

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

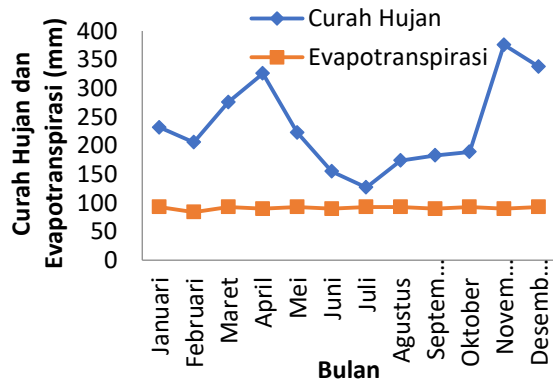
A. Kondisi Umum Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian ini berada di Kecamatan Sungaipua, X Koto dan Canduang, Provinsi Sumatera Barat. Wilayah ini terletak di lereng barat laut Gunung Marapi, yaitu salah satu gunung api aktif yang paling terkenal dan dominan di Pulau Sumatera. Tanah di wilayah penelitian sebagian besar merupakan jenis tanah vulkanik muda, terutama dari ordo Andisol, yang terbentuk dari pelapukan abu vulkanik dan material piroklastik hasil erupsi Gunung Marapi. Tanah ini memiliki ciri fisik dan kimia yang sangat mendukung aktivitas pertanian. Penggunaan lahan di wilayah Sungaipua didominasi oleh sektor pertanian dan perkebunan. Tanaman hortikultura seperti cabe, kentang, kol, daun bawang dan tomat merupakan komoditas utama, yang dibudidayakan di ladang-ladang lereng dan lahan terbuka.

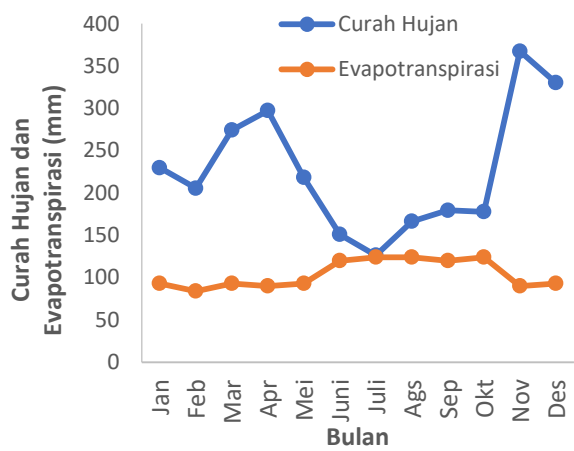
Kondisi tanah di lokasi pengambilan sampel secara umum masih menunjukkan karakteristik tanah vulkanis yang subur, dengan tekstur lempung hingga lempung berpasir, warna coklat gelap hingga hitam, serta struktur remah hingga gumpal. Kandungan bahan organik terbilang tinggi, terutama pada lapisan atas, yang mendukung aktivitas biologis tanah dan pertumbuhan vegetasi. Namun, meskipun secara visual tidak tampak adanya abu, kandungan mineral hasil erupsi tetap ada dalam bentuk tersebar halus dan terintegrasi dalam horizon tanah.

B. Kondisi Iklim di Lokasi Penelitian

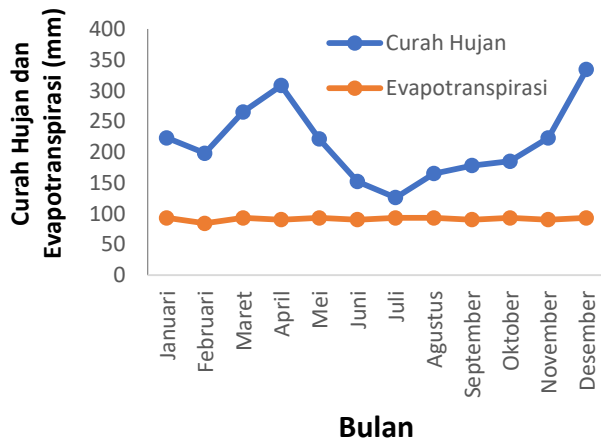
Kondisi iklim di suatu wilayah sangat penting untuk mendukung keberhasilan penelitian, khususnya yang berkaitan dengan pengelolaan sumber daya lahan dan air. Iklim merupakan faktor utama yang memengaruhi ketersediaan air, kesuburan tanah, dan pertumbuhan tanaman. Pola curah hujan, suhu, kelembapan udara, dan evapotranspirasi akan menentukan keseimbangan air di lahan serta memengaruhi proses fisiologis tanaman. Kondisi iklim pada lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



a. Grafik neraca air curah hujan wilayah X Koto.



b. Grafik neraca air curah hujan GPM Sungaipua (2015-2024)



c. Grafik neraca air curah hujan GPM Canduang (2015-2024)

Gambar 1. Grafik Neraca Air Curah Hujan dan Evapotranspirasi

Grafik neraca air pada Gambar (1.a) menunjukkan variasi yang jelas antara curah hujan dan evapotranspirasi sepanjang tahun. Curah hujan cenderung tinggi pada bulan Januari hingga April, dengan puncak terjadi pada bulan April sekitar 300 mm. Setelah itu, curah hujan menurun signifikan pada Mei hingga Juli, mencapai titik terendah di Juli mendekati 130 mm. Mulai Agustus hingga Oktober, curah hujan kembali meningkat sedikit, namun tetap berada pada kisaran menengah, sebelum melonjak tajam pada November dan Desember, masing-masing di atas 300 mm. Sebaliknya, evapotranspirasi relatif stabil sepanjang tahun, berada pada kisaran 80 hingga 124 mm, dengan sedikit peningkatan pada Juni hingga Oktober (Lampiran 11). Pola ini menunjukkan bahwa pada bulan-bulan basah seperti Januari-April dan November-Desember, terjadi surplus air karena curah hujan jauh melebihi evapotranspirasi. Sebaliknya, pada bulan kering seperti Juni, Juli, dan Agustus, neraca air mendekati seimbang atau defisit karena evapotranspirasi mendekati nilai curah hujan.

Grafik kedua pada Gambar (1.b) juga memperlihatkan pola neraca air yang menunjukkan perbedaan signifikan antara curah hujan dan evapotranspirasi, meskipun tampilan visualnya berbeda. Pada grafik ini, curah hujan juga terlihat tinggi pada Januari-April dan November-Desember, kemudian menurun drastis pada Mei-Juli (Lampiran 11). Evapotranspirasi dalam grafik kedua juga menunjukkan pola stabil dengan sedikit kenaikan pada periode pertengahan tahun.

Rata-rata curah hujan bulanan periode 2015–2024 di daerah Canduang pada Gambar (1.c) menunjukkan variasi hujan yang terdistribusi tidak merata sepanjang tahun. Intensitas hujan cenderung meningkat pada awal tahun dan mencapai kondisi maksimum pada bulan April, menandakan dominasi musim hujan. Setelah periode tersebut, curah hujan menurun secara bertahap hingga mencapai nilai minimum pada bulan Juli, yang mencerminkan berlangsungnya musim kering relatif. Memasuki bulan Agustus hingga akhir tahun, curah hujan kembali mengalami peningkatan yang cukup nyata, dengan nilai tinggi pada bulan November dan Desember (Lampiran 11). Pola ini menggambarkan siklus tahunan curah hujan yang berulang dan stabil selama kurun waktu 2015-2024.

C. Hasil Analisis Sifat Kimia Tanah

Berdasarkan penelitian yang telah dilaksanakan di laboratorium, didapatkan rata-rata dari 47 total sampel untuk parameter kimia tanah berdasarkan uji statistik.

Tabel 2. Nilai Rata-Rata Sifat Kimia Tanah G.Marapi Bagian Barat ke Utara.

Parameter	Unit	Nilai rata - rata	
		Barat Laut - Barat	Barat Laut - Utara
pH H ₂ O	-	5,57 ^a (0,264)	5,68 ^a (0,355)
pH KCl		4,86 ^a (0,308)	5,14 ^a (0,352)
P- Tersedia	ppm	18,59 ^a (24,526)	23,64 ^a (29,163)
P- Retensi	%	89,42 ^a (3,453)	90,76 ^a (3,119)
P- Potensial Fraksionasi P	mg/100 g	48,07 ^a (37,460)	39,03 ^a (30,328)
Al _p	ppm	75,43 ^a (31,839)	81,15 ^a (36,347)
Fe _p		20,85 ^b (5,696)	46,87 ^a (83,223)
Ca _p		15,74 ^a (6,008)	14,78 ^a (7,652)

Ket : Nilai yang diikuti huruf kecil yang sama artinya berbeda tidak nyata, sedangkan nilai yang diikuti huruf kecil yang berbeda artinya berbeda nyata. Nilai yang berada didalam kurung adalah nilai standar deviasi.

