan sistem pertanian padi, jagung dan tebu di Indonesia.
2. Bagaimana formulasi fungsi tujuan dan kendala dalam model tersebut, sehingga secara efektif dapat merepresentasikan hubungan hierarkis antara memaksimalkan total hasil produksi pangan pada tingkat atas dan memaksimalkan keuntungan finansial bersih (laba) dari kegiatan pertanian padi, tebu dan jagung pada tingkat bawah.

3. Bagaimana Solusi dari model matematis menggunakan pendekatan *bi-level programming* tersebut.

1.5 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang dikaji, maka tujuan yang akan dicapai dalam penelitian ini adalah:

1. Membangun model matematis menggunakan pendekatan *bi-level programming* dalam permasalahan sistem pertanian padi, jagung dan tebu di Indonesia.
2. Merumuskan formulasi fungsi tujuan dan kendala dalam model tersebut, sehingga secara efektif dapat merepresentasikan hubungan hierarkis antara total hasil produksi pangan pada tingkat atas dan memaksimalkan keuntungan finansial bersih (laba) dari kegiatan pertanian padi, tebu dan jagung pada tingkat bawah.
3. Menganalisis hasil model dan Solusi optimal yang diperoleh.

1.6 Manfaat Penelitian

1. Bagi Penulis

Penelitian ini akan membantu penulis mengembangkan kemampuan dalam menganalisis dan menyelesaikan masalah kompleks menggunakan metode matematis, khususnya *bi-level programming*. Penelitian ini menjadi bentuk kontribusi penulis terhadap perkembangan ilmu pengetahuan, terutama dalam penerapan optimasi pada sistem pertanian.

2. Bagi Pembaca

Penelitian ini memberikan wawasan kepada pembaca terkait teknik optimasi *bi-level programming* dalam sistem pertanian guna mendukung ekonomi hijau.

3. Bagi Masyarakat:

Penelitian ini akan membantu masyarakat dalam merasakan manfaat dari peningkatan hasil produksi pertanian yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Dengan adanya sistem pertanian yang optimal, masyarakat, khususnya petani, dapat meningkatkan pendapatan dan taraf hidup mereka.

4. Bagi Pemerintah:

Penelitian ini dapat memberikan rekomendasi berbasis ilmiah bagi pemerintah dalam merancang kebijakan yang mendukung ekonomi hijau di sektor pertanian. Hasil penelitian dapat membantu pemerintah mengalokasikan sumber daya secara lebih efektif untuk meningkatkan produktivitas dan keberlanjutan lingkungan

