

Pendekatan Sistem Dinamis pada Pengendalian Hama dan Adaptasi Teknologi Guna Meningkatkan Profitabilitas

Dynamic Systems Approach to Pest Control and Technology Adaptation for Enhancing Profitability

Daffa Athillah Akbar ^{1*}, Hery Murnawan ², Putu Eka Dewi Karunia Wati³, Wiwin Widiasih ⁴

¹²³⁴Teknik Industri, Teknik, Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya

Jalan Semolowaru No. 45, Surabaya, Jawa Timur, (031) 5931800

*Email Koresponding: Daffaathillahakbar@gmail.com

Diterima 25 Juli, 2025; Disetujui 04 Agustus, 2025; Dipublikasikan 31 Oktober, 2025

Abstrak

Desa Sentul merupakan desa dengan luas lahan sebesar 74% dari total wilayahnya yang memiliki komoditas padi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis faktor-faktor yang memengaruhi ketahanan pangan dan profitabilitas petani di Desa Sentul Kabupaten Jombang, serta mengembangkan model sistem dinamis untuk mendukung keberlanjutan pertanian di Desa Sentul. Menggunakan pendekatan *Triple Bottom Line* dengan *SMART PLS*, hasil analisis menunjukkan bahwa faktor usia, adaptasi teknologi, serangan hama, penggunaan pupuk, dan pH tanah memiliki pengaruh signifikan terhadap produktivitas dan ketahanan pangan. Model sistem dinamis yang dikembangkan dengan *STELLA* menggambarkan hubungan antara faktor-faktor ini dan mengungkapkan pentingnya pengelolaan pupuk dan hama yang tepat. Tiga skenario simulasi diuji untuk meningkatkan produktivitas dan keuntungan petani, dengan Skenario 3 (kombinasi teknologi dan organik) menunjukkan hasil paling optimal, meningkatkan produktivitas padi hingga 14% dan menurunkan biaya operasional hingga 21% dan Meningkatkan *Profit* sebesar Rp2,507,146,451. Penelitian ini juga mencakup analisis risiko dan strategi mitigasi untuk skenario, yang diharapkan dapat mengurangi tantangan dan meningkatkan keberlanjutan pertanian di Desa Sentul.

Kata kunci: Ketahanan Pangan, Optimasi *Profit*, Pertanian Berkelanjutan, Produktivitas Pertanian, Sistem Dinamis

Abstract

Desa Sentul is a village where 74% of its total area is agricultural land primarily used for rice cultivation. This research aims to analyze the factors influencing food security and farmer profitability in Sentul Village, Jombang Regency, and to develop a system dynamics model to support agricultural sustainability. Using a *Triple Bottom Line* approach with *SMART PLS*, the analysis results show that age, technology adoption, pest attacks, fertilizer use, and soil pH significantly impact productivity and food security. The system dynamics model developed with *STELLA* illustrates the relationships between these factors and highlights the importance of proper fertilizer and pest management. Three simulation scenarios were tested to increase farmer productivity and profit, with Scenario 3 (a combination of technological and organic approaches) showing the most optimal results, increasing rice productivity by up to 14%, reducing operational costs by up to 21%, and increasing profit by Rp2,507,146,451. The study also includes risk analysis and mitigation strategies for scenario, which are expected to reduce challenges and enhance agricultural sustainability in Sentul Village.

Keywords: Agricultural Productivity, Food Security, Profit Optimization, Sustainable Agriculture, System Dynamics

1. Pendahuluan

Ketahanan pangan merupakan pilar utama pembangunan berkelanjutan yang krusial bagi stabilitas dan kesejahteraan masyarakat global (Elizabeth et al., 2024). Di tengah dinamika populasi dan perubahan iklim yang terus berlangsung, memastikan ketersediaan, aksesibilitas, pemanfaatan, dan stabilitas pangan menjadi tantangan kompleks yang memerlukan perhatian serius, terutama di tingkat komunitas pedesaan yang menjadi garda terdepan produksi pangan (Rachmawatie et al., 2020). Dalam konteks ini, Desa Sentul di Kecamatan Tembelang, Kabupaten Jombang, Jawa Timur, menyajikan sebuah studi kasus yang menarik. Dengan sebagian besar wilayahnya, sekitar 74,8%, didedikasikan untuk lahan pertanian, Desa Sentul secara teoritis memiliki fondasi kuat untuk ketahanan pangan lokal. Data bahkan menunjukkan produksi beras Desa Sentul mencapai surplus signifikan, yaitu 1.261,69 ton setiap tahun. Namun, di balik angka surplus tersebut, tersimpan berbagai tantangan laten yang mengancam keberlanjutan sektor pertanian dan kesejahteraan para petaninya.

Fenomena ini mendorong penelitian mendalam terhadap akar permasalahan yang menghambat tercapainya potensi penuh Desa Sentul. Analisis komprehensif menguak sejumlah isu krusial yang dapat dikelompokkan dalam tiga dimensi keberlanjutan yang saling terkait: lingkungan (*Planet*), ekonomi (*Profit*), dan sosial (*People*). Dari perspektif lingkungan, penggunaan pupuk kimia secara berlebihan telah mengakibatkan degradasi kualitas tanah yang nyata (Hamzah & Siswanto, 2023). pH tanah yang berada di kisaran 5, jauh di bawah rentang optimal 6-7, serta kadar C-organik yang hanya 1,5% dibandingkan batas optimal 3%, menunjukkan adanya ketidakseimbangan ekologis (Noerhayati & Suprpto, 2018). Kondisi ini sering kali memaksa petani untuk mengistirahatkan lahan pada musim tanam ketiga guna pemulihan, sebuah praktik yang secara langsung mengurangi produktivitas tahunan dan memunculkan kekhawatiran serius terhadap keberlanjutan jangka panjang sumber daya lahan.

Secara ekonomi, kesejahteraan petani di Desa Sentul tertekan oleh serangkaian faktor yang memangkas profitabilitas mereka. Serangan hama seperti tikus, keong mas, dan wereng secara konsisten menyebabkan kerugian panen yang substansial (Airlangga et al., 2022) masing-masing mencapai 25%, 10%, dan 10-20%, tidak hanya mengurangi hasil tetapi juga memicu biaya tambahan untuk upaya pengendalian hama. Di samping itu, dinamika pasar yang tidak menguntungkan, terutama fluktuasi harga jual gabah yang cenderung rendah saat musim panen raya, seringkali diperparah oleh kualitas panen yang kurang optimal, semakin mengikis margin keuntungan petani (Mahmudi et al., 2024). Dimensi sosial pertanian di Desa Sentul juga menghadapi tantangan serius. Terjadi penurunan drastis dalam jumlah petani, dari 522 jiwa pada tahun 2019 menjadi 253 jiwa pada tahun 2023. Kecenderungan ini diperparah oleh rata-rata usia petani yang di atas 56 tahun, mengindikasikan krisis regenerasi yang mengkhawatirkan dan kurangnya minat generasi muda untuk meneruskan tradisi pertanian (Nurjismi, 2021), yang pada gilirannya mengancam keberlangsungan sektor vital ini.

