ANALISIS BESARAN NILAI EVAPOTRANSPIRASI POTENSIAL MENGGUNAKAN SISTEM INFORMASI GEOGRAFIS (SIG) DI WILAYAH KALIMANTAN UTARA

SKRIPSI

Disusun Oleh:

MUHAMMAD DIAN NUGRAHA

NPM. 202212020

PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS KALTARA

2026

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Muhammd Dian Nugraha

Npm : 202212020

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi yang saya buat dengan judul :

ANALISIS BESARAN NILAI EVAPOTRANSPIRASI POTENSIAL MENGGUNAKAN SISTEM INFORMASI GEOGRAFIS (SIG) DI WILAYAH KALIMANTAN UTARA

Merupakan salah satu persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Kaltara. Sejauh yang saya ketahui bukan merupakan tiruan atau duplikat untuk mendapatkan gelar sarjana di lingkungan Universitas Kaltara maupun di perguruan tinggi atau instansi manapun, kecuali bagian sumber informasi yang dicantumkan sebagaimana mestinya, saya bertanggung jawab sepenuhnya atas kebenaran dari skripsi ini.

Demikian pernyataan skripsi ini saya buat dengan sebenar-benarnya, tanpa ada paksaan dari pihak manapun. Saya siap mendapatkan sanksi akademis apabila dikemudian hari ditemukan pelanggaran terkait penyusunan skripsi ini.

Tanjung Selor, Juli 2026

METERAI TEMPEL

MUHAMMAD DIAN NUGRAHA

202212020

PENGESAHAN

Skripsi dengan judul

ANALISIS BESARAN NILAI EVAPOTRANSPIRASI POTENSIAL MENGGUNAKAN SISTEM INFORMASI GEOGRAFIS (SIG) DI WILAYAH KALIMANTAN UTARA

Disusun Oleh :

MUHAMMAD DIAN NUGRAHA
NPM. 202212020

Tanjung Selor, Juli 2026

Menyetujui,
Dosen Pembimbing

Ir. Rachel Zandra Singal, S.T., M.T.
NIDN : 11.031079.01

Dosen Penguji 1,

Arman, S.T., M.T.
NIDN : 11.141089.02

Dosen Penguji 2,

Ir. Fuad Harwadi, S.T., M.T.
NIDN : 11.280171.01

Menyetujui,
Ketua Jurusan Teknik Sipil

Ir. Rachel Zandra Singal, S.T., M.T.
NIDN : 11.031079.01

Mengetahui,
Dekan Fakultas Teknik

Ir. Enny Haryiyanti, S.T., M.T.
NIDN : 11.220786.02

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kami panjatkan kepada Tuhan yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunianya yang telah diberikan sehingga penulis dapat meyelesaikan Ujian Skripsi sebagai salah satu syarat untuk mendapatkan gelar sarjana dengan judul ’’ ANALISIS BESARAN NILAI EVAPORTRANSPIRASI POTENSIAL MENGGUNAKAN SISTEM INFORMASI GEOGRAFIS (SIG) DI WILAYAH KALIMANTAN UTARA’’ ini dapat diselesaikan dengan baik.

Penulisan tugas akhir ini merupakan salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Kaltara. Dalam penulisan tugas akhir ini, dan tidak lupa penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pihak yang telah banyak memberi bantuan baik berupa moril maupun materi sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi ini dengan baik dan tepat waktu. Oleh karena itu penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah Subhanahu Wa Ta'ala dan Rasulullah Muhammad Shallallahu 'Alaihi Wasallam.
2. Kepada kedua Orang Tua saya Bapak Yuyun Gunawan S.T. dan Ibu Juliana S.Sos yang selalu memberikan semangat dan dukungan doa selama penelitian ini.
3. Dr. Didi Ardiansyah, S.T.P., M.M., Selaku Rektor Universitas Kaltara.
4. Ir. Enny Harviyanti,S.T., M.T., selaku Dekan Fakultas Teknik.
5. Ir. Rachel Zandra Singal, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusn Teknik Sipil Sekaligus Dosen Pemimbing yang telah meluangkan waktu untuk membantu dan membimbing dalam penyusunan tugas akhir ini.
6. Arman, S.T., M.T., selaku Dosen Penguji 1 yang telah memberikan saran selama penyusunan tugas akhir ini.
7. Ir. Fuad Harwadi, S.T., M.T., selaku Dosen Penguji 2 yang telah memberikan saran selama penyusunan tugas akhir ini.
8. Arman, S.T., M.T., selaku Dosen Pemimbing Akademik yang telah memberikan nasehat dan arahan.

9. Seluruh Dosen Jurusan Teknik Sipil yang telah banyak memberikan ilmu dan pengetahuan selama perkuliahan.
10. Teman angkatan Tahun 2022 atau lebih tepatnya saudara Teknik yang telah memberikan dukungan, doa dan kata semangatnya.

Demikian yang penulis dapat sampaikan, semoga penelitian ini dapat bermanfaat dan mampu membantu mengurangi permasalahan yang terjadi. Penyusun mengharapkan kritik dan saran yang membangun yang sangat penulis harapkan. Semoga tugas akhir ini bisa bermanfaat bagi pembaca. Sekian dan Terima kasih.

Tanjung Selor, April 2026

MUHAMMAD DIAN NUGRAHA

NPM: 202212020

Muhammad Dian Nugraha
202212020
Departemen Teknik Sipil

Dosen Pembimbing
Ir. Rachel Zandra Singal, S.T., M.T

ANALISIS BESARAN NILAI EVAPORTRANSPIRASI POTENSIAL MENGGUNAKAN SISTEM INFORMASI GEOGRAFIS (SIG) DI WILAYAH KALIMANTAN UTARA

ABSTRAK

Evapotranspirasi Potensial (ETo) merupakan parameter kunci dalam analisis neraca air, perencanaan irigasi, dan perancangan infrastruktur keairan. Provinsi Kalimantan Utara (Kaltara) yang terletak di garis khatulistiwa memiliki karakteristik iklim tropis basah dengan aktivitas evapotranspirasi yang sangat dinamis. Namun, analisis hidrometeorologi regional di wilayah ini dihadapkan pada tantangan keterbatasan, ketidakberlanjutan (*missing data*), serta distribusi stasiun pantau cuaca bumi (BMKG) konvensional yang tidak merata di atas luasan wilayah sebesar 75.000 km^2. Penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi dan memetakan distribusi spasial-temporal nilai ETo bulanan di seluruh kabupaten/kota Provinsi Kalimantan Utara menggunakan integrasi teknologi Sistem Informasi Geografis (SIG) dan data reanalisis satelit. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode empiris standar internasional Penman-Modifikasi (FAO-24). Input parameter klimatologi jangka panjang (periode 10 tahun, 2016–2025) meliputi temperatur udara (T, Tmax, Tmin), kelembapan relatif (RH), kecepatan angin (u2), dan radiasi matahari gelombang pendek bersih (Rs) yang diakuisisi dari data berbasis grid platform NASA POWER (asimilasi model atmosfer global MERRA-2). Visualisasi dan pemetaan distribusi spasial dilakukan memanfaatkan teknik interpolasi berbasis SIG.

Hasil penelitian ini menyajikan peta sebaran spasial-temporal ETo kontinu tingkat provinsi yang informatif guna mengidentifikasi wilayah dengan tingkat kehilangan air permukaan tertinggi di Kaltara. Berdasarkan pemetaan tersebut, nilai ET_0 tertinggi tercatat di Tarakan pada bulan April sebesar 5,23 mm/hari, sedangkan nilai terendah teridentifikasi di Bulungan pada bulan Januari sebesar 3,70 mm/hari. Secara praktis, luaran penelitian ini berkontribusi sebagai basis data hidrometeorologi sekunder yang valid bagi perencana infrastruktur sipil dalam menghitung debit andalan, mendesain kapasitas tampung waduk/bendungan, sistem drainase, serta manajemen alokasi air irigasi regional pada wilayah tropis basah yang minim infrastruktur pemantauan darat.

Kata Kunci : Evapotranspirasi Potensial (ETo), Penman-Modifikasi, NASA POWER, Sistem Informasi Geografis (SIG), Kalimantan Utara.

Muhammad Dian Nugraha
202212020
Department of Civil Engineering

Supervising Lecturer
Ir. Rachel Zandra Singal, S.T., M.T

ANALYSIS OF POTENTIAL EVAPORANSPIRATION VALUES USING A GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM (GIS) IN THE NORTH KALIMANTAN REGION

ABSTRAK

Potential Evapotranspiration (ETo) is a key parameter in water balance analysis, irrigation planning, and water infrastructure design. North Kalimantan Province (Kaltara), located on the equator, has a humid tropical climate with highly dynamic evapotranspiration activity. However, regional hydrometeorological analysis in this region is faced with the challenges of limitations, unsustainability (missing data), and uneven distribution of conventional weather monitoring stations (BMKG) over an area of 75,000 km2. This study aims to estimate and map the spatial-temporal distribution of monthly ETo values across all districts/cities in North Kalimantan Province using the integration of Geographic Information System (GIS) technology and satellite reanalysis data. The method used in this study is the international standard empirical method Penman-Modification (FAO-24). Long-term climatological input parameters (10 years, 2016–2025) include air temperature (T, Tmax, Tmin), relative humidity (RH), wind speed (u2), and net shortwave solar radiation (Rs) acquired from grid-based data from the NASA POWER platform (assimilation of the MERRA-2 global atmospheric model). Spatial distribution visualization and mapping were performed using GIS-based interpolation techniques.

The results of this study present an informative provincial-level continuous spatial-temporal distribution map of ETo to identify areas with the highest surface water loss rates in North Kalimantan. Based on this mapping, the highest ET0 value was recorded in Tarakan in April at 5.23 mm/day, while the lowest value was identified in Bulungan in January at 3.70 mm/day. Practically, this research output contributes as a valid secondary hydrometeorological database for civil infrastructure planners in calculating reliable discharge, designing reservoir/dam storage capacity, drainage systems, and managing regional irrigation water allocation in humid tropical regions with minimal ground monitoring infrastructure.

