

Simulasi *System Dynamics* Kualitas Tanah Terhadap Efisiensi Biaya dan Profit Usaha Tani di Desa Gunungsari

Elsa Amanda Putri*, Hery Murnawan

Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya
Jalan Semolowaru No. 45, Surabaya 60118, Jawa Timur, Indonesia

E-mail: elsaaputri141@gmail.com*

Abstract

This study evaluates the effectiveness of soil pH enhancement and pesticide-use efficiency on operational costs and the profitability of a sustainable farming system in Gunungsari Village. In this area, rice and maize are cultivated alternately in the first and second planting seasons, heavily reliant on rainfall and irrigation. During the dry season, this dependency shifts to chemical fertilizers and water pumps, leading to a surge in operational expenses. Employing a triple bottom line approach (people, planet, profit), the methodology combines quantitative analysis via SmartPLS to identify dominant sustainability factors with system dynamics simulations in STELLA to test various policy scenarios. SmartPLS results identify soil pH as the most influential factor (44% contribution). Raising soil pH from 5.97 to 6.80 through liming and organic amendments significantly reduces reliance on urea fertilizer, lowering operational costs by 5.36–7.04% and boosting profits by 12.91% (Rice Season 1), 10.27% (Rice Season 2), 14.65% (Maize Season 1), and 13.83% (Maize Season 2). Moreover, a 20–80% increase in pesticide-use efficiency curtails production costs without sacrificing yield, supporting eco-friendly agriculture. This model provides a systemic overview of social, environmental, and economic interactions and informs data-driven policy recommendations for more efficient, adaptive, and sustainable farming.

Keywords: *System Dynamics, Structural Equation Modeling (SEM), Pesticide Efficiency, Triple Bottom Line (People, Planet, Profit), Sustainable Agriculture, Soil pH.*

Abstrak

Penelitian ini mengevaluasi efektivitas peningkatan pH tanah dan efisiensi penggunaan pestisida terhadap biaya operasional dan profitabilitas sistem pertanian berkelanjutan di Desa Gunungsari. Di desa ini, pola tanam padi dan jagung dilakukan secara bergantian pada musim tanam pertama dan kedua, dengan ketergantungan tinggi pada curah hujan dan irigasi. Pada musim kemarau, ketergantungan tersebut beralih pada pupuk kimia dan pompa air, sehingga menimbulkan lonjakan biaya. Dengan pendekatan triple bottom line (*people, planet, profit*), metode yang dipakai meliputi analisis kuantitatif menggunakan SmartPLS untuk mengidentifikasi faktor dominan keberlanjutan, serta simulasi *system dynamics* berbasis STELLA untuk menguji berbagai skenario kebijakan. Hasil SmartPLS menunjukkan pH tanah sebagai faktor paling berpengaruh (kontribusi 44%). Peningkatan pH dari 5,97 menjadi 6,80 melalui pengapuran dan penambahan bahan organik secara signifikan mengurangi ketergantungan pada pupuk urea, menurunkan biaya operasional sebesar 5,36–7,04% dan meningkatkan profit sebesar 12,91% (Padi MT 1), 10,27% (Padi MT 2), 14,65% (Jagung MT 1), dan 13,83% (Jagung MT 2). Selain itu, peningkatan efisiensi penggunaan pestisida sebesar 20–80% menekan biaya produksi tanpa menurunkan produktivitas, mendukung prinsip pertanian ramah lingkungan. Model ini menyajikan gambaran sistemik interaksi dimensi sosial, lingkungan, dan ekonomi, serta merekomendasikan kebijakan berbasis data untuk mencapai pertanian yang lebih efisien, adaptif, dan berkelanjutan.

Kata kunci: *Sistem Dinamis, Structural Equation Modeling (SEM), Efisiensi Pestisida, Triple Bottom Line (People, Planet, Profit), Keberlanjutan Pertanian, pH Tanah.*

1. Pendahuluan

Ketahanan pangan menjadi isu krusial di tengah tantangan global seperti perubahan iklim, pertumbuhan populasi, dan keterbatasan sumber daya alam. Di Indonesia, sektor pertanian berperan penting dalam menjaga ketersediaan pangan, menggerakkan ekonomi pedesaan, dan menciptakan lapangan kerja [1]. Di Desa Gunungsari, Kecamatan Dawarblandong, Kabupaten Mojokerto, hampir seluruh aktivitas ekonominya pada sektor pertanian. Desa ini memiliki total luas wilayah sekitar 468,016 hektar dengan 128 hektar merupakan lahan sawah milik masyarakat dan sisanya merupakan lahan kering (sekitar 340 hektar) yang digunakan untuk permukiman, perkebunan, dan infrastruktur lainnya. Pola tanam dibagi menjadi tiga musim: pada Musim Tanam I (November–Februari), petani memanfaatkan curah hujan tinggi dengan menanam padi di sawah irigasi dan jagung di lahan kering, kemudian pada Musim Tanam II bergantung pada ketersediaan air, apabila curah hujan rendah maka para petani mengaktifkan pompa air yang secara tidak langsung meningkatkan biaya operasional. Sedangkan, pada Musim Tanam III, sebagian besar para petani tidak menanam untuk menghindari lonjakan biaya akibat ketergantungan pada penggunaan pompa air. Berikut ini merupakan data hasil luas panen dan hasil produksi (dalam ton) selama lima tahun terakhir di Desa Gunungsari:

