



## Analisis Spasial Ketersediaan Lahan Potensial untuk Pengembangan Jagung (*Zea mays* L.) di Bagian Utara Provinsi Bengkulu

## Spatial Analysis of Potential Land Availability for Maize (*Zea mays* L.) Development in the Northern Region of Bengkulu Province

Thoriq Taqiyyuddin <sup>\*,1</sup>, Bambang Sulistyono <sup>1</sup>, Priyono Prawito <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Program Studi Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Bengkulu, Bengkulu, Indonesia

\*Penulis Korespondensi

Email: [thoriqtaqiyyuddin@gmail.com](mailto:thoriqtaqiyyuddin@gmail.com)



**Abstrak.** Ketersediaan informasi spasial lahan potensial menjadi faktor penting dalam mendukung pengembangan jagung secara berkelanjutan. Di Provinsi Bengkulu, khususnya Kabupaten Muko-Muko, Bengkulu Utara, dan Bengkulu Tengah, informasi kesesuaian lahan untuk budidaya jagung masih terbatas. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis ketersediaan lahan potensial secara spasial serta menentukan lokasi prioritas pengembangan jagung. Analisis dilakukan menggunakan Sistem Informasi Geografis melalui metode overlay berbobot dan matching berdasarkan kelas kesesuaian lahan S1 (sangat sesuai), S2 (cukup sesuai), S3 (sesuai marginal), dan N (tidak sesuai). Data yang digunakan meliputi peta administrasi, kemiringan lereng, status kawasan, izin usaha pertambangan, jenis tanah, dan curah hujan, serta data lapangan berupa drainase, tekstur tanah, kedalaman efektif, bahan kasar, batuan permukaan, dan pH tanah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa luas lahan potensial untuk pengembangan jagung mencapai 2.471,36 ha dengan dominasi kelas kesesuaian aktual S2 (cukup sesuai). Faktor pembatas utama pada seluruh jenis tanah adalah curah hujan (tc), sedangkan faktor pembatas lain yang spesifik meliputi kondisi drainase (rc) pada Alfisols, Inceptisol dan oxisols, serta retensi hara (nr) pada Oxisols. Secara umum, karakteristik media perakaran, tekstur, kedalaman tanah, dan kemiringan lereng tergolong sesuai (S1), namun keterbatasan iklim dan sifat kimia tanah menjadi kendala utama dalam optimalisasi produksi jagung. Sebaran lahan potensial cenderung berada pada wilayah dengan kondisi topografi relatif landai. Temuan ini menunjukkan bahwa upaya perbaikan pengelolaan air dan kesuburan tanah menjadi kunci dalam meningkatkan kelas kesesuaian lahan.

**Kata kunci:** evaluasi lahan, SIG pertanian, overlay berbobot, kesesuaian agroklimat, perencanaan wilayah.

**Abstract.** The availability of spatial information on potential land is an important factor in supporting the sustainable development of maize cultivation. In Bengkulu Province, particularly in Muko-Muko, North Bengkulu, and Central Bengkulu regencies, information on land suitability for maize cultivation remains limited. This study aims to spatially analyze the availability of potential land and determine priority locations for maize development. The analysis was conducted using a Geographic Information System through weighted overlay and matching methods based on land suitability classes, namely S1 (highly suitable), S2 (moderately suitable), S3 (marginally suitable), and N (not suitable). The data used included administrative maps, slope, land status, mining business permits, soil types, and rainfall, as well as field data consisting of

*drainage, soil texture, effective soil depth, coarse fragments, surface rock, and soil pH. The results showed that the potential land area for maize development reached 2,471.36 ha, dominated by the actual land suitability class of S2 (moderately suitable). The main limiting factor across all soil types was rainfall (tc), while other specific limiting factors included drainage conditions (rc) in Alfisols, Inceptisols, and Oxisols, as well as nutrient retention (nr) in Oxisols. In general, root-zone characteristics, texture, soil depth, and slope were classified as suitable (S1). However, climatic limitations and soil chemical properties remain the main constraints in optimizing maize production. The distribution of potential land tends to occur in areas with relatively gentle topography. These findings indicate that improving water management and soil fertility is a key strategy for increasing land suitability classes.*

**Keywords:** *land evaluation, Agricultural Geographic Information System (GIS), weighted overlay, agroclimatic suitability, regional planning.*

## 1. Pendahuluan

Jagung (*Zea mays L.*) merupakan salah satu komoditas pangan strategis di Indonesia yang berperan penting sebagai sumber pangan, pakan ternak, serta bahan baku industri. Seiring dengan meningkatnya pertumbuhan penduduk, perubahan struktur masyarakat, dan dinamika ekonomi, kebutuhan terhadap jagung dan lahan pertanian terus mengalami peningkatan, sementara ketersediaan lahan bersifat tetap. Kondisi ini mendorong terjadinya konversi lahan yang berpotensi menurunkan luas dan kualitas lahan pertanian (Nurpita *et al.*, 2018). Oleh karena itu, pemanfaatan lahan harus dilakukan secara optimal dengan mempertimbangkan potensi dan karakteristik lahan agar mampu menghasilkan produksi pertanian yang berkelanjutan (Muryono & Utami, 2020). Mengingat setiap lahan memiliki karakteristik biofisik yang berbeda, kajian mengenai kesesuaian dan potensi lahan menjadi sangat penting sebelum dimanfaatkan untuk budidaya pertanian (Sari *et al.*, 2024). Dalam konteks ini, Provinsi Bengkulu, khususnya bagian utara, memiliki potensi yang cukup besar untuk pengembangan budidaya jagung. Namun demikian, keterbatasan informasi spasial terkait kesesuaian lahan dan faktor lingkungan masih menjadi kendala utama dalam perencanaan pengembangan jagung, sehingga diperlukan analisis yang komprehensif untuk mendukung optimalisasi pemanfaatan lahan (Shafiani, 2020).

Penyediaan informasi mengenai potensi lahan sangat penting untuk mendukung pengambilan keputusan dalam pengembangan pertanian berkelanjutan (Mendrofa *et al.*, 2024). Informasi ini menjadi acuan bagi pemerintah daerah dalam menentukan lokasi yang tepat untuk perluasan lahan pertanian, termasuk budidaya jagung (Subroto & Witjaksono, 2022). Pemanfaatan data spasial memungkinkan identifikasi wilayah yang memiliki karakteristik lingkungan optimal bagi pertumbuhan tanaman. Salah satu teknologi yang dapat digunakan untuk menganalisis potensi lahan secara spasial adalah Sistem Informasi Geografis (SIG) (Sishodia *et al.*, 2020).