Merespons kompleksitas permasalahan yang saling berkelindan di Desa Sentul, penelitian ini bertujuan untuk memberikan kontribusi substantif dalam memahami dan merumuskan solusi yang adaptif dan berkelanjutan. Secara spesifik, penelitian ini mengajukan serangkaian pertanyaan esensial (Romadlon, 2022): Faktor-faktor apa saja yang menjadi pertimbangan utama petani dalam mendukung ketahanan pangan terkait profitabilitas mereka di Desa Sentul? Bagaimana sebuah model sistem dinamis dapat dikembangkan secara efektif untuk mengintegrasikan dan menganalisis interaksi kompleks antara faktor-faktor tersebut guna mendukung ketahanan pangan dan keuntungan petani? Skenario sistem dinamis manakah yang dapat diidentifikasi sebagai paling optimal dalam meningkatkan produktivitas sekaligus profitabilitas petani di Desa Sentul?

Kebaruan penelitian ini terletak pada aplikasi pendekatan Sistem Dinamis yang komprehensif sebagai alat analisis untuk memecahkan permasalahan pertanian yang multidimensional di Desa Sentul. Dengan memanfaatkan perangkat lunak Stella, penelitian ini tidak hanya mengembangkan sebuah model sistem dinamis yang canggih untuk mensimulasikan interaksi antara variabel-variabel kunci, tetapi juga secara sistematis menguji berbagai skenario intervensi. Integrasi pendekatan Triple Bottom Line dengan metodologi Sistem Dinamis ini menyediakan kerangka kerja holistik yang inovatif untuk mencapai keberlanjutan pertanian dan memperkuat ketahanan pangan di tingkat komunitas,

menjadikannya sebuah model yang relevan dan dapat direplikasi untuk wilayah lain yang menghadapi tantangan serupa.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan sistem dinamis dan *SMART PLS* untuk menganalisis faktor-faktor yang mempengaruhi ketahanan pangan dan keuntungan petani di Desa Sentul. Sistem dinamis dipilih karena kemampuannya untuk menggambarkan hubungan yang kompleks antara variabel-variabel yang saling berinteraksi dalam suatu sistem pertanian. Pendekatan ini memungkinkan pemodelan berbagai skenario yang dapat mengoptimalkan produktivitas pertanian serta meningkatkan keberlanjutan pertanian di daerah tersebut.

2.1 Penyebaran Kuisioner

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode kuantitatif yang mengandalkan pengumpulan data melalui survei dan wawancara dengan petani dan stakeholder terkait di Desa Sentul. Model sistem dinamis dikembangkan dengan menggunakan perangkat lunak Stella untuk memvisualisasikan hubungan antar variabel dan melakukan simulasi skenario. Selain itu, *SMART PLS* (*Partial Least Squares Structural Equation Modeling*) digunakan untuk menganalisis faktor-faktor yang memengaruhi ketahanan pangan berdasarkan data kuisioner yang telah dikumpulkan.

Populasi penelitian ini adalah petani yang berada di Desa Sentul, yang mayoritas bekerja dalam sektor pertanian padi. Pengambilan sampel dilakukan secara *purposive sampling*, yaitu dengan memilih petani yang memiliki pengalaman dalam budidaya padi dan yang telah lama terlibat dalam kegiatan pertanian (Mahdalena et al., 2022). Sampel yang diambil terdiri dari 80 petani yang akan mengisi kuisioner terkait faktor-faktor yang memengaruhi produktivitas pertanian mereka. Setelah data kuisioner dikumpulkan, data tersebut dianalisis menggunakan *SMART PLS* untuk mengetahui hubungan antara variabel-variabel tersebut terhadap ketahanan pangan dan keuntungan petani lalu di lanjutkan dengan pembuatan *Causal Loop Diagram*.

2.2 Analisis Faktor

Tahap analisis faktor dalam penelitian ini berfokus pada identifikasi dan evaluasi variabel-variabel kunci yang memengaruhi ketahanan pangan dan profitabilitas petani di Desa Sentul. Menggunakan *SMART PLS* (*Partial Least Squares Structural Equation Modeling*) terhadap data kuisioner dari 80 petani, analisis ini berhasil mengidentifikasi faktor-faktor signifikan seperti usia petani, adaptasi teknologi, serangan hama, penggunaan pupuk, dan pH tanah. Hasilnya menunjukkan bagaimana faktor-faktor ini secara signifikan memengaruhi produktivitas pertanian, ketahanan pangan, dan keuntungan petani, sekaligus menjadi landasan esensial dalam pengembangan model Sistem Dinamis, termasuk perumusan *Causal Loop Diagram* dan *Stock and Flow Diagram* (Setiabudhi et al., 2025).

2.3 Pembuatan Model Sistem Dinamis

Tahap pembuatan model sistem dinamis merupakan inti dari penelitian ini, di mana pemahaman tentang faktor-faktor yang memengaruhi ketahanan pangan dan profitabilitas petani yang telah diidentifikasi pada analisis sebelumnya, diterjemahkan ke dalam suatu representasi dinamis. Proses ini diawali dengan pengembangan *Causal Loop Diagram* (CLD) (Sarasi et al., 2021). Pada tahap ini, variabel-variabel kunci dan hubungan kausal di antaranya, termasuk umpan balik positif dan negatif, dipetakan secara kualitatif. CLD berfungsi sebagai alat konseptual untuk memvisualisasikan bagaimana perubahan pada satu variabel dapat memicu serangkaian efek pada variabel lain di dalam sistem pertanian Desa Sentul, khususnya yang berkaitan dengan peningkatan keuntungan hasil panen.

Setelah hubungan kausal antar variabel dipahami secara kualitatif melalui CLD, langkah selanjutnya adalah mengembangkan model tersebut menjadi *Stock and Flow Diagram* (SFD). *Stock and Flow Diagram* adalah alat yang esensial dalam proses pemodelan sistem dinamis untuk menggambarkan hubungan antara variabel stok (akumulasi), aliran (perubahan stok), dan variabel pembantu (faktor-

faktor yang memengaruhi aliran). SFD memungkinkan representasi kuantitatif dari sistem, di mana setiap komponen (stok, aliran, konverter) dihubungkan dengan persamaan matematis yang merefleksikan perilaku dinamis dari sistem pertanian. Model *Stock and Flow Diagram* ini dikembangkan menggunakan perangkat lunak *STELLA*, yang memfasilitasi visualisasi, formulasi persamaan, dan simulasi berbagai skenario. Dengan demikian, SFD sangat berguna dalam menganalisis dinamika sistem, memungkinkan pemodelan untuk memahami bagaimana perubahan dalam satu aspek sistem dapat memengaruhi aspek lainnya, serta menjadi dasar untuk pengujian skenario simulasi guna mengidentifikasi strategi optimal untuk meningkatkan produktivitas dan profitabilitas petani.