Tabel 1.
Luas Panen dan Hasil Produksi Desa Gunungsari

Tahun	Luas Panen (ha)		Hasil Produksi (ton)	
	Padi	Jagung	Padi	Jagung
2020	300	206	1.617	370,8
2021	302	302	1.775	543,6
2022	302	665	1.820	1.197
2023	300	675	1.824	1.215
2024	300	686	1.935	1.234

Tabel 1 menunjukkan pada tahun 2024 total luas panen luas panen 300 ha padi dan 638 ha jagung yang berasal dari lahan sawah milik masyarakat seluas 128 hektar, serta lahan Milik Negara (Perhutani) kurang lebih 332 hektar yang berada dalam wilayah Desa Gunungsari melalui skema bagi hasil sebesar 2.5% dari hasil panen. Berikut ini merupakan perhitungan kebutuhan konsumsi beras dari 2020 sampai 2024:

Berdasarkan produksi gabah kering giling (GKG) mencapai rata-rata 1.935 ton per tahun. Dengan rendemen penggilingan 62 %, dihasilkan rata-rata 1.199,4 ton beras per tahun. Jika kebutuhan konsumsi rata-rata 217,3 gram per kapita per hari dengan populasi pada tahun 2024

sebesar 2871. Maka, total kebutuhan beras Desa Gunungsari pada 2024 adalah 227,398 ton. Artinya, desa ini mencatat surplus 972,01 ton beras (81 %), yang menunjukkan potensi kuat sebagai penyedia cadangan pangan regional. Untuk jagung, peningkatan luas tanam dan produktivitas pada periode yang sama menegaskan peranannya tidak hanya sebagai komoditas pangan tetapi juga bahan pakan ternak. Berikut ini merupakan alur rantai pasok (*supply chain*) pada padi dan jagung:



Gambar 1 Mapping Supply Chain Desa Gunungsari

Gambar 1 mengilustrasikan rantai pasok padi dan jagung di Desa Gunungsari dari input (pupuk, benih, alat) hingga distribusi pasar dan mengidentifikasi tiga hambatan utama yaitu yang pertama dari aspek *people*, dominasi petani >50 tahun tanpa regenerasi dan pelatihan terbatas. Yang kedua dari aspek *planet*, ketergantungan pada pupuk kimia dan pestisida serta monokultur yang mempermudah serangan hama. Yang ketiga dari aspek, *profit*, biaya input (pupuk subsidi, sewa pompa) yang tinggi menekan *margin* keuntungan.

Penelitian ini menggabungkan metode kuantitatif menggunakan metode *Structural Equation Modeling* (SEM) untuk mengidentifikasi faktor dominan keberlanjutan, dan metode simulasi sistem dinamis berbasis untuk mensimulasikan skenario intervensi pertanian berkelanjutan. Dengan dukungan referensi terkini tentang aplikasi SEM dan penggunaan *System Dynamics* pada keberlanjutan petani diharapkan model yang dihasilkan dapat memberikan rekomendasi strategi yang efektif dan ekonomis bagi petani.

2. Metodologi

Penelitian ini menggunakan pendekatan campuran yang memadukan analisis kuantitatif dengan pemodelan sistem dinamis. Analisis kuantitatif dilakukan melalui *PLS-SEM* (*Partial Least Squares Structural Equation Modeling*) menggunakan perangkat lunak SmartPLS, sedangkan simulasi sistem dinamis dilakukan dengan perangkat lunak STELLA. Metode SEM

membangun model pengukuran dan model struktural sesuai kerangka teori untuk menguji hubungan antar variabel. SmartPLS dipilih karena fleksibilitasnya: pendekatan ini menggunakan *bootstrapping* sehingga tidak memerlukan asumsi normalitas data dan efektif untuk ukuran sampel terbatas. Sementara itu, pemodelan sistem dinamis memungkinkan simulasi perilaku sistem pertanian seiring waktu, dengan STELLA sebagai platform grafis yang menyusun elemen-elemen sistem (stok, aliran, converter, konektor) secara visual.

Sumber data penelitian terdiri dari data primer dan sekunder. Data primer diperoleh langsung dari lapangan melalui kuesioner kuantitatif dan observasi kepada petani Desa Gunungsari. Kuesioner ini mengumpulkan informasi tentang karakteristik usaha tani, praktik pengelolaan lahan, serta variabel ekonomi dan lingkungan (misalnya pH tanah, penggunaan pestisida, luas lahan, biaya operasional, hasil panen). Data sekunder berupa data historis dan administratif yang diambil dari instansi resmi seperti BPS, Balai Penyuluhan Pertanian (BPP), dan Dinas Pertanian setempat. Contoh data sekunder meliputi statistik produksi tanaman, luas panen, penggunaan pupuk dan pestisida, kondisi agroklimatologi, serta parameter biaya dan harga pasar. Dengan demikian, analisis metodologi dapat menggunakan kombinasi data primer lapangan dan data sekunder historis yang komprehensif.

