

Rekayasa Sistem Produksi Beras berbasis Spasial dan Sistem Dinamik untuk Mitigasi Alih Fungsi Lahan Sawah di Kabupaten Tabanan

Spatial-based Rice Production System Engineering and System Dynamics Modeling for Mitigating Paddy Field Conversion in Tabanan Regency

Ni Luh Trisna Candra Dewi¹, Ngadisih^{1*}, Ansita Gupitakingkin Pradipta¹, Lilik Sutiarto, Hanggar Ganara Mawandha

¹ Departemen Teknik Pertanian dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

Email^{*}: ngadisih@ugm.ac.id

Received:
9th March 2026

Revised:
9th August 2026

Accepted:
11th September
2026

Published:
29th September
2026

DOI:10.29303/jrpb.v14i2.1239

ISSN 2301-8119,
e-ISSN 2443-1354

Available at:
<http://jrpb.unra.m.ac.id/>

Abstract: Rice field conversion threatens the sustainability of rice production and self-sufficiency in Tabanan Regency, one of Bali Province's major rice-producing areas. This study aims to determine the rate of rice field conversion, evaluate the balance between rice production and demand, and assess its long-term impacts through dynamic system scenarios. Spatial analysis was conducted using Sentinel-2 imagery processed in Google Earth Engine with Random Forest classification for 2020–2024, followed by dynamic system modeling to simulate rice production and demand from 2020 to 2050. Classification accuracy was very high, with Kappa coefficients ranging from 0.90 to 0.94. Rice field area decreased by an average of 1.71% per year. Under the business-as-usual scenario, rice production is projected to decline gradually and fall below demand around 2038–2039. Model validation produced nRMSE values below 10%, indicating very good model performance. A 50% reduction in land conversion slowed the decline in production, while combining land protection with a 10% increase in rice productivity produced a more stable production trajectory and maintained a surplus through 2050. Therefore, sustainable rice self-sufficiency requires integrated policies that control rice field conversion, protect agricultural land, and improve productivity.

Keywords: land use change; rice production; remote sensing; system dynamics

Abstrak: Alih fungsi lahan sawah menjadi ancaman terhadap keberlanjutan produksi dan swasembada beras di Kabupaten Tabanan sebagai salah satu sentra produksi beras di Provinsi Bali. Penelitian ini bertujuan menghitung laju alih fungsi lahan sawah, mengevaluasi keseimbangan produksi dan kebutuhan beras, serta menilai dampaknya melalui skenario sistem dinamik. Analisis spasial dilakukan menggunakan citra Sentinel-2 yang diolah melalui Google Earth Engine dengan klasifikasi *Random Forest* untuk periode 2020–2024, kemudian dilanjutkan dengan pemodelan sistem dinamik untuk memproyeksikan produksi dan kebutuhan beras hingga 2050. Hasil klasifikasi menunjukkan tingkat akurasi sangat tinggi dengan koefisien Kappa 0,90–0,94. Luas lahan sawah mengalami penurunan rata-rata sebesar 1,71% per tahun. Pada skenario *business-as-usual*, produksi beras diproyeksikan menurun secara bertahap dan berpotensi berada di bawah kebutuhan sekitar 2038–2039. Validasi model menghasilkan nilai nRMSE di bawah 10% yang menunjukkan kinerja model sangat baik. Pengurangan alih fungsi lahan sebesar 50% mampu memperlambat penurunan produksi, sedangkan kombinasi perlindungan lahan dan peningkatan produktivitas sebesar 10% menghasilkan kondisi produksi yang lebih stabil dan tetap surplus hingga 2050. Oleh karena itu, keberlanjutan swasembada beras memerlukan kebijakan terpadu melalui pengendalian alih fungsi lahan, perlindungan lahan pertanian, dan peningkatan produktivitas.

Kata kunci: alih fungsi lahan; produksi beras; penginderaan jarak jauh; sistem dinamik

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Swasembada beras merupakan isu strategis bagi Indonesia, mengingat beras merupakan komoditas pangan pokok yang sangat penting bagi masyarakat dan memiliki peran strategis dalam mendukung ketahanan pangan nasional (Budiman & Santu, 2024). Dalam upaya mencapai swasembada beras, salah satu tantangan utama bagi Indonesia adalah tekanan terhadap lahan pertanian, khususnya sawah. Alih fungsi lahan adalah perubahan sebagian atau seluruh area lahan dari fungsi aslinya ke fungsi lain yang berdampak negatif terhadap lingkungan dan mengurangi optimalisasi potensi lahan (Sari, 2020). Perubahan ini sebagian besar dipengaruhi oleh perluasan pertanian, deforestasi, dan pertumbuhan pesat kawasan perkotaan, yang secara bersama-sama menggambarkan interaksi kompleks antara aktivitas manusia dan perubahan lingkungan (Vongvassana et al., 2026).

Alih fungsi lahan pertanian menjadi lahan non-pertanian, terutama sawah, terjadi dengan cepat di beberapa wilayah di Indonesia, salah satunya adalah Kabupaten Tabanan, Bali. Berdasarkan analisis spasial-temporal, alih fungsi lahan sawah di Kabupaten Tabanan selama 2018–2022 mencapai 5.220,817 ha, atau rata-rata sekitar 1.305,2 ha per tahun, terutama berupa perubahan sawah menjadi ladang, kebun, dan bangunan (Adyaguhyatriko et al., 2024). Kabupaten Tabanan dikenal sebagai lumbung padi Bali karena kontribusinya yang besar terhadap produksi beras di Provinsi Bali. Kabupaten Tabanan memiliki luas wilayah 839 km² dan didominasi oleh sawah-sawah produktif, yang didukung oleh kondisi agroekosistem yang subur serta sistem irigasi tradisional Subak, yang telah diakui sebagai warisan budaya dunia. Namun, dalam beberapa tahun terakhir, Kabupaten Tabanan mengalami tekanan yang semakin meningkat terkait konversi lahan. Penelitian sebelumnya (Yasmita & Rahmantari, 2025) menunjukkan bahwa peningkatan konversi lahan ke sektor non-pertanian, terutama pariwisata, telah mengurangi produksi pangan lokal dan mengancam kelangsungan sistem Subak sebagai warisan budaya pertanian Bali. Penelitian serupa yang dilakukan di Daerah Istimewa Yogyakarta menunjukkan bahwa konversi sawah terjadi secara signifikan akibat tekanan urbanisasi dan berdampak pada produksi pangan (Fitriana et al., 2021). Selain itu, sebuah studi menjelaskan bahwa tingginya laju konversi sawah berdampak pada penurunan ketersediaan pangan bagi penduduk, yang pada gilirannya menyebabkan penurunan produksi pangan, terutama beras, sehingga mengancam ketahanan pangan (Prasada & Rosa, 2018).

Meskipun berbagai penelitian menawarkan solusi konseptual melalui pengembangan berkelanjutan, namun pendekatan spasial terhadap laju konversi sawah belum diterapkan, dan dampaknya terhadap sistem swasembada beras jangka panjang belum dianalisis secara kuantitatif. Untuk memahami dampak jangka panjang konversi sawah terhadap sistem pangan, diperlukan pendekatan analisis spasial serta analisis yang mampu menjelaskan dinamika dan interaksi antar variabel dalam sistem yang kompleks dan berubah seiring waktu. Penelitian sebelumnya telah menyoroti pentingnya mengintegrasikan teknologi penginderaan jauh dan Sistem Informasi Geografis (SIG) untuk pengelolaan lingkungan berbasis spasial (Ngadisih et al., 2025). Sejalan dengan pendekatan ini, penelitian ini menggunakan analisis spasial berbasis satelit yang dipadukan dengan pemodelan dinamika sistem untuk mengevaluasi dampak jangka panjang alih fungsi lahan terhadap keberlanjutan produksi di Kabupaten Tabanan, Bali. Pendekatan dinamika sistem digunakan untuk memahami perilaku sistem yang kompleks dan saling berinteraksi selama periode waktu tertentu, dalam upaya menjaga ketersediaan beras (Donoriyanto et al., 2023; Fitriana et al., 2021).