2.4 Validasi Model

Setelah proses maka dilakukan proses validasi model untuk mengevaluasi apakah model yang dikembangkan mencerminkan sistem nyata yang sedang disimulasikan. Dalam penelitian ini, uji validitas perilaku diterapkan untuk memverifikasi substansi model sesuai dengan tujuan yang ingin dicapai. Pada penelitian ini *Behavior Validity Test* dimana dilaksanakan melalui dua cara, yaitu uji perbandingan rata-rata (*mean comparison*) atau uji perbandingan variasi amplitudo (*% error variance*). Model dinyatakan valid dalam uji *mean comparison* jika nilai $E1 \leq 5\%$. Sementara itu dalam uji *% error variance* model dianggap valid jika $E2 \leq 30\%$. (Hair et al., 2019)

Perbandingan rata-rata (*Mean Comparison*)

$$E1 = \frac{\bar{S} - \bar{A}}{\bar{A}} \quad (1)$$

Keterangan:

$\bar{S}$ = Mean hasil simulasi

$\bar{A}$ = Mean data

Model dianggap valid bila $E1 < 5\%$

Variasi Amplitudo (*Error Variance*)

$$E2 = \left| \frac{Ss - Sa}{Sa} \right| \quad (2)$$

Keterangan:

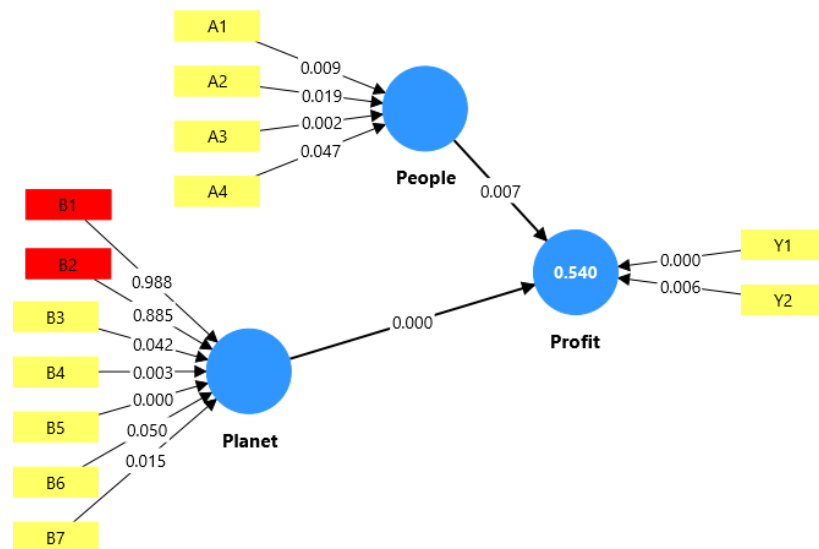
Ss = Standar deviasi model

Sa = Standar deviasi data

Model dianggap valid bila $E2 < 30\%$

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Analisa Faktor SMART PLS



Gambar 1. Analisis Faktor Menggunakan Smart PLS

Grafik pada Gambar 1. menunjukkan bahwa faktor-faktor yang memengaruhi ketahanan pangan dan keuntungan petani di Desa Sentul dapat dikelompokkan dalam tiga konstruk utama, yaitu *People*, *Planet*, dan *Profit*, dengan masing-masing konstruk memiliki indikator yang menunjukkan pengaruh signifikan terhadap variabel dependen yang diuji.

Tabel 1 Hasil *Bootstrapping SMART PLS*

Kode	Konstruk	Original sample (O)	T statistics (O/STDEV)	P values
A1	Usia	0.527	2.6	0.009
A2	Pendidikan terakhir	0.379	2.344	0.019
A3	Adaptasi Teknologi	0.515	3.099	0.002
A4	Jenis Alat	-0.384	1.983	0.047
B3	Jenis Pupuk	0.4	2.971	0.003
B4	Cuaca	-0.222	2.034	0.042
B5	Tingkat Hama	0.694	5.936	0
B6	Sumber air	-0.244	1.964	0.05
B7	PH tanah	0.292	2.431	0.015
Y1	Profit MT 1	0.702	4.977	0
Y2	Profit MT 2	0.449	2.768	0.006

Tabel 1 Pada konstruk *People*, semua indikator yang diuji menunjukkan pengaruh yang signifikan secara statistik ($p < 0.05$). Dua indikator yang memiliki pengaruh paling kuat adalah Adaptasi Teknologi (A3) Dengan nilai O = 0.515 dan Usia (A1) dengan nilai O = 0.527), yang mengindikasikan bahwa kemampuan adaptasi teknologi dan usia petani adalah faktor penting yang berkontribusi dalam membentuk konstruk *People*. Hal ini menunjukkan bahwa petani yang lebih muda atau yang memiliki kemampuan untuk beradaptasi dengan teknologi pertanian cenderung memiliki kinerja yang lebih baik dalam hal ketahanan pangan dan produktivitas pertanian. Hasil yang lebih menarik muncul pada Jenis Alat (A4) dengan O = -0.384, yang menunjukkan koefisien negatif, mengindikasikan bahwa penggunaan alat tertentu dalam pertanian, meskipun signifikan, mungkin justru memberikan dampak negatif terhadap konstruksi *People*. Ini bisa berarti bahwa alat yang digunakan petani tidak sepenuhnya mendukung efisiensi atau keberlanjutan dalam praktik pertanian mereka.

Konstruk *Planet*, memiliki indikator Tingkat Hama (B5) dengan nilai O = 0.694 menunjukkan pengaruh yang paling dominan, dengan tingkat signifikansi yang sangat tinggi ($p = 0.000$). Hal ini

menegaskan pentingnya manajemen hama sebagai faktor yang sangat mempengaruhi ketahanan pangan di Desa Sentul. Pengelolaan hama yang efektif dan tepat waktu dapat meningkatkan hasil pertanian dan mencegah kerugian yang disebabkan oleh serangan hama. Selain itu, indikator Jenis Pupuk (B3) ($O = 0.400$) dan pH Tanah ($O = 0.292$) juga memberikan kontribusi positif yang signifikan terhadap konstruk *Planet*, menunjukkan bahwa faktor-faktor lingkungan seperti kondisi cuaca dan kualitas tanah turut berperan dalam menentukan keberhasilan pertanian. Namun, Cuaca ($O = -0.222$) dan Sumber Air ($O = -0.244$) menunjukkan pengaruh negatif meskipun tetap signifikan secara statistik. Koefisien negatif pada indikator-indikator ini mungkin mengindikasikan bahwa penggunaan jenis pupuk atau sumber air tertentu dapat memperburuk kondisi tanah atau memperburuk ketahanan terhadap perubahan iklim dan cuaca ekstrem, meskipun hasil ini memerlukan analisis lebih lanjut.