Setelah data terkumpul, analisis kuantitatif dilakukan dengan alur berikut. Data kuesioner pertama-tama diproses di SmartPLS untuk memeriksa validitas dan reliabilitas instrumen penelitian melalui analisis konfirmatori (CFA), kemudian dilanjutkan dengan estimasi model struktural antar variabel. SmartPLS menggunakan teknik *bootstrapping* sehingga tidak bergantung pada asumsi normalitas distribusi data. Hasil analisis SEM memberikan informasi tentang kekuatan dan signifikansi pengaruh relatif berbagai faktor (misalnya pengaruh efisiensi pestisida, pH tanah, dan biaya operasional terhadap hasil panen dan pendapatan petani).

Sementara itu, model sistem dinamis dibangun menggunakan STELLA berdasarkan parameter teknis dan data sekunder yang diperoleh. Peneliti mengidentifikasi stok dan aliran utama (misalnya stok kesuburan tanah, aliran pemupukan, stok modal, aliran biaya) serta variabel pengendali (konverter) dalam sistem pertanian yang dikaji. Dengan STELLA, variabel-variabel ini dimodelkan secara grafis. Model tersebut digunakan untuk mensimulasikan berbagai skenario manajemen atau kebijakan (misalnya perubahan pola penggunaan pestisida, perbaikan

kualitas pH tanah, atau variasi biaya) sepanjang periode tertentu. Dari simulasi ini dapat diprediksi dampak perubahan kebijakan terhadap hasil panen dan kelayakan ekonomi jangka panjang.

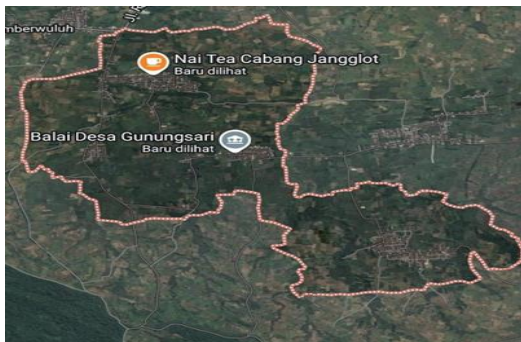
Hasil simulasi sistem dinamis dan temuan analisis SEM kemudian diinterpretasikan secara terpadu. Kombinasi keluaran kedua metode ini memberikan gambaran komprehensif tentang faktor-faktor pendukung keberlanjutan pertanian. Analisis gabungan ini akhirnya digunakan untuk menyusun rekomendasi kebijakan dan praktik terbaik peningkatan keberlanjutan pertanian di Desa Gunungsari.

2.1 Prosedur Penelitian

- a) Studi Literatur
Menelaah teori dan penelitian sebelumnya terkait ketahanan pangan, sistem dinamis, dan pendekatan *triple bottom line*.
- b) Perumusan Kuisisioner
Kuisisioner disusun berdasarkan dimensi *people, planet, dan profit*. Masing-masing dimensi memiliki beberapa indikator yang diukur dengan skala Likert 1–5.
- c) Pengumpulan Data
Primer: Penyebaran kuisisioner kepada petani Desa Gunungsari
Sekunder: Pengumpulan data dari lembaga resmi (BPS, BPP, Dinas Pertanian)
- d) Analisis Data Kuisisioner dengan SmartPLS
Melakukan pengujian *outer model* dan *inner model* untuk mengetahui validitas, reliabilitas, serta hubungan antar konstruk laten.
- e) Penyusunan Model Sistem Dinamis
Menggunakan STELLA untuk membangun model berdasarkan hubungan kausal antar variabel *people, planet, dan profit*.
- f) Verifikasi dan Validasi Model
Memastikan keakuratan model sistem dinamis dengan membandingkan hasil simulasi terhadap data historis.
- g) Simulasi dan Analisis Skenario
Menjalankan simulasi skenario peningkatan pH tanah dan efisiensi pestisida untuk mengetahui dampaknya terhadap profit, biaya operasional, dan keberlanjutan.
- h) Penyusunan Kesimpulan dan Rekomendasi
Menyimpulkan hasil penelitian dan memberikan rekomendasi kebijakan berdasarkan hasil analisis dan simulasi.