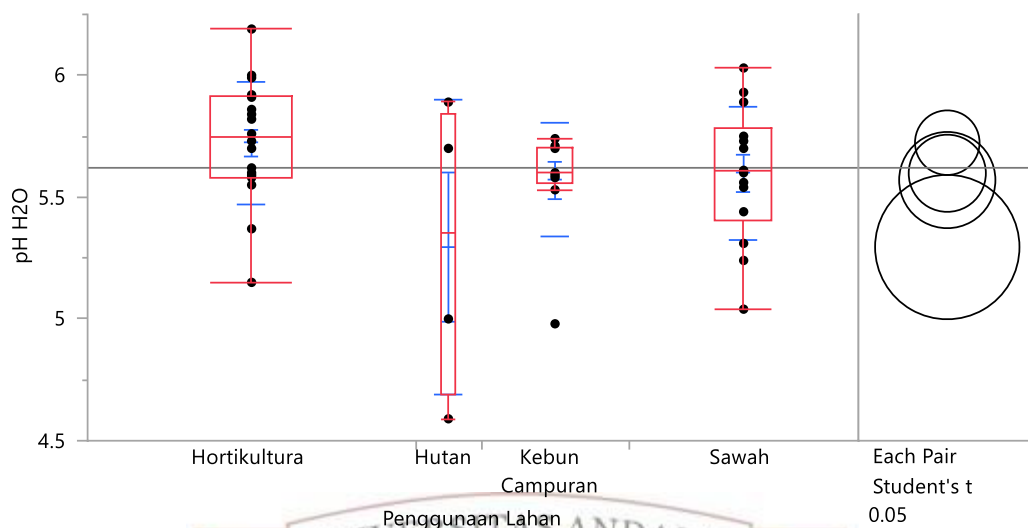
a. pH Tanah

Pengukuran pH tanah pada wilayah penelitian menunjukkan kisaran pH tanah yang tergolong masam, baik pada pengukuran dengan pH H₂O maupun dengan pH KCl. Nilai pH H₂O tanah tertinggi ditemukan di wilayah Barat Laut-Utara dengan nilai 5,68 , diikuti oleh Barat Laut-Barat 5,57. Sementara itu, pH KCl tanah juga menunjukkan data serupa, dengan nilai tertinggi di Barat Laut-Utara 5,14, dan nilai yang terendah terdapat pada Barat Laut-Barat 4,86 (Tabel 2). Perbedaan ini menunjukkan bahwa tanah pada bagian Barat Laut-Utara memiliki kondisi keasaman yang lebih rendah dibandingkan bagian Barat Laut-Barat. Curah hujan yang relatif tinggi juga menyebabkan pencucian kation basa seperti Ca, Mg, dan K, sehingga pH tanah menjadi lebih rendah. Perbedaan pH antara arah Barat Laut-Barat dan Barat Laut-Utara menunjukkan bahwa faktor penggunaan lahan dan kondisi lingkungan turut memengaruhi tingkat keasaman, di mana lahan yang dikelola cenderung memiliki pH sedikit lebih tinggi dibandingkan lahan yang relatif alami.

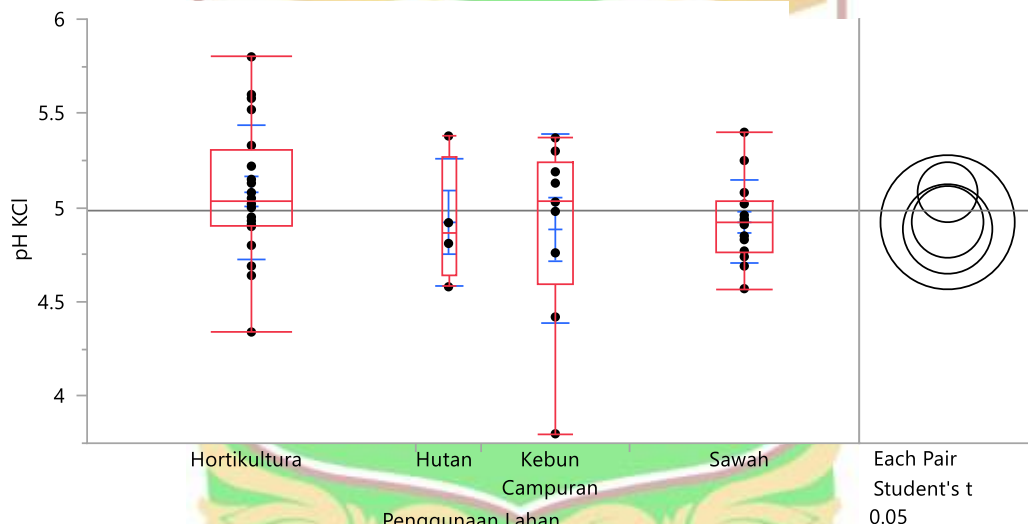
Nilai standar deviasi pada parameter pH tanah menunjukkan tingkat variasi data dari beberapa titik pengambilan sampel. Pada pengukuran pH H₂O tanah, bagian Barat Laut-Utara memiliki standar deviasi sebesar 0,355, sedangkan bagian Barat-Barat Laut sebesar 0,264. Pola yang sama juga terlihat pada pengukuran pH KCl tanah. Bagian Barat Laut-Utara memiliki standar deviasi sebesar 0,352, sementara bagian Barat-Barat Laut menunjukkan nilai 0,308 (Tabel 2). Wilayah Barat Laut-Utara memiliki variasi kondisi kimia tanah yang lebih tinggi dibandingkan wilayah Barat-Barat Laut. Sementara itu, pada lokasi penelitian bagian Selatan didapatkan hasil pH H₂O tanah lebih kecil dibandingkan bagian Utara sementara pH KCl tanah pada bagian Selatan lebih tinggi dibandingkan bagian Utara (Wahyudi, 2026).

Nilai pH tanah yang sedikit lebih tinggi pada arah Barat Laut-Utara sangat mungkin dipengaruhi oleh jenis penggunaan lahan yang lebih mendukung peningkatan pH tanah, seperti area hortikultura dan tanaman campuran pada grafik terlihat memiliki nilai pH H₂O dan pH KCl tanah lebih tinggi dibandingkan lahan hutan (Gambar 2). Selain penggunaan lahan, perbedaan arah mata angin juga mempengaruhi kondisi tanah. Arah Barat Laut-Utara umumnya lebih terlindung dari angin dominan serta memiliki tingkat kelembapan dan pencucian hara yang lebih rendah. Kondisi yang lebih stabil ini memungkinkan akumulasi kation basa, sehingga pH lebih tinggi. Sebaliknya, Barat Laut-Barat lebih terbuka terhadap angin dan menerima intensitas hujan dan aliran permukaan yang lebih besar, yang meningkatkan proses pelindihan (leaching) kation basa sehingga pH tanah turun.

Temuan ini sejalan dengan temuan Nkoa *et al.* (2018) menunjukkan bahwa perubahan penggunaan lahan menyebabkan perubahan signifikan pada pH tanah, di mana lahan hutan cenderung lebih masam dibandingkan tanah yang dikelola secara intensif. Selain itu, penelitian Muhamad (2023) menjelaskan bahwa pH KCl umumnya lebih rendah dari pada pH H₂O, karena larutan HCl melepaskan ion H⁺ dari kompleks pertukaran sehingga menunjukkan tingkat keasaman potensial tanah yang sebenarnya. Nilai pH tanah diberbagai penggunaan lahan dapat dilihat pada Gambar 2.



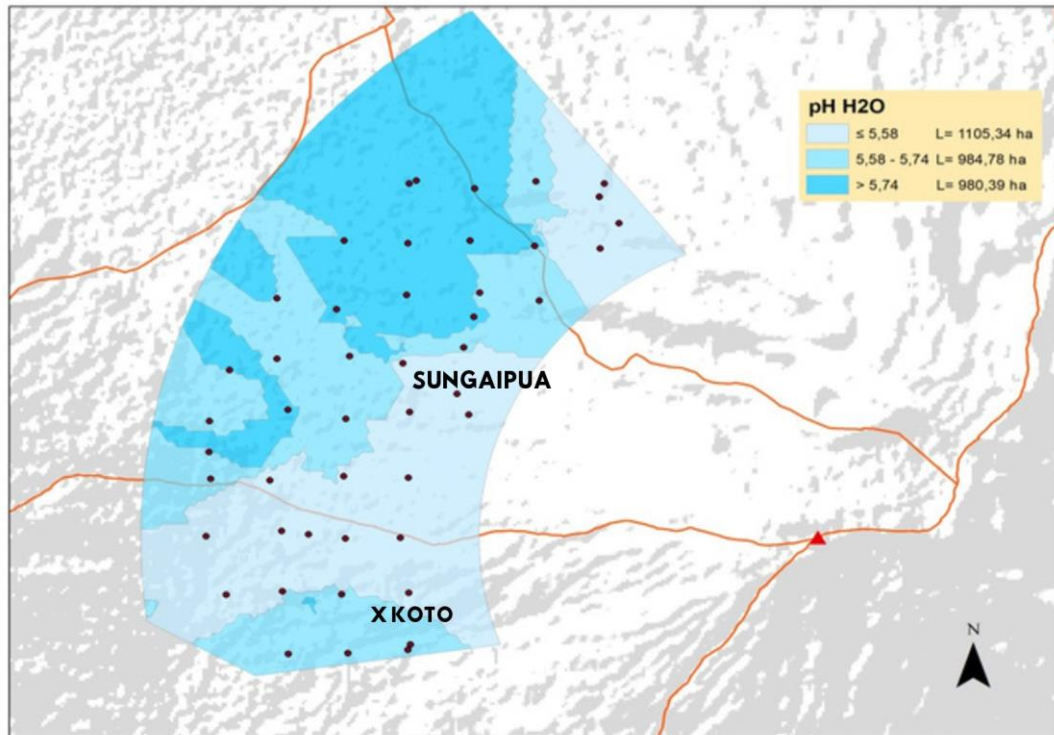
UNIVERSITAS ANDALAS
a. pH H₂O Tanah



UNTUK KEDAJAAN BANGSA
b. pH KCl Tanah

Gambar 2. Nilai pH H₂O dan pH KCl tanah pada berbagai penggunaa lahan.