Tujuan

Tujuan penelitian ini adalah menghitung laju alih fungsi lahan sawah di Kabupaten Tabanan, mengevaluasi keseimbangan antara produksi dan kebutuhan konsumsi beras, serta menyusun dan menilai skenario sistem dinamik untuk dampak alih fungsi lahan sawah terhadap swasembada beras di Kabupaten Tabanan.

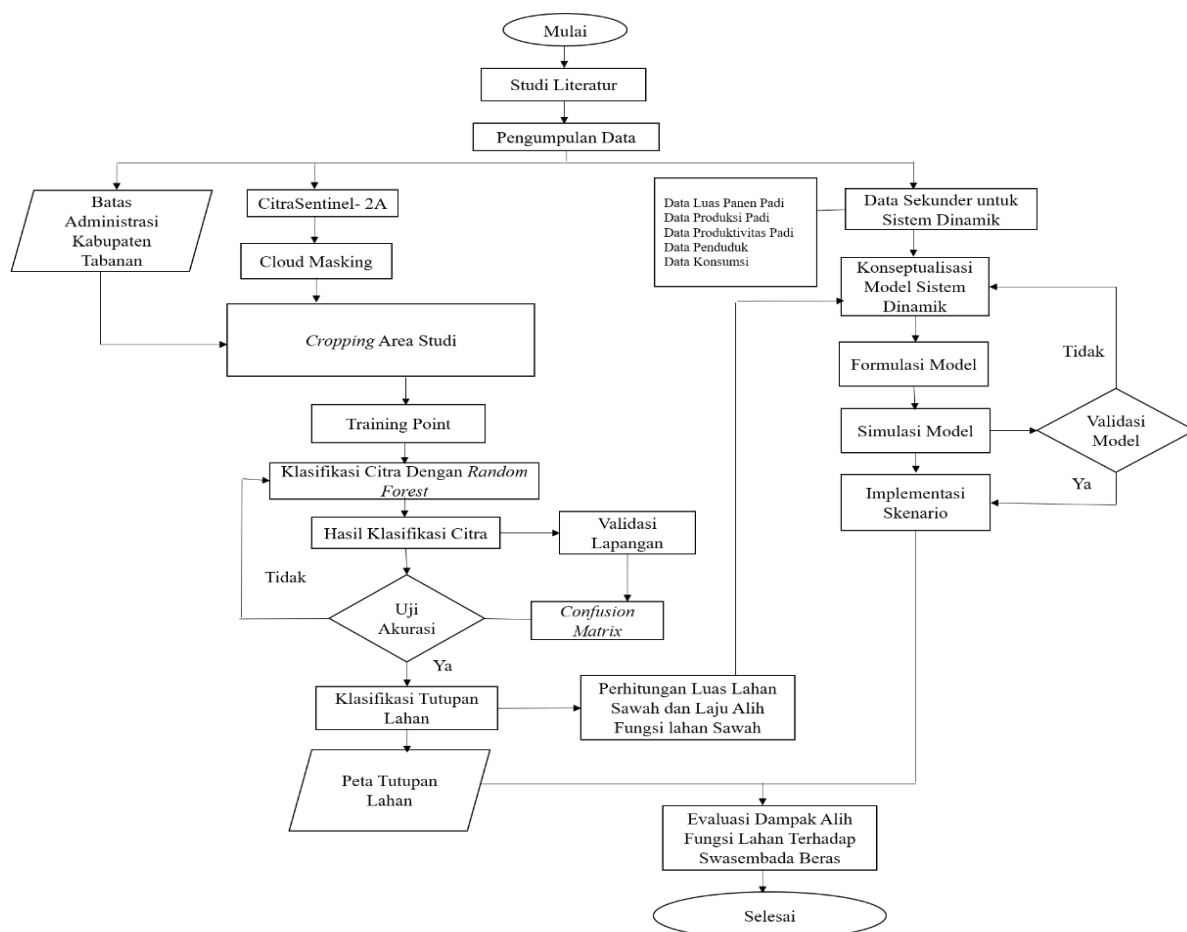
METODE PENELITIAN

Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini platform berbasis cloud *Google Earth Engine*, *Google Earth Pro*, Aplikasi *ArcGIS Pro*, *GPS Maps Camera*, dan *Powersim Studio 10*. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari data spasial dan nonspasial. Data spasial meliputi citra satelit Sentinel-2 dengan resolusi spasial 10 m yang diperoleh melalui *Google Earth Engine* serta peta administrasi Kabupaten Tabanan skala 1:300.000. Data nonspasial meliputi data produktivitas lahan sawah, luas panen, jumlah penduduk, jumlah wisatawan, serta konsumsi beras per kapita yang diperoleh dari Badan Pusat Statistik (BPS) Kabupaten Tabanan Tahun 2025.

Metode

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan. Tahapan penelitian meliputi pengumpulan data, pengolahan citra satelit Sentinel-2, pengembangan dan simulasi model sistem dinamik. Diagram penelitian secara lengkap disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir

Gambar 1 memberikan ilustrasi bahwa tahapan penelitian diawali dengan pengumpulan data sebagai dasar analisis, kemudian dilanjutkan dengan pengolahan dan klasifikasi citra Sentinel-2 untuk mendapatkan informasi penggunaan lahan. Hasil klasifikasi selanjutnya digunakan sebagai input dalam pengembangan dan simulasi sistem dinamik untuk mengevaluasi perubahan penggunaan lahan serta keterkaitan antarvariabel.

Klasifikasi Tutupan Lahan

Klasifikasi tutupan lahan dianalisis dengan metode klasifikasi terbimbing (*supervised classification*) yang banyak digunakan dalam pemetaan tutupan lahan berbasis citra satelit, termasuk Sentinel-2. Teknik *Random Forest* juga digunakan agar secara efektif mencegah munculnya bias dan meminimalisasi *overfitting* (Purnami et al., 2026). Metode ini digunakan karena memiliki kemampuan yang baik dalam mengolah data multispektral sehingga mampu membedakan kelas lahan sawah dan non-sawah dengan tingkat akurasi yang tinggi (Bilotta et al., 2025). Berdasarkan karakteristik penggunaan lahan hasil interpretasi penginderaan jauh, tutupan lahan diklasifikasikan ke dalam lima kelas utama, yaitu sawah, pertanian non-sawah, vegetasi, lahan terbangun, dan badan air (Ongsomwang, 2025).

Validasi Lapangan

Validasi lapangan dilakukan untuk memastikan bahwa hasil klasifikasi citra satelit sesuai dengan kondisi aktual di lapangan. Tahap ini diawali dengan penyusunan data referensi sebagai acuan dalam proses validasi. Data referensi tahun 2024 diperoleh melalui survei lapangan menggunakan GPS, sedangkan data referensi tahun 2020–2023 diperoleh melalui interpretasi visual menggunakan *Google Earth Pro*. Titik sampel validasi ditentukan menggunakan metode *Stratified Random Sampling*, yaitu teknik pengambilan sampel dengan membagi populasi ke dalam beberapa strata berdasarkan kelas tutupan lahan, kemudian mengambil sampel secara acak dari setiap strata (Firmansyah & Dede, 2022). Jumlah sampel pada masing-masing strata dihitung menggunakan Persamaan (1).

$$nh = \frac{N_h}{N} \times n \quad \dots \dots \dots (SEQ Equation \setminus * ARABIC 1)$$

Keterangan:

Nh = Jumlah sampel pada strata ke-*h*
 Nh = Jumlah populasi pada strata ke- *h*
 N = Jumlah populasi keseluruhan
 n = Jumlah total sampel

Penelitian ini menggunakan 448 titik sampel. Koordinat sampel kemudian diinput ke dalam *Google Earth Pro* dan dibandingkan dengan hasil klasifikasi pada *Google Earth Engine*. Tingkat akurasi klasifikasi dievaluasi menggunakan confusion matrix, yang menghasilkan nilai *Overall Accuracy* (OA) dan Koefisien Kappa melalui perbandingan antara hasil klasifikasi dan data referensi (Svoboda & Paluba, 2022). Perhitungan *user's accuracy* pada Persamaan (2), *producer's accuracy* pada Persamaan (2) dan *overall accuracy* ditunjukkan pada Persamaan (4), sedangkan Koefisien Kappa dihitung menggunakan Persamaan (5).

