

Optimalisasi Penentuan Potensi *Recharge Area* melalui Integrasi Thornthwaite-Mather dan Google Earth Engine (Studi Kasus Turen dan Pujon Kabupaten Malang)

Muhammad Izzuddin Al Haq¹, Baskoro Tri Julianto²

¹Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, IPB University, Bogor, Indonesia

²Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Sukabumi, Sukabumi, Indonesia

Email: izzuddinhaq@apps.ipb.ac.id^{1*}

Received 17 Juni 2025 | Revised 26 September 2025 | Accepted 18 November 2025

ABSTRAK

Perubahan iklim dan urbanisasi menjadi penyebab utama dalam penurunan kapasitas resapan air tanah yang merupakan tantangan krusial dalam pengelolaan sumber daya air berkelanjutan. Studi ini bertujuan untuk mengidentifikasi potensi recharge area melalui integrasi metode Thornthwaite-Mather dengan platform Google Earth Engine (GEE). GEE, sebagai platform komputasi cloud, memungkinkan pemrosesan data iklim dan spasial berskala besar secara efisien, sehingga sangat relevan untuk wilayah dengan keterbatasan data lapangan. Penelitian dilakukan di Kabupaten Malang, berfokus pada dua lokasi dengan perbedaan elevasi signifikan, yaitu Kecamatan Turen dan Pujon. Data yang digunakan meliputi curah hujan dan suhu dari tahun 2015–2019, serta parameter tanah dari OpenLandMap. Estimasi recharge dihitung berdasarkan neraca air bulanan dan analisis sifat fisik serta hidraulik tanah, seperti kapasitas lapang (FC) dan titik layu permanen (PWP). Hasil penelitian menunjukkan bahwa rata-rata recharge tahunan di Pujon mencapai 1417 mm, sedangkan di Turen hanya 756 mm. Komparasi antara Turen dan Pujon memperlihatkan variasi recharge tahunan yang signifikan, dipengaruhi oleh topografi dan tingkat urbanisasi di masing-masing kecamatan. Studi ini menegaskan bahwa integrasi metode hidrologi klasik dengan platform spasial berbasis cloud dapat meningkatkan akurasi estimasi recharge dan secara substantif mendukung upaya pengelolaan air tanah berkelanjutan.

Kata kunci: recharge area, air tanah; google earth engine; kapasitas lapang; thornthwaite-Mathert

ABSTRACT

Climate change and urbanization are the main causes of the decline in groundwater recharge capacity, which is a crucial challenge in sustainable water resources management. This study aims to identify potential recharge areas through the integration of the Thornthwaite-Mather method with the Google Earth Engine (GEE) platform. GEE, as a cloud computing platform, enables efficient processing of large-scale climatic and spatial data, making it highly relevant for areas with limited field data. The research was conducted in Malang District, focusing on two locations with significant elevation differences, namely Turen and Pujon Districts. Data used included rainfall and temperature from 2015-2019, and soil parameters from OpenLandMap. Recharge estimates were calculated based on monthly water balance and analysis of soil physical and hydraulic properties, such as field capacity (FC) and permanent wilting point (PWP). The results showed that sites with high sand content and moderate organic matter had greater recharge potential. Comparisons between Turen and Pujon showed significant variations in annual recharge, influenced by the topography and level of urbanization in each sub-district. This study confirms that the integration of classical hydrological methods with cloud-based spatial platforms can improve the accuracy of recharge estimation and substantially support sustainable groundwater management efforts.

Keywords: Recharge Area, Groundwater; Google Earth Engine; Field Capacity; Thornthwaite-Mathert

1. PENDAHULUAN

Penurunan signifikan muka air tanah telah menjadi fenomena global, merefleksikan tekanan yang kian meningkat terhadap sumber daya air bawah tanah yang vital bagi kehidupan dan ekosistem. Dalam konteks keberlanjutan air tanah, perubahan iklim diidentifikasi sebagai faktor dominan yang memengaruhi kualitas dan kuantitas air melalui fluktuasi parameter iklim seperti curah hujan dan suhu. Peningkatan konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer telah mengubah pola iklim global, berdampak pada ketidakseimbangan siklus hidrologi regional [1]. Implikasi terhadap proses hidrologis ini sangat kompleks, khususnya dalam hal pengisian kembali air tanah (*groundwater recharge*), yang secara langsung dipengaruhi oleh curah hujan, evapotranspirasi, kelembaban tanah, dan ketebalan zona tak jenuh. Perubahan ini tidak hanya bersifat jangka panjang tetapi juga berpotensi menyebabkan dampak ireversibel, terutama pada sistem akuifer yang telah tertekan secara antropogenik [2].

Kabupaten Malang merupakan salah satu wilayah yang rentan terhadap isu ketersediaan air. Dengan luas sekitar 3.473,439 km². Kabupaten Malang menduduki urutan kedua terluas setelah Kabupaten Banyuwangi di Provinsi Jawa Timur (Kementerian Dalam Negeri). Topografi Kabupaten Malang didominasi oleh dataran tinggi yang dikelilingi oleh beberapa gunung, seperti lereng Tengger-Semeru di timur (500-3.600 meter dpl) dan lereng Kawi-Arjuno di barat (500-3.300 meter dpl). Di bagian tengah, terdapat dataran rendah atau daerah lembah dengan ketinggian 250-500 meter dpl, serta daerah perbukitan kapur (Pegunungan Kendeng) di selatan pada ketinggian 0-650 meter dpl. Kondisi geografis ini menjadikan Kabupaten Malang sebagai daerah yang sejuk, dengan ketinggian pusat pemerintahan kecamatan berkisar antara 239 hingga 1.157 meter dpl. Berdasarkan data dari Stasiun Klimatologi Karangploso-Malang, pada Tahun 2023, suhu udara rata-rata relatif sedang, berkisar antara 22,4°C hingga 26,9°C. Kelembaban udara rata-rata (RH relatif) berkisar antara 64 persen hingga 87 persen. Curah hujan tertinggi tercatat pada Bulan Februari dan Bulan Maret, sementara terendah pada Bulan Agustus dan Bulan September. Dalam studi ini, fokus penelitian dilakukan di Kecamatan Turen dan Pujon. Kecamatan Turen terletak di bagian selatan Kabupaten Malang, cenderung memiliki elevasi yang lebih rendah karena kedekatannya dengan Laut Selatan. Sebaliknya, Kecamatan Pujon berada di bagian utara, dengan elevasi yang cenderung tinggi mengingat lokasinya yang berdekatan dengan dataran tinggi Kota Batu. Perbedaan karakteristik topografi dan iklim ini menjadi dasar penting dalam menganalisis potensi *recharge area* di kedua wilayah.