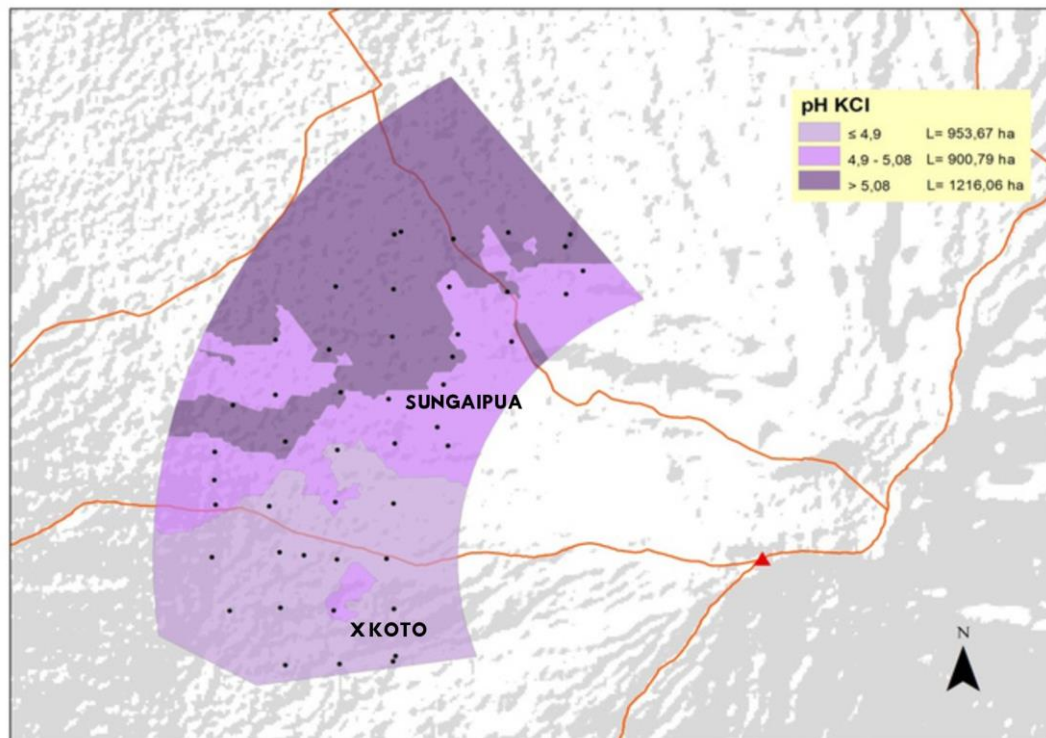
Perbedaan nilai ini terjadi karena pH KCl mengukur kemasaman potensial sehingga nilainya lebih rendah dibandingkan pH H₂O. Lahan hutan memiliki pH terendah pada kedua metode pengukuran, yang menandakan tanah di area ini lebih masam dibandingkan lahan hortikultura, kebun campuran, dan sawah. Pada grafik pH H₂O penggunaan lahan kebun campuran, terlihat adanya satu titik data yang berada di bawah sebaran utama. Titik tersebut menunjukkan nilai pH yang lebih rendah dibandingkan sampel kebun campuran lainnya.



Gambar 3. Sebaran spasial pH H₂O tanah di wilayah penelitian G. Marapi.

Area dengan pH tanah antara 5,58 hingga 5,74 mencakup sekitar 984,78 hektar, tersebar pada bagian tengah peta dan sebagian sisi barat (Gambar 3). Wilayah ini menunjukkan tanah dengan tingkat keasaman sedang yang umumnya masih kurang ideal untuk sebagian besar tanaman, tetapi memiliki potensi lebih baik dibanding wilayah dengan pH sangat masam. Sementara itu, area dengan pH tanah > 5,74 hanya mencakup sekitar 980,39 hektar, terutama tersebar di bagian timur laut hingga tengah wilayah.

Nilai pH KCl tanah dibagi ke dalam tiga kelas, yaitu: sangat masam ($\leq 4,9$), masam ($4,9 - 5,08$), dan agak masam ($> 5,08$). Wilayah dengan pH tanah $> 5,08$ mencakup luasan paling besar, yaitu sekitar 1.216,06 hektar (Gambar 4). Wilayah dengan pH tanah antara 4,9 - 5,08 meliputi sekitar 900,79 hektar. Wilayah ini tersebar cukup merata pada bagian tengah wilayah penelitian. Sementara itu, area dengan pH KCl tanah $\leq 4,9$ mencakup sekitar 953,67 hektar dan tersebar di wilayah kecamatan X Koto. Keasaman yang tinggi pada tanah ini berpotensi menyebabkan fiksasi unsur hara serta meningkatkan kelarutan logam berat yang bersifat racun bagi tanaman.



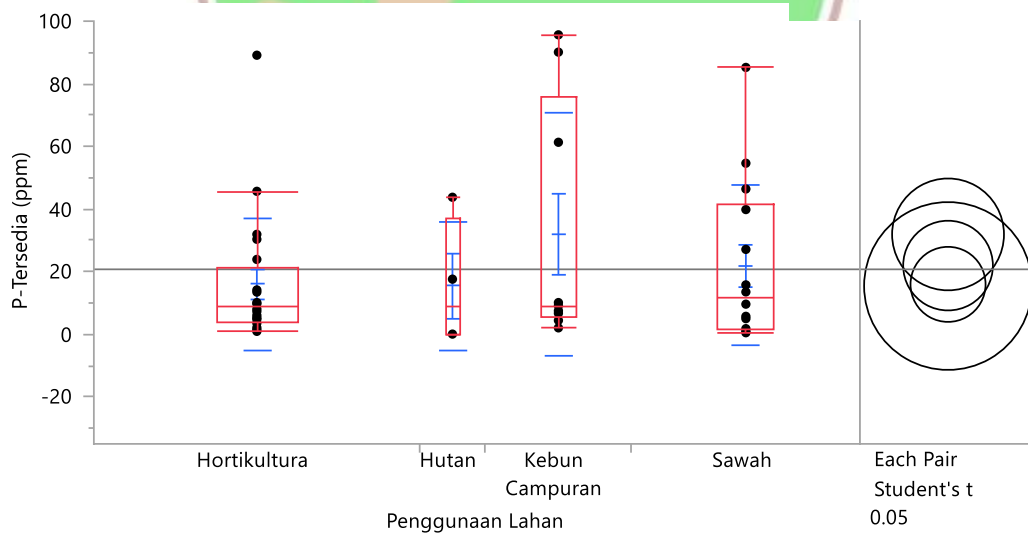
Gambar 4. Sebaran spasial pH KCl tanah di wilayah penelitian G. Marapi.

b. P-Tersedia Tanah

Nilai P-tersedia tanah pada dua arah pengamatan menunjukkan perbedaan yang cukup jelas, yaitu 18,59 ppm pada arah Barat Laut-Barat dan 23,64 ppm pada arah Barat Laut-Utara. Kedua nilai ini berada pada kategori sedang, namun nilai pada arah Barat Laut-Utara terlihat lebih tinggi. Nilai standar deviasi P-tersedia pada Barat Laut-Utara adalah 29,163, yang berarti data P-tersedia tanah di wilayah ini bervariasi atau berbeda-beda antar titik sampel. Dengan kata lain, kondisi tanahnya tidak sama di setiap titik. Sebaliknya, wilayah Barat-Barat Laut memiliki standar deviasi 24,256 (Tabel 2). Nilai P-tersedia tanah berada pada kategori sedang, namun menunjukkan perbedaan antara wilayah Barat Laut-Barat dan Barat Laut-Utara. Kondisi ini disebabkan oleh tingginya kemampuan tanah vulkanis dalam mengikat fosfor melalui oksida Al dan Fe, sehingga hanya sebagian fosfor yang berada dalam bentuk tersedia. Pada lahan yang dikelola secara intensif nilai P-tersedia cenderung lebih tinggi akibat adanya masukan fosfor dari pupuk dan bahan organik. Sebaliknya, pada lahan alami lebih rendah karena tidak adanya input fosfor dari pengelolaan serta tingginya proses fiksasi dan pencucian akibat curah hujan.

Hasil ini sejalan dengan penelitian oleh Cheng *et al.* (2021) yang melaporkan bahwa *soil available phosphorus* berbeda secara signifikan antar jenis penggunaan lahan karena pengaruh topografi dan tipe lahan. Selain itu, temuan Ding *et al.* (2011) menyatakan bahwa variasi ketersediaan fosfor di tanah sangat dipengaruhi oleh penggunaan lahan dan fertilisasi manusia jangka panjang, yang menyebabkan distribusi P-tersedia tanah yang tidak seragam antar lokasi. Sedangkan Pada bagian Selatan memiliki nilai P-Tersedia tanah lebih kecil dibandingkan bagian utara (Wahyudi, 2026).