SIG memungkinkan analisis akurat terhadap berbagai parameter lingkungan, seperti jenis tanah, kemiringan lahan, curah hujan, suhu, dan ketersediaan air, untuk menentukan tingkat kesesuaian lahan bagi budidaya jagung (Ansar *et al.*, 2020). Pendekatan berbasis SIG memberikan

kemudahan dalam pengambilan keputusan perencanaan pertanian secara efektif dan efisien (Wahyuni, 2025). Teknologi ini mampu memberikan gambaran spasial mengenai lokasi-lokasi yang paling sesuai untuk pengembangan jagung, sehingga mendukung peningkatan produktivitas dan keberlanjutan pertanian di Provinsi Bengkulu (Ahmad *et al.*, 2025).

Berbagai penelitian sebelumnya telah memanfaatkan Sistem Informasi Geografis (SIG) dalam evaluasi kesesuaian lahan untuk pengembangan jagung, yang umumnya menitikberatkan pada analisis faktor biofisik seperti iklim, topografi, dan sifat tanah. Pendekatan ini terbukti mampu memberikan gambaran spasial mengenai potensi lahan serta membantu dalam perencanaan pengembangan pertanian secara lebih terarah. Selain itu, penerapan SIG juga berperan dalam mengurangi risiko kegagalan panen akibat ketidaksesuaian lahan dan ketidakpastian perubahan iklim, karena informasi spasial yang dihasilkan dapat digunakan oleh petani dan pemangku kepentingan dalam menyusun strategi budidaya yang lebih adaptif, seperti pemilihan varietas yang sesuai dan penerapan teknik konservasi tanah dan air (Nofal *et al.*, 2022). Namun demikian, sebagian besar studi tersebut masih terbatas pada aspek kesesuaian lahan potensial dan belum secara komprehensif mengintegrasikan faktor pembatas aktual penggunaan lahan, seperti status kawasan hutan, perizinan usaha pertambangan, serta dinamika penggunaan lahan eksisting.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis ketersediaan lahan potensial untuk budidaya jagung secara spasial di bagian utara Provinsi Bengkulu yang meliputi Kabupaten Muko-Muko, Bengkulu Utara, dan Bengkulu Tengah. Pemilihan ketiga wilayah ini didasarkan pada pertimbangan bahwa kawasan tersebut merupakan sentra pengembangan pertanian di bagian utara Provinsi Bengkulu yang masih memiliki ketersediaan lahan relatif luas, didominasi oleh lahan kering potensial, serta menghadapi tekanan konversi lahan yang cukup signifikan. Selain itu, ketiga kabupaten ini juga menunjukkan variasi kondisi biofisik dan penggunaan lahan yang representatif, sehingga dapat menggambarkan dinamika ketersediaan lahan untuk pengembangan jagung di wilayah utara Bengkulu secara lebih komprehensif.

## 2. Bahan dan Metode

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Mei hingga Agustus 2025 di Kabupaten Muko-muko, Bengkulu Utara, dan Bengkulu Tengah, Provinsi Bengkulu, dengan luas wilayah total sebesar 976.951,72 ha. Penelitian ini menggunakan pendekatan kombinasi antara analisis spasial berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG) dan survei lapangan untuk memperoleh data yang lengkap mengenai ketersediaan lahan potensial untuk budidaya jagung.

Pada tahap awal, penelitian dimulai dengan pengumpulan data sekunder, meliputi peta administrasi, kemiringan lereng, status kawasan, izin usaha pertambangan, peta jenis tanah, dan

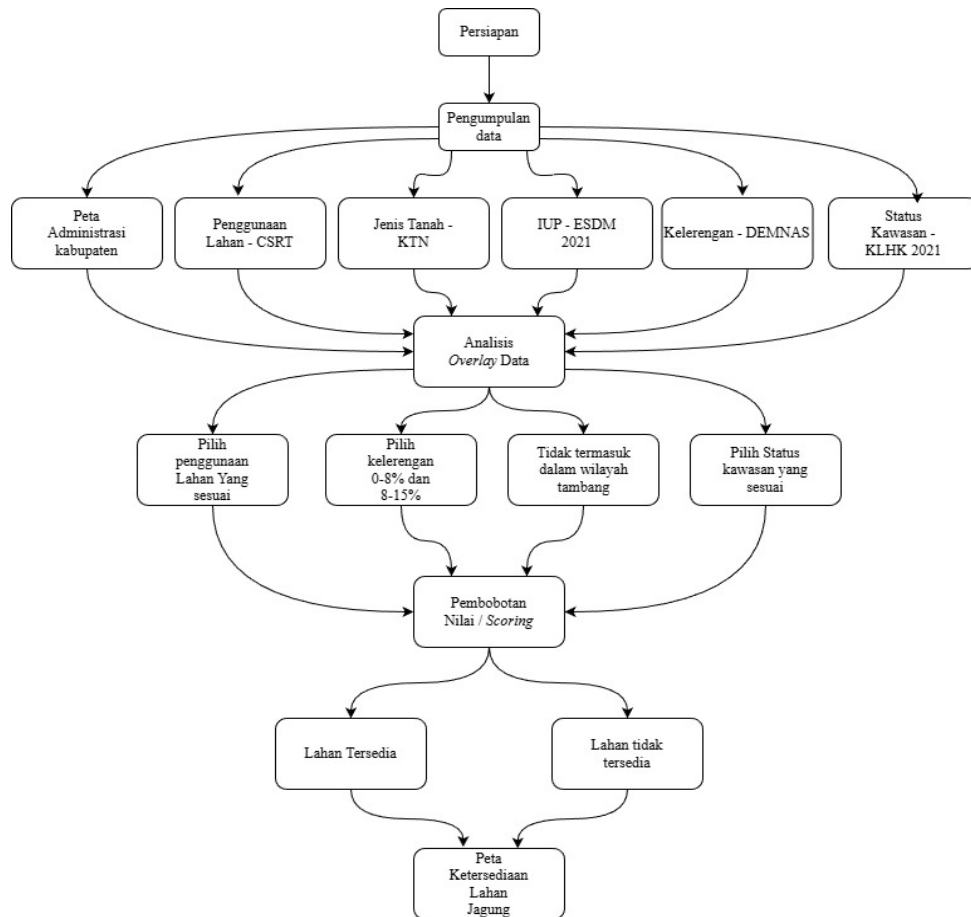
data curah hujan. Seluruh data spasial kemudian diselaraskan koordinatnya menggunakan sistem WGS 1984 Zona 48S dan dipotong sesuai batas administratif wilayah penelitian. Data ini selanjutnya dianalisis melalui overlay dan intersect untuk mengidentifikasi lahan yang memenuhi kriteria teknis budidaya jagung, yaitu kemiringan lereng 0–8% dan 8–15%, tutupan lahan berupa semak belukar, lahan terbuka, atau kebun campur, serta tidak termasuk dalam kawasan hutan atau izin usaha pertambangan. Lahan dinyatakan tersedia dan berpotensi apabila memiliki luas minimum >5 ha, karena luasan tersebut dianggap cukup untuk penerapan teknologi pertanian secara efisien, memudahkan manajemen budidaya, dan memungkinkan penggunaan mekanisasi pertanian yang optimal sehingga produktivitas jagung dapat ditingkatkan secara signifikan.