2.2 Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Desa Gunungsari, Kecamatan Dawarblandong, Kabupaten Mojokerto, yang terletak di bagian utara Mojokerto dan berbatasan langsung dengan Kabupaten Gresik dan Lamongan. Desa Gunungsari memiliki luas wilayah 468,016 hektar dan terdiri atas lima dusun, yakni Manyarsari, Gunungsari, Summersari, dan Sumberdadi. Lokasinya berjarak sekitar 6 km dari pusat kecamatan. Berikut ini merupakan peta geografi di Desa Gunungsari, Kecamatan Dawarblandong:



Gambar 2 Peta Geografi Desa Gunungsari, Kec. Dawarblandong, Kab.Mojokerto.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Data Jumlah Penduduk

Tabel 3. Data Jumlah Penduduk

Tahun	Jumlah Penduduk		
	Laki-laki	Perempuan	Total
2019	1495	1489	2984
2020	1490	1470	2960
2021	1495	1490	2985
2022	1470	1480	2950
2023	1460	1460	2920
2024	1435	1436	2871

Berdasarkan tabel 3 di atas, jumlah penduduk cenderung mengalami penurunan dari tahun 2019 hingga 2024, baik pada kelompok laki-laki maupun perempuan. Penurunan jumlah penduduk ini dapat berdampak pada penurunan ketersediaan tenaga kerja, terutama di sektor pertanian yang selama ini masih sangat bergantung pada tenaga kerja manual.

3.2. Data Luas Lahan Tanam dan Luas Panen Per Komoditi

Dari tabel 4, terlihat bahwa luas tanam untuk komoditas padi relatif stabil, dengan sedikit peningkatan pada MT 1 dan MT 2 dari tahun ke tahun. Sebaliknya, luas tanam jagung mengalami penurunan, terutama setelah tahun 2021. Sementara itu, luas panen jagung MT 2 juga menunjukkan tren yang menurun, diduga karena pengaruh faktor eksternal seperti ketersediaan air,

serangan hama, atau perubahan preferensi komoditas petani.

Tabel 4. Data Luas Lahan Tanam Per Komoditi Desa Gunungsari

Tahun	Luas Lahan Tanam			Luas Panen		
	Padi (MT 1)	Padi (MT 2)	Jagung (MT 2)	Padi (MT 1)	Padi (MT 2)	Jagung (MT 2)
2020	165,56	165,56	229	152	148	206
2021	166,67	166,67	336	154,17	145,83	302
2022	167,78	167,78	739	155,19	146,81	665
2023	166,11	166,11	750	153,65	146,35	675
2024	165,56	165,56	762	153,14	146,86	686

3.3. Data Biaya Operasional Per Komoditi

Tabel 5. Data Biaya Operasional Padi

Biaya Operasional Padi 100 RU					
Jenis	Keterangan	Volume	Satuan	Biaya Satuan	Total Biaya
Bibit		5	Kg	Rp 40.000	Rp 200.000
Pupuk Kimia					
Urea		30	Kg		Rp 120.000
Ponska		25	Kg		Rp 110.000
ZA		21	Kg		Rp 100.000
Pupuk Organik					
Kotoran Kandang					-
Insektisida		20	milliter		Rp 45.000
Pestisida		40	milliter		Rp 25.000
Air	Debit per Jam				-
Pembersihan Lahan		1	orang	Rp 120.000	Rp 120.000
Pembajakan Lahan	Traktor	1			Rp 250.000
Tenaga Kerja Sewa Teknologi					
Tanam		5 kg	3 orang	Rp120.000	Rp 360.000
Menyulam					
Memupuk		71 kg	2 orang	Rp 120.000	Rp 240.000
Menyemai			2 orang	Rp 120.000	Rp 240.000
Mengairi			-		-
Panen	Combi (Sewa)				Rp 450.000
Angkutan Hasil Panen	Motor	1	orang	Rp 10.000	Rp 10.000
Total Per 100 RU					Rp 2.270.000

Tabel 5 menunjukkan rincian biaya operasional budidaya padi pada luasan 100 RU (setara dengan 0,14 hektar). Komponen biaya terdiri dari pupuk kimia (urea, ponska, dan ZA), pupuk organik berupa kotoran kandang, pestisida, serta biaya irigasi. Selain itu, terdapat biaya tenaga kerja dan penggunaan alat teknologi seperti traktor dan combi untuk aktivitas pembajakan, penanaman, pemupukan, penyemprotan, dan panen. Total biaya operasional yang dibutuhkan untuk budidaya padi pada luas lahan tersebut adalah sebesar Rp 2.270.000.

Tabel 6. Data Biaya Operasional Jagung

Biaya Operasional Jagung 100 RU					
Jenis	Keterangan	Volume	Satuan	Biaya Satuan	Total Biaya
Bibit		3	Kg	Rp 35.000	Rp 140.000
Pupuk Kimia					
Urea		35	Kg		Rp 110.000
Ponska		20	Kg		Rp 100.000
ZA		20	Kg		Rp 100.000
Pupuk Organik					
Biaya Sewa Lahan					Rp 128.000
Insektisida		50	milliter		Rp 100.000
Pestisida		40	milliter		Rp 30.000
Air (Pom)	Debit per 2 Jam				Rp 40.000
Pembajakan Lahan					Rp 250.000
Tenaga Kerja Sewa Teknologi					
Tanam		3 kg	2 orang	Rp 80.000	Rp 160.000
Memupuk			1 orang	Rp 80.000	Rp 80.000
Mengairi			1 orang	Rp 20.000	Rp 20.000
Panen			2 orang	Rp 80.000	Rp 160.000
Angkutan Hasil Panen			2 orang	Rp 10.000	Rp 20.000
Total Per 100 RU					Rp 1.438.000

Berdasarkan Tabel 4 hingga Tabel 6 data sekunder yang diperoleh dari BPP, BPS, dan

Profil Desa memberikan gambaran kontekstual mengenai kondisi pertanian di wilayah penelitian. Data ini Sebagian tidak digunakan dalam analisis PLS-SEM, namun berperan penting dalam mendukung tahap selanjutnya, yaitu penyusunan model sistem dinamis yang merepresentasikan keterkaitan antar variabel dalam jangka waktu tertentu.