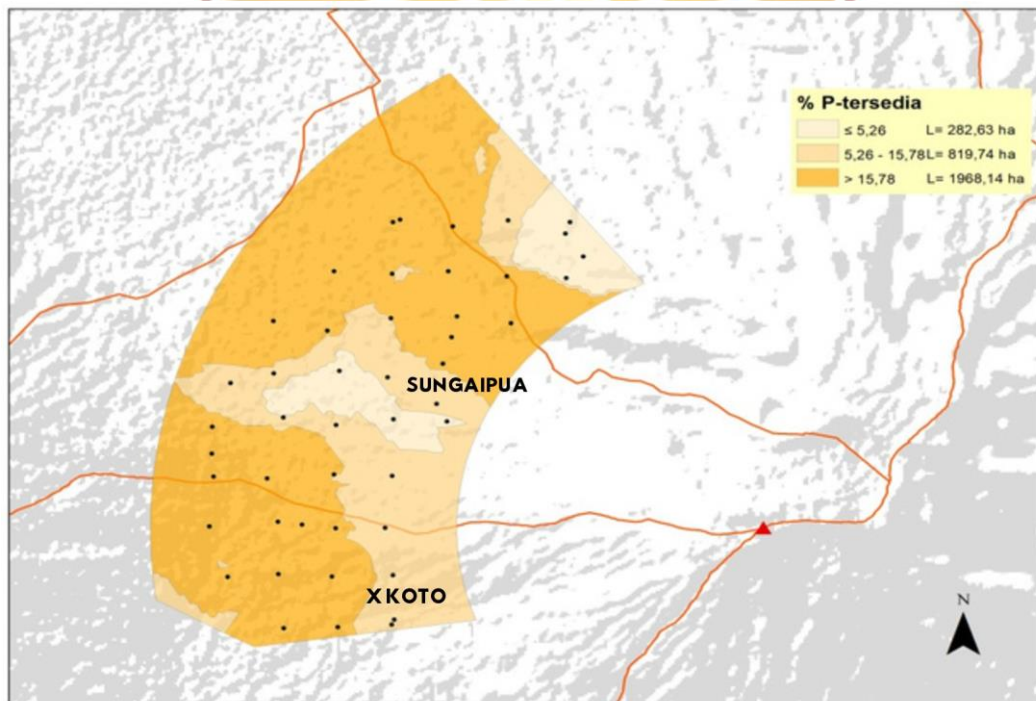
Nilai P-tersedia tanah memiliki variasi yang cukup besar antar jenis lahan. Lahan hortikultura cenderung memiliki nilai P-tersedia tanah rendah hingga sedang, sedangkan kebun campuran dan sawah memperlihatkan rentang nilai yang lebih tinggi. (Gambar 5). Tingginya nilai pada jenis penggunaan lahan tertentu menunjukkan adanya aktivitas yang menambah fosfor ke dalam tanah, seperti pemupukan P secara berulang atau masukan bahan organik yang kaya fosfat. Oleh karena itu, nilai P-tersedia tanah pada penelitian ini yang berada pada tingkatan sedang dapat diinterpretasikan sebagai hasil dari penggunaan lahan yang tidak terlalu intensif. Nilai P-Tersedia tanah dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Nilai P-Tersedia tanah pada berbagai penggunaan lahan.

Grafik menunjukkan variasi kandungan P-tersedia tanah pada empat jenis penggunaan lahan: hutan, hortikultura, kebun campuran, dan sawah. Nilai

tertinggi terdapat pada kebun campuran, diikuti oleh sawah, sedangkan hutan dan hortikultura memiliki nilai yang lebih rendah. Kebun campuran menampilkan sebaran yang lebar dengan beberapa nilai sangat tinggi, menunjukkan adanya pengaruh pengelolaan yang beragam dan kondisi tanah yang berbeda-beda. Sebaliknya, pada hutan dan hortikultura, P-tersedia tanah lebih rendah, kemungkinan karena tingginya tingkat fiksasi oleh Al dan Fe aktif dari material vulkanik serta pencucian akibat curah hujan tinggi. Pada hortikultura, pengolahan intensif dan pencucian hara semakin mempercepat hilangnya fosfat tersedia dari tanah. Pada grafik penggunaan lahan hortikultura menunjukkan adanya satu titik data yang berada jauh di atas sebaran utama. Titik ini menunjukkan nilai P-tersedia yang lebih tinggi dibandingkan sebagian besar data hortikultura lainnya.



Gambar 6. Sebaran spasial P-tersedia tanah di wilayah penelitian G. Marapi.

Peta sebaran spasial P-tersedia tanah menunjukkan variasi kandungan fosfor yang cukup, signifikan antar wilayah. Berdasarkan klasifikasi nilai P-tersedia tanah dalam peta, wilayah dibagi menjadi tiga kelas, yaitu: rendah ($\leq 5,26$), sedang ($5,26-15,78$), dan tinggi ($> 15,78$). Sebagian besar area penelitian didominasi oleh kelas P-tersedia tanah tinggi ($> 15,78$) yang mencakup luasan sebesar 1968,14 hektar. Wilayah dengan kategori tinggi ini mencerminkan kondisi tanah yang cukup subur dari sisi ketersediaan unsur hara fosfor. P-tersedia tanah

sedang (5,26–15,78) meliputi area seluas 819,74 hektar dan tersebar secara tidak merata di wilayah Sungaipua . Pada area ini, ketersediaan fosfor masih cukup untuk menunjang pertumbuhan tanaman, meskipun mungkin memerlukan tambahan pemupukan untuk komoditas tertentu yang memiliki kebutuhan fosfor tinggi.

Wilayah ini dapat dijadikan prioritas untuk pengelolaan hara yang lebih intensif dengan mempertimbangkan efisiensi dan keberlanjutan penggunaan lahan. Sementara itu, wilayah dengan kandungan P-tersedia tanah rendah ($\leq 5,26$) hanya mencakup area seluas 282,63 hektar. Rendahnya nilai P-tersedia di wilayah ini kemungkinan dipengaruhi oleh pencucian hara akibat curah hujan tinggi.

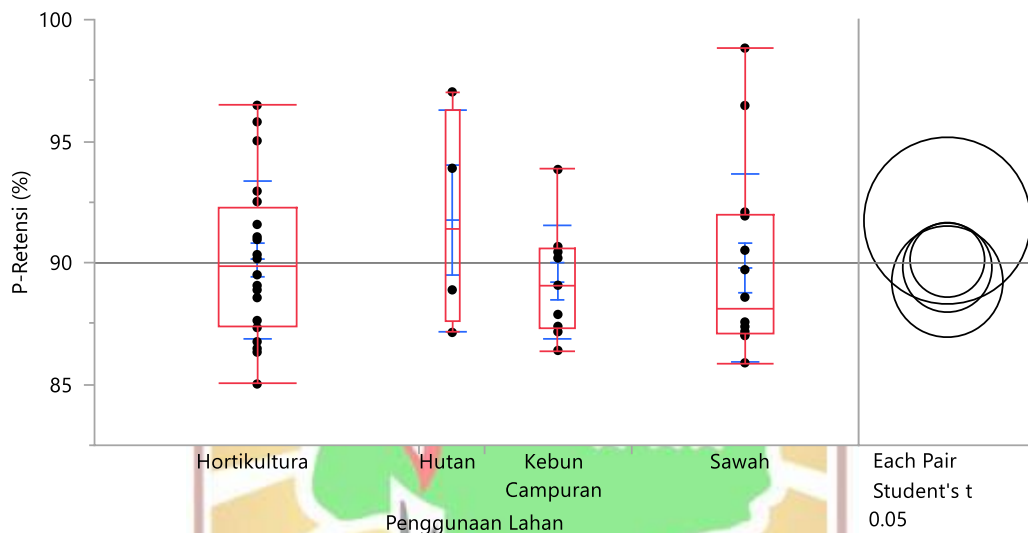
c. P-Retensi Tanah

Nilai P-Retensi tanah menunjukkan bahwa area Barat Laut-Utara memiliki retensi P lebih tinggi 90,76% dibandingkan Barat Laut-Barat 89,42% (Tabel 2). Nilai standar deviasi P-retensi tanah pada bagian Barat Laut-Utara sebesar 3,119 menunjukkan bahwa variasi antar titik sampel relatif kecil, sehingga kondisi tanah di wilayah ini lebih homogen. Sebaliknya, standar deviasi pada Barat-Barat Laut mencapai 3,453 (Tabel 2). Tingginya nilai P-retensi tanah pada seluruh wilayah penelitian menunjukkan bahwa tanah vulkanis Gunung Marapi memiliki kemampuan yang sangat besar dalam mengikat fosfor. Hal ini disebabkan oleh dominasi mineral liat nonkristalin seperti alofan. Akibatnya, fosfor yang masuk ke dalam tanah, baik dari sumber alami maupun pemupukan, cenderung terikat kuat dan sulit tersedia bagi tanaman.

Sementara itu hasil P-Retensi tanah pada bagian Selatan memiliki nilai lebih > dibandingkan bagian Utara (Wahyudi 2026). Perbedaan nilai standar error yang mencolok ini menegaskan bahwa stabilitas karakteristik tanah di Barat Laut-Utara lebih tinggi dibandingkan Barat-Barat Laut. Secara keseluruhan, kedua nilai ini tergolong retensi fosfor yang sangat tinggi, artinya tanah di wilayah penelitian mempunyai kemampuan besar untuk mengikat fosfor, sehingga hanya sebagian kecil fosfor yang dapat dilepaskan dan dimanfaatkan oleh tanaman.

Terlihat bahwa seluruh tipe penggunaan lahan (hutan, hortikultura, kebun campuran, sawah) menunjukkan kecenderungan retensi P yang sama tinggi. Namun terdapat pola penting: lahan hutan memiliki sebaran data yang lebih stabil

dan cenderung lebih tinggi, sedangkan hortikultura dan sawah memperlihatkan variasi yang lebih besar. Hal ini dapat dijelaskan melalui perbedaan intensitas pengolahan tanah. Penelitian sejalan dengan penelitian Hashar *et al* (2024) yang melaporkan bahwa tanah pada lahan sawah memiliki retensi P tinggi akibat proses adsorpsi kuat oleh Fe-Al oksida. Nilai P-Retensi dapat dilihat pada Gambar 7.