Sehingga faktor utama yang perlu di perhatikan pada Konstruk *People* adalah Adaptasi teknologi dan Usia sedangkan konstruk *Planet* adalah Tingkat hama, Jenis pupuk dan juga Ph Tanah.

3.2. Uji Hipotesis

Uji hipotesis dilakukan untuk mengatahun hubungan antar variabel apakah saling mempengaruhi atau diak dengan dirumuskan sebagai berikut:

1. H_0 (Hipotesis Nol): Tidak ada hubungan signifikan antara *People*, *Planet*, dan *Profit*. Dengan kata lain, faktor-faktor seperti usia petani, tingkat pendidikan, adaptasi teknologi, tingkat serangan hama, jenis pupuk, dan pH tanah tidak berpengaruh terhadap profitabilitas pertanian.
2. H_1 (Hipotesis Alternatif): Ada hubungan signifikan antara *People*, *Planet*, dan *Profit*. Artinya, faktor-faktor tersebut memiliki pengaruh yang signifikan terhadap profitabilitas pertanian.

Tabel 1. *Path Coefisien*

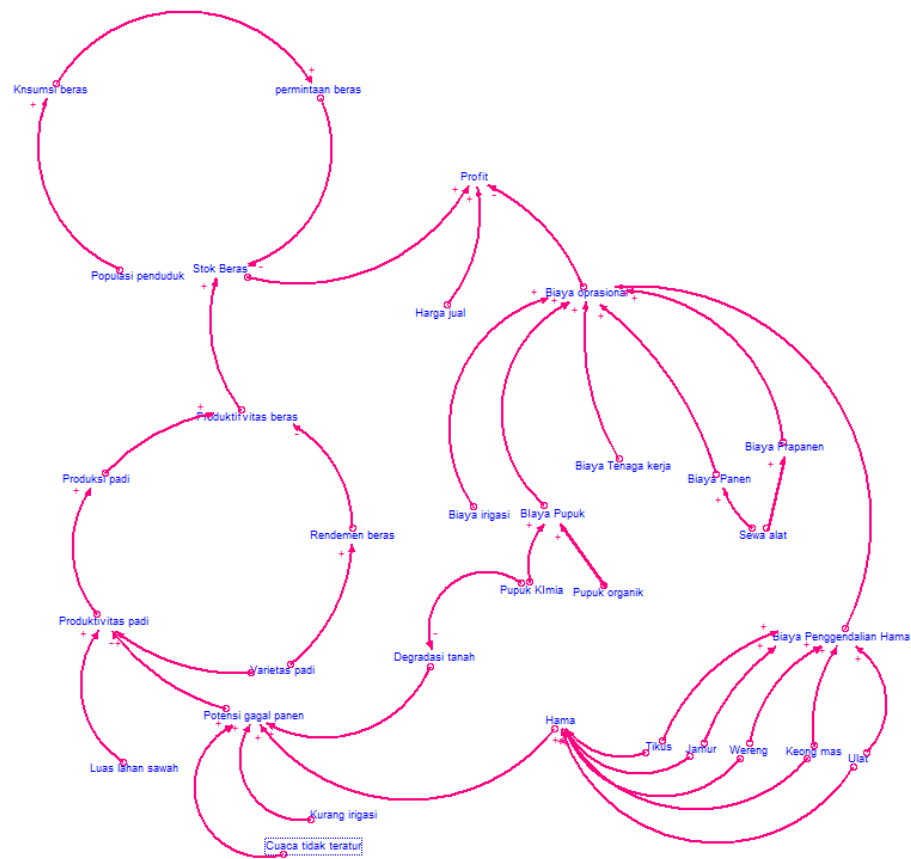
Hubungan	Original Sample (O)	Sample Mean (M)	Standard Deviasi (STDEV)	T Statistic (O/ STDEV)	P Value
<i>People -> Profit</i>	0.238	0.25	0.088	2.722	0.007
<i>Planet -> Profit</i>	0.595	0.618	0.084	7.056	0

Tabel 2 menunjukkan *Path Coefisien* yang menunjukkan apakah Hipotesis dapat di terima ataupun di tolak terdapat dua konstruk yaitu *Peole* terhadap *Profit* dan *Planet* Terhadap *Profit*.

People → *Profit* memiliki p-value = 0.007 yang lebih kecil dari 0.05, sehingga H_1 diterima. Ini berarti *People* (yang mencakup usia petani, pendidikan, dan adaptasi teknologi) memiliki pengaruh signifikan terhadap *Profit*.

Planet → *Profit* memiliki p-value = 0.000, yang juga lebih kecil dari 0.05, sehingga H_1 diterima. Ini menunjukkan bahwa *Planet* (termasuk faktor seperti tingkat hama, jenis pupuk, dan pH tanah) memiliki pengaruh signifikan terhadap *Profit*.

3.1. Causal Loop Diagram



Gambar 2. Causal Loop Diagram

Gambar 2 menunjukkan *Causal Loop Diagram* yang menggambarkan model hubungan sebab-akibat antar variabel dalam upaya meningkatkan pendapatan petani di Desa Sentul, khususnya pada komoditas padi. Pertumbuhan dan penurunan jumlah penduduk memengaruhi populasi desa. Perubahan populasi ini kemudian berdampak pada permintaan beras, yang juga dipengaruhi oleh hasil panen padi serta kebutuhan beras per kapita masyarakat.

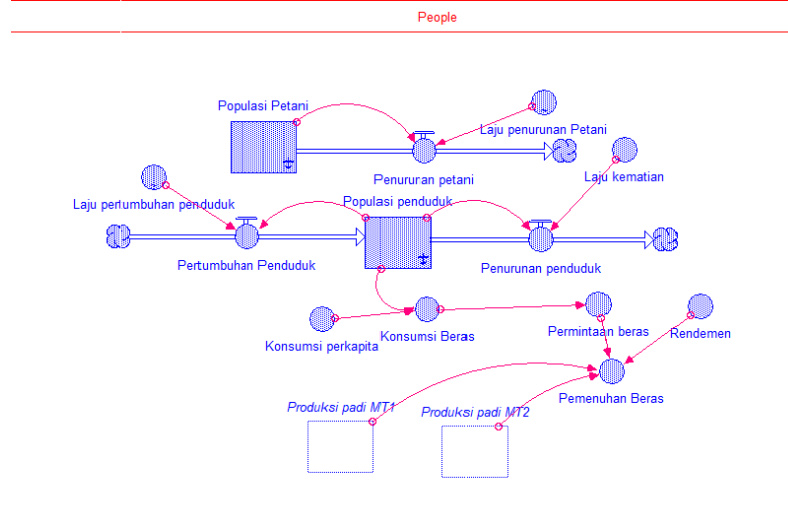
Luas lahan yang digunakan untuk bercocok tanam dan risiko gagal panen menentukan besarnya area panen untuk masing-masing komoditas, yang pada akhirnya memengaruhi total hasil panen. Selanjutnya, hasil panen bersama dengan harga jual gabah akan menghasilkan pendapatan petani. Namun, pendapatan ini akan dikurangi oleh biaya operasional yang dikeluarkan petani. Siklus-siklus (*loop*) dalam model ini mencerminkan umpan balik positif dan negatif yang saling memengaruhi ketersediaan pangan serta keuntungan yang diperoleh petani.