Keywords: Potential Evapotranspiration (ETo), Penman-Modification, NASA POWER, Geographic Information System (GIS), North Kalimantan.

DAFTAR ISI

Halaman

HALAMAN JUDUL ..... **i**

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI ..... **ii**

PENGESAHAN ..... **iii**

KATA PENGANTAR ..... **iv**

ABSTRAK ..... **vi**

DAFTAR ISI ..... **viii**

DAFTAR GAMBAR ..... **x**

DAFTAR TABEL ..... **xi**

DAFTAR RUMUS ..... **xii**

BAB I PENDAHULUAN **1**

1.1. Latar Belakang 1

1.2. Rumusan Masalah 8

1.3. Tujuan Penelitian 9

1.4. Batasan Penelitian 9

1.5. Manfaat Penelitian 9

1.6. Sistematika Penelitian 10

BAB II TINJAUAN PUSTAKA **11**

2.1. Hidrologi dan Siklus Air 11

2.1.1. Parameter-parameter Hidrologi 12

2.1.2. Mekanisme Siklus Hidrologi 14

2.2. Pengertian Evaportranspirasi 16

2.3. Parameter Klimatologi Evapotranspirasi Potensial 16

2.4. Perhitungan Evaportranspirasi Potensial 17

2.5. Metode Sistem Informasi Geografis 20

2.5.1. ArcGIS 21

2.5.2. Interpolasi Spasia Dalam SIG 23

2.5.3 Interpolasi Inverse Distance Weighting (IDW) 24

2.5.4. Gradasi Warna Dalam Peta Interpolasi ET_0 24

2.6. Layanan Informasi Klimatologi Sebagai Input Analisis ET_0 27

2.7. Peta Evaportranspirasi Berbasis SIG 29

2.8. Penelitian Terdahulu 29
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....34
3.1. Lokasi Penelitian 36
3.2. Pendekatan Penelitian 36
3.2.1. Pendekatan Kuantitatif..... 36
3.2.2. Deskriptif..... 36
3.3. Pengumpulan Data 37
3.3.1. Waktu Penelitian..... 37
3.3.2. Peralatan Penelitian..... 37
3.3.3. Teknik Pengumpulan Data..... 38
3.3.4. Data Sekunder..... 39
3.4. Bagan Alir Penelitian 42
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 43
4.1 Data Klimatologi Rata-rata Stasiun 43
4.2 Nilai Evapotranspirasi Potensial Per Stasiun..... 47
4.3 Analisis ETP Bulanan Evaportranspirasi Potensial..... 56
4.4 Pemetaan Evaportranspirasi Potensial 59
4.5 Deskripsi Peta Sebaran Bulanan 72
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN..... 73
5.1 Kesimpulan 73
5.2 Saran..... 74
DAFTAR PUSTAKA..... 76
DAFTAR RIWAYAT HIDUP 77
LAMPIRAN..... 78

DAFTAR GAMBAR

1.1.	Lokasi Penelitian	5
2.1.	Siklus Hidrologi	11
3.1.	Batas Wilayah Kalimantan Utara	34
4.1.	Nilai Evapotranspirasi Potensial	58
4.2.	Peta ETP Bulan Januari	60
4.3.	Peta ETP Bulan Februari	61
4.4.	Peta ETP Bulan Maret	62
4.5.	Peta ETP Bulan April	63
4.6.	Peta ETP Bulan Mei	64
4.7.	Peta ETP Bulan Juni	65
4.8.	Peta ETP Bulan Juli	66
4.9.	Peta ETP Bulan Agustus	67
4.10.	Peta ETP Bulan September	68
4.11.	Peta ETP Bulan Oktober	69
4.12.	Peta ETP Bulan November	70
4.13.	Peta ETP Bulan Desember	71

DAFTAR TABEL

2.1	Tools ArcGIS yang Digunakan dalam Penelitian.....	22
2.2	Skema Gradasi Warna.....	25
2.3	Perbandingan Metode Klasifikasi untuk Peta ETP	26
3.1	Data Administrasi Wilayah Provinsi Kalimantan Utara	35
3.2	Stasiun Meteorologi BMKG	35
3.3	Peralatan Penelitian	37
3.4	Jenis Data Klimatologi yang diunduh dari Nasa Power	40
3.5	Pembagian Peran ArcGIS dalam penelitian	41
4.1	Rata-rata Parameter Klimatologi Stasiun Bulungan (2016–2025)	43
4.2	Rata-rata Parameter Klimatologi Stasiun Tarakan (2016–2025) .	44
4.3	Rata-rata Parameter Klimatologi Stasiun Nunukan (2016–2025)	45
4.4	Rata-rata Parameter Klimatologi Stasiun Malinau (2016–2025)..	45
4.5	Rata-rata Parameter Klimatologi Stasiun Krayan (2016–2025) ...	46
4.6	Rata-rata Parameter Klimatologi Stasiun Berau (2016–2025).....	46
4.7	Faktor Koreksi c (Tabel FAO Paper 24)	49
4.8	Nilai besaran evapotranspirasi Tarakan periode 2016-2025	50
4.9	Nilai besaran evapotranspirasi Bulungan periode 2016-2025.....	51
4.10	Nilai besaran evapotranspirasi Nunukan periode 2016-2025	52
4.11	Nilai besaran evapotranspirasi Malinau periode 2016-2025.....	53
4.12	Nilai besaran evapotranspirasi Krayan periode 2016-2025	54
4.13	Nilai besaran evapotranspirasi Berau periode 2016-2025.....	55
4.14	Rekap Nilai ET_0	59

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. LATAR BELAKANG

Air merupakan sumber daya alam yang tidak dapat dipisahkan dari kehidupan manusia maupun keberlangsungan ekosistem di muka bumi. Hidrologi merupakan cabang ilmu teknik sipil/kebumian yang mempelajari perjalanan air di bumi: mulai dari proses terjadinya, pergerakan/sirkulasinya, distribusinya di alam, hingga sifat-sifat fisik dan kimianya serta reaksinya terhadap lingkungan dan makhluk hidup. Dalam siklus hidrologi, air bergerak secara terus-menerus melalui berbagai proses fisik, salah satunya adalah evapotranspirasi. Proses ini mencakup penggabungan antara evaporasi dan tranpirasi.

Evaporasi adalah suatu proses fisika di mana terjadi perubahan fase zat cair (air) menjadi gas atau uap air, yang kemudian bergerak dari permukaan bumi menuju ke atmosfer. Proses ini terjadi secara murni pada permukaan benda-benda mati atau badan air terbuka (*free water surfaces*), seperti laut, danau, sungai, rawa, permukaan tanah (*bare soil*), hingga air yang terperangkap di atas permukaan buatan seperti perkerasan jalan atau atap bangunan. Evaporasi membutuhkan energi panas (lazimnya dari radiasi matahari) untuk memutus ikatan hidrogen antar molekul air di permukaan, sehingga molekul tersebut memiliki energi kinetik yang cukup untuk melepaskan diri menjadi uap. Laju evaporasi sangat dipengaruhi oleh ketersediaan air di permukaan dan kemampuan atmosfer untuk menampung uap air tersebut. Pada badan air terbuka, evaporasi berlangsung tanpa batas selama energi panas tersedia. Namun, pada permukaan tanah, laju evaporasi akan menurun drastis seiring dengan mengeringnya lapisan tanah bagian atas, karena air di dalam pori-pori tanah harus melawan gaya kapiler dan hisapan matriks tanah untuk dapat menguap ke permukaan.

Transpirasi adalah proses penguapan air yang dilepaskan oleh jaringan tanaman hidup ke atmosfer melalui proses fisiologisnya. Berbeda dengan evaporasi yang merupakan fenomena fisika murni, transpirasi merupakan fenomena biologis yang dikontrol secara ketat oleh aktivitas tanaman. Air diserap oleh sistem perakaran tanaman dari dalam tanah untuk mengangkut unsur hara dan nutrisi menuju batang dan daun. Setelah proses fotosintesis dan metabolisme selesai, sebagian besar air (mencapai lebih dari 95%) yang diserap tersebut tidak dikonsumsi oleh tanaman, melainkan dilepaskan kembali ke udara dalam bentuk uap air melalui pori-pori mikro pada daun yang disebut stomata (mulut daun).

Evapotranspirasi merupakan parameter kesatuan yang merepresentasikan total volume air yang kembali ke atmosfer melalui kombinasi dua proses simultan, yaitu evaporasi dari permukaan tanah/badan air dan transpirasi dari jaringan vegetasi yang hidup di atas lahan tersebut. Di dalam ekosistem alamiah yang tertutup oleh vegetasi, kedua proses ini terjadi secara bersamaan dan saling tumpang tindih. Penguapan dari tanah di bawah tajuk tanaman (evaporasi) terjadi berbarengan dengan penguapan dari daun tanaman itu sendiri (transpirasi). Sangat sulit bahkan hampir mustahil untuk memisahkan secara akurat berapa milimeter air yang menguap dari tanah dan berapa milimeter yang berasal dari stomata daun dalam satu hamparan lahan tunggal. Oleh karena itu, para ahli hidrologi mengintegrasikan kedua fenomena ini menjadi satu istilah tunggal, yaitu evapotranspirasi. Nilai Evaportranspirasi inilah yang menjadi komponen "kehilangan air" (*water loss*) yang sesungguhnya dalam perhitungan siklus hidrologi pada suatu daerah aliran sungai (DAS) atau kawasan budidaya. sehingga menjadi komponen kunci dalam neraca air suatu wilayah. Secara global, evapotranspirasi diperkirakan menyumbang sekitar 60 hingga 65 persen dari total curah hujan yang jatuh ke daratan, menjadikannya variabel hidrologi yang paling dominan dalam siklus air (Allen et al., 1998). Pemahaman mendalam tentang besaran evapotranspirasi menjadi fondasi penting dalam berbagai perencanaan teknik sipil yang berkaitan dengan pengelolaan sumber daya air.