Untuk data primer, penelitian dilakukan melalui survei lapangan dengan pengamatan langsung pada lahan yang telah dianalisis melalui data sekunder. Parameter yang diamati meliputi drainase, tekstur tanah, kandungan bahan kasar, kedalaman tanah, dan keberadaan batuan permukaan. Selain itu, sampel tanah diambil untuk analisis laboratorium guna menentukan pH tanah. Titik sampling ditentukan berdasarkan integrasi hasil peta ketersediaan lahan dan peta jenis tanah, kemudian dilakukan ground check untuk memastikan keakuratan data hasil analisis spasial.

Tabel 1. Kesesuaian lahan untuk tanaman jagung

Persyaratan Penggunaan	S1 (Sangat Sesuai)	S2 (Cukup Sesuai)	S3 (Sesuai Marginal)	N (Tidak Sesuai)
<b>Curah hujan (mm/tahun)</b>	900–1200	1200–1600 / 500–900	>1600 / 300–500	<300
<b>Media perakaran (rc)</b>				
Drainase	baik, sedang	agak cepat, agak terhambat	terhambat	sangat terhambat, cepat Kasar
Tekstur	Halus, agak halus, sedang	Halus–sedang	Agak kasar	Kasar
Bahan kasar (%)	<15	15–35	35–55	>55
Kedalaman tanah (cm)	>60	40–60	25–40	<25
<b>Retensi hara (nr)</b>				
pH H <sub>2</sub> O	5,8–7,8	5,5–5,8 / 7,8–8,2	<5,5 / >8,2	-
<b>Bahaya erosi (eh)</b>				
Lereng (%)	<3	3–8	8–15	>15
Tingkat bahaya erosi	-	Sangat ringan	Ringan–sedang	Berat–sangat berat
Batuan permukaan (%)	<5	5–15	15–40	>40

Dalam analisis data, seluruh data yang dikumpulkan diolah menggunakan perangkat lunak seperti ArcGIS 10.8, SAS Planet, Avenza Map, GPS Maps Camera, dan Microsoft Excel. Evaluasi kesesuaian lahan untuk budidaya jagung dilakukan dengan metode pencocokan (*matching*), sehingga lahan dapat diklasifikasikan ke dalam empat kelas kesesuaian, yaitu S1 (sangat sesuai), S2 (cukup sesuai), S3 (sesuai marginal), dan N (tidak sesuai) (Tabel 1). Penentuan kelas kesesuaian lahan ini mengacu pada kriteria evaluasi lahan menurut FAO (*Food and Agriculture Organization*) serta literatur terkait yang relevan dengan persyaratan tumbuh tanaman jagung. Diagram alir penelitian disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Pembatas Teknis dan Legalitas dalam ketersediaan lahan program cetak lahan jagung

Tutupan lahan yang berpotensi dijadikan lahan jagung pada wilayah penelitian awalnya meliputi lahan terbuka dan semak belukar dengan luasan yang relatif besar, namun setelah dilakukan analisis spasial menggunakan metode *overlay* dan *intersect* dengan mempertimbangkan kemiringan lereng, status kawasan, izin usaha pertambangan (IUP), serta batas minimal luas hamparan  $>5$  ha, luas tersebut menyusut signifikan menjadi 2.471,36 ha (Tabel 2). Perbedaan ini menunjukkan bahwa potensi lahan berbasis tutupan lahan cenderung menghasilkan estimasi yang lebih luas dibandingkan potensi aktual yang telah melalui penyaringan biofisik dan legal, sejalan dengan temuan Tashayo *et al.* (2020) yang menegaskan bahwa pendekatan multi-kriteria spasial menghasilkan luasan yang lebih realistis. Namun, penyusutan yang lebih besar pada penelitian ini mengindikasikan adanya pengaruh kuat dari pembatas tambahan seperti status kawasan dan IUP, serta kondisi topografi yang kurang sesuai untuk budidaya jagung, sehingga perbedaan hasil antar studi tidak hanya disebabkan oleh metode analisis tetapi juga karakteristik wilayah.

Tabel 2. Tutupan lahan pada di Provinsi Bengkulu bagian Utara

Tutupan Lahan Eksisting	Luas	
	Ha	%
Badan Air	7.145,74	0,73%
Pepohonan/Hutan	893019,25	91,41%
Vegetasi Tergenang/Rawa	238,14	0,02%
Lahan Pertanian	13.959,31	1,43%
Area Terbangun	16.907,84	1,73%
Lahan Terbuka	191,85	0,02%
Semak Belukar	45.489,58	4,66%
Total	976.951,72	100%

Hasil penelitian menunjukkan bahwa wilayah penelitian seluas 976.951,72 ha didominasi oleh area penggunaan lain sebesar 54,60%, diikuti oleh kawasan konservasi (24,60%), hutan produksi terbatas (11,33%), hutan lindung (6,12%), hutan produksi tetap (2,23%), dan hutan produksi yang dapat dikonversi (1,13%) (Tabel 3). Komposisi ini mengindikasikan bahwa secara komparatif, ketersediaan lahan untuk pengembangan jagung tidak hanya ditentukan oleh luas wilayah, tetapi lebih dipengaruhi oleh distribusi status kawasan yang sebagian besar membatasi aktivitas budidaya. Temuan ini sejalan dengan Mulyani *et al.* (2023). yang menegaskan pentingnya aspek legalitas dalam menentukan ketersediaan lahan, namun pada penelitian ini proporsi kawasan terbatas relatif lebih besar sehingga ruang pengembangan menjadi lebih sempit dibandingkan studi tersebut. Perbedaan ini diduga disebabkan oleh tingginya dominasi kawasan konservasi dan hutan lindung di wilayah penelitian, yang secara regulatif tidak dapat dikonversi, sehingga hanya sebagian kecil lahan, terutama pada hutan produksi yang dapat dikonversi, yang berpotensi dimanfaatkan. Hal ini menunjukkan bahwa perbedaan hasil antar penelitian tidak hanya bergantung pada pendekatan analisis, tetapi juga pada karakteristik kebijakan tata ruang dan distribusi status kawasan di masing-masing wilayah. Oleh karena itu, integrasi status kawasan dengan parameter teknis lain seperti kemiringan lereng, tutupan lahan, dan luas hamparan menjadi krusial untuk menghindari overestimasi lahan potensial, sehingga perencanaan pengembangan jagung dapat dilakukan secara lebih akurat, legal, dan berkelanjutan (Sperandio *et al.*, 2025).