$$UA = \frac{n_{ii}}{n_{+i}} \quad \dots \dots \dots (SEQ Equation \setminus * ARABIC 2)$$

$$PA = \frac{n_{ii}}{n_{i+}} \dots \dots \dots (SEQ Equation \setminus$$

* ARABIC 3)

$$OA = \frac{\sum_i n_{ii}}{N} \dots \dots \dots (SEQ Equation \setminus$$

* ARABIC 4)

$$Kappa\ coefficient = \frac{N \cdot \sum_i n_{ii} - \sum_i (n_{i+} \times n_{+i})}{N^2 - \sum_i (n_{i+} \times n_{+i})} \dots \dots \dots (SEQ Equation \setminus$$

ARABIC 5)

Keterangan:

- n_{ii} = Jumlah sampel yang benar pada kelas i
- n_{i+} = Total sampel referensi kelas i (jumlah baris)
- n_{+i} = Total sampel hasil klasifikasi kelas i (jumlah kolom)
- N = Total semua sampel
- $\sum_i n_{ii}$ = Jumlah total sampel yang benar pada kelas

Analisis Alih Fungsi Lahan

Peta tutupan lahan hasil klasifikasi tahun 2020-2024 digunakan untuk menganalisis alih fungsi lahan sawah. Analisis dilakukan dengan overlay pada periode 2020-2021, 2021-2022, 2022-2023, dan 2023-2024 untuk mengidentifikasi perubahan kelas tutupan lahan dari sawah menjadi non-sawah. Hasil *overlay* menghasilkan informasi mengenai lokasi, luas, serta arah perubahan penggunaan lahan pada setiap periode pengamatan.

Luas alih fungsi sawah dihitung berdasarkan total luas piksel yang berubah dari kelas sawah menjadi kelas non-sawah. Laju alih fungsi lahan sawah dihitung menggunakan Persamaan (6).

$$\text{Laju Alih Fungsi Lahan} = \frac{A_t - A_{t+1}}{A_t} \times 100\% \dots \dots \dots (6)$$

Keterangan:

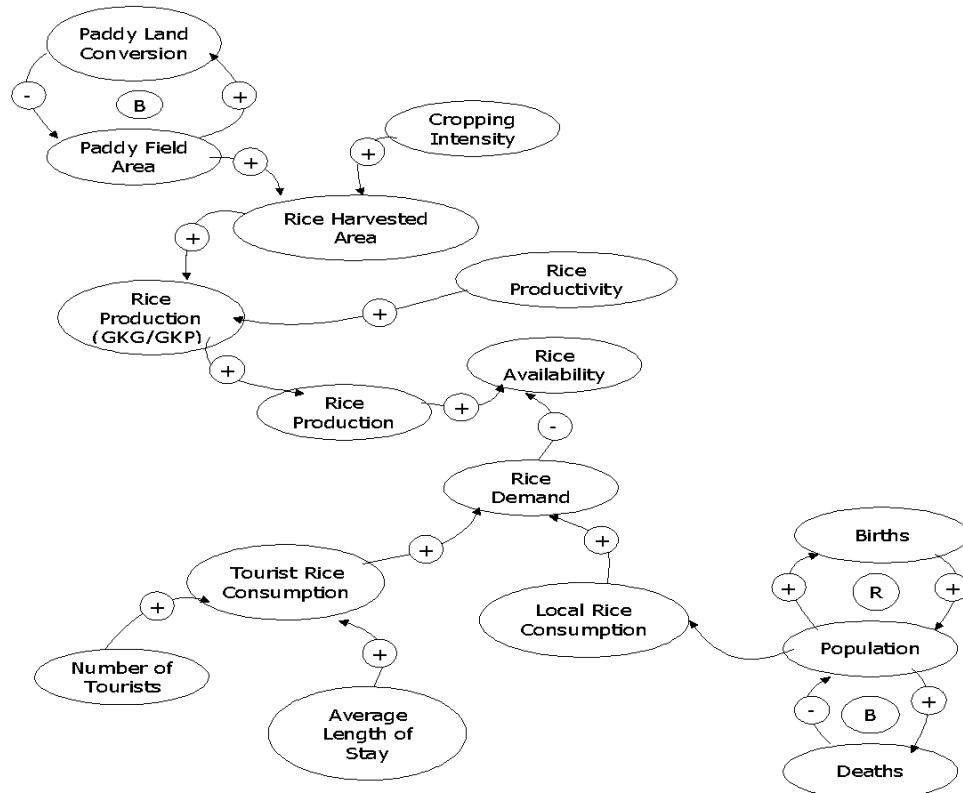
- A_t = Luas sawah pada tahun ke-t (ha)
- A_{t+1} = Luas sawah pada tahun berikutnya (ha)

Pemodelan Sistem Dinamik

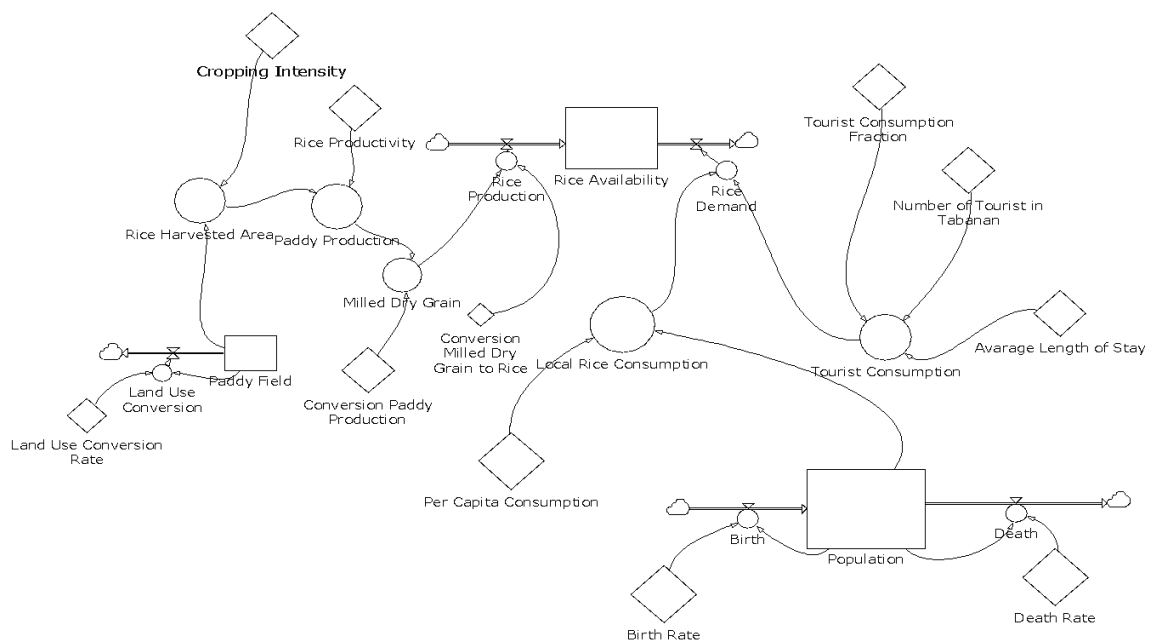
Pemodelan sistem dinamik telah banyak diterapkan pada berbagai bidang penelitian, termasuk ketahanan pangan. Model ini mensimulasikan berbagai skenario intervensi serta evaluasi dampaknya terhadap tujuan sistem, seperti peningkatan produksi maupun pencapaian swasembada beras (Eneh & Eneh, 2025). Model sistem dinamik dalam penelitian ini dikembangkan berdasarkan hasil analisis spasial, yaitu luas lahan sawah dan laju alih fungsi lahan sawah yang diperoleh dari klasifikasi tutupan lahan tahun 2020-2024. Nilai luas sawah pada tahun dasar digunakan sebagai kondisi awal (*initial stock*), sedangkan rata-rata laju alih fungsi lahan sawah digunakan sebagai parameter yang mengendalikan perubahan luas sawah selama periode simulasi.