Evapotranspirasi potensial (ETp) memegang peranan sentral dalam menentukan neraca air suatu wilayah. Bagi seorang perencana infrastruktur, nilai ETp yang akurat sangat dibutuhkan untuk menghitung kebutuhan air irigasi, mendesain kapasitas waduk, dan memprediksi ketersediaan air tanah (Hadi dkk., 2021). Tanpa estimasi ETp yang tepat, risiko kegagalan fungsi infrastruktur air atau pemborosan sumber daya air akan meningkat secara signifikan. Untuk mengestimasi nilai ETp menggunakan metode standar internasional seperti rumus *Penman-Modifikasi*, diperlukan pemahaman mendalam terhadap empat parameter klimatologi utama yang saling berinteraksi. Pertama, Radiasi Matahari merupakan penggerak utama dari seluruh proses penguapan di bumi. Kedua, Temperatur Udara (T) menentukan kapasitas tampung udara terhadap uap air. Tingginya temperatur udara juga meningkatkan energi kinetik molekul air, sehingga mempercepat laju pelepasan uap air ke udara. Ketiga, Kelembapan Relatif (RH) merepresentasikan rasio tekanan uap air aktual di udara dibandingkan dengan tekanan uap jenuhnya pada suhu yang sama. Keempat, Kecepatan Angin (U_2) Berperan penting dalam proses transportasi massa uap air. Ketika evaporasi dan transpirasi terjadi, lapisan udara di atas permukaan vegetasi akan menjadi sangat lembap dan jenuh. Jika tidak ada angin, proses penguapan akan terhenti. Angin berfungsi untuk menyapu atau memindahkan udara lembap tersebut dan menggantikannya dengan massa udara baru yang lebih kering, sehingga gradien tekanan uap air terjaga dan proses penguapan dapat terus berlangsung secara kontinu.

Parameter ETp bukan sekadar data cuaca biasa, melainkan komponen input yang sangat krusial dalam berbagai analisis rekayasa infrastruktur keairan. Dasar kontinuitas hidrologi menyatakan bahwa perubahan tampungan air dipengaruhi oleh input dan output. Curah hujan adalah input, sedangkan ETp adalah komponen output utama di samping aliran permukaan. Tanpa akurasi nilai ETp, perhitungan sisa air yang tersedia untuk dimanfaatkan manusia tidak akan pernah akurat. Pemahaman mendalam mengenai komponen siklus ini menjadi pondasi utama dalam perencanaan bangunan air, sistem irigasi, hingga

manajemen sumber daya air wilayah sungai. Salah satu komponen yang paling kritis namun sering kali sulit diukur dengan presisi tinggi adalah evapotranspirasi, yang mencakup penguapan dari permukaan air dan tanah serta transpirasi dari vegetasi.

Secara konseptual, penelitian ini tetap menggunakan istilah Evapotranspirasi Potensial (ETP) pada judul dan kerangka teori utama untuk merepresentasikan laju maksimum kehilangan air ke atmosfer dari permukaan vegetasi rata-rata yang cukup air. Namun demikian, secara metodologis dan teknis operasional, perhitungan ETP dalam penelitian ini diestimasi menggunakan metode Penman Modifikasi FAO-24 yang secara matematis menghasilkan ET_0.

Secara eksplisit bahwa ET_0 dan ETP secara teoritis tidak bersifat identik. Penerapan ET_0 melalui metode Penman Modifikasi FAO-24 dipilih dan ditegaskan sebagai pendekatan operasional terbaik dalam mengestimasi ETP di wilayah kajian. Keputusan ini didasarkan pada pertimbangan rasional bahwa metode FAO-24 mampu mengakomodasi keterbatasan data empiris di lapangan dengan tetap memadukan faktor ketersediaan energi (radiasi matahari) dan kemampuan aerodinamis atmosfer secara presisi, sehingga nilai ET_0 yang dihasilkan memiliki tingkat keandalan dan validitas ilmiah yang paling representatif untuk mendekati nilai ETP aktual di daerah penelitian.

Indonesia, sebagai negara tropis dengan radiasi matahari yang tinggi sepanjang tahun, memiliki karakteristik penguapan yang sangat dinamis. Wilayah Kalimantan, khususnya Provinsi Kalimantan Utara, memiliki tutupan lahan berupa hutan hujan tropis yang luas serta jaringan sungai yang masif. Kondisi ini menyebabkan proses evapotranspirasi di wilayah ini berlangsung sangat aktif dan menjadi faktor dominan dalam siklus hidrologi lokal. Secara astronomis, Kalimantan Utara terletak di sekitar garis khatulistiwa.

Sumber : *paintmaps.com/id/peta*

Gambar 1.1 Lokasi Penelitian

Posisi geografis ini menyebabkan wilayah Kaltara menerima paparan radiasi matahari gelombang pendek secara intensif dengan durasi yang stabil sepanjang tahun. Kondisi ini menghasilkan rata-rata temperatur tahunan yang tinggi serta kelembapan udara yang konstan tinggi akibat karakteristik iklim tropis basah. Pola pemanfaatan lahan di Kaltara saat ini didominasi oleh konversi lahan menjadi kawasan perkebunan monokultur skala besar, dengan komoditas utama berupa kelapa sawit. Akibat karakteristik biologis ini, tanaman kelapa sawit memiliki laju transpirasi yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan tanaman hutan homogen berdaun jarum atau lahan semak belukar.

Tantangan utama dalam analisis hidrometeorologi di Provinsi Kalimantan Utara adalah distribusi stasiun meteorologi bumi yang tidak merata dan jumlahnya yang sangat terbatas jika dibandingkan dengan luas wilayahnya yang mencapai lebih dari 75 ribu kilometer persegi. Banyak area strategis, terutama di wilayah pedalaman dengan topografi kompleks seperti Kabupaten Malinau, Nunukan, hingga dataran tinggi Krayan, yang tidak terjangkau oleh sensor fisik di darat. Kesenjangan data spasial ini menjadi hambatan serius bagi analisis hidrologi yang komprehensif, khususnya dalam pemodelan neraca air wilayah (Prasetyo, 2023).

Keterbatasan alat ukur konvensional di permukaan bumi sering kali diperparah oleh kendala teknis penyiaran data seketika (*real-time telemetry*). Platform penyedia data sinoptik stasiun bumi seperti Nasa Power, meskipun menyajikan parameter aktual, sering kali menghasilkan rekaman data yang terputus, memiliki persentase data hilang (*missing data*) yang tinggi, atau tidak konsisten akibat gangguan jaringan komunikasi dan biaya pemeliharaan alat yang tinggi di daerah terpencil perbatasan. Kondisi ekosistem data yang tidak kontinu ini menuntut adanya inovasi dalam perolehan parameter iklim jangka panjang yang tidak lagi bergantung sepenuhnya pada keterbatasan stasiun fisik di lokasi, melainkan beralih memanfaatkan kemajuan teknologi penginderaan jauh (*remote sensing*) dan data reanalisis global.

Pemanfaatan data satelit meteorologi dan model asimilasi asinkron kini menjadi alternatif yang sangat valid dan telah diakui secara internasional dalam dunia akademik serta praktisi teknik sipil. Satelit mampu menyediakan parameter cuaca global secara kontinu tanpa adanya celah kekosongan data (*data gap*). Salah satu sumber data berbasis grid terkalibrasi yang sangat potensial namun belum banyak dieksplorasi secara spesifik untuk wilayah Kalimantan Utara adalah platform ***Nasa Power* (*Prediction of Worldwide Energy Resources*)**.

Data *Nasa Power* memanfaatkan asimilasi model atmosfer global **MERRA-2 (*Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications*)** yang menyediakan akses data klimatologi historis berbasis resolusi grid. Platform ini mencakup parameter suhu udara permukaan (T, Tmax, Tmin), kelembapan relatif (RH), kecepatan angin (u2), dan yang paling krusial adalah parameter radiasi matahari gelombang pendek bersih (Rs atau Rn). Kombinasi parameter ini memenuhi kebutuhan input wajib dalam rumus empiris standar evaporasi dunia, yaitu metode Penman modifikasi FAO-24. Keunggulan utama data berbasis grid dari *Nasa Power* ini adalah kemampuannya memberikan kontinuitas data 100% serta akomodasi nilai elevasi wilayah, sehingga dapat menjadi solusi mutakhir atas kekosongan data pada area pedalaman yang tidak memiliki stasiun fisik bumi.

Penerapan Sistem Informasi Geografis (SIG) memungkinkan hasil perhitungan Evapotranspirasi Potensial (ET_0) bulanan tersebut divisualisasikan dalam bentuk peta spasial kontinu yang informatif di tingkat provinsi. Melalui SIG, analisis tidak hanya terpaku pada angka rata-rata tabular stasiun, melainkan dapat memodelkan pola distribusi penguapan di seluruh bentang alam Kalimantan Utara secara spasial (Wibowo dkk., 2024). Visualisasi geo-klimatologi ini sangat membantu dalam mengidentifikasi wilayah yang memiliki tingkat kehilangan air permukaan tertinggi, sehingga skala prioritas manajemen dan alokasi air waduk maupun irigasi dapat ditentukan secara rasional berbasis data spasial.

Penelitian terdahulu mengenai evapotranspirasi di Indonesia sering kali hanya berfokus pada Pulau Jawa dengan ketersediaan stasiun bumi BMKG yang rapat dan lengkap. Penelitian oleh Ramadhan (2022) menunjukkan bahwa penggunaan data pemodelan iklim global untuk estimasi parameter penguapan di wilayah dengan karakteristik geografi yang luas memiliki tingkat korelasi yang kuat dengan data lapangan. Namun, penerapan khusus menggunakan integrasi data satelit grid *Nasa Power* untuk pemetaan temporal evapotranspirasi mencakup seluruh kabupaten di Kalimantan Utara masih sangat jarang dilakukan.