3.2. Stock And Flow

Simulasi adalah metode untuk meniru fenomena atau proses di dunia nyata. Model simulasi berfungsi sebagai media untuk menafsirkan, menyelidiki, dan mengoptimalkan tindakan dari suatu proses atau gejala, dengan tujuan memprediksi masa depan. Tahap penyusunan diagram stok dan aliran dilakukan untuk setiap sub-model agar semua aspek dapat terekam dengan baik.

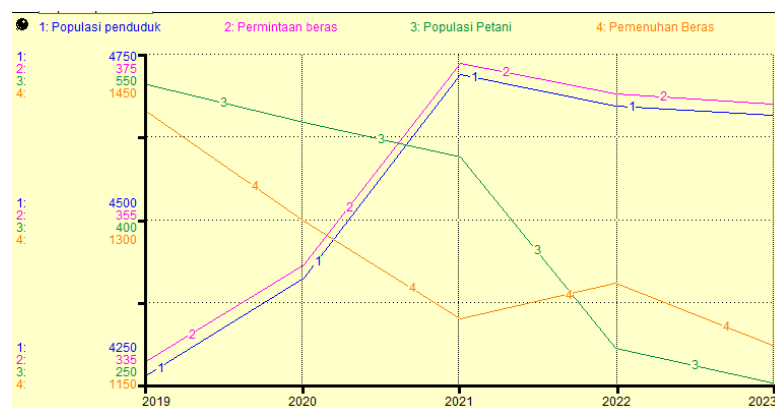
Proses perumusan model ini melibatkan penginputan data dan informasi ke dalam simbol-simbol dinamis seperti *stok/level*, aliran/tingkat, konstanta, variabel tambahan/*auxiliary*, dan sumber/*sink*. Hubungan antar elemen ini digambarkan melalui diagram yang diwakili oleh persamaan integral dan aljabar. Persamaan-persamaan ini kemudian diselesaikan secara numerik untuk mensimulasikan perilaku dinamis sistem (Sternan, 2000, dikutip dari Aprillya, 2020).

3.4.1 Sub Model People



Gambar 1. Sub Model People

Sub sistem stock and flow pada bagian *People* dimana variabel *stock* berupa populasi penduduk yang memiliki *Inflow* berupa pertumbuhan penduduk yang di dukung oleh Laju pertumbuhan penduduk tahun ke tahun sedangkan *out flow*nya adalah pemenuhan konsumsi beras. Dan juga ada *varibel stock* yang berisikan populasi petani dengan *outflow* penurunan jumlah petani.

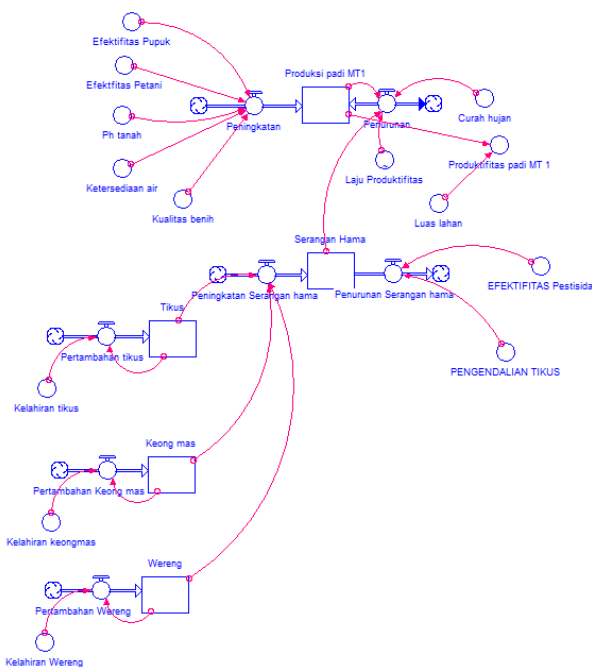


Gambar 2. Hasil Grafik Sub Model People

Gambar 4 Menunjukkan bahwa jumlah penduduk desa sentul dari tahun 2019-2023 bersifat fluktuatif yang awalnya jumlah populasi di 2019 berada di 4882 dan di tahun 2023 berada pada populasi 4726 untuk jumlah petani di Desa sentul sendiri juga lambat laun mengalami penurunan pada tahun 2019 berjumlah 552 namun di 2023 berjumlah 253 dengan pemenuhan beras yang selalu terpenuhi tiap tahunnya.

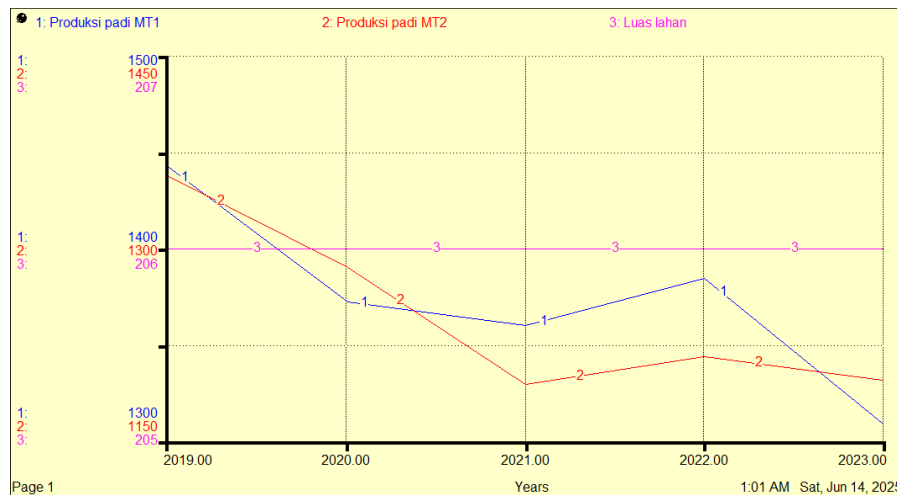
3.4.2 Sub Model Planet

Sub model Planet berfungsi untuk mengetahui hasil produksi dari padi di masing masing MT1 dan MT2 yang di pengaruhi oleh beberapa aspek seperti serangan hama curah hujan dan juga efektifitas pupuk.



Gambar 3 Sub Model Planet

Karena tidak adanya penurunan luas lahan selama 5 tahun terakhir maka produktifitas padi perlu diketahui sebab naik dan turunya mulai dari tahun 2019 hingga 2023. yang selanjutnya akan dilakukan simulasi untuk mengetahui bagaimana produktifitas padi di Desa sentul.