Tabel 3. Status Kawasan di Provinsi Bengkulu bagian Utara

Status Kawasan	Luas	
	Ha	%
Area Penggunaan Lain	533.386,52	54,60%
Hutan Lindung	59.796,52	6,12%
Hutan Produksi Terbatas	110.667,44	11,33%
Hutan Produksi Tetap	21.760,10	2,23%
Hutan Produksi yang dapat di Konversi	11.023,22	1,13%
Kawasan Konservasi	24.0317,93	24,60%
Total	976.951,72	100%

Sumber: KLHK, 2021

Sebagian besar wilayah penelitian tidak memiliki izin usaha pertambangan (Non IUP), yaitu seluas 937.010,93 ha atau sekitar 95,91% dari total luas wilayah. Sebaliknya, lahan yang berada

dalam Izin Usaha Pertambangan (IUP) hanya seluas 39.940,79 ha atau sekitar 4,09% dari total wilayah penelitian (Tabel 4). Keberadaan lahan IUP tetap menjadi kendala dalam perencanaan cetak lahan jagung. Meskipun hanya menempati sebagian kecil wilayah, lahan ini tidak dapat dimanfaatkan untuk budidaya jagung karena terkait regulasi dan aktivitas pertambangan yang sedang berjalan. Kondisi ini menekankan pentingnya integrasi data IUP dengan parameter spasial lainnya, seperti tutupan lahan, kemiringan, status kawasan, dan luas hamparan, untuk menentukan lahan yang benar-benar potensial untuk jagung. Pendekatan ini memastikan bahwa pengembangan lahan dilakukan secara efisien, legal, dan berkelanjutan, serta meminimalkan potensi konflik penggunaan lahan (Werner *et al.*, 2024).

Tabel 4. IUP di Provinsi Bengkulu bagian Utara

IUP dan Non IUP	Luas	
	Ha	%
IUP	39940,79	4,09%
Non IUP	937.010,93	95,91%
Total	976.951,72	100%

Distribusi kelerengan lahan di Provinsi Bengkulu bagian utara menunjukkan bahwa sebagian besar wilayah penelitian memiliki kemiringan yang relatif rendah. Lahan dengan kategori datar menempati 541.062,09 ha atau 55,38% dari total luas wilayah, sedangkan lahan landai seluas 259.640,23 ha (26,58%). Lahan dengan kemiringan lebih curam, yaitu agak curam seluas 116.688,47 ha (11,94%), curam 41.592,74 ha (4,26%), dan sangat curam 17.968,18 ha (1,84%) (Tabel 5). Hasil ini menunjukkan bahwa sebagian besar lahan memiliki kemiringan yang sesuai untuk kegiatan pertanian, khususnya budidaya jagung, yang ideal pada lereng 0–15%. Namun, keberadaan lahan dengan kemiringan lebih curam tetap menjadi faktor pembatas dalam pemanfaatan lahan untuk cetak lahan jagung. Lereng yang tinggi meningkatkan risiko erosi, kesulitan mekanisasi, dan pengelolaan air yang lebih kompleks, sehingga lahan ini dikategorikan kurang sesuai atau marginal untuk budidaya jagung (Du *et al.*, 2022; Wezel *et al.*, 2002). Oleh karena itu, kelerengan menjadi salah satu parameter teknis utama dalam analisis kesesuaian lahan, yang harus dikombinasikan dengan status kawasan, tutupan lahan, IUP, dan luas hamparan untuk menentukan lahan potensial yang benar-benar layak untuk dikembangkan (Li *et al.*, 2025).

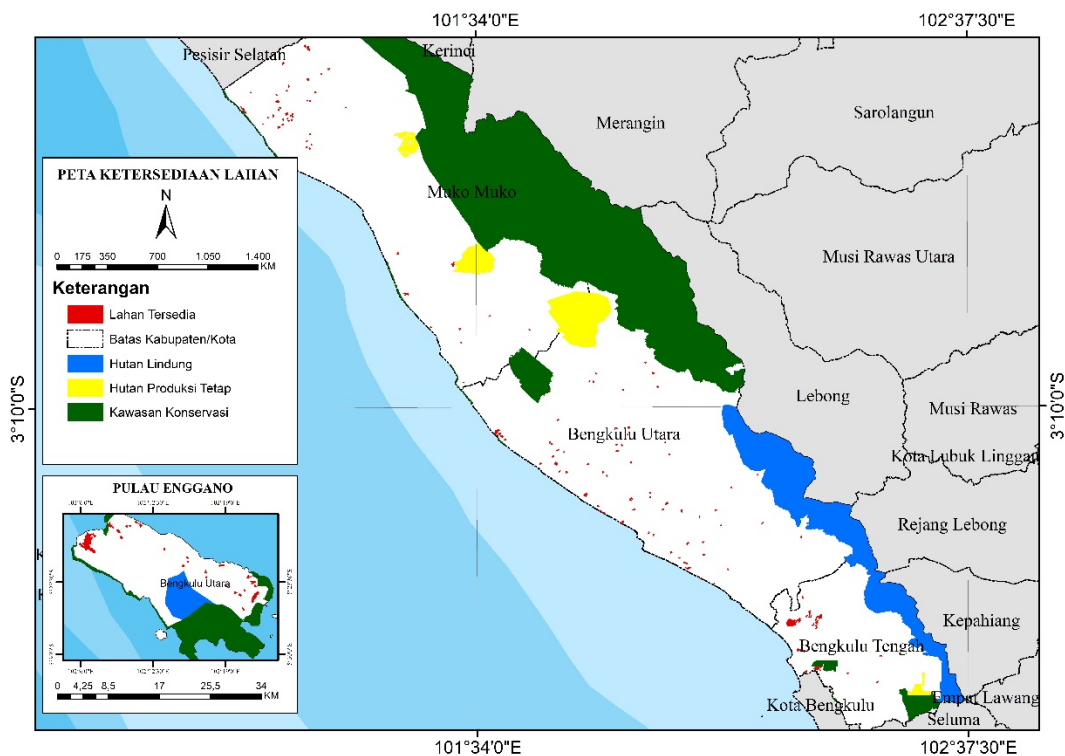
Tabel 5. Kelerengan di Provinsi Bengkulu bagian Utara

Kemiringan Lereng	Luas	
	Ha	%
Datar	541.062,09	55,38%
Landai	259.640,23	26,58%
Agak Curam	116.688,47	11,94%
Curam	41.592,74	4,26%
Sangat Curam	17.968,18	1,84%
Total	976.951,72	100%

Sumber: DEMNAS, 2018

### 3.2 Ketersediaan lahan untuk program cetak lahan jagung

Hasil analisis spasial menunjukkan bahwa ketersediaan lahan yang memenuhi syarat legalitas untuk pelaksanaan program cetak lahan jagung di Provinsi Bengkulu bagian utara yang meliputi Kabupaten Muko-muko, Bengkulu Utara, dan Bengkulu Tengah tergolong sangat rendah. Dari total luas wilayah penelitian sebesar 976.951,72 ha, hanya 2.471,36 ha atau sekitar 0,25% yang memenuhi kriteria teknis dan legalitas untuk budidaya jagung ([Gambar 2](#)). Temuan ini menegaskan bahwa tingkat ketersediaan lahan potensial pada wilayah penelitian berada pada kategori yang sangat rendah, sehingga perlu strategi pengelolaan dan perencanaan yang hati-hati untuk pengembangan pertanian jagung ([Moisa et al., 2022](#)).