Kesenjangan penelitian (*research gap*) inilah yang ingin diisi melalui penelitian ini. Sebagian besar studi hidrologi sebelumnya di Kalimantan Utara masih bersifat sektoral pada satu daerah aliran sungai (DAS) kecil dan menggunakan metode pendekatan manual yang sulit diperbarui secara cepat. Penelitian ini hadir untuk menyempurnakan metodologi perhitungan hidrologi regional dengan mengintegrasikan keandalan kontinuitas data *Nasa Power* dan teknik pengolahan interpolasi SIG yang lebih modern, efisien, serta memiliki cakupan wilayah yang utuh dalam satu provinsi.

Tantangan teknis dalam penelitian ini terletak pada validasi parameter makro grid satelit terhadap kondisi elevasi aktual di lapangan. Namun, dengan penerapan algoritma koreksi tekanan atmosfer lokal dan pemanfaatan koefisien penyesuaian iklim tropis basah, optimasi nilai ET_0 yang presisi tetap dapat

dicapai. Hal ini akan memberikan kontribusi penting bagi pengembangan standar perhitungan kebutuhan air dan rancangan hidrologi di daerah tropis basah yang minim infrastruktur pemantauan darat (Lubis dkk., 2025).

Alasan utama mengapa penelitian ini sangat mendesak adalah untuk mendukung perencanaan ketahanan air dan desain infrastruktur sipil di Kalimantan Utara dalam jangka panjang. Tanpa data ET_0 historis yang akurat, pembangunan saluran irigasi, bendungan, spillway, dan sistem drainase perkotaan hanya akan didasarkan pada asumsi parameter yang lemah. Hal ini sangat berisiko karena dapat memicu kegagalan struktural maupun fungsional bangunan air akibat kesalahan estimasi debit andalan, kapasitas tampung, dan analisis neraca air.

Urgensi penelitian ini juga berkaitan erat dengan isu perubahan iklim global yang memicu pergeseran pola cuaca ekstrem di wilayah ekuator. Pemetaan ETo berbasis SIG ini akan menjadi alat bantu (*decision support tool*) bagi pemerintah daerah dan praktisi teknik sipil dalam melakukan adaptasi perencanaan infrastruktur tangguh iklim. Oleh karena itu, analisis besaran nilai evapotranspirasi potensial menggunakan data platform *Nasa Power* berbasis SIG di Kalimantan Utara sangat perlu dilakukan guna menghasilkan basis data hidrologi regional yang valid, kontinu, terbuka, dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

1.2. RUMUSAN MASALAH

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana karakteristik dan besaran nilai ET_0 di wilayah Kalimantan Utara berdasarkan ekstraksi data *Nasa Power* dalam kurun waktu 10 tahun (2016-2025)?
2. Bagaimana pola persebaran spasial ET_0 di seluruh wilayah Provinsi Kalimantan Utara yang divisualisasikan melalui System Information Geografis (SIG)?

1.3. TUJUAN PENELITIAN

Berdasarkan rumusan masalah yang telah ditetapkan, maka tujuan penelitian ini adalah:

1. Mengetahui besaran nilai ET_0 secara kuantitatif di wilayah Kalimantan Utara dengan memanfaatkan parameter klimatologi dari data *Nasa Power*.
2. Memetakan distribusi spasial nilai ET_0 di Provinsi Kalimantan Utara menggunakan analisis interpolasi dalam SIG untuk menyajikan informasi visual yang komprehensif mengenai zona Evaportranspirasi.

1.4. BATASAN PENELITIAN

Batasan penelelitian pada penelitian ini yaitu sebagai berikut.

1. Data klimatologi yang digunakan bersumber dari platform *Nasa Power* yang meliputi parameter suhu udara minimum, suhu udara maksimum, kelembapan relatif, dan kecepatan angin.
2. Rentang waktu data yang dianalisis dibatasi pada periode 10 (sepuluh) tahun terakhir untuk mendapatkan tren data terkini yang relevan dengan kondisi perubahan iklim saat ini.
3. Analisis spasial menggunakan perangkat lunak System Information Geografis (SIG) untuk menghasilkan peta sebaran ET_0.
4. Penelitian ini hanya berfokus pada analisis Evapotranspirasi Potensial atau ET_0 dan tidak menghitung Evapotranspirasi Aktual (ETA) maupun neraca air tanah secara mendalam.
5. Penelitian tidak membahas Data pembanding sekunder dari stasiun Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG).
6. Penelitian tidak membahas aspek kimia air atau kualitas air di wilayah studi, melainkan murni pada kuantitas penguapan dalam siklus hidrologi.

1.5. MANFAAT PENELITIAN

Manfaat yang diambil dari penelitian ini adalah Memberikan kontribusi ilmiah mengenai efektivitas penggunaan data dalam menghitung nilai evapotranspirasi di wilayah tropis dengan karakteristik geografis seperti Kalimantan Utara dan menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya di bidang hidrologi dan teknik sipil, khususnya mengenai integrasi antara data

meteorologi *Nasa Power* dengan analisis spasial berbasis SIG. Serta memberikan pembuktian secara kuantitatif mengenai tingkat akurasi data *Nasa Power*, sehingga memperkaya kajian tentang rekayasa data di wilayah yang minim fasilitas pengukuran.

1.6. SISTEMATIKA PENULISAN

Sistematika penulisan ini disusun bab demi bab yang Dimana tiap bab dibagi lagi menjadi beberapa bagian yang akan diuraikan lagi. Adapun penguraiannya sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Dalam bab ini diuraikan latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pustaka merupakan tinjaun yang memuat secara sistematis tentang teori, dari penelitian ini yang meliputi tentang Hidrologi, Evaportanspirasi Potensial, Sistem Informasi Geografis, *Nasa Power,* Kondisi Kalimantan Utara dan Penelitian Terdahulu.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian merupakan motodologi penelitian yang menjelaskan waktu dan lokasi penelitian serta tahap-tahap dalam proses penelitian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Merupakan Analisa hasil dan pembahasan yang menguraikan tentang hasil yang diperoleh dari proses penelitian dan hasil pembahasannya. Penyajian hasil memuat deskripsi sistematik tentang data yang diperoleh. Sedangkan pada pembagian pembahasan adalah mengelolah hasil data penelitian dengan tujuan untuk mencapai tujuan penelitian.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Merupakan penutup yang berisi tentang kesimpulan dari hasil penelitian, serta saran-saran dari penulis yang berkaitan dengan yang dialami selama penelitian berlangsung, yang tentunya diharapkan agar penelitian ini berguna untuk kedepannya dan sebagai acuan untuk penelitian selanjutnya.

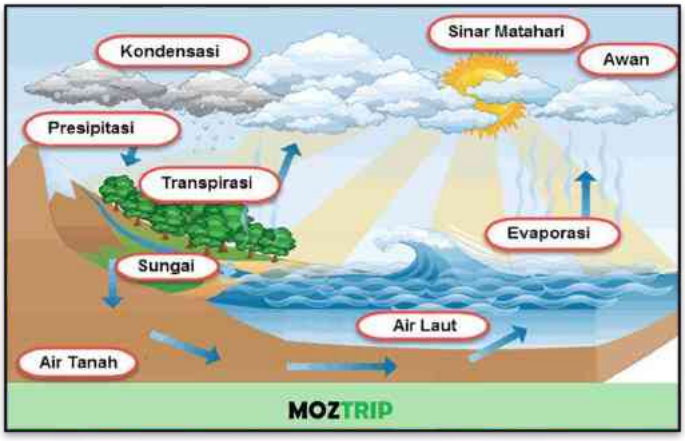
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. HIDROLOGI DAN SIKLUS AIR

Hidrologi adalah cabang ilmu yang mempelajari keberadaan, pergerakan, dan distribusi air di bumi, baik di permukaan maupun di bawah tanah, termasuk hubungannya dengan lingkungan dan makhluk hidup. Triatmodjo (2008) mendefinisikan hidrologi sebagai ilmu yang berkaitan dengan air di bumi, meliputi kejadian, peredaran, dan distribusinya, sifat-sifat fisik dan kimianya.

Siklus hidrologi merupakan proses pergerakan air yang berlangsung terus-menerus dari bumi ke atmosfer dan kembali lagi ke bumi. Siklus hidrologi adalah sebuah proses pergerakan air dari bumi ke atmosfer dan kembali lagi ke bumi yang berlangsung secara kontinu. Dalam siklus ini, evapotranspirasi memegang peranan yang sangat penting karena merupakan komponen kehilangan air terbesar dari daratan menuju atmosfer. Evapotranspirasi menyumbang sekitar 60 hingga 65 persen dari total presipitasi yang jatuh ke daratan, menjadikannya sebagai salah satu elemen paling penting dalam siklus hidrologis.



Sumber: Moztrip

Gambar 2.1 Siklus Hidrologi

2.1.1 Parameter-Parameter Hidrologi

Seluruh pergerakan air di bumi berlangsung secara kontinu dalam suatu sistem tertutup yang dikenal sebagai Siklus Hidrologi. Siklus ini digerakkan oleh energi radiasi matahari dan gaya gravitasi. Dalam siklus hidrologi, terdapat 9 (sembilan) tahapan/parameter utama yang menggambarkan perjalanan air dari daratan/perairan menuju atmosfer hingga kembali lagi ke daratan/perairan, yaitu:

1. Evaporasi

   Evaporasi adalah proses perubahan wujud air dari fase cair menjadi fase gas (uap air) yang terjadi dari badan-badan air terbuka seperti laut, samudra, sungai, danau, waduk, serta dari permukaan tanah yang basah. Proses ini terjadi ketika molekul-molekul air menyerap energi panas dari radiasi matahari. Energi thermal ini meningkatkan energi kinetik molekul air hingga melampaui ikatan hidrogen di permukaannya, sehingga molekul air terlepas dan naik ke atmosfer.