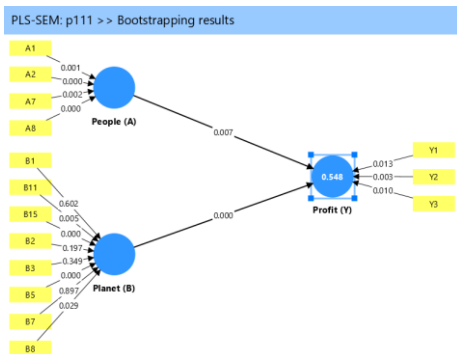
3.4. Analisis Faktor Menggunakan SmartPLS

Indikator yang digunakan dalam kuisioner dirancang untuk mengukur konstruk *People*, *Planet*, dan *Profit* sesuai dengan model PLS-SEM yang dianalisis menggunakan SmartPLS. Masing-masing konstruk terdiri atas beberapa pernyataan sebagai berikut:

Tabel 7. Daftar Indikator Kuisioner

Kode	Indikator	Variabel
A1	Usia	People
A2	Pendidikan terakhir	
A7	Adaptasi teknologi	
A8	Jenis teknologi yang digunakan	
B1	Jenis bibit padi yang digunakan musim tanam (MT) 1	Planet
B2	Jenis bibit padi yang digunakan musim tanam (MT) 2	
B3	Jenis bibit jagung yang digunakan musim tanam (MT) 2	
B5	Jenis pupuk yang digunakan	
B7	Cuaca di wilayah saya	
B8	Tingkat hama di wilayah saya	
B11	Sumber air di wilayah saya	
B15	Kondisi tanah (PH)	Profit
Y1	Profit padi musim tanam (MT) 1	
Y2	Profit padi musim tanam (MT) 2	
Y3	Profit jagung musim tanam (MT) 2	

Berdasarkan Tabel 7, dapat diketahui bahwa seluruh indikator kuisioner telah dikategorikan secara sistematis ke dalam tiga konstruk utama, yaitu *People*, *Planet*, dan *Profit*. Masing-masing indikator merepresentasikan aspek penting dalam sistem pertanian berkelanjutan dan akan menjadi dasar dalam analisis model menggunakan SmartPLS. Selain data primer yang diperoleh melalui kuisioner, penelitian ini juga menggunakan beberapa data sekunder yang mendukung interpretasi terhadap karakteristik wilayah dan kondisi pertanian responden.



Gambar 3 Hasil Outer Model

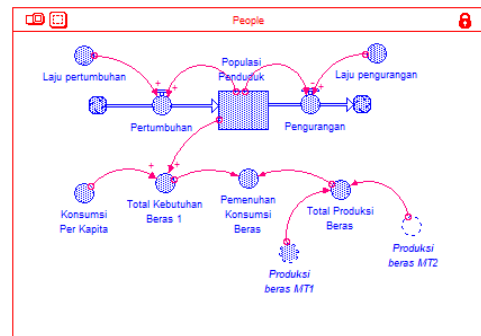
Berdasarkan gambar 3, dapat dilihat bahwa tidak semua indikator memiliki pengaruh

signifikan terhadap konstraknya. Oleh karena itu, analisis selanjutnya dilakukan untuk mengidentifikasi indikator-indikator yang valid berdasarkan nilai outer weight dan p-value guna memastikan kualitas model pengukuran.

Analisis Pareto menunjukkan bahwa pada konstruk *People*, tiga indikator utama A8, A2, dan A1 menyumbang 81% kontribusi kumulatif, sehingga diprioritaskan dalam penguatan konstruk. Indikator A7 memiliki kontribusi lebih kecil (19%), namun tetap relevan secara konseptual. Pada konstruk *Planet*, indikator B15 (pH tanah) dan B5 (jenis pupuk) memberikan kontribusi dominan sebesar 73%, menegaskan pentingnya kualitas input lingkungan terhadap profitabilitas pertanian.

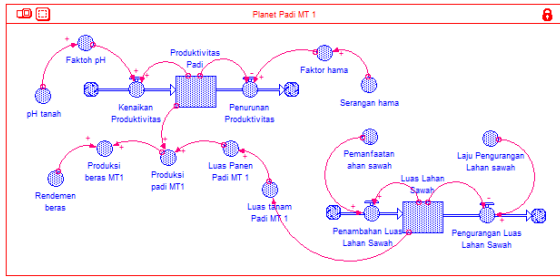
Penelitian ini memperlihatkan bahwa tidak semua indikator memiliki pengaruh yang sama. Indikator dengan kontribusi kecil namun tetap valid secara teoritis, seperti bibit dan cuaca, tetap dipertahankan dalam model formatif demi menjaga cakupan konsep. Hasil analisis ini menjadi dasar dalam pemetaan variabel utama ke dalam model dinamis STELLA, di mana *People* dan *Planet* diposisikan sebagai penggerak utama yang memengaruhi *Profit*.