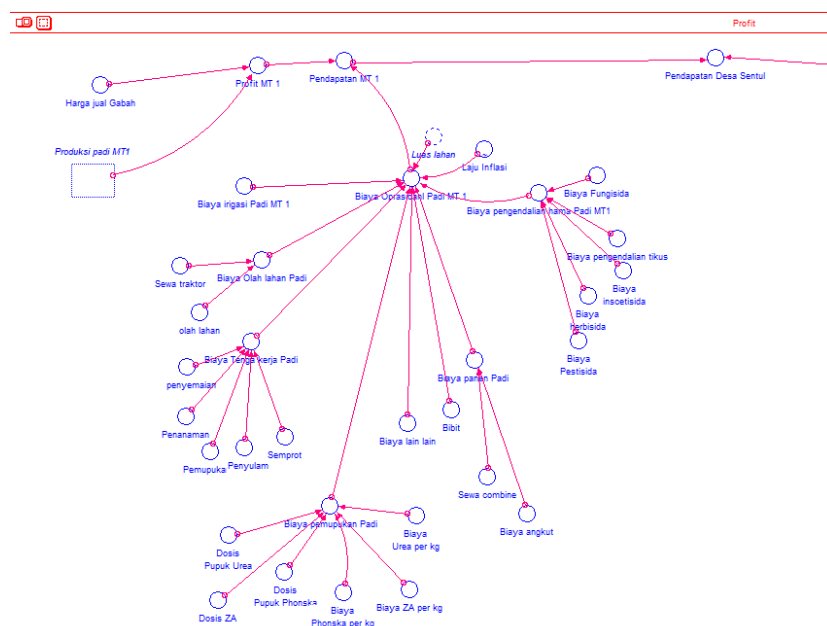


Gambar 4. Hasil Grafik *Sub model Planet*

Grafik pada gambar 6 Menunjukkan bahwa produktifitas padi di MT1 dan MT2 terus menerus mengalami penurunan dari tahun 2019 hingga ke 2023 sedangkan luas lahannya stagnan di 206 Hektar dengan demikian dapat di lakukan simulasi apa apa sajakah yang mempengaruhi penurunan produktifitasnya dari tahun ke tahun.

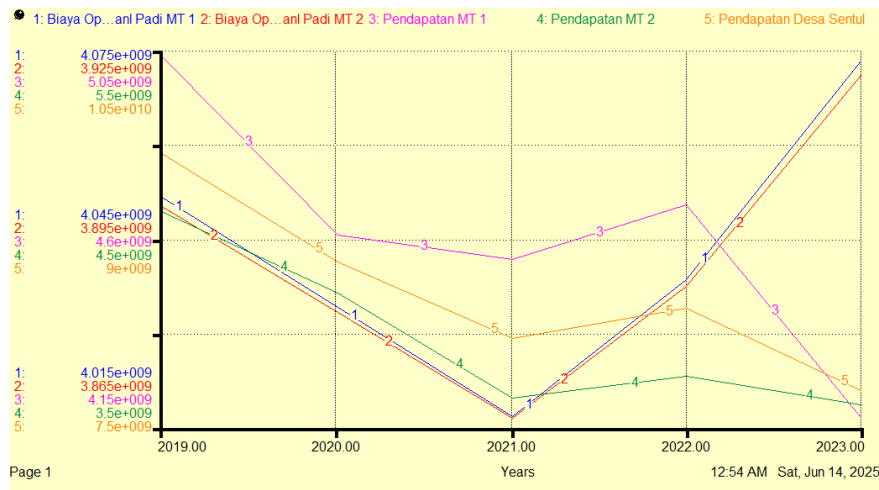
3.4.3 Sub Model Profit

Sub model profit sangat di pengaruhi oleh fluktuasi harga dan biaya oprasional pada sub model ini kita dapat mengetahui berpakah biaya oprasioal yang di dikeluarkan oleh desa Sentul untuk menunjang kutivasi padi.



Gambar 5. *Sub Model Profit*

Gambar 7 menunjukkan *Submodel* profit terdiri dari biaya biaya seperti biaya tenaga kerja, olah lahan, biaya pemupukan, irigaisai sampai dengan biaya pengendalian hama.



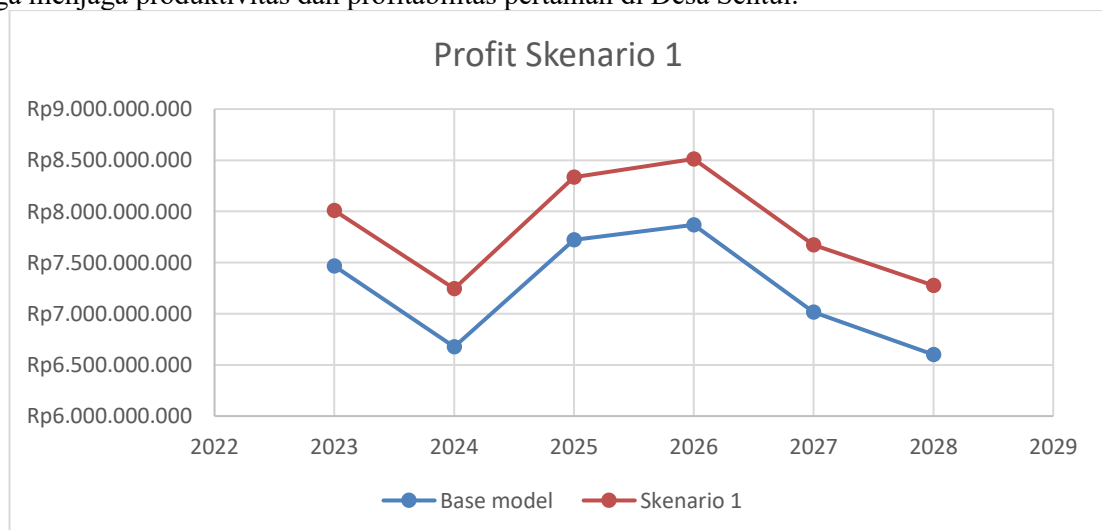
Gambar 6. Hasil Grafik Sub model Profit

Gambar 8 menyajikan estimasi biaya operasional untuk penanaman padi, merinci pengeluaran untuk *input* pertanian (bibit, pupuk, pestisida, herbisida) serta biaya tenaga kerja dan jasa (pengolahan lahan, tanam, pemeliharaan, panen, pengangkutan). Musim Tanam 1 (MT-1): Total biaya operasional langsung adalah Rp 2.575.000. Dengan penambahan biaya sewa lahan Rp 1.000.000, total keseluruhan menjadi Rp 3.575.000. Bibit yang digunakan adalah Ciherang. Musim Tanam 2 (MT-2): Total biaya operasional langsung adalah Rp 2.418.000. Dengan penambahan biaya sewa lahan Rp 1.000.000, total keseluruhan menjadi Rp 3.418.000. Bibit yang digunakan adalah Inpari. Secara keseluruhan, biaya operasional MT-2 sedikit lebih rendah dibanding MT-1, terutama karena perbedaan jenis bibit dan harga beberapa *input* pertanian

3.3. Hasil Skenario

3.5.1 Skenario 1 : Adaptasi Teknologi

Skenario pertama membahas tantangan penurunan jumlah petani dengan luas lahan konstan. Solusinya adalah adopsi teknologi pertanian modern seperti penyemprot *drone* dan *transplanter*. Inovasi ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi dan menurunkan biaya operasional (Nurjasmi, 2021), sehingga menjaga produktivitas dan profitabilitas pertanian di Desa Sentul.