2. Transpirasi

   Transpirasi adalah proses pelepasan uap air ke atmosfer yang berasal dari jaringan tubuh tanaman atau vegetasi sebagai hasil sampingan dari proses fisiologis dan metabolisme (fotosintesis). Akar tanaman menyerap air dan hara dari dalam tanah. Air tersebut dialirkan melalui pembuluh xilem ke seluruh bagian tanaman, termasuk daun. Sebagian kecil air digunakan untuk sintesis sel, sedangkan sebagian besar dikeluarkannya kembali ke udara dalam bentuk uap air melalui celah mikroskopis pada permukaan daun yang disebut stomata.

3. Evapotranspirasi

   Evapotranspirasi merupakan gabungan antara proses evaporasi dari permukaan tanah/perairan dan proses transpirasi dari vegetasi pada suatu wilayah/landsekap tertentu. Dalam neraca, evapotranspirasi menduduki posisi yang sangat penting karena merupakan komponen pengeluaran air terbesar yang mengembalikan air dari daratan kembali ke atmosfer.

4. Sublimasi

Sublimasi adalah proses perubahan wujud air secara langsung dari fase padat (es atau salju) menjadi fase gas (uap air) tanpa melalui fase cair terlebih dahulu. Proses ini umumnya terjadi pada kondisi lingkungan berketinggian tinggi (pegunungan es) atau wilayah kutub yang memiliki tekanan udara sangat rendah, suhu sangat dingin, radiasi matahari kuat, serta kelembapan udara yang amat sangat rendah. Walaupun kontribusinya relatif kecil pada cakupan global daerah tropis seperti Indonesia, sublimasi tetap menjadi bagian penting dari kesetimbangan air di wilayah beriklim dingin/pegunungan.

5. Kondensasi

Kondensasi adalah proses perubahan wujud uap air di atmosfer kembali menjadi titik-titik air cair atau kristal es halus. Saat udara basah yang membawa uap air terangkat ke lapisan atmosfer yang lebih tinggi, udara tersebut mengalami penurunan suhu. Ketika suhu udara mencapai titik embun dan udara menjadi sangat jenuh (*saturated*), uap air mengembun dan menempel pada inti kondensasi (seperti partikel debu, garam laut, atau polutan hingga membentuk gumpalan awan atau kabut.

6. Adveksi

Adveksi adalah proses pergerakan atau perpindahan awan dan uap air secara horizontal dari satu wilayah ke wilayah lain di atmosfer akibat dorongan arus angin. Proses adveksi sangat vital dalam meredistribusikan massa air dari atmosfer di atas wilayah perairan/samudra (daerah pembentuk awan utama) menuju ke wilayah daratan. Tanpa adanya adveksi, wilayah daratan terpencil atau daratan yang jauh dari laut tidak akan menerima pasokan hujan yang cukup.

7. Presipitasi

Presipitasi adalah proses jatuhnya segala bentuk air dari atmosfer menuju ke permukaan bumi, baik dalam bentuk cair (hujan) maupun wujud padat (salju, hujan es). Presipitasi terjadi ketika butiran-butiran air atau kristal es di dalam awan hasil kondensasi terus bertambah ukurannya

melalui proses koalesensi. Ketika massa butiran air tersebut telah menjadi terlalu berat untuk ditopang oleh arus udara naik, gaya gravitasi bumi akan menarik air tersebut jatuh ke permukaan bumi. Presipitasi berfungsi sebagai input (masukan) utama dalam seluruh sistem neraca air di suatu Daerah Aliran Sungai (DAS).

8. Limpasan Permukaan

   Limpasan permukaan (*surface runoff*) adalah bagian dari air presipitasi/hujan yang tidak sempat meresap ke dalam tanah dan mengalir di atas permukaan tanah menuju tempat yang berelevasi lebih rendah. Air limpasan akan mengalir melalui alur-alur kecil (*rill*), kemudian berkumpul pada parit, anak sungai, sungai utama, hingga akhirnya mengalir menuju danau, waduk, atau kembali ke samudra.

9. Infiltrasi

   Infiltrasi adalah proses masuknya atau meresapnya air hujan dari permukaan tanah ke dalam lapisan tanah secara vertikal melalui pori-pori tanah. Proses infiltrasi dipengaruhi oleh gaya gravitasi dan aksi kapiler tanah. Air yang telah meresap ini sebagian akan tertahan di lapisan tanah atas sebagai kelembapan tanah (*soil moisture*) untuk dimanfaatkan oleh akar vegetasi. Sementara itu, air selebihnya akan terus bergerak tegak lurus lebih dalam ke bawah melalui proses perkolasi (*percolation*) hingga mencapai zona jenuh dan menjadi cadangan air tanah (*groundwater*). Air tanah ini nantinya dapat keluar kembali ke permukaan bumi sebagai mata air atau memberikan aliran basis (*baseflow*) bagi sungai pada musim kemarau.

2.1.2 Mekanisme Siklus Hidrologi

Siklus hidrologi bekerja berdasarkan prinsip kekekalan massa air. Energi matahari menjadi pendorong (*engine*) utama berlangsungnya sirkulasi ini.

1. Penguapan dan Pembentukan Awan

   Energi radiasi matahari memanaskan permukaan bumi, menyebabkan air dari samudra, laut, danau, sungai, serta permukaan tanah menguap ke atmosfer melalui proses evaporasi. Di saat yang sama, vegetasi/tanaman juga melepaskan uap air hasil dari proses metabolisme tubuhnya ke udara melalui stomata daun, yang dikenal sebagai transpirasi. Gabungan dari kedua proses penguapan ini dinamakan Evapotranspirasi.

2. Kondensasi dan Presipitasi

   Uap air hasil evapotranspirasi naik ke atmosfer yang lebih tinggi dan mengalami pendinginan (kondensasi) membentuk gumpalan awan. Ketika awan mengalami kejenuhan dan butiran air menjadi terlalu berat, air jatuh kembali ke bumi dalam bentuk presipitasi (hujan).

3. Pendistribusian Air di Bumi

   Air hujan yang jatuh ke permukaan bumi sebagian akan tertahan oleh vegetasi (intersepsi), sebagian meresap ke dalam tanah (infiltrasi), dan sisanya mengalir di atas permukaan tanah. Air yang terinfiltrasi akan mengisi kelembapan tanah dan terus bergerak mengalami perkolasi menjadi air tanah . Air tanah dan limpasan permukaan ini nantinya akan mengalir kembali menuju sungai, danau, dan laut.

4. Penutup Mekanisme

   Evapotranspirasi memegang peranan krusial karena merupakan satu-satunya komponen keluaran utama yang mengembalikan air dari daratan dan perairan kembali ke atmosfer. Tanpa adanya evapotranspirasi, kesetimbangan air di atmosfer dan bumi tidak akan terjaga. Oleh karena itu, pemahaman yang mendalam mengenai mekanisme penguapan gabungan ini baik secara definisi, faktor pemengaruh, maupun metode perhitungannya menjadi sangat mendasar sebelum melakukan analisis kuantitatif ketersediaan air.

2.2. PENGERTIAN EVAPORTRANSPIRASI

Evapotranspirasi adalah gabungan dari dua proses penguapan yang berbeda namun terjadi secara bersamaan, yaitu evaporasi dan transpirasi. Evaporasi merupakan penguapan air dari permukaan tanah atau badan air, sedangkan transpirasi adalah pelepasan uap air melalui pori-pori daun tumbuhan. Dalam analisis teknik, kedua proses ini sulit dipisahkan sehingga dihitung sebagai satu kesatuan kehilangan air (Triatmodjo, 2020).

Besarnya laju evapotranspirasi di suatu kawasan, khususnya di wilayah tropis seperti Kalimantan Utara, sangat bergantung pada interaksi kompleks antara variabel meteorologi dan karakteristik permukaan lahan. Faktor-faktor utama yang memengaruhi proses ini meliputi radiasi matahari sebagai sumber energi utama, suhu udara, kelembapan relatif, serta kecepatan angin yang berfungsi memindahkan massa uap air dari permukaan ke atmosfer.

2.3. PARAMETER KLIMATOLOGI EVAPOTRANSPIRASI POTENSIAL

Evapotranspirasi Potensial adalah jumlah air yang akan menguap jika ketersediaan air di lahan tersebut melimpah atau tidak terbatas. Nilai ETP menjadi angka "maksimum" penguapan yang mungkin terjadi pada kondisi iklim tertentu. Perhitungan ETP sangat krusial dalam menentukan kebutuhan air maksimal untuk irigasi maupun perhitungan debit andalan sungai (Putra dkk., 2022). Pada musim kemarau, laju ETP tumbuh menjadi signifikan untuk memverifikasi keseimbangan air, dan berkembang menjadi sangat krusial untuk kasus ketersediaan air seperti irigasi, pasokan air, dan tenaga air.

Proses hilangnya air akibat evapotranspirasi merupakan salah satu komponen penting dalam hidrologi karena proses tersebut dapat mengurangi simpanan air dalam badan-badan air, tanah, dan tanaman. Untuk kepentingan sumber daya air, data evapotranspirasi ini diperlukan untuk menghitung kesetimbangan air (neraca air). Evapotranspirasi ditentukan oleh beberapa faktor meteorologi antara lain:

1. Radiasi surya (Rd): Komponen sumber energi dalam memanaskan badan badan air, tanah dan tanaman. Radiasi potensial sangat ditentukan oleh posisi geografis lokasi.
2. Kecepatan angin (v): Angin merupakan faktor yang menyebabkan terdistribusinya air yang telah diuapkan ke atmosfir, sehingga proses penguapan dapat berlangsung secara terus-menerus sebelum terjadinya kejenuhan kandungan uap di udara.
3. Kelembaban relatif (RH): Parameter iklim ini memegang peranan penting karena udara memiliki kemampuan untuk menyerap air sesuai kondisinya termasuk temperatur udara dan tekanan udara atmosfer.
4. Temperatur: Suhu merupakan komponen tak terpisah dari kelembaban relatif (RH) dan radiasi. Suhu ini dapat berupa suhu badan air, tanah, dan tanaman ataupun juga suhu atmosfer (Allen et al, 1998).