Dalam model ini, perubahan luas sawah akibat alih fungsi memengaruhi luas panen. Luas panen selanjutnya digunakan untuk menghitung produksi GKP/GKG dan produksi beras, yang kemudian dibandingkan dengan kebutuhan beras berdasarkan konsumsi penduduk dan wisatawan. Tahapan pemodelan diawali dengan identifikasi batas sistem dan variabel-variabel utama yang berpengaruh, kemudian dilanjutkan dengan penyusunan

Causal Loop Diagram (CLD) yang disajikan pada Gambar 2. CLD digunakan untuk menggambarkan hubungan sebab-akibat serta interaksi dinamis antarvariabel dalam sistem (Ermayendri et al., 2025). Selanjutnya, CLD dikembangkan menjadi *Stock Flow Diagram* (SFD) yang disajikan pada Gambar 3 sebagai dasar penyusunan model simulasi (Pasha, 2017) dengan simulasi periode 2020–2050. Secara umum, *Stock Flow Diagram* berfungsi sebagai alat pendukung pengambilan keputusan dalam mengevaluasi berbagai skenario jangka panjang (Ermayendri et al., 2025).



Gambar 2. *Causal Loop Diagram* pemodelan ketersediaan beras di Kabupaten Tabanan



Gambar 3. Stock and Flow Diagram pemodelan ketersediaan beras di Kabupaten Tabanan**Validasi Model**

Validasi model dilakukan untuk mengetahui model yang dibangun telah mampu merepresentasikan kondisi sistem nyata. Apabila hasil validasi menunjukkan ketidaksesuaian, maka model perlu diperbaiki sebelum digunakan untuk simulasi skenario (Widhianthini, 2019). Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi model terhadap data aktual ketersediaan beras menggunakan pendekatan *quantitative behavior pattern comparison* (Utami, 2006). Tingkat kesesuaian model diukur menggunakan *normalized Root Mean Square Error* (nRMSE) yang menggambarkan besarnya rata-rata kesalahan hasil simulasi terhadap data aktual (Hasibuan & Novialdi, 2022). Persamaan nRMSE ditunjukkan pada Persamaan 7.

$$nRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum (y_{sim} - y_{akt})^2}}{\bar{y}_{akt}} \times 100\% \dots \dots \dots (7)$$

Keterangan:

y_{sim} = Nilai simulasi

y_{akt} = Nilai aktual

$\bar{y}_{akt}$ = Rata-rata nilai aktual

Hasil dari perhitungan nRMSE selanjutnya di klasifikasi menjadi Sangat Baik (nRMSE < 10%), Baik (10% ≤ nRMSE ≤ 20%), Cukup (20% ≤ nRMSE ≤ 30%), Buruk (nRMSE > 30%).

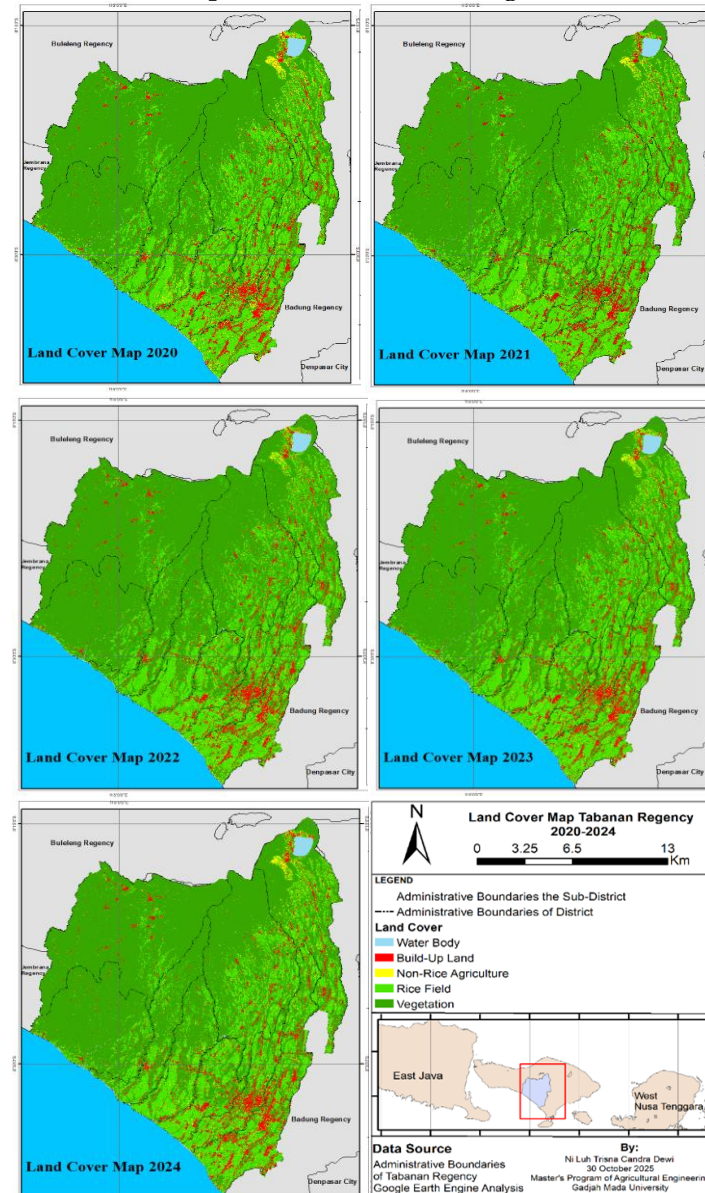
Simulasi Skenario

Setelah mendapatkan hasil validasi, simulasi dilakukan untuk mengetahui bagaimana perilaku sistem di masa mendatang baik dengan perubahan kebijakan ataupun tidak. Selanjutnya, simulasi model dengan skenario kebijakan akan menghasilkan beberapa skenario-skenario model, dimana input skenario kebijakan tersebut akan berdampak pada variabel output sistem secara keseluruhan (Pradnyana *et al.*, 2021). Penelitian ini menerapkan dua skenario kebijakan yang dibandingkan dengan kondisi eksisting. Skenario pertama pengurangan laju alih fungsi lahan sawah dan skenario kedua skenario kombinasi antara pengurangan laju alih fungsi lahan sawah dengan peningkatan produktivitas padi.

HASIL DAN PEMBAHASAN**Tutupan Lahan Kabupaten Tabanan**

Analisis spasial berperan penting dalam memahami dominasi dan pola distribusi spasial tutupan lahan yang diperoleh dari hasil interpretasi citra penginderaan jauh (Lillesand *et al.*, 2015). Informasi spasial yang akurat dan terpercaya dibutuhkan bagi pengambil kebijakan serta pemangku kepentingan (Adhikari *et al.*, 2025). Hasil klasifikasi peta tutupan lahan disajikan pada Gambar 4 guna mengetahui distribusi spasial masing-masing kelas tutupan lahan Kabupaten Tabanan. Pola distribusi spasial tutupan lahan di Kabupaten Tabanan selama periode 2020–2024 menunjukkan bahwa vegetasi merupakan kelas tutupan lahan yang paling dominan dan tersebar terutama pada wilayah bagian tengah hingga utara Kabupaten Tabanan. Lahan sawah terletak pada wilayah dataran rendah hingga menengah, khususnya di bagian selatan dan tengah Kabupaten Tabanan. Sementara itu, kawasan terbangun sebagian besar terkonsentrasi di sekitar pusat permukiman dan kawasan perkotaan pada wilayah dataran rendah. Perubahan kelas tutupan lahan dari sawah menjadi non-sawah digunakan sebagai indikator spasial yang mengindikasikan terjadinya alih fungsi

lahan sawah. Namun, interpretasi tersebut perlu mempertimbangkan pengaruh musim tanam, fase fenologi tanaman. Oleh karena itu, diperlukan validasi lapangan untuk memastikan kesesuaian hasil interpretasi citra satelit dengan kondisi aktual di lapangan.