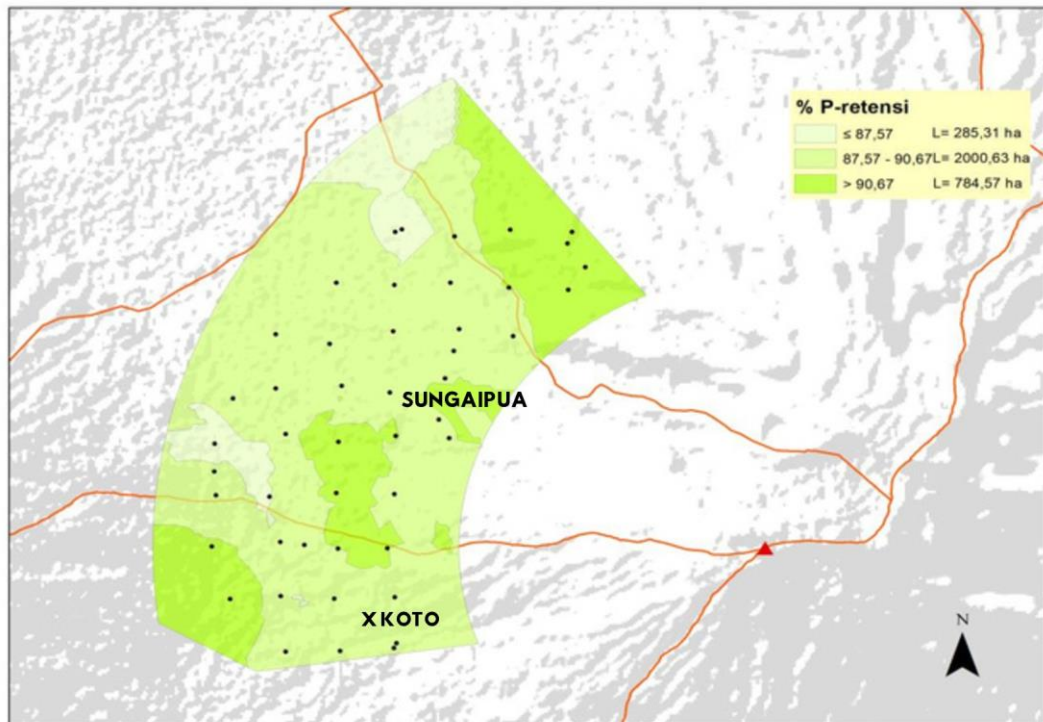


Gambar 7. Nilai P-Retensi tanah pada berbagai penggunaan lahan.

Grafik P-retensi tanah menunjukkan pada empat jenis penggunaan lahan: hutan, hortikultura, kebun campuran, dan sawah. Secara umum, nilai P-retensi tanah berada pada kisaran tinggi untuk semua lahan, yang menunjukkan kemampuan tanah menahan fosfat cukup besar. Tingginya P-retensi tanah pada hutan dapat dikaitkan dengan kondisi tanah yang relatif alami dan kaya bahan organik, sehingga membentuk kompleks yang mampu mengikat fosfat lebih kuat. Sebaliknya, lahan kebun campuran menunjukkan nilai lebih rendah karena pengolahan intensif, pencucian unsur hara, dan penggunaan pupuk yang dapat memengaruhi koloid tanah. Kebun hortikultura dan sawah memiliki variasi sedang, mencerminkan pengaruh pengelolaan lahan yang tidak seintensif kebun campuran, tetapi lebih terbuka dibanding hutan.

Peta sebaran spasial ini dibagi ke dalam tiga kelas nilai p-retensi tanah, yaitu: kelas $\leq 87,57\%$ dengan luas sekitar 285,31 hektar, kelas $87,57\% - 90,67\%$ dengan luas dominan mencapai 2.000,63 hektar, dan kelas $> 90,67\%$ seluas 784,57 hektar (Gambar 8). Berdasarkan distribusinya, mayoritas wilayah

penelitian tergolong dalam kelas sedang, yaitu 87,57-90,67%, yang tersebar merata. Hal ini mengindikasikan bahwa sebagian besar tanah di kawasan ini memiliki kapasitas menahan fosfor yang cukup baik, meskipun belum optimal. Wilayah dengan nilai p-retensi tanah tertinggi ($> 90,67\%$) cenderung tersebar secara local. wilayah dengan nilai p-retensi tanah terendah ($\leq 87,57\%$) tampak berada di bagian ujung luar dari wilayah penelitian.



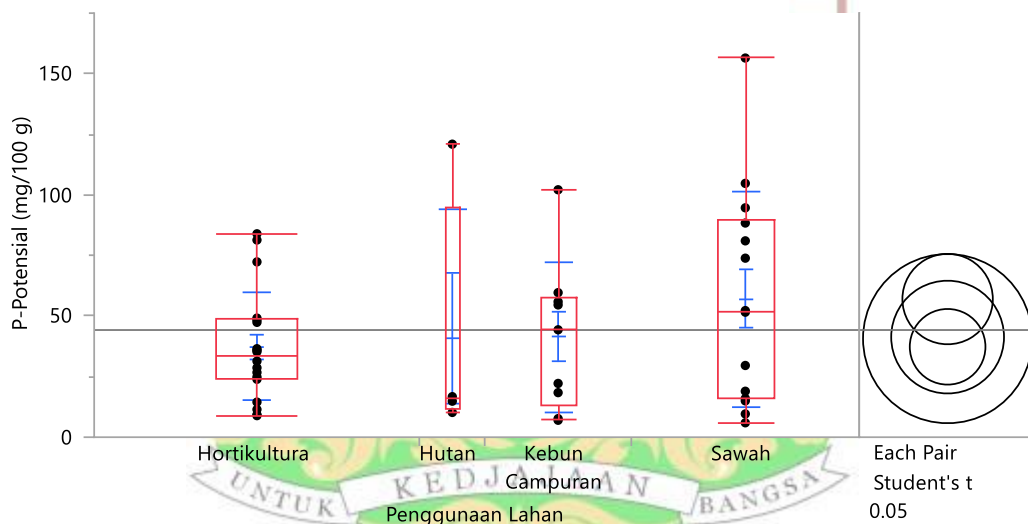
Gambar 8. Sebaran spasial P-retensi tanah di wilayah penelitian G. Marapi

d. P- Potensial Tanah

Nilai P-Potensial tanah pada area Barat Laut-Barat sebesar 48,07 mg/100 g dan Barat Laut-Utara sebesar 39,03 mg/100 g menunjukkan bahwa tanah di kedua area tersebut memiliki potensi fosfor (P) yang sedang hingga cenderung rendah. Nilai standar deviasi P-potensial tanah pada wilayah Barat Laut-Utara sebesar 30,328, standar deviasi pada wilayah Barat-Barat Laut mencapai 37,640 (Tabel 2), sedikit lebih tinggi, menandakan bahwa variasi P-potensial di wilayah ini lebih besar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai P-potensial tanah tergolong cukup tinggi, yang menandakan adanya cadangan fosfor dalam tanah vulkanis Gunung Marapi. Kondisi ini dipengaruhi oleh akumulasi fosfor dari

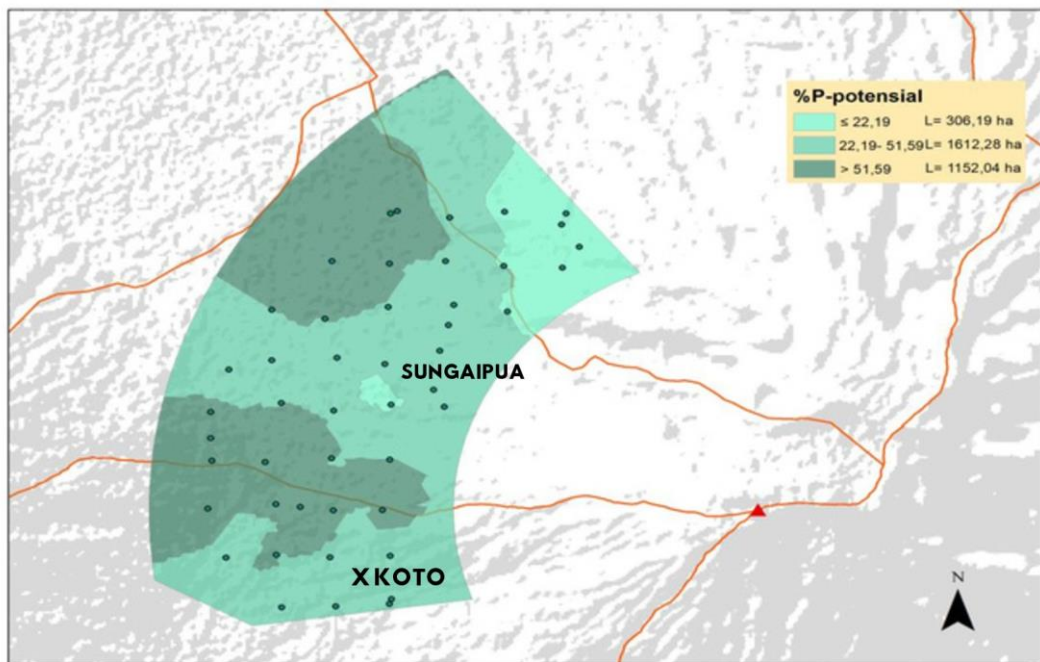
proses aktivitas penggunaan lahan, terutama pada lahan pertanian yang menerima input pupuk fosfat. Namun, tingginya P-potensial tidak selalu diikuti oleh meningkatnya P-tersedia karena sebagian besar fosfor tersimpan dalam bentuk terikat. Hal ini menunjukkan bahwa tanah memiliki kemampuan menyimpan fosfor dalam jumlah besar, tetapi pemanfaatannya oleh tanaman masih terbatas akibat sifat kimia tanah vulkanis.