Berbagai metode telah dikembangkan untuk mengestimasi laju pengisian kembali air tanah, mulai dari pendekatan empiris hingga model numerik dan fisik-spasial. Meskipun metode empiris populer karena kemudahan aplikasinya secara temporal dan spasial, sering kali metode ini mengabaikan karakteristik fisik sistem akuifer seperti tekstur tanah, penggunaan lahan, kemiringan lereng, dan ketebalan zona tak jenuh [3]. Hal ini membatasi akurasi, terutama dalam menghadapi kompleksitas perubahan iklim. Pemahaman yang akurat terhadap ketersediaan air dalam suatu daerah tangkapan air sangat bergantung pada kemampuan perhitungan neraca air yang tepat. Neraca air merupakan komponen fundamental dalam sistem hidrologi, merefleksikan keseimbangan antara input (presipitasi) dan output (evaporasi, transpirasi, dan aliran permukaan). Salah satu pendekatan yang umum digunakan untuk menghitung neraca air adalah metode Thornthwaite dan Mather. Metode ini telah terbukti efektif dalam memperkirakan potensi air bulanan berdasarkan parameter klimatologis yang relatif sederhana, menekankan penggunaan data yang mudah diperoleh seperti curah hujan, data penggunaan lahan (vegetasi), suhu udara, serta sifat fisik tanah untuk memodelkan keseimbangan air suatu wilayah [4]. Keunggulan utama metode ini adalah kemampuannya dalam mengestimasi ketersediaan atau defisit air tanah tanpa memerlukan data muka air tanah secara langsung, menjadikannya relevan dan aplikatif, terutama di wilayah dengan keterbatasan data iklim atau hidrogeologi [5].

Beberapa tahun terakhir, kemajuan teknologi penginderaan jauh dan komputasi awan telah membuka peluang baru dalam studi hidrologi, khususnya dalam estimasi zona resapan air tanah (*groundwater recharge area*). Google Earth Engine (GEE) menjadi platform revolusioner dengan akses gratis ke beragam data penginderaan jauh dan kemampuan komputasi spasial-temporal skala besar tanpa memerlukan perangkat keras berkapasitas tinggi [6]. Berbeda dengan pendekatan konvensional yang

mengandalkan data lapangan dan pemrosesan lokal yang kompleks dan memakan waktu, GEE memungkinkan integrasi parameter iklim seperti curah hujan, evapotranspirasi, dan suhu secara efisien dan cepat, bahkan di wilayah dengan keterbatasan data. Dalam konteks ini, metode Thornthwaite dan Mather, yang berbasis pada estimasi neraca air menggunakan parameter klimatologi sederhana, dapat dioptimalkan secara signifikan melalui pemanfaatan GEE [7]. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi potensi zona resapan air tanah pada wilayah kajian dengan menerapkan metode Thornthwaite dan Mather yang didukung oleh pengolahan data spasial menggunakan GEE. Selain itu, studi ini juga membandingkan estimasi *recharge area* antara dua lokasi berbeda dalam satu kota yang sama guna mengkaji variasi spasial pengisian ulang akuifer berdasarkan perbedaan karakteristik fisik dan penggunaan lahan. Pendekatan ini diharapkan dapat meningkatkan akurasi dan efisiensi analisis *recharge* di tengah keterbatasan data *in-situ* serta menjadi landasan bagi perencanaan pengelolaan sumber daya air tanah yang lebih adaptif dan berkelanjutan

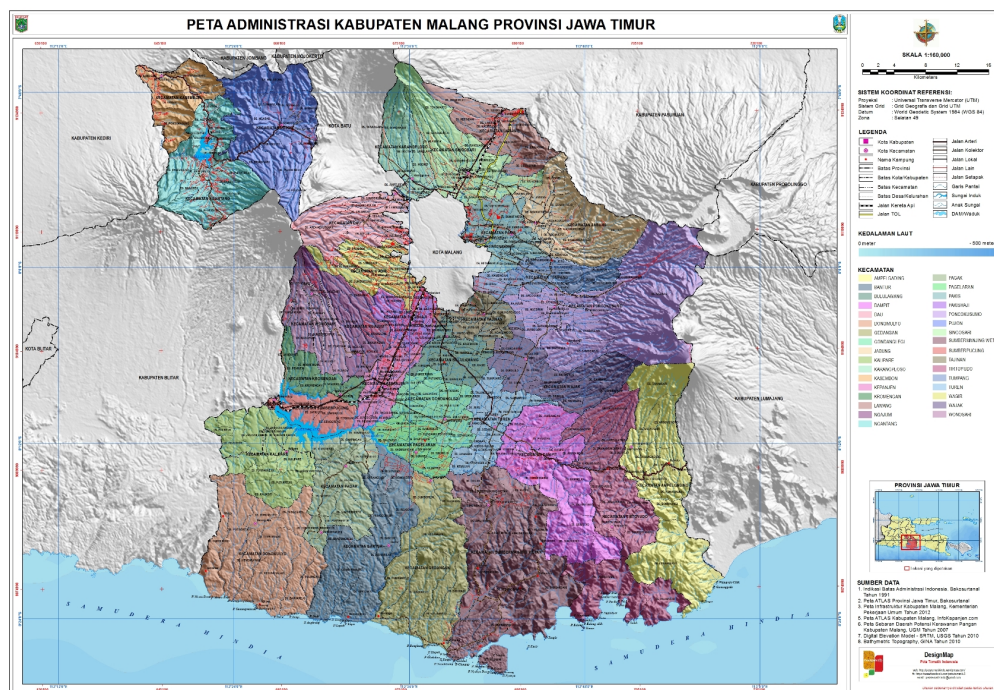
2. METODOLOGI

2.1 Pendekatan dan Rancangan Penelitian

Metode penelitian dengan pendekatan kuantitatif yang berfokus pada pemodelan spasial berbasis data sekunder. Seluruh analisis dilaksanakan dengan mengintegrasikan platform *Google Earth Engine* (GEE) dan *Google Colaboratory*. Kombinasi kedua platform ini memfasilitasi pemrosesan dan visualisasi data geospasial secara efisien dan skalabel. Pendekatan ini bertujuan utama untuk mengidentifikasi zona resapan air tanah (*groundwater recharge area*) berdasarkan karakteristik fisik tanah, serta melakukan perbandingan potensi resapan antar lokasi dalam cakupan spasial yang sama.