Gambar 4. Tutupan Lahan Kabupaten Tabanan 2020-2024

Validasi Lapangan

Validasi lapangan merupakan tahapan penting untuk memastikan bahwa hasil klasifikasi citra satelit benar-benar sesuai dengan kondisi aktual di lokasi penelitian. Hasil validasi lapangan disajikan pada Tabel 1. Validasi dilakukan menggunakan 448 titik sampel yang ditentukan dengan metode *Stratified Random Sampling*.

Tabel 1. Hasil Validasi Lapangan

Tahun	Validasi Lapangan	
	<i>Kappa Coefficient</i>	<i>Overall Accuracy</i>
2020	0,95	95,75
2021	0,94	95,71
2022	0,92	93,98

2023	0,90	92,41
2024	0,90	90,85

Hasil validasi lapangan menunjukkan bahwa nilai *Kappa Coefficient* dan *Overall Accuracy* lebih dari 80%. Nilai tersebut mengindikasikan bahwa peta tutupan lahan sawah hasil interpretasi citra pada periode 2020–2024 memiliki tingkat kesesuaian yang sangat tinggi terhadap kondisi aktual di lapangan.

Analisis Laju Alih Fungsi Lahan Sawah di Kabupaten Tabanan

Analisis spasial tutupan lahan di Kabupaten Tabanan selama periode 2020–2024 menunjukkan adanya proses perubahan penggunaan lahan yang dinamis. Hasil perhitungan luas masing-masing kelas tutupan lahan yang dinyatakan dalam satuan hektare (ha) disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Perhitungan Setiap Kelas

No	Kelas Tutupan Lahan	Luas (ha)				
		2020	2021	2022	2023	2024
1	Sawah	21.863,75	22.079,83	19.357,75	21.595,11	20.070,31
2	Pertanian Non Sawah	2.434,15	1.759,91	1.440,01	1.493,14	1.887,78
3	Vegetasi	55.531,86	55.887,19	59.067,79	56.422,62	57.669,38
4	Lahan Terbangun	4.533,80	4.624,02	4.473,49	4.813,31	4.758,82
5	Badan Air	592,97	606,158	617,73	633,23	571,08
Total		84.956,55	84.957,12	84.956,78	84.957,42	84.957,38

Hasil klasifikasi menunjukkan bahwa luas lahan sawah pada periode 2020–2021 mengalami peningkatan dari 21.863,75 ha menjadi 22.079,83 ha. Namun, pada tahun 2022 terjadi penurunan hingga mencapai 19.357,75 ha, kemudian kembali meningkat pada tahun 2023 menjadi 21.595,11 ha dan mengalami penurunan kembali pada tahun 2024 menjadi 20.070,31 ha. Fluktuasi tutupan lahan sawah selama periode 2020–2024 dipengaruhi oleh kombinasi beberapa faktor, seperti dinamika perubahan penggunaan lahan, perbedaan musim tanam, serta variasi fase fenologi tanaman padi pada saat perekaman citra satelit. Pada wilayah berkembang, tutupan lahan pertanian memiliki tingkat kerentanan yang tinggi terhadap perubahan fungsi lahan akibat meningkatnya nilai ekonomi lahan dan tekanan urbanisasi (Irawan, 2005). Hasil analisis laju alih fungsi lahan sawah disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Laju Alih Fungsi Lahan Sawah di Kabupaten Tabanan

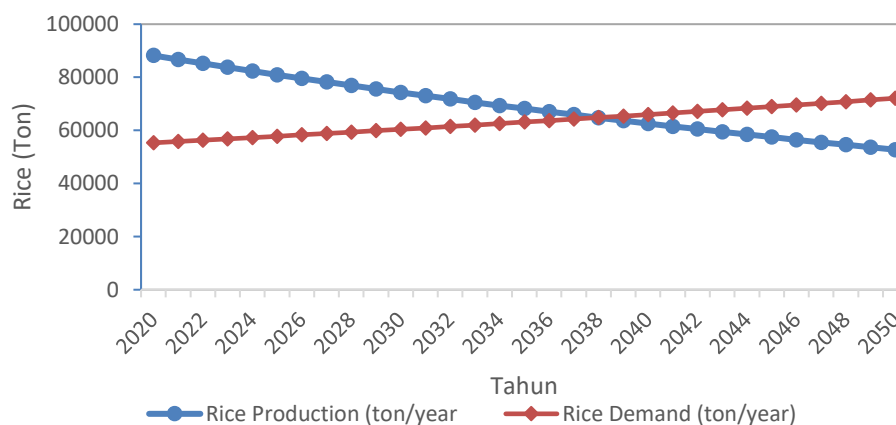
Kelas Tutupan Lahan	Laju Alih Fungsi Lahan								Rata – rata (%)
	2020-2021		2021-2022		2022-2023		2023-2024		
	Ha	%	Ha	%	Ha	%	Ha	%	
Sawah	216,08	0,99	-2,722,08	-12,33	2237,36	11,56	-1,524,80	-7,06	-1,71
Pertanian non sawah	-674,24	-27,70	-319,90	-18,18	53,13	3,69	394,64	26,43	-3,94
Vegetasi	355,33	0,64	3180,61	5,69	-2,645,17	-4,48	1,246,76	2,21	1,02
Lahan Terbangun	90,22	1,99	-150,53	-3,26	339,82	7,60	-54,49	-1,13	1,30
Badan Air	13,18	2,22	11,57	1,91	15,50	2,51	-62,15	-9,81	-0,79

Tabel 3 menunjukkan bahwa kelas lahan sawah mengalami dinamika perubahan yang paling signifikan dibandingkan dengan kelas tutupan lahan lainnya. Secara rata-rata, luas lahan sawah mengalami penurunan sebesar -1,71%, dengan penurunan terbesar terjadi pada periode 2021–2022 sebesar -12,33% dan periode 2023–2024 sebesar -7,06%. Penurunan luas

lahan sawah tersebut bersamaan dengan peningkatan luas kelas vegetasi dan lahan terbangun, yang mengindikasikan adanya dinamika alih fungsi lahan sawah ke non pertanian maupun perubahan sementara akibat pengelolaan lahan. Hasil penelitian ini sejalan dengan Adyaguhyatriko et al. (2024) yang menyatakan bahwa Kabupaten Tabanan menghadapi tekanan alih fungsi lahan akibat perkembangan infrastruktur dan peningkatan pembangunan akomodasi pariwisata. Selain itu, kelas lahan terbangun menunjukkan kecenderungan ekspansi yang relatif meningkat selama periode pengamatan, yang mencerminkan adanya peningkatan tekanan populasi, bisa dimungkinkan urbanisasi dan perubahan pola pemanfaatan ruang di wilayah tersebut.

Simulasi Produksi Beras Kabupaten Tabanan

Hasil simulasi menunjukkan proyeksi produksi beras di Kabupaten Tabanan sebagaimana disajikan pada Gambar 5. Produksi beras tahunan di Kabupaten Tabanan menunjukkan kecenderungan penurunan secara bertahap. Penurunan tersebut terjadi secara linier dan konsisten dari tahun ke tahun, yang menunjukkan adanya tekanan struktural dalam sistem produksi, terutama akibat berkurangnya luas lahan sawah. Titik keseimbangan antara produksi dan kebutuhan beras diperkirakan terjadi pada periode 2038–2039. Setelah periode tersebut produksi beras tidak dapat mencukupi permintaan beras sehingga berpotensi menyebabkan defisit produksi beras setiap tahunnya.