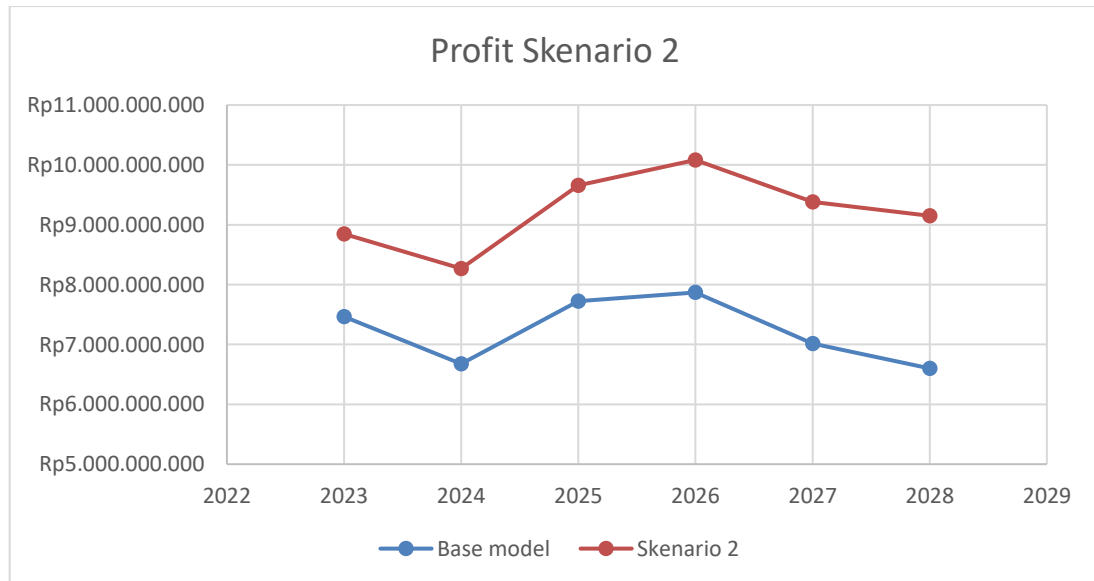
Gambar 7. Hasil Skenario 1

Berdasarkan data Grafik pada gambar 9 yang diberikan, Skenario 1 secara konsisten menunjukkan *profit* yang lebih tinggi dibandingkan *Base Model* sepanjang periode 2023 hingga 2028. Rata-rata *profit* Skenario 1 adalah Rp Rp7,841,223,782, yang berarti peningkatan *profit*

sebesar 9% atau Rp616,212,852 dibandingkan dengan rata-rata *profit Base Model* sebesar Rp Rp7,225,010,931 Secara keseluruhan, penggunaan adaptasi teknologi pada Skenario 1 terbukti berhasil meningkatkan produksi padi, dengan kenaikan yang lebih signifikan.

3.5.2 Skenario 2 Penggunaan BioPestisida dan Pupuk Organik

Skenario ke dua lebih mengedepankan pendekatan dengan dimensi *Planet* pada skenario ini dilakukan pemanfaatan hama Keong mas sebagai Pupuk Organik cair (Nugroho et al., 2020) sehingga selain menekan hama dapat menyuburkan tanah dan juga menggunakan Umbi Gadung sebagai bahan baku pembuatan Insektisida untuk membasmi hama wereng dan *Rodensida* untuk membasmi hama tikus (Hamzah & Siswanto, 2023).

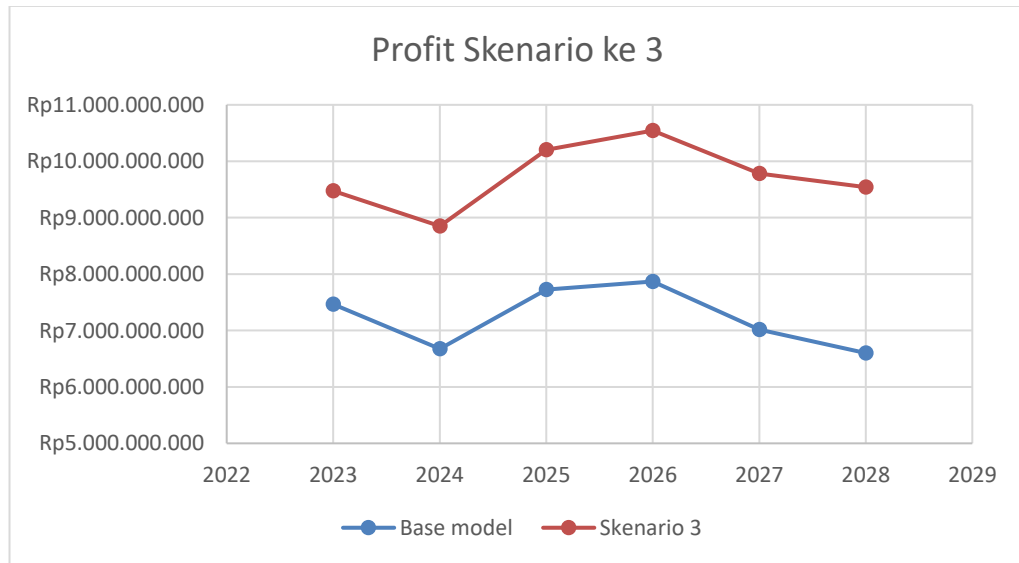


Gambar 8 Profit Skenario 2

Pada Grafik pada gambar 10 ini membandingkan proyeksi *profit* antara *Base model* dan Skenario 2 dari tahun 2023 hingga 2028. Skenario 2 secara konsisten menghasilkan *profit* yang lebih tinggi daripada *Base model* di setiap tahunnya. Rata-rata *profit* Skenario 2 adalah Rp9,623,306,533, menunjukkan peningkatan *profit* sebesar 26% atau sekitar Rp2,005,816,158 dibandingkan dengan rata-rata *profit Base model* sebesar Rp Rp7,225,010,931. Ini mengindikasikan bahwa Skenario 2 berhasil meningkatkan profitabilitas secara signifikan.