2.2 Lokasi Kajian

Lokasi kajian difokuskan pada -7.528147 LS dan 110.799716 BT, yang dipilih sebagai titik representatif berdasarkan kondisi hidrologi lokal. Analisis dilakukan pada resolusi spasial 1 km², dengan rentang temporal data yang mencakup periode tahun 2014 hingga 2024, untuk menangkap dinamika hidrologis dalam jangka waktu menengah hingga panjang. Peta administrasi Kabupaten Malang dapat dilihat pada Gambar 1.

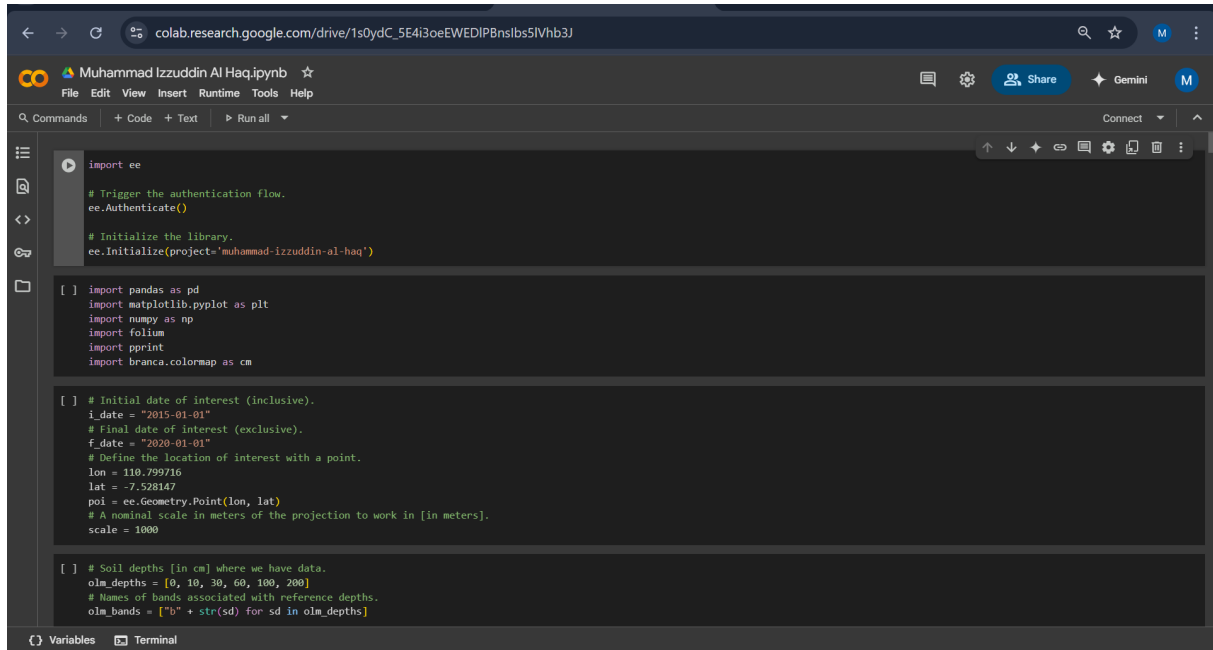


Gambar 1. Peta Administrasi Kabupaten Malang

2.4 Alat dan Perangkat Analisis

Beberapa platform dan pustaka perangkat lunak digunakan dalam penelitian ini, antara lain:

1. Google Earth Engine (GEE): untuk akuisisi dan pemrosesan data spasial berskala global.
2. Google Colaboratory (Colab): sebagai lingkungan pemrograman berbasis Python yang mendukung analisis interaktif tanpa ketergantungan pada spesifikasi perangkat keras lokal.
3. *Python libraries*: earthengine-api untuk mengakses data GEE, folium dan branca untuk visualisasi spasial interaktif, matplotlib dan numpy untuk analisis numerik dan plotting, pandas untuk manipulasi data tabular. Secara visual dapat dilihat pada Gambar 2.



```

import ee

# Trigger the authentication flow.
ee.Authenticate()

# Initialize the library.
ee.Initialize(project='muhammad-izzuddin-al-haq')

[ ] import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import folium
import pprint
import branca.colormap as cm

[ ] # Initial date of interest (inclusive).
i_date = "2015-01-01"
# Final date of interest (exclusive).
f_date = "2020-01-01"
# Define the location of interest with a point.
lon = 110.799716
lat = -7.528147
poi = ee.Geometry.Point(lon, lat)
# A nominal scale in meters of the projection to work in [in meters].
scale = 1000

[ ] # Soil depths [in cm] where we have data.
olm_depths = [0, 10, 30, 60, 100, 200]
# Names of bands associated with reference depths.
olm_bands = ["b" + str(sd) for sd in olm_depths]
  
```

Gambar 2. Platform Perangkat Lunak Google Collab dan Earth Engine

2.4 Tahapan Penelitian

Proses penelitian ini dilakukan secara sistematis dengan memanfaatkan integrasi antara Google Earth Engine (GEE) dan Google Colaboratory (Colab) dalam lingkungan pemrograman Python. Tahap pertama dimulai dengan autentikasi akun GEE agar dapat mengakses data spasial global secara langsung dari platform Colab. Setelah itu, titik lokasi kajian ditentukan menggunakan koordinat geografis yang dikonversi ke dalam bentuk geometri spasial, yang kemudian dijadikan sebagai pusat pengamatan. Resolusi spasial analisis ditetapkan sebesar 1.000 meter untuk memastikan cakupan yang representatif terhadap variasi karakteristik tanah di sekitarnya. Tahap selanjutnya dalam penelitian ini melibatkan ekstraksi data karakteristik tanah dari dataset OpenLandMap. Data yang diekstrak mencakup parameter kunci seperti fraksi pasir, fraksi lempung, dan kandungan karbon organik. Data ini dikumpulkan untuk kedalaman 0 hingga 200 cm, dengan pembagian berdasarkan interval kedalaman tertentu. Kandungan karbon organik kemudian dikonversi menjadi bahan organik total menggunakan faktor konversi standar yang relevan.