Gambar 5. Hasil Simulasi Produksi Beras Kabupaten Tabanan 2020-2050

Kabupaten Tabanan merupakan salah satu kontributor utama produksi padi di Provinsi Bali, dengan tingkat produksi beras yang secara konsisten lebih tinggi dibandingkan kabupaten/kota lainnya di provinsi tersebut. Meskipun mengalami fluktuasi produksi dari tahun ke tahun, Kabupaten Tabanan tetap menjadi salah satu lumbung pangan utama di Bali (Widyari & Arka, 2025). Penurunan produksi beras tidak hanya dipengaruhi oleh penyusutan luas lahan sawah, tetapi juga oleh peningkatan kebutuhan beras sebagai bahan pangan pokok yang terus mengalami peningkatan seiring dengan pertumbuhan jumlah penduduk setiap tahun (Alamsyar, 2022). Selain pertumbuhan jumlah penduduk, perkembangan sektor pariwisata yang pesat turut meningkatkan tekanan terhadap kebutuhan beras. Namun, peningkatan mobilitas penduduk akibat aktivitas pariwisata, ekspansi kawasan perkotaan, dan peningkatan konsumsi pangan memberikan tekanan tambahan terhadap sistem pangan, khususnya melalui peningkatan kebutuhan beras (Lestari et al., 2025).

Validasi Sistem Dinamik

Validasi model dilakukan untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian antara hasil simulasi dengan kondisi aktual selama periode historis. Tabel 4 menyajikan hasil validasi model sistem dinamik pada tingkat kecamatan dengan membandingkan hasil simulasi terhadap data

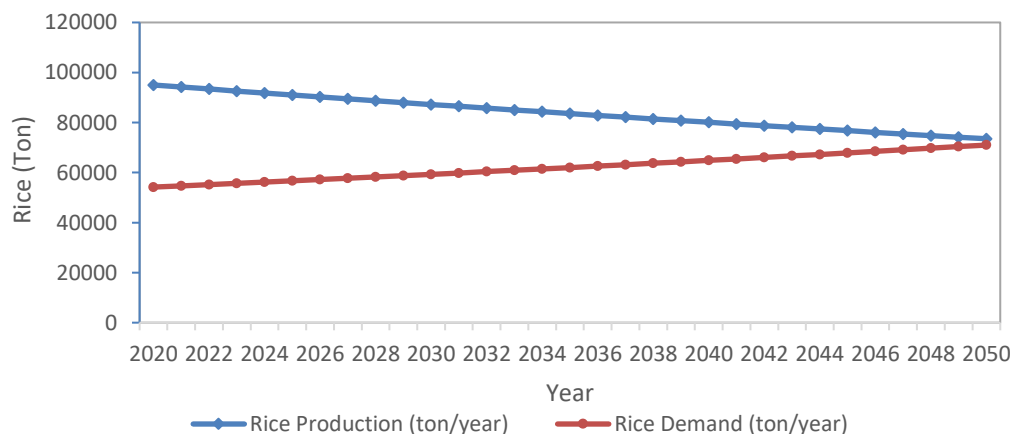
aktual selama periode 2020–2024 menggunakan indikator *normalized Root Mean Square Error* (nRMSE). Tabel 4 menunjukkan variabel yang divalidasi memiliki nilai galat di bawah 10%, sehingga dikategorikan memiliki tingkat akurasi yang sangat baik.

Tabel 4. Validasi Sistem Dinamik

Tahun	Penduduk (Ribuan)		Lahan Panen (ton/ha)		Lahan Sawah (ha)		Produksi Padi (ton/th)		Produksi Beras (ton/th)	
	Akt.	Sim.	Akt.	Sim.	Akt.	Sim.	Akt.	Sim.	Akt.	Sim.
2020	461,6	461,6	25.269	28.421	21.863,7	21.853,0	142.846	166.268	80.558,8	88.210,1
2021	465,3	465,7	29.211	27.938	22.079,8	21.491,3	166.880	163.442	94.113,1	86.710,5
2022	469,3	470,5	29.039	27.463	19.357,8	21.126,0	169.265	160.663	95.458,2	85.236,4
2023	471,3	474,7	28.190	26.996	21.595,1	20.766,8	169.512	157.932	95.597,2	83.787,4
2024	478,4	478,9	26.906	26.537	20.070,3	20.413,8	163.227	155.247	92.052,0	82.363,0
nRMSE (%)	0,355		6,371		4,405		7,946		9,953	

Skenario 1 (Pengurangan Alih Fungsi Lahan Sawah)

Alih fungsi lahan sawah telah menyebabkan penurunan produksi beras di tingkat Kabupaten. Chofyan & Dewi (2025) menegaskan bahwa konversi lahan pertanian berdampak langsung terhadap penurunan kapasitas produksi. Skenario kebijakan ini dikembangkan berdasarkan Keputusan Bupati Tabanan Nomor 180/1114/03/HK/2022 tentang pelaksanaan Perlindungan Lahan Pertanian Pangan Berkelanjutan (LP2B) (Ramadhan & Murti, 2024). Dalam model sistem dinamis, kebijakan ini direpresentasikan dengan menurunkan laju alih fungsi lahan sebesar 50% dari kondisi *existing*, yaitu dari 1,71% per tahun menjadi 0,85% per tahun. Alih fungsi lahan merupakan faktor struktural yang secara signifikan memengaruhi kapasitas produksi beras dan stabilitas ketersediaan beras (Gandharum et al., 2025). Simulasi skenario dapat dilihat pada Gambar 6.



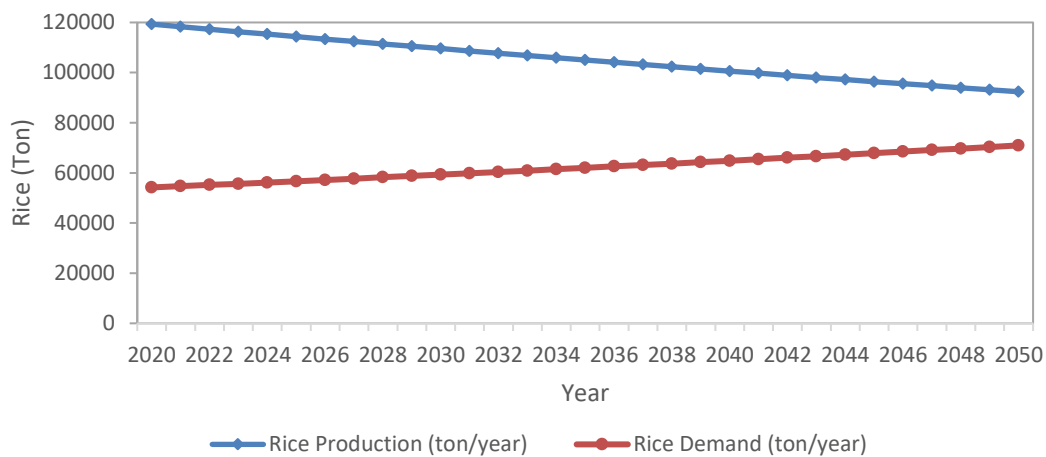
Gambar 6. Skenario 1 Penurunan Alih Fungsi Lahan

Gambar 6 menunjukkan produksi beras tahunan tetap mengalami penurunan secara bertahap selama periode 2020–2050. Produksi yang pada awal periode berada di 95.000 ton per tahun menurun menjadi sekitar 73.000 ton pada akhir periode simulasi dan mencapai swasembada 2050 karena masuk kategori surplus. Namun, penurunan tersebut terjadi secara laju yang lebih lambat dibandingkan kondisi *existing*. Hal ini menunjukkan bahwa pengurangan laju alih fungsi lahan mampu memperlambat penurunan kapasitas produksi. Chu et al. (2021) menyatakan bahwa kebijakan membatasi konversi lahan sawah produktif ke

penggunaan non-pertanian membantu mempertahankan basis lahan pertanian, sehingga dapat mengurangi penurunan produksi jangka panjang dan menjaga stabilitas sistem pangan. Selain itu, kehilangan lahan sawah memiliki dampak yang lebih besar terhadap produksi dibandingkan fluktuasi musiman produktivitas. Namun demikian, tanpa dukungan peningkatan produktivitas dan pengelolaan permintaan, manfaat perlindungan lahan cenderung bersifat sementara (Harini, 2012).