Gambar 2. Peta sebaran ketersediaan lahan untuk program cetak lahan jagung.

Rendahnya ketersediaan lahan ini dipengaruhi oleh beberapa faktor utama. Legalitas dan tumpang tindih penggunaan ruang menjadi kendala signifikan, termasuk kawasan hutan lindung, izin usaha pertambangan, dan status kepemilikan lahan yang tidak jelas, sehingga lahan tidak dapat dimanfaatkan untuk kegiatan pertanian ([Nugroho et al., 2025](#)). Selanjutnya tingginya tingkat kemiringan lahan pada sebagian besar wilayah, yang tidak sesuai dengan kriteria teknis cetak lahan jagung (0–15%), membatasi potensi lahan untuk pertanian mekanis dan meningkatkan risiko erosi ([Lu et al., 2025](#)). Persyaratan luas minimal hamparan lahan >5 ha juga menjadi pembatas, karena banyak lahan yang potensial namun tersebar dalam ukuran kecil sehingga tidak memenuhi kriteria efisiensi operasional untuk budidaya jagung ([Hao et al., 2025](#)).

### 3.3 Kesesuaian Lahan Aktual untuk jagung

Berdasarkan data [Tabel 6](#), karakteristik lahan di Kabupaten Muko-muko, Bengkulu Utara, dan Bengkulu Tengah bervariasi sesuai dengan jenis tanah yang ada, yaitu Ultisols, Alfisols, Inceptisols, dan Oxisols. Curah hujan di seluruh wilayah relatif seragam, yaitu 1.400 mm per tahun, sehingga kondisi kelembapan tidak menjadi pembatas utama bagi pertumbuhan jagung. Dari segi media perakaran, drainase tanah bervariasi; Ultisols tergolong agak terhambat, Alfisols dan Inceptisols sedang, sedangkan Oxisols memiliki drainase cepat. Tekstur tanah sebagian besar berupa sedang hingga halus, dengan kandungan bahan kasar 0–3%, dan kedalaman efektif tanah berkisar antara 76–101 cm. Nilai pH tanah menunjukkan kondisi asam hingga sedikit asam (pH 4,9–5,6), yang masih memungkinkan untuk budidaya jagung dengan pengelolaan tanah yang tepat. Persentase batuan di permukaan rendah (0–2%), sehingga tidak menjadi kendala besar dalam pengolahan lahan.

Tabel 6. Karakteristik Lahan pada berbagai Jenis Tanah di Provinsi Bengkulu bagian utara.

Karakteristik Lahan	Jenis Tanah			
	Ultisols	Alfisols	Inceptisol	Oxisols
<b>Curah hujan (mm)</b>	1.400mm	1.400mm	1.400mm	1.400mm
<b>Media Perakaran (rc)</b>				
Drainase	Agak terhambat	Sedang	Sedang	Cepat
Tekstur	Halus	Sedang	Sedang	Sedang
Bahan kasar (%)	0%	3%	2%	3%
Kedalaman tanah (cm)	76	101	76	76
<b>Retensi hara (nr)</b>				
pH H <sub>2</sub> O	5,2	5,6	5,5	4,9
<b>Bahaya erosi (eh)</b>				
Lereng (%)	0-8%	0-8%	0-8%	0-8%
<b>Penyiapan lahan (lp)</b>				
Batuan di permukaan (%)	0%	2%	1%	0%

Variasi karakteristik tanah ini menjadi faktor penting dalam menentukan kesesuaian lahan untuk budidaya jagung. Drainase yang agak terhambat pada Ultisols dapat menghambat pertumbuhan akar dan meningkatkan risiko genangan, sehingga diperlukan pengelolaan air yang lebih intensif ([Wang et al., 2015](#)). Tanah dengan pH rendah seperti Oxisols memerlukan amendemen tanah untuk meningkatkan ketersediaan hara. Kedalaman tanah dan kandungan bahan kasar juga memengaruhi kemudahan pengolahan dan penetrasi akar, sehingga perlu diperhatikan dalam perencanaan budidaya jagung. Dengan demikian, karakteristik fisik dan kimia tanah menjadi parameter penting dalam analisis kesesuaian lahan, karena lahan yang tersedia secara fisik belum tentu optimal tanpa pengelolaan yang tepat ([Huang & Hue, 2022](#); [Silahooy, 2024](#)).

Berdasarkan data [Tabel 7](#), kesesuaian lahan aktual untuk budidaya jagung di Kabupaten Muko-muko, Bengkulu Utara, dan Bengkulu Tengah menunjukkan bahwa sebagian besar parameter lahan berada pada kelas S1 (sangat sesuai) hingga S3 (sesuai marginal), tergantung jenis

tanah. Secara umum, curah hujan di seluruh jenis tanah dikategorikan S2, menunjukkan bahwa curah hujan cukup untuk mendukung pertumbuhan jagung. Untuk media perakaran, drainase tanah memiliki variasi; Ultisols berada pada kelas S1, Alfisols dan Inceptisols S2, sedangkan Oxisols S3. Tekstur tanah dan kandungan bahan kasar di seluruh jenis tanah menunjukkan kelas S1, menandakan bahwa lahan secara fisik ideal untuk penetrasi akar dan pengolahan lahan. Kedalaman tanah berada pada kelas S1 pada semua jenis tanah. Nilai pH tanah sebagian besar berada pada kelas S1, kecuali Oxisols yang masuk S3. Kedalam tanah dan bahaya erosi (lereng) dan batuan di permukaan menunjukkan kelas S1 pada semua jenis tanah. Secara keseluruhan, kesesuaian lahan aktual berada pada kelas S2 sampai S3 dengan catatan teknis tertentu, seperti drainase, retensi hara, dan amendemen tanah (S2 tc, S2 tc rc, S3 tc oa nr) (Tabel 7).

Tabel 7. Kesesuaian Lahan Aktual Jagung (*Zea mays*).

Karakteristik Lahan	Jenis Tanah			
	Ultisols	Alfisols	Inceptisol	Oxisols
<b>Curah hujan (mm)</b>	S2	S2	S2	S2
<b>Media Perakaran (rc)</b>				
Drainase	S1	S2	S2	S3
Tekstur	S1	S1	S1	S1
Bahan kasar (%)	S1	S1	S1	S1
Kedalaman tanah (cm)	S1	S1	S1	S1
<b>Retensi hara (nr)</b>				
pH H <sub>2</sub> O	S1	S1	S1	S3
<b>Bahaya erosi (eh)</b>				
Lereng (%)	S1	S1	S1	S1
<b>Penyiapan lahan (lp)</b>				
Batuan di permukaan (%)	S1	S1	S1	S1
<b>Kesesuaian lahan</b>	S2 tc	S2 tc rc	S2 tc	S3 tc oa nr

Variasi kelas kesesuaian ini menunjukkan bahwa meskipun sebagian lahan fisik tersedia, parameter teknis seperti drainase, kedalaman tanah, pH, dan retensi hara dapat membatasi produktivitas optimal jagung. Ultisols cenderung memiliki drainase baik dan kesesuaian lahan lebih tinggi, sementara Oxisols memerlukan pengelolaan tambahan untuk memperbaiki pH dan retensi hara agar sesuai optimal. Alfisols, dengan kedalaman tanah lebih dangkal, masuk dalam kategori S3 untuk beberapa parameter, sehingga memerlukan penyesuaian dalam praktik budidaya. Hasil ini menegaskan pentingnya analisis kesesuaian lahan aktual yang mengintegrasikan karakteristik fisik dan kimia tanah, tutupan lahan, kelerengan, dan faktor lingkungan lainnya untuk memastikan pengembangan jagung yang efektif dan berkelanjutan (Ali *et al.*, 2021; Feng *et al.*, 2022; Ma *et al.*, 2025; Prates *et al.*, 2022).