Berdasarkan parameter tersebut, dilakukan perhitungan dua variabel penting dalam retensi air tanah: kapasitas lapang (FC) dan titik layu permanen (PWP). Perhitungan ini memanfaatkan rumus fungsi pedotransfer (PTF) yang mengintegrasikan nilai fraksi tekstur tanah dan kandungan bahan organik pada setiap lapisan kedalaman. Hasil perhitungan FC dan PWP kemudian divisualisasikan dalam bentuk grafik batang vertikal untuk menunjukkan distribusinya dari permukaan hingga kedalaman 200 cm. Selanjutnya, potensi retensi air tanah dihitung sebagai selisih antara FC dan PWP pada masing-masing lapisan. Nilai ini merepresentasikan volume air yang berpotensi bergerak menuju zona jenuh sebagai bagian dari proses pengisian ulang air tanah.

Jika tersedia data dari titik lokasi lain, akan dilakukan analisis komparatif untuk menilai variasi spasial kemampuan tanah dalam menyimpan dan mengalirkan air. Pendekatan ini bertujuan untuk mengidentifikasi wilayah-wilayah dengan potensi recharge tertinggi, yang pada akhirnya dapat menjadi dasar pertimbangan dalam perencanaan konservasi dan pengelolaan sumber daya air tanah secara berkelanjutan.

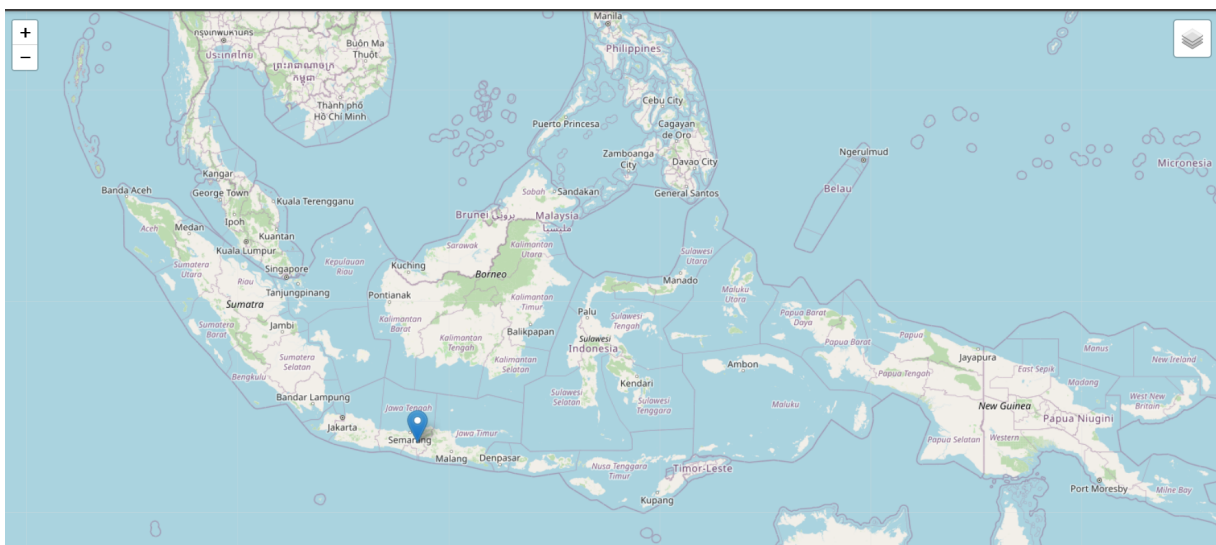
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Sifat Fisik Tanah Lokasi Kajian

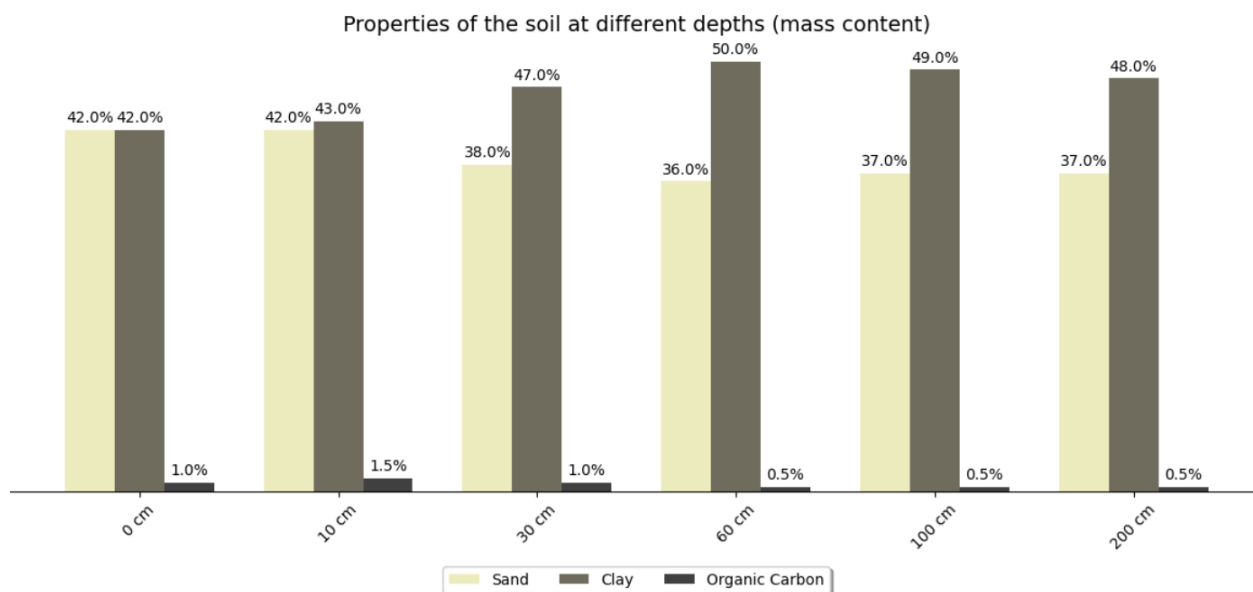
Lokasi kajian ini berada pada titik koordinat -7.528147 LS dan 110.799716 BT. Penentuan titik koordinat ini dilakukan untuk mengetahui sifat fisik tanah pada lokasi kajian. Lokasi kajian dapat dilihat pada Gambar 1. Sifat fisik tanah memainkan peran krusial dalam menentukan potensi suatu wilayah sebagai daerah resapan air (*recharge area*) karena secara langsung mempengaruhi kemampuan tanah dalam mendukung pergerakan, retensi, dan ketersediaan air.