Skenario 2 (Skenario Kombinasi: Pengurangan Alih Fungsi Lahan dan Peningkatan Produktivitas Padi)

Skenario 2 adalah kombinasi yang digunakan untuk menilai dampak simultan implementasi kebijakan LP2B dengan mengintegrasikan perlindungan lahan sawah melalui pengurangan alih fungsi lahan sebesar 50% dengan peningkatan produktivitas padi sebesar 10% (dari 5,85 ton/ha menjadi 6,43 ton/ha). Skenario 2 ini mempertimbangkan kenaikan produktivitas Kabupaten Tabanan berdasarkan data BPS 2020. Hasil simulasi tersaji pada Gambar 7.



Gambar 6. Skenario 2 Kombinasi penurunan alih fungsi lahan dan peningkatan produktivitas padi

Gambar 7 menunjukkan bahwa produksi beras di Kabupaten Tabanan tetap memperlihatkan tren penurunan selama periode 2020–2050. Pada awal periode tahun 2020, produksi berada di kisaran 120.000 ton per tahun, kemudian menurun secara bertahap hingga sekitar 92.000 ton pada tahun 2050 (surplus). Pola penurunan secara linear ini menunjukkan adanya tekanan struktural dalam sistem produksi, seperti berkurangnya luas lahan sawah atau keterbatasan peningkatan produktivitas yang belum mampu sepenuhnya mengimbangi kehilangan lahan. Bahri & Syahrial (2024) menyatakan bahwa alih fungsi lahan memberikan kontribusi terhadap penurunan produksi beras tahunan karena berkurangnya luas lahan sawah secara langsung menurunkan total luas panen. Mengingat produksi beras ditentukan oleh luas lahan yang ditanami dan hasil per ha, maka setiap penurunan luas sawah berpotensi menurunkan produksi apabila tidak diimbangi dengan peningkatan produktivitas lahan. Kondisi ini menunjukkan bahwa pengendalian alih fungsi lahan dan peningkatan produktivitas merupakan dua aspek penting yang tidak bisa dipisahkan sebagai upaya mempertahankan kapasitas produksi beras di Kabupaten Tabanan.

Rekomendasi Skenario dalam Mendukung Swasembada Beras di Kabupaten Tabanan Tahun 2050

Dalam penentuan skenario terbaik dalam mendukung swasembada beras di Kabupaten Tabanan, dilakukan perbandingan hasil simulasi antara kondisi *existing* dan dua skenario intervensi yang telah dikembangkan. Hasil perbandingan tersebut disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan Kondisi *Existing* dan Skenario

Indikator	Kondisi <i>Existing</i>	Skenario 1 (Penurunan Alih Fungsi Lahan)	Skenario 2 (Kombinasi Pengurangan Alih Fungsi Lahan dan Peningkatan Produktivitas)	Satuan
Produksi Beras	52.738,04	73.533,41	75.800	ton
Kebutuhan Beras	70.986,09	70.986,09	70.986,09	ton
Surplus/Defisit	-18.248,05	2.547,32	13.138,39	ton
Status	Defisit	Surplus	Surplus	-

Pada Tabel 5, produksi beras kondisi *existing* sebesar 52.738,04 ton belum mampu memenuhi kebutuhan beras sebesar 70.986,09 ton, sehingga terjadi defisit sebesar 18.248,05 ton. Penerapan skenario penurunan alih fungsi lahan mampu meningkatkan produksi beras menjadi 73.533,41 ton sehingga menghasilkan surplus sebesar 2.547,32 ton. Namun demikian, surplus yang dihasilkan masih kecil sehingga dalam mencapai swasembada beras daerah masih rentan terhadap perubahan produksi maupun peningkatan kebutuhan beras di masa mendatang. Sementara itu, skenario kombinasi pengurangan alih fungsi lahan dan peningkatan produktivitas padi menghasilkan produksi beras sebesar 75.800 ton dengan surplus mencapai 13.138,39 ton. Nilai surplus yang lebih besar menunjukkan bahwa skenario ini mampu memberikan keseimbangan yang lebih baik antara produksi dan kebutuhan beras. Oleh karena itu, skenario kombinasi direkomendasikan sebagai strategi yang paling optimal untuk mendukung keberlanjutan swasembada beras di Kabupaten Tabanan hingga tahun 2050.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa alih fungsi lahan sawah di Kabupaten Tabanan mengalami perubahan selama periode 2020–2024, dengan rata-rata penurunan sebesar –1,71% per tahun. Analisis spasial menunjukkan bahwa lahan sawah sebagian besar terkonsentrasi pada wilayah dataran rendah, tetapi kawasan tersebut semakin mengalami tekanan akibat alih fungsi lahan. Nilai koefisien Kappa yang tinggi (0,90–0,94) menunjukkan bahwa hasil klasifikasi tutupan lahan memiliki tingkat keandalan yang sangat baik. Hasil simulasi sistem dinamik periode 2020–2050 menunjukkan bahwa pada eksisting tahun 2050, produksi beras defisit sebesar 18.248,05 ton, dengan produksi hanya mencapai 52.738,04 ton, sedangkan kebutuhan beras diperkirakan mencapai 70.986,09 ton. Hasil validasi model dengan nilai nRMSE <10% menunjukkan bahwa model yang dikembangkan mampu merepresentasikan perilaku sistem nyata dengan baik dan layak digunakan sebagai dasar analisis kebijakan. Skenario kebijakan berupa pengurangan laju alih fungsi lahan sebesar 50% mampu memperlambat penurunan produksi beras, tetapi belum sepenuhnya mampu mengatasi penurunan produksi dalam jangka panjang. Sementara itu, kombinasi skenario pengendalian alih fungsi lahan dan peningkatan produktivitas padi sebesar 10%

menghasilkan tren produksi yang lebih baik, meskipun tekanan struktural terhadap sistem pangan masih tetap terlihat. Oleh karena itu, keberlanjutan ketahanan pangan beras di Kabupaten Tabanan memerlukan kebijakan terpadu yang secara bersamaan mampu melindungi lahan pertanian, meningkatkan produktivitas, serta memperkuat ketahanan sistem pertanian dalam jangka panjang.

Saran

Penelitian ini masih memiliki keterbatasan pada penggunaan data penginderaan jauh dengan periode waktu 5 tahun yang kurang dalam membentuk tren. Selain itu, pemodelan sistem dinamik tidak memodelkan distribusi atau perdagangan antar wilayah. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan menggunakan periode waktu yang lebih jauh, menambahkan variabel yang lebih beragam, serta melakukan analisis pada skala wilayah yang lebih rinci untuk meningkatkan ketelitian dan relevansi hasil.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pemerintah Kabupaten Tabanan atas dukungan yang diberikan selama pelaksanaan penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Dinas Pertanian Kabupaten Tabanan dan Badan Pusat Statistik (BPS) Kabupaten Tabanan atas penyediaan data statistik mengenai produksi padi, luas panen, jumlah penduduk, dan jumlah wisatawan yang digunakan dalam penelitian ini. Penulis turut menyampaikan apresiasi kepada Badan Informasi Geospasial (BIG) atas penyediaan data batas administrasi serta kepada *platform Google Earth Engine* yang telah memfasilitasi akses terhadap citra satelit Sentinel-2. Selain itu, penulis menyampaikan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada dosen pembimbing serta Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Gadjah Mada atas bimbingan, masukan yang konstruktif, dan dukungan yang diberikan selama proses penelitian hingga penyusunan karya ilmiah ini.

PENDANAAN

Penelitian ini tidak menerima pendanaan eksternal.

CONFLICT OF INTEREST

Penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan dalam penelitian ini. Penelitian ini tidak menerima pendanaan khusus dari lembaga pendanaan publik, komersial, maupun nirlaba.