### 3.4 Faktor Pembatas Utama dan Strategi Pengelolaan

Berdasarkan Tabel 8, terdapat beberapa faktor pembatas utama yang menghambat pemanfaatan lahan untuk budidaya jagung di Kabupaten Muko-muko, Bengkulu Utara, dan Bengkulu Tengah. Curah hujan sebesar 1.400 mm/tahun meningkatkan kelembaban lingkungan

dan insidensi penyakit jamur, sehingga diperlukan penyesuaian waktu tanam dan pemilihan varietas jagung yang toleran terhadap kelembaban tinggi (Czarnecka *et al.*, 2022). Selain itu diperlukan pengelolaan tanah untuk menjaga kelembaban yang meliputi pengolahan tanah dalam (*subsoiling*) dan aplikasi bahan organik untuk memperbaiki struktur tanah (Sun *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2025).

Selain itu, drainase yang cepat pada Oxisols menurunkan retensi air dan efisiensi penggunaan air oleh tanaman jagung. Upaya mitigasinya meliputi peningkatan kandungan bahan organik tanah dan penerapan irigasi hemat air untuk mendukung ketersediaan air secara optimal. Keempat, pH tanah yang rendah (4,9 pada Oxisols) menyebabkan keracunan aluminium dan fiksasi fosfor yang tidak tersedia bagi tanaman. Strategi pengelolaannya antara lain aplikasi kapur pertanian dan penggunaan pupuk hayati pelarut fosfat untuk memperbaiki ketersediaan hara (Fang & Su, 2019).

Tabel 8. Faktor Pembatas Utama yang Menghambat Lahan Jagung.

Faktor Pembatas	Dampak Utama	Rekomendasi Pengelolaan
Curah Hujan (tc) (1.400 mm/tahun)	Meningkatkan kelembaban dan insidensi penyakit jamur	Penyesuaian waktu tanam dan pemilihan varietas toleran kelembaban tinggi
Drainase (oa) (Cepat pada Oxisols)	Rendahnya retensi air dan efisiensi penggunaan air	Peningkatan bahan organik tanah dan penerapan irigasi hemat air
pH Tanah (nr) (4.9 pada Oxisols)	Keracunan aluminium dan fiksasi fosfor yang tidak tersedia bagi tanaman	Aplikasi kapur pertanian dan penggunaan pupuk hayati pelarut fosfat

### 3.5 Implikasi Kebijakan dan Strategi Alternatif

Hasil analisis spasial dan karakterisasi lahan menunjukkan bahwa ketersediaan lahan untuk budidaya jagung di Kabupaten Muko-Muko, Bengkulu Utara, dan Bengkulu Tengah sangat terbatas, terutama jika ditinjau dari ketersediaan lahan aktual. Meskipun secara tentatif (potensial biofisik) sebagian wilayah memiliki tingkat kesesuaian lahan pada kelas S1 hingga S3, integrasi dengan faktor pembatas aktual seperti status kawasan, izin usaha pertambangan (IUP), serta penggunaan lahan eksisting menunjukkan bahwa hanya sekitar 0,25% dari total wilayah yang benar-benar tersedia untuk pengembangan jagung. Perbedaan antara potensi lahan tentatif dan ketersediaan lahan aktual ini menunjukkan bahwa perumusan kebijakan tidak dapat hanya didasarkan pada kesesuaian biofisik, tetapi harus mempertimbangkan aspek legalitas dan penggunaan lahan secara komprehensif. Oleh karena itu, pemerintah daerah perlu menetapkan prioritas pengembangan lahan berbasis integrasi data spasial untuk menghindari konflik pemanfaatan ruang dan mendukung praktik pertanian berkelanjutan (Morán-Alonso *et al.*, 2025).

Strategi pengembangan jagung di wilayah penelitian perlu disusun secara adaptif dengan mengacu pada kondisi lahan aktual yang tersedia. Pada lahan yang secara biofisik sesuai namun

memiliki keterbatasan teknis (kelas S2–S3), upaya perbaikan lahan dapat dilakukan melalui penerapan teknologi konservasi tanah dan air, seperti terasering, subsoiling, serta peningkatan kandungan bahan organik untuk memperbaiki struktur tanah, drainase, dan retensi hara. Pendekatan ini terbukti mampu meningkatkan produktivitas lahan marginal jika dikelola secara tepat (Gao *et al.*, 2024). Selain itu, pemilihan varietas jagung yang adaptif terhadap kondisi tanah masam, kelembaban tinggi, dan curah hujan tinggi menjadi strategi penting untuk mengoptimalkan hasil pada lahan dengan keterbatasan biofisik. Penerapan irigasi hemat air serta penggunaan pupuk hayati juga dapat menjadi solusi untuk meningkatkan efisiensi penggunaan air dan ketersediaan hara tanaman (Tandzi *et al.*, 2018).

Lebih lanjut, pada wilayah yang secara potensial sesuai namun tidak tersedia secara aktual akibat pembatas legal atau penggunaan lahan, diperlukan strategi alternatif berupa optimalisasi lahan eksisting melalui intensifikasi pertanian, serta diversifikasi komoditas yang lebih sesuai dengan kondisi lahan. Pemerintah daerah dapat menetapkan zonasi prioritas pengembangan jagung berbasis hasil analisis spasial untuk memastikan intervensi kebijakan lebih terarah dan efektif. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan efisiensi pemanfaatan lahan, tetapi juga berkontribusi terhadap ketahanan pangan regional dan keberlanjutan lingkungan (Kazemi & Hosseinpour, 2022).