Sifat fisik tanah memegang peranan vital dalam menentukan potensi suatu wilayah sebagai daerah resapan air (*recharge area*). Hal ini disebabkan oleh pengaruh langsung sifat fisik tanah terhadap kemampuan tanah dalam mendukung pergerakan, retensi, dan ketersediaan air. Karakteristik kunci seperti tekstur, struktur, porositas, dan kepadatan massa tanah secara langsung memengaruhi laju infiltrasi air ke dalam profil tanah dan kapasitas tanah untuk menahan air [8]. Sebagai contoh, tanah bertekstur kasar seperti pasir, dengan makropori yang dominan, menunjukkan laju infiltrasi yang tinggi namun kapasitas retensi airnya rendah. Sebaliknya, tanah liat, yang didominasi mikropori, memiliki kapasitas menahan air yang tinggi namun cenderung menghambat perkolasi air. Struktur tanah yang baik, seperti struktur granular atau remah (*crumb*), dapat meningkatkan porositas total dan distribusi pori, yang esensial untuk pergerakan air dan udara, serta mendukung pertumbuhan akar dan aktivitas mikroorganisme tanah [9].

Selain itu, total porositas dan distribusi ukuran pori (keseimbangan antara makropori dan mikropori) secara kolektif menentukan kemampuan tanah untuk menyimpan air dan memfasilitasi perkolasi menuju lapisan akuifer. Faktor-faktor ini tidak hanya memengaruhi dinamika hidrologi tanah, tetapi juga interaksi kimia dan biologi di dalamnya, menjadikan sifat fisik tanah sebagai parameter utama dalam evaluasi komprehensif potensi *recharge area* [10]. Data spesifik yang diperoleh dari lokasi kajian disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Peta Lokasi Kajian Recharge Area



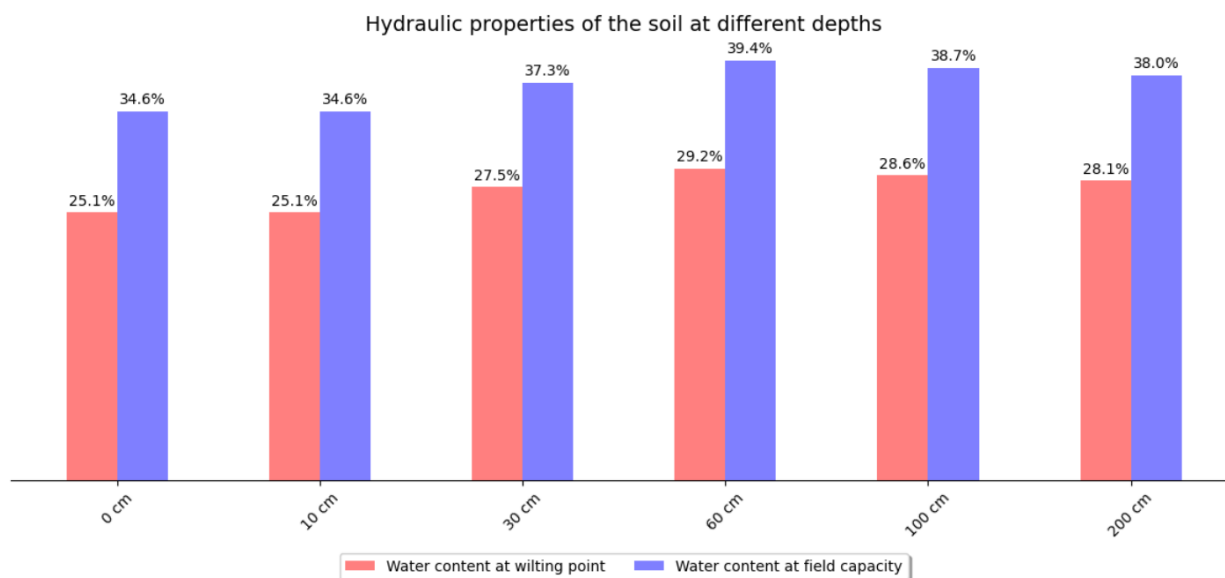
Gambar 4. Sifat Fisik Tanah Pada Berbagai Kedalaman Tanah Pada Lokasi Kajian

Data pada Gambar 4 menunjukkan variasi sifat fisik tanah pada kedalaman 0 hingga 200 cm, yang sangat memengaruhi potensi *recharge* air tanah. Lapisan permukaan (0–10 cm) memiliki kandungan pasir tinggi (43%) dan karbon organik yang relatif rendah (1,5%), yang menciptakan struktur tanah gembur dengan porositas tinggi, memungkinkan infiltrasi air hujan secara cepat dan efisien. Pada lapisan menengah (30–60 cm), kandungan lempung meningkat (47–50%) dan bahan organik menurun tajam (1,5%), menyebabkan infiltrasi melambat namun daya retensi air meningkat, menjadikan lapisan ini berperan sebagai penyangga air sebelum mencapai zona jenuh. Sementara itu, lapisan dalam (100–200 cm) menunjukkan keseimbangan antara pasir dan lempung (masing-masing 37%) dengan kandungan bahan organik rendah (0,5%), menghasilkan struktur tanah yang lebih padat dan kurang permeabel, sehingga berfungsi sebagai reservoir yang menyimpan air dalam jangka waktu lebih lama. Profil vertikal ini secara keseluruhan menunjukkan bahwa lokasi kajian memiliki karakteristik tanah yang mendukung proses *recharge* air tanah: infiltrasi baik di lapisan atas, retensi optimal di lapisan tengah, dan penyimpanan jangka panjang di lapisan bawah. Oleh karena itu, wilayah dengan struktur tanah seperti ini memiliki potensi tinggi sebagai area resapan air tanah alami dan sangat penting untuk dikonservasi dalam pengelolaan sumber daya air yang berkelanjutan.