Sementara itu pada bagian Selatan memiliki nilai P-Potensial tanah lebih kecil dibandingkan bagian Utara (Wahyudi, 2026). Temuan ini sejalan dengan penelitian Abile (2024) yang menunjukkan bahwa perubahan penggunaan lahan dari hutan ke pertanian menyebabkan penurunan kualitas tanah dan penurunan unsur hara termasuk fosfor, karena hilangnya penutup lahan alami dan meningkatnya erosi. Nilai P-Potensial pada berbagai penggunaan lahan dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Nilai P-Potensial tanah pada berbagai penggunaan lahan.

Lahan sawah memiliki P-potensial paling tinggi, sedangkan kebun campuran dan hortikultura berada pada tingkat sedang. Sementara itu, lahan hutan menunjukkan P-potensial paling rendah. Kondisi ini mencerminkan bahwa intensitas pengelolaan lahan dan aktivitas budidaya berpengaruh terhadap ketersediaan fosfor, di mana lahan yang dikelola secara intensif cenderung mempertahankan P-potensial lebih tinggi dibandingkan lahan alami.



Gambar 10. Sebaran spasial P-potensial tanah di wilayah penelitian G. Marapi.

Peta sebaran spasial P-potensial tanah Gunung Marapi memberikan gambaran visual mengenai distribusi kandungan fosfor potensial di wilayah penelitian. Berdasarkan legenda pada peta, nilai P-potensial tanah dibagi menjadi tiga kelas, yaitu: $\leq 22,19$ (seluas 306,19 ha), 22,19–51,59 (seluas 1612,28 ha), dan $> 51,59$ (seluas 1152,04 ha). Dari peta ini terlihat bahwa sebaran P-potensial tanah paling luas berada pada kelas sedang (22,19–51,59), yang tersebar merata di wilayah kecamatan Sungaipua. Sementara itu, kelas tinggi ($> 51,59$) lebih terkonsentrasi di wilayah kecamatan X Koto. Area dengan nilai P-potensial tanah rendah ($\leq 22,19$) hanya menempati area yang sempit dan tersebar secara terbatas di bagian tengah.

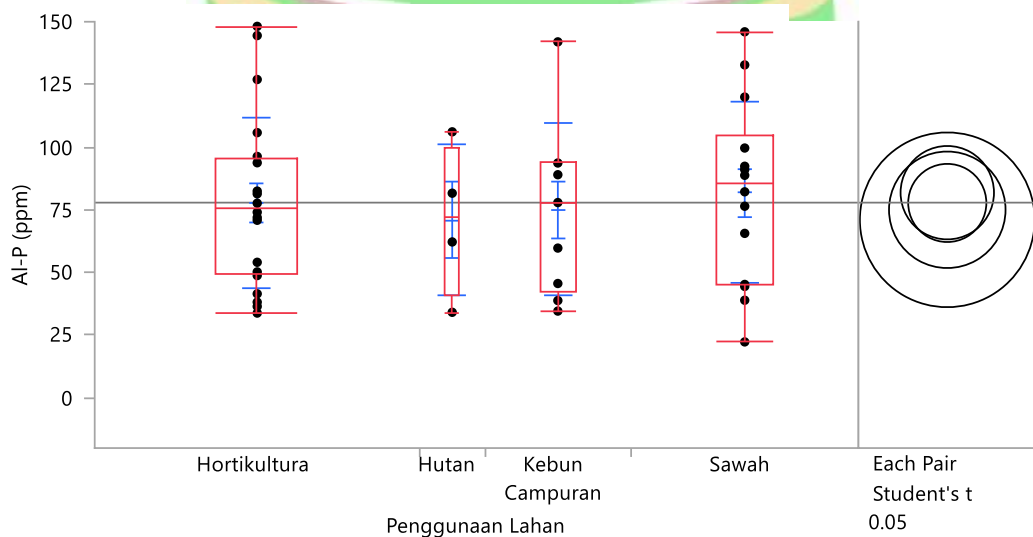
e. Fraksionasi P Tanah

1. Al_p Tanah

Fraksi Al_p tanah pada wilayah penelitian menunjukkan variasi antar penggunaan lahan. Nilai Al_p tanah tertinggi ditemukan pada lokasi Barat Laut-Utara sebesar 81,15 ppm, diikuti oleh Barat Laut-Barat sebesar 75,43 ppm (Tabel 2). Nilai standar deviasi Al_p tanah pada wilayah Barat Laut-Utara sebesar 36,347, yang menunjukkan bahwa nilai Al_p tanah antar titik sampel cukup bervariasi. Artinya, kondisi tanah di wilayah ini tidak sepenuhnya seragam.

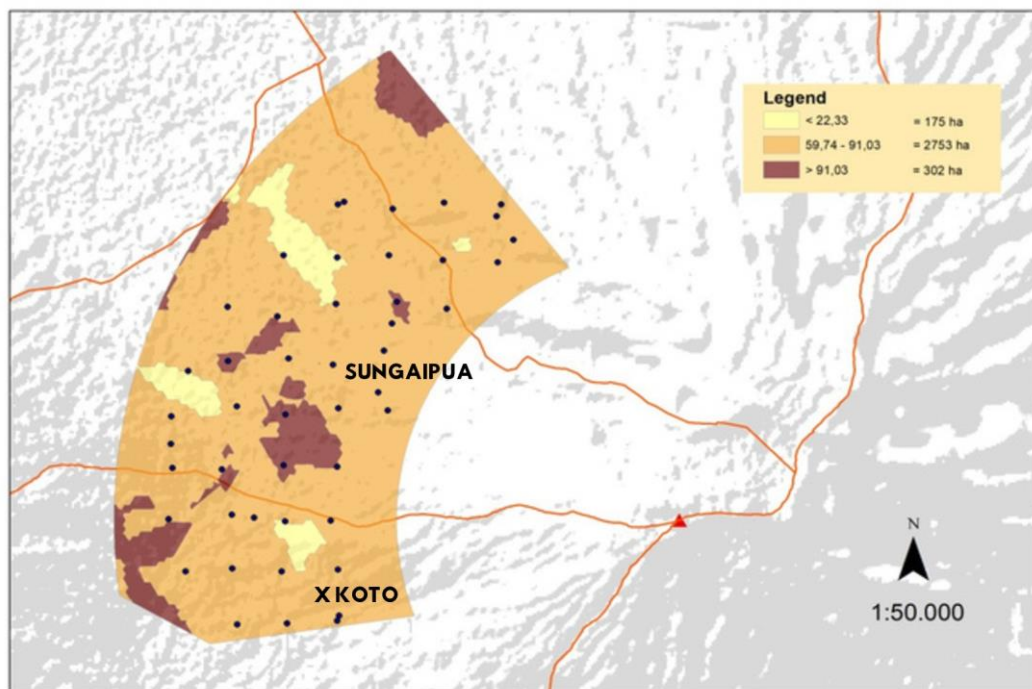
Sementara itu, standar deviasi pada wilayah Barat-Barat Laut adalah 31,839 (Tabel 2), lebih rendah dibandingkan Barat Laut-Utara. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa bagian Barat Laut-Utara memiliki tingkat pengikatan fosfor oleh aluminium yang lebih besar. Kondisi ini berkaitan langsung dengan pH tanah yang masam, di mana aluminium menjadi lebih aktif dan mudah mengikat fosfor. Lahan yang dikelola intensif menunjukkan nilai Al_p lebih tinggi akibat tingginya fosfor yang masuk ke tanah, yang kemudian terfiksasi oleh Al. Akibatnya, meskipun kandungan fosfor total cukup, ketersediaan fosfor bagi tanaman tetap terbatas.

Pada bagian Selatan ternyata memiliki nilai Al_p tanah pada bagian Barat-Barat laut lebih besar dibandingkan bagian Utara dan Barat laut-Selatan lebih kecil dibandingkan bagian Utara (Wahyudi, 2026). Hal ini dapat terjadi karena perbedaan kondisi lingkungan dan sifat tanah yang ada di lokasi penelitian. Temuan ini konsisten dengan beberapa penelitian sebelumnya. Penelitian oleh Shen *et al.* (2011) menjelaskan bahwa pada tanah masam, fraksi Al_p tanah menjadi bentuk P dominan akibat tingginya aktivitas Al-oksida. Hardjowigeno (2015) juga menjelaskan bahwa tanah-tanah masam di daerah beriklim lembap memiliki kandungan Al_p tanah tinggi akibat pelapukan intensif dan pelindihan basa. Nilai Kandungan Al_p tanah dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11. Kandungan Al_p tanah pada berbagai penggunaan lahan

Lahan sawah menunjukkan tingkat Al_p yang relatif paling tinggi, diikuti oleh lahan hortikultura yang berada pada kategori sedang hingga tinggi. Sementara itu, lahan kebun campuran dan hutan cenderung memiliki Al_p pada kategori sedang hingga rendah. Kondisi ini menunjukkan bahwa penggunaan lahan dengan pengelolaan intensif cenderung meningkatkan ikatan fosfor dengan aluminium, sedangkan pada lahan yang lebih alami, fosfor relatif lebih sedikit terikat dalam bentuk Al_p .