3.5. Penyusunan Model Sistem Dinamis (Stella)



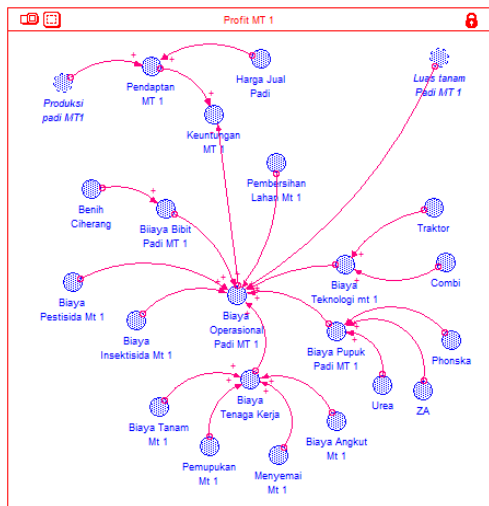
Gambar 4 Stok and flow diagram People

Berdasarkan gambar 4, data yang diperlukan dalam penyusunan submodel populasi mencakup jumlah penduduk Desa Gunungsari, tingkat pertumbuhan penduduk, konversi padi menjadi beras, serta angka konsumsi beras per kapita selama periode 2020 hingga 2024. Data ini digunakan sebagai dasar dalam melakukan simulasi untuk menganalisis sejauh mana hasil produksi padi lokal mampu memenuhi kebutuhan pokok penduduk terhadap beras.



Gambar 5. Stock and flow diagram Planet Padi Musim Tanam (MT) 1

Gambar 5, menunjukkan hubungan antar variabel dalam submodel Planet Padi MT 1, yang menggambarkan bagaimana faktor pH tanah dan serangan hama memengaruhi produktivitas padi, serta bagaimana luas lahan sawah menentukan jumlah produksi padi melalui proses tanam dan panen.



Gambar 6. Stock and flow diagram Profit Padi Musim Tanam (MT) 1

Gambar 6, menunjukkan sub-model Profit MT 1 yang menggambarkan hubungan antara produksi padi, biaya operasional, dan pendapatan petani pada musim tanam pertama (MT 1). Variabel utama dalam model ini adalah Biaya Operasional Padi MT 1, yang terdiri dari beberapa komponen seperti biaya bibit, pupuk, pestisida, insektisida, tenaga kerja, teknologi, dan biaya angkut

3.6. Pengembangan Simulasi Efektivitas Peningkatan pH Tanah dan Simulasi Efisiensi Biaya Pestisida untuk Mengurangi Biaya Operasional

Pengembangan simulasi pada peningkatan pH tanah, pH tanah dari rata-rata 5,97 menjadi 6,80 dilakukan untuk mengoptimalkan penyerapan nutrisi tanaman. Dalam model, hal ini berdampak langsung pada efisiensi biaya pupuk urea yang dihitung dengan rumus:

$$\text{Urea} = 840.000 \times (7 - \text{pH tanah})$$

Semakin mendekati pH optimal (7), kebutuhan dan biaya pupuk menurun. Strategi ini terbukti efektif dalam menekan biaya operasional melalui perbaikan kualitas tanah.

Pengembangan efisiensi biaya pestisida, Berdasarkan penelitian yang menunjukkan pengurangan aplikasi pestisida hingga 95% dengan IPM [1], pada simulasi ini digunakan tiga tingkat pengurangan biaya pestisida: 20% (nilai 0.8), 50% (nilai 0.5), dan agresif 80% (nilai 0.2). Tujuannya adalah menguji sensitivitas model terhadap efisiensi biaya dalam pengendalian hama. Berikut ini merupakan hasil simulasi sistem dinamis dari skenario pertama dan kedua:

Tabel 8. Simulasi Biaya Operasional Padi

Tahun	Biaya Operasional MT 1		Biaya Operasional MT 2	
	Data Base	Skenario	Data Base	Skenario
2024	Rp 2.619.987.297	Rp 2.495.335.919	Rp 2.210.521.536	Rp 2.121.385.907
2025	Rp 2.627.847.259	Rp 2.461.146.816	Rp 2.217.153.100	Rp 2.092.326.221
2026	Rp 2.635.730.801	Rp 2.468.530.257	Rp 2.223.804.560	Rp 2.098.603.200
2027	Rp 2.643.637.993	Rp 2.475.935.848	Rp 2.230.475.973	Rp 2.104.899.009
2028	Rp 2.651.568.907	Rp 2.483.363.655	Rp 2.237.167.401	Rp 2.111.213.706
2029	Rp 2.659.523.614	Rp 2.490.813.746	Rp 2.243.878.903	Rp 2.117.547.347
2030	Rp 2.667.502.185	Rp 2.498.286.187	Rp 2.250.610.540	Rp 2.123.899.989
mean	2.639.715.978,77	2.479.187.706,90	2.227.166.912,14	2.107.662.565,11

Tabel 8, terjadi penurunan biaya operasional sebesar 7,04% dan 5.36% dibandingkan kondisi awal. Efisiensi ini menunjukkan bahwa perbaikan pH tanah merupakan strategi yang efektif dalam mengurangi beban input produksi, khususnya pada pupuk urea, sekaligus meningkatkan keberlanjutan budidaya padi di musim tanam pertama.