3.2 Estimasi Sifat Hidraulik Tanah

Sifat hidraulik tanah diketahui dengan 2 parameter tanah yakni kapasitas lapang (*field capacity* – FC) dan titik layu permanen (*permanent wilting point* – PWP). Titik layu permanen (PWP) dan kapasitas lapang (FC) merupakan parameter kunci dalam menentukan zona ketersediaan air tanah yang berpengaruh langsung terhadap potensi *recharge area*. PWP menandai batas bawah ketersediaan air bagi tanaman, di mana tanaman tidak lagi mampu menyerap air sehingga terjadi kelayuan permanen. Ketika kelembaban tanah mencapai titik ini, seperti yang ditunjukkan oleh studi [11], proses evaporasi sangat menurun, yang kemudian meningkatkan fluks panas sensibel dan memicu perubahan sirkulasi atmosfer lokal serta memengaruhi distribusi spasial curah hujan, faktor penting dalam *recharge* air tanah. Sementara itu, FC biasanya dianggap sebagai batas atas ketersediaan air, yakni ketika air tanah tersisa setelah drainase gravitasi berhenti. Namun, penelitian [12] menunjukkan bahwa tanaman masih dapat mengambil air dari kondisi tanah yang lebih basah dari FC, sehingga FC bukanlah batas mutlak. Hal ini penting dalam konteks *recharge area*, karena air yang tidak segera diserap oleh tanaman atau menguap berpotensi meresap lebih dalam menuju akuifer. Parameter tanah seperti tekstur (fraksi pasir dan lempung), kandungan bahan organik, serta sifat hidraulik tanah (misalnya konduktivitas jenuh dan kurva retensi air) sangat memengaruhi nilai FC dan PWP, dan pada akhirnya menentukan seberapa besar air dapat tersimpan atau masuk ke zona jenuh [13]. Oleh karena itu, dalam menentukan dan mengelola *recharge*

area, penting untuk mempertimbangkan dinamika PWP dan FC secara spasial dan temporal agar estimasi infiltrasi dan resapan air tanah lebih akurat dan sesuai dengan kondisi biofisik setempat. Estimasi sifat hidraulik tanah pada lokasi kajian didapatkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Sifat Hidraulik Tanah Pada Lokasi Kajian

Gambar 5 menyajikan karakteristik hidraulik tanah pada berbagai kedalaman, khususnya terkait kandungan air pada titik layu permanen (PWP) dan kapasitas lapang (FC). Secara umum, terlihat adanya peningkatan kandungan air seiring bertambahnya kedalaman. Nilai kapasitas lapang secara konsisten lebih tinggi daripada titik layu, mengindikasikan volume air yang tersedia bagi tanaman.

Pada kedalaman 0–10 cm, nilai kapasitas lapang tercatat 34,6% dengan titik layu 25,1%, menghasilkan kisaran air tersedia sebesar 19,5%. Menariknya, pada kedalaman 30–200 cm, terjadi peningkatan kisaran air tersedia, di mana kapasitas lapang berkisar antara 27,5% hingga 28,1% dan titik layu antara 37,3% hingga 38%, menghasilkan kisaran air tersedia sekitar 9,8%–9,9%. Peningkatan kapasitas lapang pada kedalaman yang lebih dalam ini diduga kuat disebabkan oleh peningkatan fraksi lempung dan struktur tanah yang lebih padat, yang berkontribusi pada kemampuan tanah menyimpan air lebih besar.

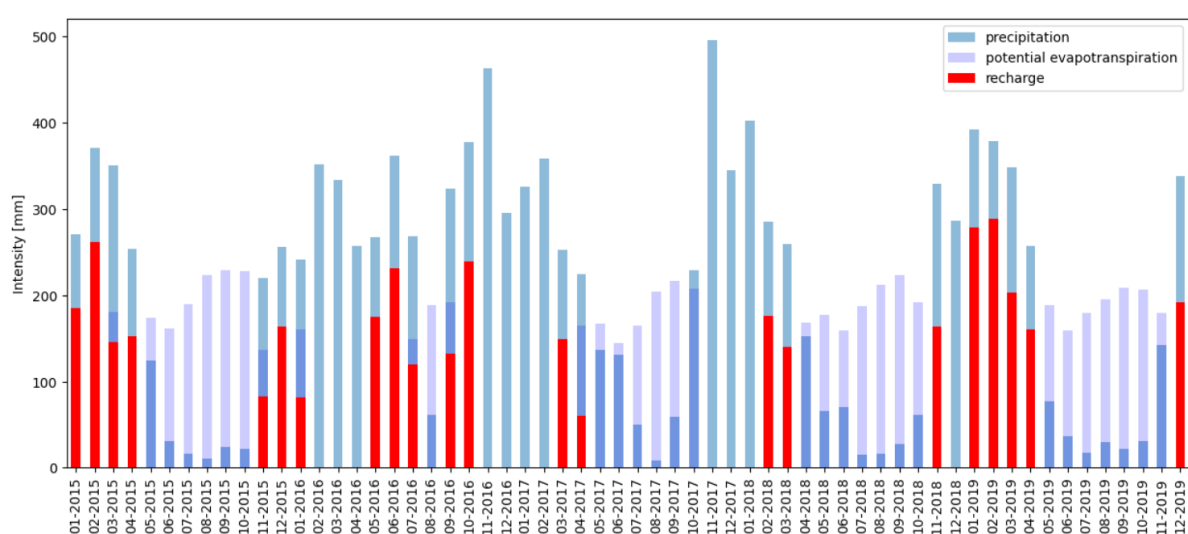
Meskipun demikian, tingginya nilai titik layu juga menunjukkan bahwa sebagian besar air tertahan kuat oleh matriks tanah dan tidak dapat diakses oleh tanaman. Dalam konteks potensi *recharge area*, profil tanah ini mengindikasikan bahwa air yang tidak dimanfaatkan oleh tanaman di lapisan atas masih berpotensi bergerak menuju lapisan bawah yang memiliki kapasitas retensi tinggi. Kondisi ini sangat mendukung akumulasi dan resapan air tanah yang lebih dalam. Oleh karena itu, profil tanah yang demikian mencerminkan karakter tanah yang kondusif untuk pengisian ulang akuifer secara perlahan, terutama jika didukung oleh curah hujan yang memadai dan kondisi permukaan tanah yang tidak tertutup oleh lapisan impermeabel.