DAFTAR REFERENSI

- Adhikari, G., Joshi, K. P., Chad, D., Ghimire, A., & Mahara, S. (2025). Spatial Dynamics And Risk Mapping Of Forest Fires In Madhesh Province , Nepal : A Multi-Criteria Decision Approach. *Environment And Natural Resources Journal*, 23(1), 80–94. <https://doi.org/10.32526/Ennrj/23/20240124>
- Adyaguhyatriko, I. B. K., Wijaya, I. M. A. S., & Sumiyati, S. (2024). Analisis Spatio-Temporal Alih Fungsi Lahan Sawah Kabupaten Tabanan Spatio-Temporal. *Jurnal Beta (Biosistem Dan Teknik Pertanian)*, 12(April), 128–133.
- Alamsyar, A. (2022). Transfer, Impact Function, Rice Land Regency, Food Securitysigi. *Agrotekbis*, 10(1), 176–185.
- Budiman, N. D., & Santu, L. (2024). Kajian Strategi Dan Kebijakan Pemerintah Indonesia Dalam Mencapai Target Swasembada Beras. *Cemara*, 21.

- Chofyan, I., & Dewi, D. A. D. (2025). The Impact Of Land Conversion On Rice Production Vulnerability In South Bangka Regency : A GIS- Based Analysis. *International Journal Of Innovative Research & Scientific Studies*, 8(4), 1986–1997. <https://doi.org/10.53894/Ijirss.V8i4.8282>
- Chu, L., Nguyen, H., Kompas, T., Dang, K., & Bui, T. (2021). Heliyon Rice Land Protection In A Transitional Economy : The Case Of Vietnam. *Heliyon*, 7(4), E06754. <https://doi.org/10.1016/J.Heliyon.2021.E06754>
- Donoriyanto, D. S., Nugraha, I., & Ardlianti, R. A. (2023). Analisis Ketersediaan Beras Di Surabaya Dengan Pendekatan Sistem Dinamis. *Tekmapro*, 18(2), 23–34. <https://doi.org/10.33005/Tekmapro.V18i2.334>
- Ermayendri, D., Simarmata, M., Arianto, W., & Sukiyono, K. (2025). *Dynamic Integrated Model For Sustainable Solid Waste Management In Bengkulu City*. 23(6), 494–515. <https://doi.org/10.32526/Ennrj/23/20250048>
- Fitriana Lely, S Susanto , Ngadisih , C Setyawan and R Tirtalistyani. *Climate stresses and its impact towards food sufficiency: a case in Bantul regency Yogyakarta-Indonesia*. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 653 (2021) 012141. 1-7
- Gandharum, L., Hartono, D. M., Sadmono, H., Sanjaya, H., Sumargana, L., Kusumawardhani, A. D., Alhasanah, F., Sencaki, D. B., & Setyaningrum, N. (2025). Advancing Land Use Modeling With Rice Cropping Intensity : A Geospatial Study On The Shrinking Paddy Fields In Indonesia. *Geographies*, 1–27. <https://doi.org/10.3390/Geographies5030031>
- Harini, R. (2012). *Agricultural Land Conversion : Determinants And Impact For Food Sufficiency In Sleman Regency*. 44(2).
- Hasibuan, L. S., & Novialdi, Y. (2022). Prediksi Harga Minyak Goreng Curah Dan Kemasan Menggunakan Algoritme Long Short-Term Memory (LSTM) Prediction Of Bulk And Packaged Cooking Oil Prices Using The Long Short-Term Memory (LSTM) Algorithm. *Prediksi Harga Minyak Goreng Curah Dan Kemasan Menggunakan Algoritme Long Short-Term Memory (LSTM)*, 9.
- Irawan, B. (2005). Konversi Lahan Sawah : Potensi Dampak, Pola Pemanfaatannya, Dan Faktor Determinan. *Forum Penelitian Agro Ekonomi*, 23, 1–18.
- Lestari, A. M., Khusaini, M., Sholihah, Q., & Ciptadi, G. (2025). The Impact Of Community Participation On Tourism Village Management And Sustainability : A Case Study In Wonokitri Village , Pasuruan. *Environment And Natural Resources Journal*, 23(4), 366–378. <https://doi.org/10.32526/Ennrj/23/20250007>
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2015). *Remote Sensing And Image Interpretation* (Seventh). Wiley.
- Ngadisih, N., Purwantana, B., Susanti, D. Y., Puspitaningrum, I. N., Samodra, G., Strauss, P., Arif, S. S., Murtiningrum, Rahayoe, S., W.K, J. N., Sutiarso, L., Bintoro, N., Radi, R., Nugroho, A. P., Maftukhah, R., M, R. E., Setyawan, C., Nugroho, B. DA, & Lestari, P. (2025). Landslide Disaster Risk For Small And Medium Agricultural Enterprises (Smaes). *Environment And Natural Resources Journal*, 23(4), 325–342.

<https://doi.org/10.32526/Ennrj/23/20240340>

- Pasha, D. (2017). *Pengembangan Model Rantai Pasok Menggunakan Sistem Dinamik (Studi Kasus : Minyak Goreng Di PT Tunas Baru Lampung)*.
- Pradnyana, I. G. Y., Widia, I. W., & Sumiyati, S. (2021). Model Sistem Dinamik Stok Beras Untuk Mendukung Ketahanan Pangan Provinsi Bali. *Jurnal BETA (Biosistem Dan Teknik Pertanian)*, 9(1), 10. <https://doi.org/10.24843/Jbeta.2021.V09.I01.P02>
- Prasada, I. M. Y., & Rosa, T. A. (2018). The Impact Of Wetland Conversion On Food Security In Daerah Istimewa Yogyakarta. *Sosial Ekonomi Pertanian*, 1(1), 103–110.
- Purnami, T., Lestari, S., Wirman, S. P., & Fitrya, N. (2026). Deteksi Kematangan Buah Sawit Non-Destruktif Menggunakan Hidung Elektronik Multisensor Dan Random Forest. 14(1), 94–112. <https://doi.org/10.29303/Jrpb.V14i1.1221>
- Ramadhan, S., & Murti, R. P. W. (2024). Dinamika Alih Fungsi Lahan Sawah Dan Upaya Perlindungan Lahan Pertanian Pangan Berkelanjutan Di Wilayah Metropolitan Sarbagita. *Tunas Agraria*, 7(3), 303–325. <https://doi.org/10.31292/Jta.V7i3.357>
- Sari, T. E. M. (2020). Pola Alih Fungsi Lahan Pertanian Menjadi Lahan Industri Baru Di Kecamatan Wonoayu Kabupaten Sidoarjo. In *Repository.Ub.Ac.Id* (Vol. 53, Issue 1). <http://dx.doi.org/10.1016/J.Biochi.2015.03.025><http://dx.doi.org/10.1038/Nature10402><http://dx.doi.org/10.1038/Nature21059><http://journal.stainkudus.ac.id/index.php/Equilibrium/Article/View/1268/1127><http://dx.doi.org/10.1038/Nrmicro2577>
- Svoboda, J., & Paluba, D. (2022). Random Forest Classification Of Land Use, Land-Use Change And Forestry (LULUCF) Using Sentinel-2 Data — A Case Study Of Czechia. *Remote Sensing*. <https://doi.org/10.3390/RemoteSensing14051189> Academic
- Utami, R. (2006). Simulasi Dinamika Sistem Ketersediaan Ubi Kayu. *Skripsi, SKRIPSI*.
- Vongvassana, S., Pattanakiat, S., Tabucanon, A. S., & Chiyanon, T. (2026). Scenario-Based Land Cover And Land Use Change Modeling In Mae Chang Watershed, Lampang Province, Thailand. *Environment And Natural Resources Journal*, 24(1), 42–57. <https://doi.org/10.32526/Ennrj/24/20250115>
- Widhianthini, W. (2019). Implementasi Sistem Dinamik Dalam Bidang Pertanian. *SOCA: Jurnal Sosial Ekonomi Pertanian*, 12(2), 161. <https://doi.org/10.24843/Soca.2018.V12.I02.P03>
- Widyari, N. G. A. D., & Arka, S. (2025). International Journal Of Management The Influence Of Harvested Land Area , Labor , And Working Capital On Rice Production In Penebel District , Tabanan Regency. *International Journal Of Management Research And Economics*, 3, 372–381. <https://doi.org/10.54066/Ijmre-Itb.V3i2.3459>