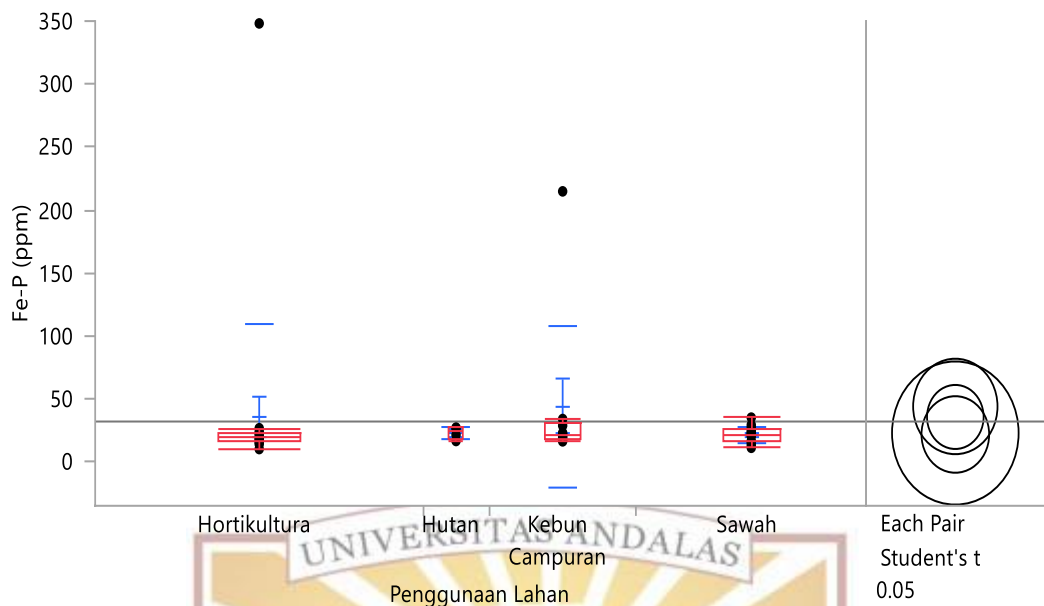
Gambar 12. Sebaran spasial Al_p tanah di wilayah penelitian G. Marapi.

Nilai Al_p tanah dibagi menjadi tiga kelas utama, yaitu <22,33 ppm dengan luas ±175 ha, 59,74–91,03 ppm dengan luas dominan ±2753 ha, dan >91,03 ppm seluas ±302 ha. Sebagian besar area didominasi oleh kelas menengah (59,74–91,03 ppm) yang tersebar merata di hampir seluruh tengah wilayah penelitian, menunjukkan bahwa proses fiksasi fosfor oleh aluminium berlangsung cukup intens di area ini. Sementara itu, kelas rendah (<22,33 ppm) umumnya terdistribusi di area berwarna kuning pucat, yang kemungkinan dipengaruhi oleh faktor seperti pH tanah yang relatif lebih netral atau kandungan bahan organik yang tinggi sehingga menurunkan aktivitas aluminium aktif. Sebaliknya, kelas tinggi (>91,03 ppm) yang ditunjukkan oleh warna coklat tua di wilayah penelitian.

2. Fe_p Tanah

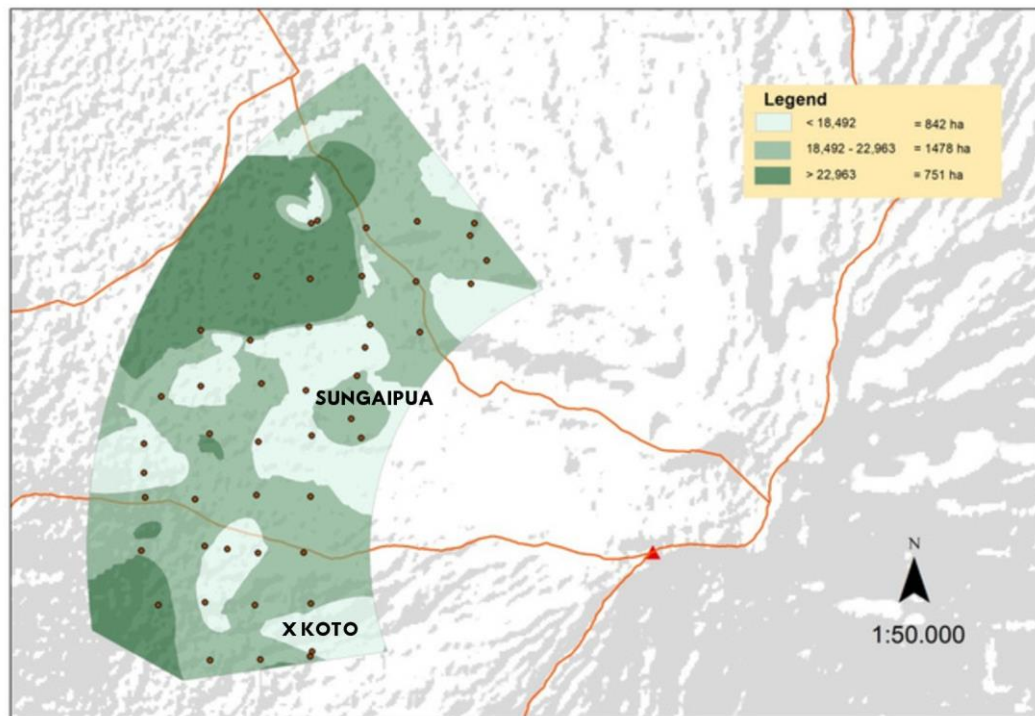
Kandungan Fe_p tanah pada wilayah penelitian, diperoleh bahwa nilai tertinggi terdapat di lokasi Barat Laut-Utara dengan nilai sebesar 46,87 ppm dan nilai terendah ditemukan di Barat Laut-Barat sebesar 20,85 ppm (Tabel 2). Standar deviasi Fe_p tanah pada Barat Laut-Utara sebesar 83,223, wilayah Barat-Barat Laut memiliki standar deviasi 5,696 (Tabel 2). Perbedaan ini menunjukkan bahwa keragaman Fe_p tanah di Barat Laut-Utara jauh lebih tinggi dibandingkan Barat-Barat Laut. Fraksi Fe_p pada tanah penelitian menunjukkan keberadaan fosfor yang terikat dengan oksida besi. Pembentukan ikatan ini dipengaruhi oleh kandungan besi aktif yang tinggi serta kondisi tanah yang lembap dan masam. Pada lahan yang mengalami pengolahan, fosfor cenderung lebih mudah berikatan dengan Fe. Akibatnya, fosfor banyak tersimpan dalam bentuk Fe_p yang relatif stabil dan kurang tersedia bagi tanaman.

Pada bagian Selatan hasil Fe_p tanah bagian Barat laut-Barat memiliki nilai lebih > dibandingkan bagian Utara, sedangkan pada bagian Barat laut-Selatan memiliki nilai lebih < dibandingkan bagian Utara (Wahyudi, 2026). Penelitian ini sejalan dengan penelitian De Jonge *et al.* (2019) yang menyatakan bahwa penggunaan lahan yang dikelola secara intensif, seperti kebun campuran dan pertanian, cenderung meningkatkan fraksi fosfor terikat besi (Fe_p) akibat tingginya masukan P dan interaksi P dengan oksida besi dalam tanah. Temuan ini juga didukung oleh penelitian Chavarro-Bermeo *et al.* (2022) yang menunjukkan bahwa konversi lahan dari hutan menjadi lahan budidaya meningkatkan proporsi P yang terjerap oleh Fe dan Al. Selain itu, penelitian Maranguit *et al.* (2017) menguatkan bahwa kondisi kelembapan tanah dan perubahan redoks yang dipengaruhi iklim lokal serta penggunaan lahan turut mengatur mobilisasi maupun akumulasi Fe_p tanah, sehingga lokasi dengan aktivitas budidaya lebih intens umumnya memiliki nilai Fe_p tanah lebih tinggi. Nilai kandungan Fe_p tanah dengan berbagai penggunaan lahan dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar 13. Kandungan Fe_p tanah pada berbagai penggunaan lahan

Fe_p pada lahan kebun campuran dan hortikultura tergolong lebih tinggi, lahan sawah berada pada tingkat sedang, sedangkan lahan hutan menunjukkan Fe_p paling rendah. Lahan yang lebih intensif dikelola cenderung mempertahankan Fe_p pada tingkat lebih tinggi, sementara pada lahan yang minim gangguan, Fe_p relatif lebih rendah karena fosfor lebih banyak tersimpan dalam bentuk lain di dalam tanah. Pada grafik penggunaan lahan hortikultura menunjukkan adanya satu titik data yang berada jauh di atas sebaran utama. keberadaan satu titik yang jauh lebih tinggi menyebabkan sebaran data menjadi tidak merata, titik ini menunjukkan bahwa terdapat satu nilai Fe_p yang jauh lebih besar dibandingkan titik lainnya pada penggunaan lahan hortikultura. Kondisi ini dapat terjadi karena pada lokasi tertentu terjadi akumulasi fosfor yang terikat oleh besi (Fe) lebih besar dibandingkan lokasi lainnya. Perbedaan ini umumnya berkaitan dengan ketidakteraturan pengelolaan lahan, sehingga proses pengikatan fosfor oleh Fe berlangsung lebih intensif pada satu titik, sementara titik lain menunjukkan nilai yang lebih rendah. Sementara itu, pada kebun campuran juga terlihat adanya titik data yang berada jauh di atas, meskipun sebagian besar data terkonsentrasi pada kisaran yang relatif lebih sempit. Hal ini menandakan bahwa dalam kebun campuran terdapat perbedaan kondisi tanah antar lokasi, sehingga kemampuan tanah dalam mengikat fosfor oleh Fe tidak sama.