2.4. PERHITUNGAN EVAPORTRANSPIRASI POTENSIAL

Terdapat banyak metode perhitungan ETP, namun metode Penman Modifikasi yang direkomendasikan oleh *Food and Agricultre Organization* (FAO) merupakan standar paling akurat secara internasional. Metode ini mengintegrasikan faktor radiasi matahari, suhu udara, kelembapan, dan kecepatan angin. Penggunaan metode yang tepat akan meminimalisir kesalahan estimasi dalam desain hidrolika (WMO, 2020). Di Indonesia, pengembangan model dengan menggunakan data penginderaan jauh ini masih belum banyak dilakukan, hanya beberapa saja yang telah menggunakan data penginderaan jauh untuk menghitung nilai evaportranpirasi salah satunya dengan menggunakan Metode Penman Modifikasi.

Dalam penelitian ini, judul dan kerangka konseptual menggunakan istilah Evapotranspirasi Potensial mengacu pada pengertian umum yang telah lama dikenal dalam literatur hidrologi Indonesia. Namun secara operasional, perhitungan dilakukan menggunakan metode Penman Modifikasi (FAO Paper 24) yang menghasilkan nilai ET_o. Penggunaan kedua istilah ini secara bergantian dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah karena keduanya merepresentasikan konsep yang sama, yaitu laju evapotranspirasi maksimum

teoritis pada kondisi ketersediaan air yang tidak terbatas. Hal ini juga sejalan dengan praktik banyak penelitian hidrologi di Indonesia yang menggunakan kedua istilah tersebut secara setara (Wilnaldo et al., 2020; Sujalu, 2024).

Allen et al. (1998) menggambarkan persamaan Penman Modifikasi sebagai berikut:

$$ET_0 = c \times [W \times R_n + (1 - W) \times f(u) \times e_s - e_a)]$$

Keterangan:

ET_0 = Evaportranspirasi potensial (mm/hari)

c = Faktor koreksi akibat kondisi cuaca siang dan malam (didapat dari tabel atau grafik berdasarkan nilai RHmax, Radiasi Matahari, dan rasio kecepatan angin siang/malam).

W = Faktor bobot (weighting factor) yang dipengaruhi oleh temperatur udara dan ketinggian tempat.

R_n = Radiasi bersih total dalam satuan kesetaraan penguapan air (mm/hari).

F(u) = Kecepatan Angin Total (km/hari)

e_s = Tekanan Uap Jenuh (kPa)

e_a = Tekanan Uap Aktual (kPa)

Masukkan nilai Tmax ke dalam rumus dasar:

$$e°(T_{maks}) = 6{,}108 \times \exp\left[\frac{17{,}27 \times T_{maks}}{T_{maks} + 237{,}3}\right]$$

Masukkan nilai Tmin ke dalam rumus dasar:

$$e°(T_{min}) = 6{,}108 \times \exp\left[\frac{17{,}27 \times T_{min}}{T_{min} + 237{,}3}\right]$$

Setelah mendapat e°(Tmax) dan e°(Tmin), hitung rata-ratanya:

$$e_s = \frac{e°(T_{maks}) + e°(T_{min})}{2}$$

Setelah mendapat es dan ea, hitung selisihnya:

$$VPD = e_s - e_a$$

Faktor bobot (W) mencerminkan efek suhu dan tekanan udara (elevasi) terhadap hubungan antara kemiringan kurva tekanan uap (Δ) dan konstanta psikrometri (γ).

$$W = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma}$$

Keterangan:

- W = Faktor bobot akibat pengaruh suhu dan tinggi tempat (tanpa satuan, bernilai antara 0 hingga 1).
- Δ = Kemiringan kurva tekanan uap jenuh (kPa/˚C).
- γ = Konstanta psikrometri (0.000665) (kPa/˚C), yang dipengaruhi oleh tekanan udara/elevasi:

Berikut adalah rumus matematis standar untuk menghitung nilai Δ:

$$\Delta = \frac{4098 \cdot e^o(T)}{(T + 237.3)^2}$$

Penentuan Radiasa netto (Rn) pada permukaan tanah dapat menggunakan persamaan di bawah ini:

$Rn=Rn_s+Rn_l$

Keterangan:

Rn = Radiasi Bersih (MJ /m^2/hari)

Rn_s = Radiasi Gelombang Pendek (MJ /m^2/hari)

Rn_l = Radiasi Gelombang Panjang (MJ /m^2/hari)

Fungsi angin dalam metode Penman Modifikasi mengukur seberapa cepat udara lembap di atas permukaan disapu oleh angin. Rumus standarnya adalah:

Rumus Konversi:

$$u_2 \text{ (km/hari)} = 86.4 \cdot u_2 \text{ (m/s)}$$

Input u_2 dalam km/hari

$$f(u) = 0.27 \cdot \left(1 + \frac{u_2}{100}\right)$$

es dicari dari tabel hubungan suhu harian rata-rata (T) dengan tekanan uap jenuh (atau menggunakan rumus eksponensial). ea dihitung dari kelembapan relatif rata-rata (RH):

$$e_a = e_s \frac{RH}{100}$$

Keterangan:

RH = Kelembaban relatif(%)

e_a = Tekanan uap air jenuh aktual

e_s = Tekanan uap air jenuh rata-rata

Rumus rata-rata aritmatika:

$$\bar{x} = \frac{\Sigma}{n}$$

2.5. METODE SISTEM INFORMASI GEOGRAFIS

Sistem Informasi Geografis atau SIG merupakan sistem berbasis komputer yang dirancang untuk menangkap, menyimpan, memanipulasi, menganalisis, serta menyajikan data yang memiliki referensi geografis atau spasial. SIG bukan sekadar alat pemetaan digital biasa, melainkan platform analisis yang mampu mengintegrasikan data atribut berupa angka-angka klimatologi dengan data spasial berupa koordinat lokasi di muka bumi. Kemampuan utama sistem ini terletak pada analisis tumpang susun atau *overlay* dari berbagai lapisan informasi, seperti peta tutupan lahan, peta jenis tanah, dan peta sebaran stasiun cuaca, sehingga dihasilkan informasi baru yang lebih komprehensif bagi perencanaan infrastruktur (Prahasta, 2021).

Pemanfaatan SIG dalam analisis hidrologi, khususnya dalam pemetaan evapotranspirasi di Kalimantan Utara, memberikan keunggulan dalam hal

akurasi visual dan efisiensi waktu pengolahan data. Melalui proses interpolasi spasial, data meteorologi yang bersifat titik dari stasiun-stasiun sinoptik dapat diubah menjadi data permukaan kontinu yang menggambarkan kondisi penguapan di seluruh wilayah provinsi.

Implementasi Sistem Informasi Geografis dalam penelitian ini memerlukan dukungan perangkat lunak yang mumpuni untuk menjamin akurasi pemrosesan data spasial dan atribut yang telah dikumpulkan. Pemilihan perangkat lunak didasarkan pada kebutuhan analisis hidrologi yang kompleks, mulai dari tahap pra-pemrosesan data mentah hingga tahap visualisasi hasil akhir dalam bentuk peta tematik. Dalam alur kerja penelitian ini, integrasi antara perangkat lunak berbasis lisensi komersial dan perangkat lunak berbasis *open-source* dilakukan untuk mengoptimalkan kelebihan masing-masing platform dalam menangani dataset meteorologi dari Kalimantan Utara. Adapun dua perangkat lunak utama yang digunakan adalah ArcGIS.

2.5.1. ArcGIS

ArcGIS adalah salah satu perangkat lunak yang dikembangkan oleh ESRI (Environmental Systems Research Institute) yang merupakan kompilasi fungsi-fungsi dari berbagai macam perangkat lunak SIG yang berbeda, mencakup SIG desktop, server, dan SIG berbasis web. Perangkat lunak ini pertama kali diperkenalkan kepada publik oleh ESRI pada tahun 1999 dengan kode versi 10.8 (ArcGIS 10.8). Sebelum hadirnya ArcGIS versi 10.8, ESRI sebenarnya telah lebih dahulu merilis perangkat lunak pendahulunya yaitu ArcInfo pada tahun 1981 yang menjadi salah satu perangkat lunak SIG komersial pertama yang digunakan secara luas di dunia (TechnoGIS, 2024).

ArcGIS adalah platform perangkat lunak SIG yang memungkinkan pengguna untuk membuat, mengelola, menganalisis, dan membagikan data spasial serta peta interaktif. Platform ini tersedia dalam beberapa produk utama, antara lain ArcGIS Online sebagai layanan berbasis cloud, ArcGIS Desktop yang terdiri dari ArcMap dan ArcGIS Pro untuk pengerjaan di komputer lokal, serta ArcGIS Enterprise untuk penerapan di tingkat organisasi. Dalam

penelitian ini, ArcGIS digunakan khususnya melalui aplikasi ArcMap atau ArcGIS Pro untuk keperluan kartografi dan pembuatan layout peta distribusi ETP final.

Fungsi utama ArcGIS yang digunakan dalam penelitian ini mencakup beberapa hal pokok. Pertama, fungsi Import dan Manajemen Data Spasial, yaitu memasukkan data raster hasil interpolasi dari ArcGIS ke dalam lingkungan kerja ArcGIS. Kedua, fungsi Clipping (Extract by Mask), yaitu memotong raster sesuai batas administrasi Provinsi Kalimantan Utara menggunakan shapefile yang diperoleh dari Badan Informasi Geospasial (BIG). Ketiga, fungsi Symbology dan Klasifikasi, yaitu mengklasifikasikan nilai ET0 ke dalam beberapa kelas menggunakan metode Natural Breaks (Jenks) dan menerapkan skema warna yang sesuai. Keempat, fungsi Layout Manager, yaitu menyusun elemen-elemen peta standar kartografi seperti judul, legenda, skala batang, arah mata angin, sistem koordinat, dan sumber data menjadi satu lembar peta yang siap cetak.