3.3 Potensi Recharge Area

Recharge area atau daerah resapan air merupakan wilayah yang berperan penting dalam mengisi kembali air tanah melalui infiltrasi dari berbagai sumber air. Dalam konteks kawasan perkotaan, proses recharge menjadi lebih kompleks akibat adanya berbagai sumber buatan seperti kebocoran jaringan pipa air bersih, sistem pembuangan limbah, dan limpasan air hujan dari permukaan kedap air. Parameter yang memengaruhi *recharge area* mencakup sumber air (seperti curah hujan, air irigasi, dan limpasan

permukaan), karakteristik fisik lahan (termasuk persentase lahan tertutup/paved area), penggunaan lahan, densitas populasi, serta tingkat kebocoran jaringan distribusi air dan saluran pembuangan [14].

Recharge juga sangat dipengaruhi oleh variabilitas spasial dan temporal, yang perlu dikaji melalui pendekatan pemodelan numerik aliran air tanah dan transportasi zat terlarut. Dalam studi kasus di Barcelona, *recharge* dihitung menggunakan persamaan analitis yang mempertimbangkan proporsi air dari berbagai sumber, dan validasinya dilakukan melalui kalibrasi model terhadap data tinggi muka air tanah dan konsentrasi klorida [15]. Dengan pemahaman yang menyeluruh tentang parameter-parameter ini, evaluasi potensi *recharge area* dapat dilakukan secara akurat untuk mendukung pengelolaan air tanah yang berkelanjutan di wilayah perkotaan. Estimasi *recharge area* dilakukan dengan menghitung potensi presipitasi dan evapotranspirasi potensial yang terjadi pada lokasi kajian dengan mengkaji data iklim selama 4 tahun. Hasil estimasi pada lokasi kajian dapat dilihat pada **Gambar 6**.

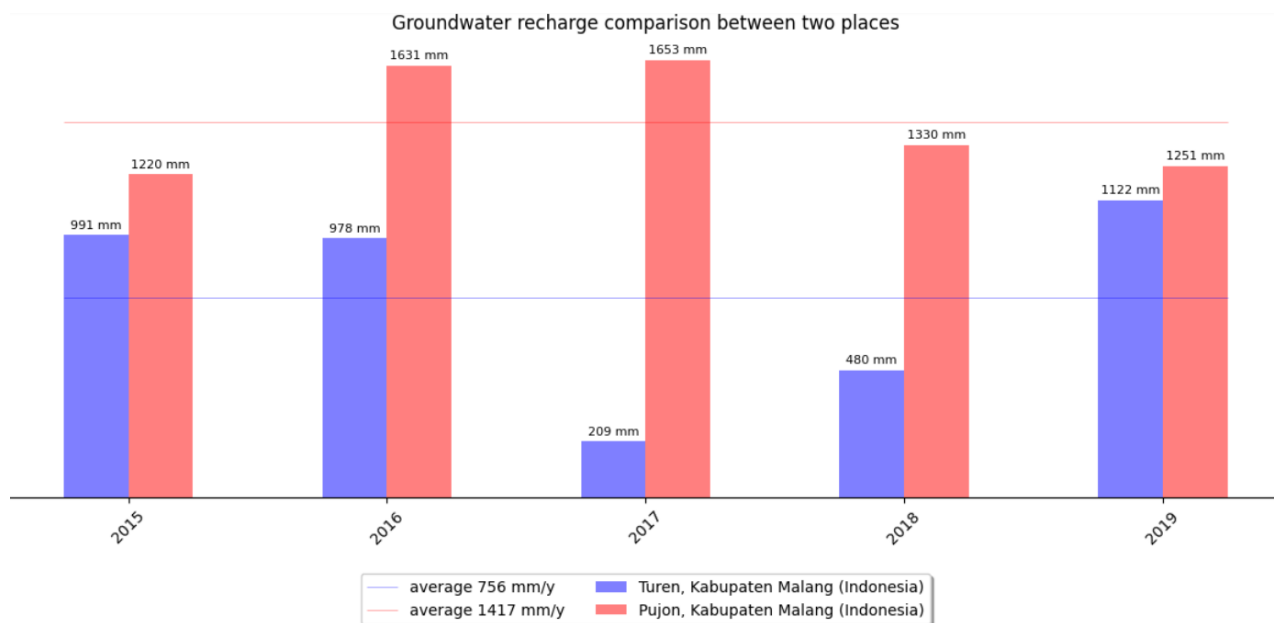


Gambar 6. Estimasi *Recharge Area* Pada Lokasi Kajian

Gambar 6 menampilkan dinamika bulanan curah hujan, evapotranspirasi potensial, dan *recharge* air tanah dalam periode tahunan. Pola yang terbentuk menunjukkan bahwa *recharge* air tanah secara konsisten hanya terjadi saat curah hujan melebihi evapotranspirasi potensial, yakni ketika terdapat surplus air dalam neraca hidrologi bulanan. Selama bulan-bulan basah, terutama pada puncak musim hujan, *recharge* meningkat tajam seiring lonjakan curah hujan yang signifikan dan evapotranspirasi yang relatif rendah [16]. Sebaliknya, pada musim kemarau atau bulan kering, *recharge* hampir nol karena sebagian besar air yang masuk segera hilang melalui evapotranspirasi, tanpa menyisakan cukup air untuk infiltrasi. Hal ini menegaskan bahwa *recharge* sangat tergantung pada selisih positif antara curah hujan dan evapotranspirasi, serta pada kapasitas tanah untuk menyimpan dan meloloskan air. Beberapa puncak *recharge* yang ekstrem juga terlihat bertepatan dengan peristiwa hujan intens, yang menandakan pentingnya hujan ekstrem sebagai kontributor utama pengisian ulang air tanah. Secara keseluruhan, grafik ini menggambarkan bahwa keberhasilan proses *recharge* dipengaruhi oleh faktor iklim (musim, intensitas dan distribusi hujan) dan bahwa periode *recharge* efektif sangat terbatas pada waktu-waktu tertentu dalam setahun. Oleh karena itu, pemahaman terhadap hubungan *tri-variate* ini sangat penting dalam perencanaan konservasi air tanah dan pengelolaan *recharge area* yang berkelanjutan.