#### 4. Kesimpulan

Ketersediaan lahan potensial untuk pengembangan jagung di Kabupaten Muko-Muko, Bengkulu Utara, dan Bengkulu Tengah secara spasial relatif terbatas, yaitu sebesar 2.471,36 ha dan didominasi oleh kelas kesesuaian S2 (sesuai marginal). Hal ini menegaskan bahwa meskipun secara biofisik sebagian parameter seperti tekstur tanah, kedalaman efektif, media perakaran, dan kemiringan lereng tergolong sesuai (S1), keberadaan faktor pembatas utama seperti curah hujan, serta faktor spesifik lainnya seperti drainase pada Alfisols dan retensi hara serta ketersediaan oksigen pada Oxisols, secara signifikan menurunkan tingkat kesesuaian lahan. Selain itu, hasil analisis spasial berbasis overlay berbobot dan matching menunjukkan bahwa integrasi berbagai parameter teknis dan legal mampu menghasilkan identifikasi lahan yang lebih akurat dibandingkan pendekatan tunggal. Sebaran lahan potensial yang umumnya berada pada wilayah dengan topografi landai juga menunjukkan pentingnya aspek geomorfologi dalam penentuan lokasi prioritas. Dengan demikian, peningkatan produktivitas jagung di wilayah penelitian sangat bergantung pada upaya perbaikan pengelolaan air dan peningkatan kesuburan tanah, sehingga dapat mendorong peningkatan kelas kesesuaian lahan menuju kondisi yang lebih optimal dan berkelanjutan.

### Singkatan yang Digunakan

SIG	Sistem Informasi Geografis
IUP	Izin Usaha Pertambangan

### Pernyataan Ketersediaan Data

Data akan tersedia berdasarkan permintaan.

### Kontribusi Para Penulis

**Thoriq Taqiyyuddin:** Konseptualisasi, Kurasi data, Analisis formal, Investigasi, Metodologi, Perangkat lunak, Validasi, Visualisasi, Penulisan - draf awal, Penulisan - tinjauan dan penyuntingan. **Bambang Sulistyio:** Konseptualisasi, Perolehan dana, Administrasi proyek, Sumber daya, Pengawasan, Penulisan - tinjauan dan penyuntingan. **Priyono Prawito:** Metodologi, Analisis formal, Validasi, Penulisan - tinjauan dan penyuntingan

### Pernyataan Konflik Kepentingan

Para penulis naskah ini menyatakan tidak ada konflik kepentingan atau kepentingan yang bersaing.

### Ucapan Terima Kasih

-

### Daftar Pustaka

- Ahmad, S. W., Mardiyah, S. I., & Wiwoho, B. S. (2025). Evaluasi kesesuaian lahan Provinsi Jawa Timur dalam upaya peningkatan produktivitas komoditas sayuran (studi kasus: kentang). *Jurnal Tanah Dan Sumberdaya Lahan*, 12(1), 21–32. <https://doi.org/10.21776/ub.jtsl.2025.012.1.3>
- Ali, A., Usman, A., & Adejo, B. (2021). Suitability Assessment of Soils of Selected Areas of Benue State, Nigeria, for Maize Production and their Management Implications. *Journal of Current Opinion in Crop Science*, 2(1), 110–117. <https://doi.org/10.62773/jcocs.v2i1.43>
- Ansar, A., Murad, M., Putra, G. M. D., & Hartuti, H. (2020). Pemetaan lahan pertanian di Kabupaten Lombok Timur menggunakan sistem informasi geografis (SIG). *Jurnal Teknik Pertanian Lampung (Journal of Agricultural Engineering)*, 9(2), 140–152. <https://doi.org/10.23960/jtep-1.v9i2.140-148>
- Czarnecka, D., Czubačka, A., Agacka-Mołodoch, M., Trojak-Goluch, A., & Księżak, J. (2022). The Occurrence of Fungal Diseases in Maize in Organic Farming Versus an Integrated Management System. *Agronomy*, 12(3), 558. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030558>
- Du, G., Guo, T., & Ma, C. (2022). Effects of Topographic Factors on Cultivated-Land Ridge Orientation in the Black Soil Region of Songnen Plain. *Land*, 11(9), 1489. <https://doi.org/10.3390/land11091489>
- Fang, J., & Su, Y. (2019). Effects of Soils and Irrigation Volume on Maize Yield, Irrigation Water Productivity, and Nitrogen Uptake. *Scientific Reports*, 9(1), 7740. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41447-z>
- Feng, P., Wang, B., Harrison, M. T., Wang, J., Liu, K., Huang, M., ..., & Hu, K. (2022). Soil properties resulting in superior maize yields upon climate warming. *Agronomy for Sustainable Development*, 42(5), 85. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00818-z>
- Gao, P. J., Abbas, H., Li, F. Q., Tang, G. R., Lv, J. Z., & Zhou, X. B. (2024). Effect of planting methods and tillage practices on soil health and maize productivity. *Frontiers in Plant Science*, 15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1436011>