Tabel 2.1 Tools ArcGIS yang Digunakan dalam Penelitian

No.	Nama Tools	Lokasi di ArcGIS	Fungsi dalam Penelitian
1	Add Data	Standard Toolbar	Memasukkan data shapefile dan raster ke dalam project
2	Extract by Mask	ArcToolbox → Spatial Analyst → Extraction	Clipping raster ETP sesuai batas wilayah Kaltara
3	Symbology (Classified)	Layer Properties → Symbology	Klasifikasi nilai ETP dan pengaturan gradasi warna
4	Natural Breaks (Jenks)	Symbology → Classification Method	Menentukan kelas nilai ETP secara otomatis berdasarkan data

No.	Nama Tools	Lokasi di ArcGIS	Fungsi dalam Penelitian
5	Color Ramp	Symbology → Color Ramp	Menerapkan skema warna gradasi pada peta ETP
6	Layout View	View Menu → Layout View	Menyusun elemen kartografi peta final
7	Insert (Legend, Scale Bar, North Arrow)	Insert Menu	Menambahkan elemen peta standar
8	Export Map	File → Export Map	Mengekspor peta ke format JPEG/PDF resolusi tinggi

Sumber: *ESRI ArcGIS Documentation (2023)*

2.5.2. Interpolasi Spasial Dalam SIG

Interpolasi spasial merupakan suatu teknik analisis matematis yang digunakan untuk mengestimasi nilai pada lokasi-lokasi yang tidak memiliki data observasi dengan memanfaatkan nilai dari titik-titik sampel yang lokasinya sudah diketahui. Prinsip utama interpolasi didasarkan pada hukum pertama geografi, di mana objek yang lokasinya berdekatan cenderung memiliki karakteristik yang lebih mirip dibandingkan dengan objek yang letaknya berjauhan. Teknik ini menjadi solusi yang sangat rasional untuk mengatasi keterbatasan sebaran stasiun meteorologi di wilayah yang luas, sehingga kita dapat membangun model permukaan kontinu dari parameter hidrologi yang bersifat diskrit (Guntur, 2024).

Penerapan interpolasi spasial memprediksi besaran nilai evapotranspirasi pada area-area pedalaman Kalimantan Utara yang tidak terjangkau oleh stasiun pengamatan fisik. Salah satu metode yang paling umum digunakan adalah *Inverse Distance Weighting* (IDW), yang bekerja dengan memberikan bobot lebih besar pada stasiun cuaca terdekat dalam menentukan nilai di titik yang tidak diketahui. Dengan mengintegrasikan algoritma interpolasi ini ke dalam

perangkat lunak SIG, data angka dari platform dapat diubah menjadi representasi visual berupa peta raster yang memperlihatkan sebaran laju penguapan secara spasial di seluruh wilayah penelitian.

2.5.3. Interpolasi Inverse Distance Weighting (IDW)

Interpolasi spasial merupakan suatu metode atau proses matematis untuk memprediksi nilai suatu variabel pada lokasi yang tidak terukur (*unsampled points*) berdasarkan nilai-nilai dari titik data sampel yang telah diketahui lokasinya (*sampled points*). Dalam kajian hidrologi dan pemetaan iklim, data klimatologi seperti suhu, curah hujan, maupun nilai evapotranspirasi potensial (ET_0) umumnya diperoleh dalam bentuk data titik lokasi stasiun cuaca. Untuk menyajikan sebaran data tersebut secara kontinu pada suatu wilayah cakupan yang luas, diperlukan teknik interpolasi spasial dalam lingkungan Sistem Informasi Geografis (SIG).

Salah satu metode interpolasi deterministik yang paling umum dan andal digunakan dalam analisis data meteorologi dan hidrologi adalah metode Inverse Distance Weighting (IDW). IDW tidak memerlukan pengujian asumsi statistik yang rumit (seperti stasionaritas spasial atau pemodelan variogram pada metode Kriging), sehingga sangat efisien untuk interpolasi data spasial berbasis raster. Nilai estimasi hasil IDW tidak akan pernah melebihi nilai maksimum atau kurang dari nilai minimum dari data sampel asli yang digunakan. Karakteristik data ET_0 yang bervariasi secara halus antar wilayah sangat cocok dipetakan menggunakan IDW, sehingga menghasilkan kontur gradasi warna sebaran yang intuitif dan mudah diinterpretasikan untuk analisis keruangan.

2.5.4. Gradasi Warna Dalam Peta Interpolasi ET_0

Pemilihan skema warna atau color ramp dalam peta interpolasi ETP bukan sekadar urusan estetika, melainkan memengaruhi secara langsung bagaimana pembaca peta menginterpretasikan informasi yang disajikan. Terdapat dua pendekatan skema warna yang umum digunakan dalam kartografi tematik untuk data kontinu seperti ETP.

A. Skema Warna Sekuensial

Skema warna sekuensial digunakan ketika data memiliki urutan dari nilai rendah ke nilai tinggi secara linear. Warna bergerak dari warna terang atau dingin yang merepresentasikan nilai rendah menuju warna gelap atau hangat yang merepresentasikan nilai tinggi. Contoh skema warna sekuensial yang umum digunakan antara lain warna berubah dari kuning ke jingga dan kemudian coklat, atau skema Red yang menggunakan gradasi warna merah dari terang ke gelap, yang cocok untuk menampilkan distribusi nilai kontinu seperti suhu atau evapotranspirasi.

Tabel 2.2 Skema Gradasi Warna

Warna	Kode Hex	Interpretasi
Hijau Tua	#1A9641	ETP sangat rendah (musim hujan, daerah pegunungan)
Hijau Muda	#A6D96A	ETP rendah
Kuning	#FFFFBF	ETP sedang
Jingga	#FDAE61	ETP tinggi
Merah Tua	#D7191C	ETP sangat tinggi (musim kemarau, daerah pesisir)

Sumber: *ColorBrewer 2.0 (Brewer, 2023)*

Filosofi pemilihan warna hijau untuk ETP rendah didasarkan pada asosiasi intuitif bahwa kondisi ETP rendah berarti ketersediaan air relatif lebih terjaga, sedangkan warna merah untuk ETP tinggi mengindikasikan tekanan evaporatif yang besar sehingga kebutuhan air irigasi meningkat. Pendekatan ini memudahkan pembaca peta non-teknis untuk langsung memahami distribusi spasial ETP tanpa perlu membaca legenda secara detail.

B. Metode Klasifikasi Natural Breaks (Jenks)

Klasifikasi nilai ETP ke dalam kelas-kelas warna menggunakan metode Natural Breaks (Jenks) yang bekerja dengan cara mencari titik-titik pemisah alami di dalam distribusi data sehingga variasi di dalam kelas diminimalkan dan variasi antar kelas dimaksimalkan. Metode ini lebih direkomendasikan dibandingkan Equal Interval atau Quantile untuk data iklim seperti ETP karena mampu menangkap pola distribusi data yang tidak seragam dan mencerminkan kondisi alamiah di lapangan dengan lebih akurat.

Tabel 2.3 Perbandingan Metode Klasifikasi untuk Peta ETP

No.	Metode Klasifikasi	Cara Kerja	Keunggulan	Kekurangan	Rekomendasi
1	Natural Breaks (Jenks)	Mencari pemisah alami dalam distribusi data	Mencerminkan pola data nyata	Kelas berbeda tiap dataset	**Digunakan dalam penelitian ini**
2	Equal Interval	Membagi rentang nilai secara sama rata	Mudah dipahami	Tidak sensitif terhadap distribusi data	Kurang cocok untuk data iklim
3	Quantile	Jumlah data per kelas sama rata	Distribusi merata	Kelas tidak mencerminkan nilai sebenarnya	Tidak direkomendasikan
4	Standard Deviation	Berbasis simpangan baku	Cocok untuk data normal	Sulit diinterpretasikan publik umum	Untuk analisis statistik

Sumber: *ESRI ArcGIS Documentation (2023)*

2.6. LAYANANAN INFORMASI KLIMATOLOGI SEBAGAI INPUT ANALISIS ETP

Terdapat beberapa platform layanan informasi klimatologi profesional yang mengolah data mentah dari jaringan satelit penginderaan jauh (*remote sensing*) dan model asimilasi data global untuk kebutuhan hidrometeorologi. Dalam dunia akademik dan praktisi teknik sipil, platform *Nasa Power* (*Prediction of Worldwide Energy Resources*) diakui sebagai salah satu repositori data cuaca global yang paling andal karena mengintegrasikan data dari satelit-satelit pemantau bumi milik *National Aeronautics and Space Administration* (*Nasa*). *Nasa Power* bukan sekadar sumber data alternatif, melainkan instrumen kunci yang menjamin keberlangsungan analisis kuantitatif pada wilayah dengan tantangan geografis dan keterbatasan stasiun darat yang ekstrem seperti Kalimantan Utara, di mana sebaran stasiun konvensional dinilai belum mampu mencakup seluruh wilayah spasial secara merata (Ramadhan dkk., 2023).

Data yang dirangkum oleh *Nasa Power* memanfaatkan sistem asimilasi data atmosfer global modern bernama MERRA-2 (*Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2*). Sistem ini menjamin bahwa seluruh parameter klimatologi seperti suhu udara (T), kelembapan relatif (RH), kecepatan angin (u2), dan radiasi matahari gelombang pendek (Rs)dihitung menggunakan algoritma pemodelan numerik yang mutakhir, kontinu, dan terkalibrasi secara internasional dengan mempertimbangkan pengaruh elevasi serta kondisi dinamika atmosfer global.