3.4 Komparasi *Recharge Area* pada Dua Lokasi

Penentuan *recharge area* yang dilakukan pada lokasi kajian dilakukan komparasi dengan titik lain yang masih berada pada dalam satu kota. Hal ini dilakukan untuk mengetahui parameter yang paling mempengaruhi dalam penentuan *recharge area*. Komparasi ini dilakukan dengan memasukkan data koordinat yang berbeda dan melakukan perhitungan seperti sebelumnya. Komparasi yang telah dilakukan dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Komparasi *Recharge Area* Pada Lokasi Kajian

Grafik yang diperlihatkan pada Gambar 7 menunjukkan perbandingan tahunan *recharge* air tanah antara dua wilayah di Kabupaten Malang, yaitu Turen (ditampilkan dengan warna biru) dan Pujon (merah) selama periode 2015–2019. Secara konsisten, Pujon menunjukkan nilai *recharge* yang lebih tinggi dibandingkan Turen di hampir seluruh tahun pengamatan, dengan rata-rata tahunan sebesar 1417 mm/tahun, sedangkan Pujon hanya mencapai 756 mm/tahun. Puncak *recharge* terjadi pada tahun 2017, di mana Turen mencatat 209 mm dan Pujon 1653 mm, mengindikasikan adanya peristiwa hujan ekstrem atau kondisi hidroklimat yang sangat basah. Perbedaan antara kedua lokasi kemungkinan besar dipengaruhi oleh kombinasi faktor-faktor seperti topografi (Pujon berada di dataran tinggi), permeabilitas tanah, tingkat urbanisasi, dan tutupan vegetasi, yang semuanya memengaruhi kemampuan tanah untuk menginfiltirasi air hujan ke dalam lapisan bawah. Pola fluktuasi *recharge* ini juga memperlihatkan sensitivitas tinggi terhadap variabilitas iklim tahunan [17]. Secara keseluruhan, data ini menunjukkan bahwa Turen memiliki potensi lebih besar sebagai kawasan konservasi *recharge* air tanah, dan menegaskan pentingnya pendekatan spasial dan berbasis data jangka panjang dalam pengelolaan sumber daya air yang berkelanjutan.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis *recharge* air tanah antara dua wilayah di Kabupaten Malang, yaitu Turen dan Pujon selama periode 2015–2019, dapat disimpulkan bahwa Pujon memiliki potensi *recharge* yang lebih tinggi secara konsisten dibandingkan Turen. Rata-rata *recharge* tahunan di Pujon mencapai 1417 mm, sedangkan di Turen hanya 756 mm. Puncak *recharge* tertinggi terjadi pada tahun 2017, yang dipicu oleh curah hujan ekstrem, sebaliknya Turen di tahun yang sama memiliki nilai terendah. Faktor-faktor yang memengaruhi perbedaan ini mencakup topografi (Pujon berada di dataran tinggi), tingkat urbanisasi yang lebih rendah, serta struktur tanah yang lebih mendukung infiltrasi. Komparasi ini menunjukkan bahwa karakteristik fisik lahan dan kondisi lingkungan lokal sangat berpengaruh terhadap potensi *recharge*, sehingga pendekatan spasial dan berbasis data jangka panjang diperlukan dalam pengelolaan air tanah secara berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Goodarzi M, Abedi-Koupai J, Heidarpour M, Safavi HR. Evaluation of the effects of climate

- change on groundwater recharge using a hybrid method. 2015. *Water Resour Manage.* 1-16.
- [2] Gemitzi A, Ajami H, Richnow HH. Developing empirical monthly groundwater recharge equations based on modeling and remote sensing data-modeling future ground water recharge to predict potential climate change impacts. 2017. *J Hydrol.* 546:1-13.
- [3] Lias SA, Irmayani, Laban S. The potential of water availability in Maros Watershed using Thornthwaite-Mather water balance method. 2020. 1-7.
- [4] Nugroho AR, Tamagawa I, Riandraswari A, Febrianti T. Thornthwaite-Mather water balance analysis in Tambakbayan watershed, Yogyakarta, Indonesia. 2018. 1-10.
- [5] Berhanu KG, Lohani TK, Hatiye SD. Long-term spatiotemporal dynamics of groundwater storage in the data-scarce region: Tana sub-basin, Ethiopia. *Heliyon.* 10(3).
- [6] Singha C, Swain KC, Pradhan B, Rusia DK, Moghimi A, Ranjgar B. Mapping groundwater potential zone in the subarnarekha basin India, using a novel hybrid multi-criteria approach in google earth engine. 2024. *Heliyon.* 1-25.
- [7] Asrade TM, Kerebih MS, Assefa NY. Estimation of groundwater storage change and groundwater recharge using GRACE data in Jedeb Watershed under the application of google earth engine. 2024. *Air, Soil, and Water Research.* 17:1-10.
- [8] Kranz CN, McLaughlin RA, Johnson A, Miller G, Heitman JL. The effect of compost incorporation on soil physical properties in urban soils – a concise review. 2020. *Journal of Environmental Management.*
- [9] Evanylo GK, Porta SN, Li J, Shan D, Goatley JM, Maguire R. Compost practices for improving soil properties and turfgrass establishment and quality on a disturbed urban soil. 2016. *Compost Sci. Util.* 24(2):136-145.
- [10] Beck-Broichsitter S, Fleige H, Horn R. Compost quality and its function as a soil conditioner of recultivation layers – a critical review. 2018. *Int. Agrophys.* 32(1):11-18.
- [11] Hohenegger C, Stevens B. The role of the permanent wilting point in controlling the spatial distribution of precipitation. 2018. 5692-5697.
- [12] de Jong van Lier Q. Field capacity, a valid upper limit of crop available water. 201. *Agricultural Water Management.* 214-220.
- [13] Minasny B, McBratney AB. Limited effect of organic matter on soil available water capacity. 2017. *European Journal of Soil Science.* 69(1):39-47.
- [14] Tubau I, Vázquez-Suñé E, Carrera J, Valhondo C, Criollo R. Quantification of groundwater recharge in urban environments. 2017. *Science of the Total Environment.* 391-402.
- [15] Liu X, Zhang W, Zhang B, Yang Q, Chang J, Hou K. Diurnal variation in soil respiration under different land uses on Taihan Mountain, North China. 2016. *Atmos. Environ.* 125:283-293.
- [16] Fibriana R, Ginting Y S, Ferdiansyah E and Mubarak S. Analisis Besar Atau Laju Evapotranspirasi pada Daerah Terbuka Agrotekma J. Agroteknologi dan Ilmu Pertan. 2018. 2 130– 7.
- [17] Marganingrum, D., Sabar, A., Roosmini, D., & Pradono, P. Rainfall Variability and Landuse Conversion Impacts to Sensitivity of Citarum River Flow. In Forum Geografi. 2013.(Vol. 27, No. 1, pp. 11-22).