Tabel 9. Simulasi Biaya Operasional Jagung

Tahun	Biaya Operasional Jagung MT 1		Biaya Operasional Jagung MT 2	
	Data Base	Skenario	Data Base	Skenario
2024	Rp 3.857.450.254	Rp 3.709.397.383	Rp 5.074.175.666	Rp 4.860.321.519
2025	Rp 3.915.312.008	Rp 3.644.819.413	Rp 5.150.288.301	Rp 4.759.576.775
2026	Rp 3.974.041.688	Rp 3.699.491.704	Rp 5.227.542.626	Rp 4.830.970.426
2027	Rp 4.033.652.314	Rp 3.754.984.080	Rp 5.305.955.765	Rp 4.903.434.983
2028	Rp 4.094.157.098	Rp 3.811.308.841	Rp 5.385.545.101	Rp 4.976.986.508
2029	Rp 4.155.569.455	Rp 3.868.478.474	Rp 5.466.328.278	Rp 5.051.641.305
2030	Rp 4.217.902.997	Rp 3.926.505.651	Rp 5.548.323.202	Rp 5.127.415.925
mean	4.005.030.469,58	3.748.079.982,52	5.268.305.956,14	4.897.155.252,61

Tabel 9 menyajikan perbandingan antara biaya operasional Jagung MT 2 pada kondisi data base dan hasil simulasi selama periode tahun 2024 hingga 2030. Biaya operasional menurun sebesar 7,04% pada simulasi 2024–2030 dibandingkan kondisi data base. Penurunan ini mencerminkan efisiensi biaya melalui perbaikan input dan praktik budidaya.

Tabel 10. Simulasi Profit Padi

Tahun	Keuntungan MT 1		Keuntungan MT 2	
	Data Base	Skenario	Data Base	Skenario
2024	Rp 4.090.173.999	Rp 4.543.952.964	Rp 3.542.706.927	Rp 3.862.009.643
2025	Rp 4.398.577.359	Rp 4.980.521.898	Rp 3.813.007.014	Rp 4.233.092.186
2026	Rp 4.743.005.774	Rp 5.368.663.150	Rp 4.120.810.315	Rp 4.563.011.196
2027	Rp 5.105.075.812	Rp 5.777.804.389	Rp 4.444.991.533	Rp 4.910.780.192
2028	Rp 5.485.673.157	Rp 6.209.062.875	Rp 4.786.405.709	Rp 5.277.348.844
2029	Rp 5.885.727.905	Rp 6.663.615.254	Rp 5.145.952.474	Rp 5.663.717.302
2030	Rp 6.306.216.791	Rp 7.142.700.714	Rp 5.524.578.374	Rp 6.070.938.877
mean	4.951.372.334,57	5.590.603.421,40	4.308.978.995,17	4.751.659.893,94

Pada Tabel 10, peningkatan pH tanah ke kisaran optimal tidak hanya menekan biaya operasional, tetapi juga memberikan dampak signifikan terhadap peningkatan keuntungan petani padi, yaitu sebesar 12,91% dan 10,27% dibandingkan kondisi awal.

Tabel 11.
Simulasi *Profit Jagung*

Tahun	Keuntungan Jagung			
	MT 1		MT 2	
	Data Base	Skenario	Data Base	Skenario
2024	Rp 240.285.054	Rp 388.337.925	Rp 844.775.335	Rp 1.058.629.481
2025	Rp 468.486.202	Rp 738.978.797	Rp 1.181.864.669	Rp 1.572.576.195
2026	Rp 1.018.359.227	Rp 1.292.909.211	Rp 1.983.703.141	Rp 2.380.275.340
2027	Rp 1.651.843.621	Rp 1.930.511.855	Rp 2.906.427.252	Rp 3.308.948.034
2028	Rp 2.380.656.237	Rp 2.663.504.494	Rp 3.966.963.049	Rp 4.375.521.643
2029	Rp 3.218.142.216	Rp 3.505.233.197	Rp 5.184.588.579	Rp 5.599.275.552
2030	Rp 4.179.501.065	Rp 4.470.898.411	Rp 6.581.260.443	Rp 7.002.167.720
mean	1.496.295.426,05	1.753.245.913,11	2.678.053.670,87	3.049.204.374,40

Berdasarkan tabel 11, hasil simulasi, rata-rata keuntungan meningkat sebesar 14,65% dan 13,85% dibandingkan kondisi awal tanpa intervensi perbaikan pH tanah. Hal ini menunjukkan bahwa penerapan strategi peningkatan kualitas tanah juga memberikan dampak positif yang sangat besar terhadap aspek ekonomi budidaya jagung.