Gambar 14. Sebaran spasial Fe_p tanah di wilayah penelitian G. Marapi.

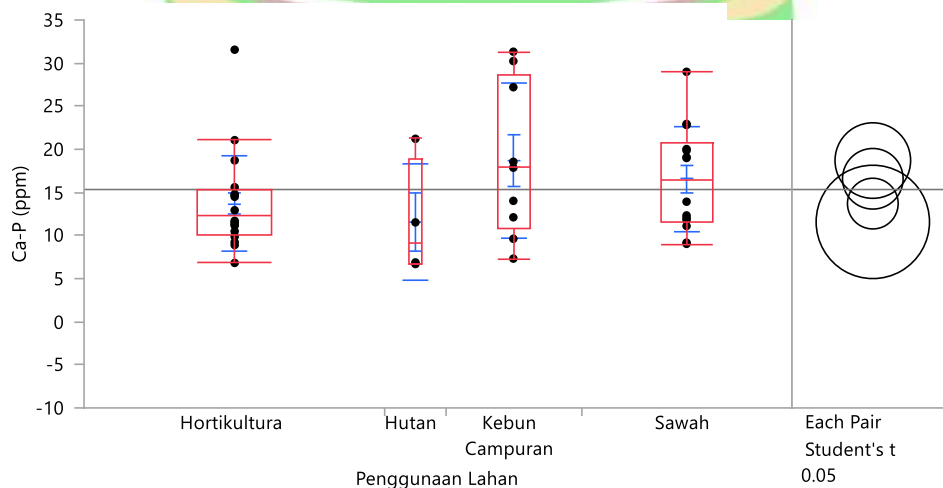
Peta sebaran spasial Fe_p tanah yang ditampilkan di atas, terlihat bahwa kandungan Fe_p tanah terbagi menjadi tiga kelas utama, yaitu <18,492 ppm dengan luas ±842 ha, 18,492–22,963 ppm dengan luas dominan ±1.478 ha, dan >22,963 ppm seluas ±751 ha. Sebaran kelas menengah (18,492–22,963 ppm) mendominasi wilayah penelitian, menunjukkan kondisi tanah yang relatif seimbang antara ketersediaan fosfor dan potensi pengikatan oleh besi. Kelas rendah (<18,492 ppm) umumnya tersebar di beberapa wilayah, yang kemungkinan disebabkan oleh rendahnya kandungan besi aktif atau adanya pengaruh bahan organik yang menghambat pembentukan Fe_p. Sementara itu, kelas tinggi (>22,963 ppm) terpusat di beberapa titik di bagian Barat Laut, mengindikasikan daerah dengan aktivitas besi yang tinggi sehingga fosfor cenderung terfiksasi dalam bentuk yang kurang tersedia bagi tanaman.

3. Ca_p Tanah

Ca_p pada tanah menunjukkan nilai rata-rata sebesar 15,74 ppm di daerah Barat Laut-Barat, 14,78 ppm di Barat Laut-Utara (Tabel 2). Standar deviasi Ca_p di Barat Laut-Utara sebesar 7,652, sedangkan di Barat-Barat Laut standar deviasinya

6,008 (Tabel 2). Jadi, variasi Ca_p di Barat Laut-Utara sedikit lebih tinggi dibandingkan Barat-Barat Laut. Kedua nilai ini relatif berdekatan dan berada pada kisaran sedang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi tanah pada lokasi penelitian memiliki kandungan Ca_p yang tidak terlalu rendah tetapi juga tidak berlebih. Nilai ini menandakan bahwa tanah masih cukup memiliki unsur kalsium dan fosfor yang penting bagi pertumbuhan tanaman. Nilai yang relatif stabil ini dipengaruhi oleh kondisi penggunaan lahan di sekitar area penelitian. Penggunaan lahan yang tidak terlalu intensif, seperti pengolahan tanah yang ringan, pemberian bahan organik dalam jumlah terbatas, serta aktivitas budidaya yang tidak berlebihan, menyebabkan unsur Ca_p tidak mengalami peningkatan maupun penurunan drastis.

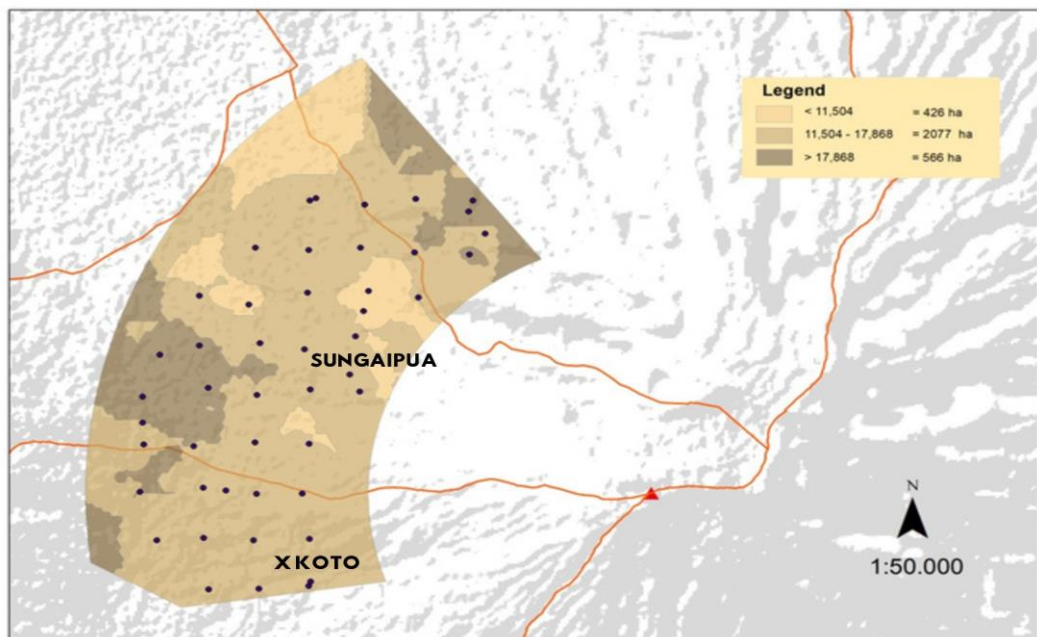
Hasil ini sejalan dengan penelitian Tiessen *et al.* (1984) serta Cross dan Schlesinger (1995) yang menyatakan bahwa fraksi fosfor terikat kalsium (Ca_p) cenderung stabil dan berada pada tingkat menengah pada tanah dengan tingkat pengelolaan rendah hingga sedang, akibat minimnya gangguan tanah dan rendahnya input fosfor eksternal. Sementara itu, pada bagian Selatan memiliki nilai Ca_p lebih besar dibandingkan bagian Utara (Wahyudi, 2025). Hal ini bisa terjadi karena pengaruh lingkungan ataupun kondisi lainnya. Nilai Ca_p dengan berbagai penggunaan lahan dapat dilihat pada Gambar 15.



Gambar 15. Kandungan Ca_p tanah pada berbagai penggunaan lahan.

Grafik menunjukkan variasi kandungan Ca_p pada empat jenis penggunaan lahan, yaitu hutan, hortikultura, kebun campuran, dan sawah. Nilai tertinggi

terdapat pada kebun campuran, diikuti oleh sawah dan hutan, sedangkan hortikultura memiliki nilai terendah (Gambar 15). Penggunaan lahan hortikultura menunjukkan satu titik data yang berada di atas sebaran utama. Sebagian besar nilai Ca_p pada hortikultura terkonsentrasi pada kisaran rendah hingga sedang, namun keberadaan satu titik dengan nilai yang jauh lebih tinggi menunjukkan adanya lokasi dengan kandungan Ca_p yang lebih besar dibandingkan lokasi lainnya.



Gambar 16. Sebaran spasial Ca_p di wilayah penelitian G. Marapi.

Peta sebaran spasial Ca_p pada tanah Marapi yang ditampilkan di atas, kandungan Ca_p terbagi menjadi tiga kelas, yaitu $<11,504$ ppm dengan luas ± 426 ha, $11,504-17,868$ ppm dengan luas dominan ± 2.077 ha, dan $>17,868$ ppm dengan luas ± 566 ha. Sebagian besar wilayah penelitian berada pada kelas menengah ($11,504-17,868$ ppm) yang tersebar merata di hampir seluruh area, menunjukkan ketersediaan fosfor dalam bentuk Ca_p yang relatif moderat dan berpotensi lebih stabil dibanding bentuk fosfat lain karena keterikatannya dengan kalsium. Kelas rendah ($<11,504$ ppm) tersebar di beberapa titik kecil, terutama di wilayah Sungaipua, yang mungkin disebabkan oleh rendahnya kandungan kalsium terlarut akibat pencucian atau reaksi dengan ion lain. Sementara itu, kelas tinggi ($>17,868$ ppm) terkonsentrasi di wilayah Barat Laut, mengindikasikan daerah dengan akumulasi kalsium yang tinggi.