3.5.3 Skenario 3 Skenario Gabungan

Skenario ke tiga menunjukan penggabungan antara penggunaan teknologi terbaru dan juga pengaplikasian pupuk organik berbahan dasar keong mas dan pestisida alami dengan menghubungkan ke dua faktor di proyeksikan hasil akan menjadi lebih optimal



Gambar 9. Profit Skenario 3

Pada gambar 11 Skenario 3 menunjukkan profitabilitas yang jauh lebih unggul dibandingkan *Base model*, dengan peningkatan *profit* rata-rata sebesar 35%, mencapai *profit* rata-rata Rp Rp9,732,157,381, dengan *profit* sebesar Rp2,507,146,451

4. Simpulan

Penelitian ini berfokus pada analisis faktor-faktor kunci yang memengaruhi ketahanan pangan dan profitabilitas petani di Desa Sentul, Kabupaten Jombang, dengan komoditas utama padi. Latar belakang penelitian menunjukkan bahwa meskipun Desa Sentul memiliki potensi pertanian yang besar dengan 74% wilayahnya sebagai lahan pertanian dan surplus produksi beras, terdapat berbagai tantangan serius. Masalah utama yang dihadapi meliputi degradasi kualitas tanah akibat penggunaan pupuk kimia berlebihan, serangan hama yang menyebabkan kerugian signifikan (hingga 45% akibat hama tikus, keong mas, dan wereng), fluktuasi harga gabah, serta penurunan jumlah dan usia rata-rata petani yang mengindikasikan krisis regenerasi.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, penelitian ini mengadopsi pendekatan holistik *Triple Bottom Line* (lingkungan, ekonomi, dan sosial) yang diintegrasikan dengan analisis *Partial Least Squares Structural Equation Modeling* (SMART PLS) dan pemodelan sistem dinamis menggunakan perangkat lunak STELLA. Metode penelitian melibatkan pengumpulan data kuantitatif melalui survei dan wawancara dengan 80 petani di Desa Sentul. Data yang terkumpul kemudian dianalisis menggunakan SMART PLS untuk mengidentifikasi hubungan antar variabel, dilanjutkan dengan pengembangan *Causal Loop Diagram* (CLD) dan *Stock and Flow Diagram* (SFD) untuk memvisualisasikan dinamika sistem. Validasi model dilakukan melalui uji perbandingan rata-rata dan variasi amplitudo untuk memastikan keakuratan representasi sistem nyata.

Hasil penelitian menunjukkan beberapa temuan kunci. Analisis SMART PLS mengkonfirmasi bahwa serangan hama adalah faktor paling signifikan yang berdampak negatif pada profitabilitas dan produktivitas petani. Selain itu, faktor usia petani, adaptasi teknologi, penggunaan pupuk, dan pH tanah juga memiliki pengaruh yang signifikan. Model sistem dinamis yang dikembangkan menggambarkan bagaimana penurunan kualitas tanah dan serangan hama berkontribusi pada penurunan produktivitas padi, meskipun luas lahan pertanian tetap stagnan.

Melalui simulasi tiga skenario, ditemukan bahwa Skenario 3 (gabungan antara adaptasi teknologi pertanian modern dan penggunaan pestisida serta pupuk organik) adalah yang paling optimal. Skenario ini berhasil meningkatkan produktivitas padi secara substansial (14% pada Musim Tanam 1 dan 11% pada Musim Tanam 2), mengurangi biaya operasional (15% pada MT1 dan 21% pada MT2), serta

menghasilkan peningkatan *profit* yang signifikan sebesar Rp2.507.146.451. Kesimpulan ini menegaskan bahwa kombinasi praktik pertanian berkelanjutan dan adaptasi teknologi adalah kunci untuk meningkatkan profitabilitas dan memperkuat ketahanan pangan jangka panjang di Desa Sentul.

Referensi

- Airlangga, P., Susanti, A., Mu, A., Zahro, arofati, Hidayatul, S. C., Wahab Habullah, K., & KHA Wahab Habullah, U. (2022). *Pemanfaatan Umbi Gadung untuk Pengendalian Tikus di Desa Jatiwates Kecamatan Tembelang Jombang* (Vol. 3, Issue 1). <https://doi.org/10.32764/abdimasper.v3i1.2474>
- Elizabeth, R., Sari, S. P., Purnamasari, I., Cahyaningrum, H., Sembiring, J., Suanda, W., Putra, R. P., Sriwahyuni, I., & Panunggul, V. B. (2024). *SISTEM PERTANIAN SISTEM PERTANIAN BERKELANJUTAN BERKELANJUTAN* (M. P. Ari Yanto., Ed.; 1st ed., Vol. 1). GET PRESS INDONESIA.
- Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2019). *MULTIVARIATE DATA ANALYSIS EIGHTH EDITION*. www.cengage.com/highered
- Hamzah, A., & Siswanto, B. (2023). *PUPUK ORGANIK*. <https://forindpress.com/index.php/forind/index>
- Mahdalena, Mahpolah, & Suroto. (2022). *Cara Membuat Kuisioner Penelitian*.
- Mahmudi, A., Wijanarko, N., Martha, N. A., & Abrar. (2024). SOCIAL AND ECONOMIC CONDITIONS OF RICE FARMERS IN NGRANDU VILLAGE, PONOROGO REGENCY IN 2000-2024. *Pendidikan Dan Humaniora*, 8(2). <https://doi.org/10.36526/js.v3i2.4830>
- Noerhayati, E., & Suprpto, B. (2018). *PERENCANAAN JARINGAN IRIGASI SALURAN TERBUKA*.
- Nugroho, C. C., Karno, & Suprioyo. (2020). *Efektifitas Pupuk Organik Cair Keong Mas Terhadap Pertumbuhan dan Hasil Padi Varietas Ciherang*. 20, 1–214.
- Nurjasm, R. (2021). Review: Potensi Pengembangan Pertanian Perkotaan oleh Lanjut Usia untuk Mendukung Ketahanan Pangan. In *Jurnal Ilmiah Respati* (Vol. 12, Issue 1). <http://ejournal.urindo.ac.id/index.php/pertanian>
- Rachmawatie, S. J., Sutrisno Joko, Rahayu, E. S., & Widiastuti, L. (2020). *Mewujudkan Ketahanan Pangan Melalui Implementasi Sistem Pertanian Terpadu Berkelanjutan* (Edisi pertama). Plantaxia.
- Romadlon, F. (2022). *DINAMIKA FOOD SUPPLY CHAIN JALAN PANJANG MENUJU KETAHANAN PANGAN NASIONAL* (F. Romadlon, Ed.). Plantaxia.
- Sarasi, V., Yulianti, D., & Farras, J. (2021). *Berpikir Sistem dan Dinamika Sistem*. <https://www.researchgate.net/publication/355165945>
- Setiabudhi, H., Suwono, M. A., Yudi, M. S., Setiawan, A., Karim, S., Hardani, P., & Duari, H. (2025). *Analisis Data Kuantitatif Dengan Smart PLS 4*.