Dengan demikian, Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, strategi peningkatan pH tanah dari 5,97 menjadi 6,80 melalui pengapuran dan penambahan bahan organik terbukti memberikan dampak yang signifikan terhadap peningkatan profit usahatani—tercatat kenaikan sebesar 12,91% pada Padi Musim Tanam (MT) 1, 10,27% pada Padi MT 2, 14,65% pada Jagung MT 1, dan 13,83% pada Jagung MT 2—serta penurunan biaya operasional berkisar antara 5,36% hingga 7,04%. Di sisi lain, simulasi efisiensi pestisida berdasarkan prinsip Pengendalian Hama Terpadu (PHT), dengan pengurangan dosis 20%, 50%, hingga 80%, juga menunjukkan hasil positif berupa penekanan biaya produksi tanpa menurunkan produktivitas dan mendukung praktik pertanian yang lebih ramah lingkungan. Namun, karena skenario pengapuran dan penambahan bahan organik menghasilkan peningkatan profit yang lebih besar, strategi inilah yang dipilih sebagai skenario utama.

4. Simpulan

Penelitian ini merancang model sistem dinamis berbasis pendekatan keberlanjutan (*people, planet, profit*) untuk mengevaluasi kebijakan peningkatan efisiensi dan profitabilitas pertanian di Desa Gunungsari. Hasil SmartPLS menunjukkan bahwa pH tanah adalah faktor paling dominan (44%) dalam mendukung keberlanjutan, diikuti oleh jenis pupuk (29%) dan sumber air (15%). Skenario peningkatan pH tanah

dari 5,97 menjadi 6,80 mampu menurunkan biaya operasional hingga 7,04% dan meningkatkan profit 10–14% tergantung musim dan komoditas. Sementara itu, efisiensi pestisida hingga 80% berhasil menekan biaya tanpa menurunkan produktivitas. Pendekatan gabungan SmartPLS dan sistem dinamis terbukti efektif untuk merumuskan kebijakan pertanian berkelanjutan berbasis data.

Daftar Pustaka

- [1] Fod. World food and agriculture – statistical yearbook 2023. World Food and Agriculture Statistical Yearbook. 2024. <https://doi.org/10.4060/cc8166en>
- [2] Bandur A. Validitas dan reliabilitas penelitian. Jakarta: Prenadamedia; 2013.
- [3] Dwi Yuhenny SM, Suratno S, Widyanto FA, Evianti AR, Vina dkk. Kecamatan Dawarblandong dalam angka 2023. Mojokerto: BPS-Statistics Mojokerto Regency; 2023.
- [4] Herlinda YP. Buku pendoman hama penting tanaman utama. Palembang: Universitas Sriwijaya; 2023.
- [5] Badan Pangan Nasional. Indeks ketahanan pangan 2022. 2022. <https://badanpangan.go.id/storage/app/media/2023/buku%20digital/buku%20indeks%20ketahanan%20pangan%202022%20signed.pdf>
- [6] Farikhin M, Suratno S, Widyanto FA, Evianti AR, Yania PAN. Kecamatan Dawarblandong dalam angka 2022. Mojokerto: Badan Pusat Statistik Kabupaten Mojokerto; 2022.
- [7] Farikhin M, Hartono T, Susanto D. Kecamatan Dawarblandong dalam angka 2021. Mojokerto: Badan Pusat Statistik Kabupaten Mojokerto; 2021.
- [8] Program Magister Sistem Informasi. Pengembangan model rantai pasok menggunakan sistem dinamik (studi kasus: minyak goreng di PT Tunas Baru Lampung). 2017;169.
- [9] Badan Pangan Nasional. Direktori konsumsi pangan kabupaten/kota tahun 2023 wilayah Jawa, Bali, dan Kalimantan. Jakarta Selatan: Deputi Bidang Pengantaragaman Konsumsi dan Keamanan Pangan; 2023.
- [10] Sihombing PR, Arsani AM, Oktaviani M, Nugraheni R, Wijaya L. Aplikasi SmartPLS 4.0 untuk statistisi pemula. 2024 Oct.
- [11] Sarasi VDY. Pengantar berfikir sistem dan dinamika sistem. Yogyakarta: Yayasan Sahabat Alam Raffesia; 2021.
- [12] Pecenka JR, Ingwell LL, Foster RE, Krupke CH, Kaplan I. IPM reduces insecticide

- applications by 95% while maintaining or enhancing crop yields through wild pollinator conservation. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2021;118(44). <https://doi.org/10.1073/pnas.2108429118>
- [13] Sarasi V. Berpikir sistem dan dinamika sistem. 2021 Jan. <https://www.researchgate.net/publication/355165945>
- [14] Stanco M, Lerro M, Marotta G. Consumers' preferences for wine attributes: a best-worst scaling analysis. *Sustainability.* 2020;12(7):1–11. <https://doi.org/10.3390/su12072819>