- Hao, W., Hu, X., Wu, G., Zhang, Z., Cai, M., Zhou, H., & Liu, X. (2025). The impact of plot size and farm size on crop production: Evidence from mechanization and labor input perspectives. *Energy Nexus*, 19, 100530. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2025.100530>
- Huang, R., & Hue, N. (2022). In Transition towards Organic Farming: Effects of Rock Phosphate, Coral Lime, and Green Manure on Soil Fertility of an Acid Oxisol and the Growth of Soybean (*Glycine max* L. Merr.) Seedlings. *Agriculture*, 12(12), 2045. <https://doi.org/10.3390/agriculture12122045>
- Kazemi, F., & Hosseinpour, N. (2022). GIS-based land-use suitability analysis for urban agriculture development based on pollution distributions. *Land Use Policy*, 123, 106426. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106426>
- Li, S., Zhang, H., Chi, Q., Zhao, B., & Wang, P. (2025). Suitability Analysis of Crops for Sloping Farmland in Arid Sandy Regions with Traditional Farming Methods. *Agronomy*, 15(5), 1150. <https://doi.org/10.3390/agronomy15051150>
- Lu, L., Liu, X., Wang, K., Song, Y., Li, Z., Zhang, G., & Zhao, Y. (2025). Effects of contour reverse-slope terraces on maize growth and soil microbial community in Yunnan sloping farmland. *Plant and Soil*, 514(2), 2759–2778. <https://doi.org/10.1007/s11104-025-07545-w>
- Ma, X., Zhao, Y., Zheng, Y., Wang, L., Zhang, Y., Sun, Y., ..., & Sun, N. (2025). Effect of Different Fertilization on Soil Fertility, Biological Activity, and Maize Yield in the Albic Soil Area of China. *Plants*, 14(5), 810. <https://doi.org/10.3390/plants14050810>
- Mendrofa, J. S., Zentrato, M. W., Halawa, N., Zalukhu, E. E., & Lase, N. K. (2024). Peran Teknologi dalam Meningkatkan Efisiensi Pertanian. *Tumbuhan: Publikasi Ilmu Sosiologi Pertanian Dan Ilmu Kehutanan*, 1(3), 01–12. <https://doi.org/10.62951/tumbuhan.v1i3.111>
- Moisa, M. B., Tiye, F. S., Dejene, I. N., & Gemed, D. O. (2022). Land suitability analysis for maize production using geospatial technologies in the Didessa watershed, Ethiopia. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 6, 34–46. <https://doi.org/10.1016/j.aaia.2022.02.001>
- Morán-Alonso, N., Viedma-Guiard, A., Simón-Rojo, M., & Córdoba-Hernández, R. (2025). Agricultural Land Suitability Analysis for Land Use Planning: The Case of the Madrid Region. *Land*, 14(1), 134. <https://doi.org/10.3390/land14010134>
- Mulyani, A., Mulyanto, B., Barus, B., Panuju, D. R., & Husnain. (2023). Potential Land Reserves for Agriculture in Indonesia: Suitability and Legal Aspect Supporting Food Sufficiency. *Land*, 12(5), 970. <https://doi.org/10.3390/land12050970>
- Muryono, S., & Utami, W. (2020). Pemetaan potensi lahan pertanian pangan berkelanjutan guna mendukung ketahanan pangan. *BHUMI: Jurnal Agraria Dan Pertanahan*, 6(2), 201–218. <https://jurnalbhumi.stpn.ac.id/index.php/JB/article/view/431>
- Nofal, M., Mukhtar, Z., Sudjatmiko, S., Yuwana, & Chozin, M. (2022). Aplikasi Sistem Informasi Geografis (SIG) untuk Menganalisis Kemampuan Lahan di Kabupaten Musi Rawas Provinsi Sumatera Selatan. *NATURALIS-Jurnal Penelitian Pengelolaan Sumberdaya Alam Dan Lingkungan*, 11(2), 199–207. <https://doi.org/10.31186/naturalis.11.2.24175>
- Nugroho, A. P., Sunito, M. A., & Kinseng, R. A. (2025). Land Tenure Conflicts in Forest Areas of Muara Gembong, Bekasi Regency. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam Dan Lingkungan (Journal of Natural Resources and Environmental Management)*, 15(3), 448. <https://doi.org/10.29244/jpsl.15.3.448>
- Nurpita, A., Wihastuti, L., & Andjani, I. Y. (2018). Dampak Alih Fungsi Lahan Terhadap Ketahanan Pangan Rumah Tangga Tani di Kecamatan Temon Kabupaten Kulon Progo. *Jurnal Gama Societa*, 1(1), 103. <https://doi.org/10.22146/jgs.34055>
- Prates, A. R., Kawakami, K. C., Coscione, A. R., Filho, M. C. M. T., Arf, O., Abreu-Junior, C. H., ..., & Nogueira, T. A. R. (2022). Composted Sewage Sludge Sustains High Maize Productivity on an Infertile Oxisol in the Brazilian Cerrado. *Land*, 11(8), 1246. <https://doi.org/10.3390/land11081246>
- Sari, L. N., Budiyanto, S., & Purbajanti, E. D. (2024). Evaluasi kesesuaian lahan Kecamatan Karangmalang Kabupaten Sragen Jawa Tengah untuk pengembangan tanaman pangan.

- Jurnal Ilmu-Ilmu Pertanian Indonesia*, 26(1), 61–71. <https://doi.org/10.31186/jipi.26.1.61-71>
- Shafiani, F. (2020). Dampak kebijakan peningkatan produksi dan produktivitas jagung terhadap kawasan hutan di Provinsi NTB. *Jurnal Analis Kebijakan*, 4(1), 13–24. <https://scholar.archive.org/work/kxizlp7sgvh6viltgonudp5p5y/access/wayback/http://jak.lan.go.id/index.php/jurnalpusaka/article/download/420/64>
- Silahooy, C. (2024). Effect of Phosphate Fertilization and Liming on Ultisol Soil on Dry Corn Seed Yield (*Zea mays* L.) and Soybeans (*Glycine max* L. (Merr)). *East Asian Journal of Multidisciplinary Research*, 3(9), 4039–4050. <https://doi.org/10.55927/eajmr.v3i9.10294>
- Sishodia, R. P., Ray, R. L., & Singh, S. K. (2020). Applications of Remote Sensing in Precision Agriculture: A Review. *Remote Sensing*, 12(19), 3136. <https://doi.org/10.3390/rs12193136>
- Sperandio, H. V., de Moraes, M. S., de Jesus França, L. C., Mucida, D. P., Santana, R. C., da Silva, R. S., ..., & Gorgens, E. B. (2025). Land suitability modeling integrating geospatial data and artificial intelligence. *Agricultural Systems*, 223, 104197. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2024.104197>
- Subroto, G., & Witjaksono, A. (2022). Prediksi spasial kawasan pertanian berkelanjutan di Provinsi Jawa Timur. *Region: Jurnal Pembangunan Wilayah Dan Perencanaan Partisipatif*, 17(2), 282. <https://doi.org/10.20961/region.v17i2.50966>
- Sun, Q., Sun, W., Zhao, Z., Jiang, W., Zhang, P., Sun, X., & Xue, Q. (2023). Soil Compaction and Maize Root Distribution under Subsoiling Tillage in a Wheat–Maize Double Cropping System. *Agronomy*, 13(2), 394. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020394>
- Tandzi, L. N., Mutengwa, C. S., Ngonkeu, E. L. M., & Gracen, V. (2018). Breeding Maize for Tolerance to Acidic Soils: A Review. *Agronomy*, 8(6), 84. <https://doi.org/10.3390/agronomy8060084>
- Tashayo, B., Honarbakhsh, A., Akbari, M., & Eftekhari, M. (2020). Land suitability assessment for maize farming using a GIS-AHP method for a semi- arid region, Iran. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 19(5), 332–338. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2020.03.003>
- Wahyuni, R. (2025). Implementasi Sistem Informasi Geografis (SIG) untuk Pemetaan dan Pengelolaan Sumber Daya Alam di Kawasan Pertanian. *Journal Of Human and Education (JAHE)*, 5(1), 545–550. <https://doi.org/10.31004/jh.v5i1.2227>
- Wang, X., Zhou, B., Sun, X., Yue, Y., Ma, W., & Zhao, M. (2015). Soil Tillage Management Affects Maize Grain Yield by Regulating Spatial Distribution Coordination of Roots, Soil Moisture and Nitrogen Status. *PLOS ONE*, 10(6), e0129231. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0129231>
- Werner, T. T., Toumbourou, T., Maus, V., Lukas, M. C., Sonter, L. J., Muhdar, M., ..., & Bebbington, A. (2024). Patterns of infringement, risk, and impact driven by coal mining permits in Indonesia. *Ambio*, 53(2), 242–256. <https://doi.org/10.1007/s13280-023-01944-y>
- Wezel, A., Steinmüller, N., & Friederichsen, J. R. (2002). Slope position effects on soil fertility and crop productivity and implications for soil conservation in upland northwest Vietnam. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 91(1–3), 113–126. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00242-0](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00242-0)
- Zhang, X., Lv, Y., Dai, H., Kong, Y., Wang, Y., & Liu, K. (2025). Increasing Topsoil Depth Improves Yield and Nitrogen Fertilizer Use Efficiency in Maize. *Agronomy*, 15(9), 2160. <https://doi.org/10.3390/agronomy15092160>