Model reanalisis MERRA-2 yang melandasi platform *Nasa Power* merupakan data ilmiah bereputasi tinggi yang digunakan secara luas untuk pemodelan iklim, simulasi hidrologi, dan analisis energi terbarukan di berbagai belahan dunia. Kebutuhan akan akurasi dan pemantauan jangka panjang pada sektor-sektor kritis tersebut menjadi jaminan bahwa data klimatologi berbasis grid yang digunakan memiliki tingkat korelasi yang sangat kuat dan deviasi yang terukur, Menyatakan bahwa data grid satelit *Nasa Power* sangat reliabel untuk pemodelan pengelolaan air regional di area yang minim stasiun pengamatan darat (Monteiro dkk., 2018). Membuktikan bahwa data

klimatologi *Nasa Power* memiliki akurasi yang sangat tinggi dan ekivalen dengan stasiun bumi untuk menghitung rumus FAO Penman (Aboelkhair dkk., 2019).

Keunggulan utama dari *Nasa Power* adalah kemampuannya dalam menyediakan rekaman data harian historis secara kontinu tanpa adanya celah kekosongan (*data gap* atau *missing data*) yang signifikan. Hal ini sangat krusial agar proses kalkulasi Evapotranspirasi Acuan (ETo) dengan metode standar FAO Penman Modifikasi dapat dilakukan secara presisi pada setiap langkah waktu (*time-step*) harian maupun bulanan di sepanjang rentang waktu penelitian. Banyak peneliti teknik sipil/pertanian di Indonesia yang menerbitkan paper di jurnal Sinta mengenai pemanfaatan *Nasa Power* untuk analisis pulau-pulau luar Jawa.

Dalam pengolahan Sistem Informasi Geografis (SIG), reliabilitas data berbasis grid dari *Nasa Power* memungkinkan proses interpolasi spasial menghasilkan visualisasi permukaan yang logis, kontinu, dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah. Mengingat stasiun bumi BMKG di Provinsi Kalimantan Utara memiliki keterbatasan jangkauan wilayah yang hanya berpusat di area pesisir, penggunaan data makro-grid dari *Nasa Power* menjadi solusi paling rasional dan ilmiah untuk mendapatkan cakupan representasi variasi iklim di area pedalaman (seperti Malinau dan dataran tinggi Krayan) yang tidak terjangkau oleh sensor fisik konvensional.

Dalam pengolahan *Sistem Informasi Geografis* (SIG), reliabilitas data Nasa Power memungkinkan proses interpolasi spasial menghasilkan peta sebaran yang logis dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah. Mengingat stasiun BMKG di Kalimantan Utara memiliki keterbatasan jangkauan pada area pedalaman, penggunaan data Nasa Power yang terkoneksi dengan jaringan sinoptik global menjadi solusi paling rasional untuk mendapatkan cakupan data wilayah yang lebih luas.

2.7. PETA EVAPOTRANSPIRASI BERBASIS SIG

Peta evapotranspirasi merupakan representasi visual yang menyajikan distribusi spasial dari kehilangan air di permukaan bumi melalui proses penguapan dan transpirasi tanaman. Dalam kerangka kerja Sistem Informasi Geografis (SIG), peta ini dihasilkan melalui integrasi data atribut klimatologi, seperti suhu, radiasi matahari, dan kecepatan angin, yang diolah menggunakan model matematis seperti metode Penman Modifikasi. Hasil dari pemrosesan ini adalah data dalam format raster atau vektor yang menunjukkan variasi nilai evapotranspirasi di setiap koordinat wilayah. Visualisasi ini jauh lebih efektif dibandingkan sekadar data tabel karena mampu memperlihatkan tren sebaran penguapan dari wilayah pesisir hingga pegunungan secara kontinu (Sari dkk., 2021).

Penggunaan peta evapotranspirasi berbasis SIG di Kalimantan Utara memberikan manfaat strategis dalam manajemen sumber daya air regional. Peta ini memungkinkan identifikasi secara cepat terhadap zona-zona yang memiliki laju penguapan tinggi, yang sering kali menjadi indikator awal risiko defisit air atau kekeringan pada lahan pertanian. Dengan adanya gradasi warna yang menunjukkan tingkatan nilai evapotranspirasi, para pengambil kebijakan dapat merencanakan lokasi pembangunan waduk atau jaringan irigasi dengan lebih presisi berdasarkan kebutuhan air nyata di lapangan. Peta ini bertindak sebagai alat bantu keputusan yang menggabungkan aspek teknis hidrologi dengan dimensi keruangan yang akurat (Syahputra, 2022).

2.8. PENELITIAN TERDAHULU

Penelitian terdahulu yang telah dilakukan antara lain:

1. Raldy, F., Boer, R., & Aris, A. (2020)

Potensi Pemanfaatan Data Iklim *Nasa Power* untuk Model Simulasi Tanaman di Indonesia: Studi Kasus Sukamandi, Jawa Barat. Penelitian ini mengevaluasi keandalan data iklim sekunder yang disediakan oleh satelit *Nasa Power* untuk diaplikasikan ke dalam model simulasi pertumbuhan tanaman di daerah sentra produksi padi Sukamandi, Jawa Barat. Parameter yang diuji meliputi radiasi matahari, suhu maksimum, dan suhu minimum

untuk melihat kesesuaiannya dengan kebutuhan input pemodelan agroklimat regional.

2. Pribadi, A., & Harun, S. (2022)

   Evaluasi Curah Hujan *Nasa Power* dengan Curah Hujan Pengamatan Wilayah Jakarta-Bogor. Penelitian ini berfokus pada uji akurasi data curah hujan grid dari satelit *Nasa Power* dengan membandingkannya secara langsung terhadap data observasi aktual dari stasiun bumi BMKG (*Ground Station*) di sepanjang koridor wilayah Jakarta hingga Bogor yang memiliki variasi topografi dari pesisir hingga perbukitan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa data curah hujan *Nasa Power* memiliki tingkat korelasi yang cukup kuat dalam menangkap pola hujan bulanan dan musiman (monsoon). Namun, untuk curah hujan harian ekstrem, data satelit cenderung mengalami efek *smoothing* (perataan nilai), sehingga diperlukan faktor koreksi bias (*bias correction*) jika ingin digunakan untuk analisis hidrologi mikro.

3. Al-Safi & Sarma (2021)

   Penelitian ini menekankan bahwa data cuaca yang dikelola secara internasional oleh WMO (seperti yang ditampilkan Nasa Power) adalah sumber data paling reliabel untuk analisis neraca air di wilayah yang minim stasiun bumi. Dengan judul kajian *Reliability of Satellite-Based Weather Data for Hydrological Modeling in Data-Scarce Regions.*

4. Hasan & Pratomo (2022)

   Mereka melakukan komparasi berbagai metode ETP di Indonesia dan menyimpulkan bahwa metode Penman-Monteith memberikan hasil yang paling mendekati kenyataan fisik di lapangan dibandingkan metode Thornthwaite atau Blaney-Criddle. Dengan judul kajian Komparasi Akurasi Metode Estimasi Evapotranspirasi Potensial pada Lahan Basah Tropis.

5. Kandowangko, N. Y., & Laatung, S. (2022)

   Penerapan Aplikasi NASA Power Untuk Perwilayahan Tanaman Kelapa Di Kabupaten Bolaang Mongondow. enelitian ini memanfaatkan parameter klimatologi jangka panjang dari *Nasa Power* (seperti radiasi, kelembapan, dan suhu) untuk memetakan dan menentukan zonasi/perwilayahan kesesuaian lahan bagi komoditas tanaman kelapa di Kabupaten Bolaang Mongondow, Sulawesi Utara, yang memiliki stasiun bumi sangat terbatas.

6. Puti, Pijar Katalisa Maulani (2024)

   Analisis Debit Banjir Rencana menggunakan Data Curah Hujan Ground Rainfall Station dengan *Nasa Power* pada DAS Mangkang Barat dan Mangkang Timur. Penelitian ini melakukan analisis komparasi perhitungan debit banjir rencana di Daerah Aliran Sungai (DAS) Mangkang Barat dan Mangkang Timur. Peneliti membandingkan hasil pemodelan hidrologi yang menggunakan data curah hujan dari stasiun bumi (*ground rainfall station*) dengan data hidrometeorologi berbasis grid dari satelit *Nasa Power*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa data curah hujan *Nasa Power* mampu menghasilkan estimasi debit banjir rencana yang mendekati pola hidrograf data lapangan. Penelitian ini menyimpulkan bahwa data *Nasa Power* dapat diandalkan sebagai basis alternatif perencanaan bangunan pengendali banjir pada DAS yang minim stasiun pencatat hujan otomatis.

7. Ramadhan, R., & Syahputra, R. (2023)

   Analisis Potensi Matahari dan Angin menggunakan Reanalysis Dataset ECMWF dan *Nasa Power* di Pulau Teupah. Penelitian ini memetakan potensi energi terbarukan (pembangkit listrik tenaga surya dan bayu) di Pulau Teupah menggunakan perbandingan dua basis data reanalisis global ternama, yaitu ECMWF (data eropa) dan *Nasa Power* (data amerika), untuk mengatasi ketiadaan alat ukur radiasi di pulau terluar tersebut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kedua dataset memiliki tingkat kesesuaian yang sangat tinggi ($R^2 > 0.85$) dalam memproyeksikan fluktuasi bulanan

radiasi matahari dan kecepatan angin harian. *Nasa Power* dinilai sangat praktis dalam menyediakan data parameter insolasi matahari langsung yang siap pakai untuk kalkulasi efisiensi panel surya regional.

8. Purnomo, A., dkk. (2024)

   Penelitian ini mengkaji penerapan teknologi Sistem Informasi Geografis (SIG) untuk memetakan karakteristik iklim dan hidrologi wilayah berskala regional provinsi menggunakan sumber data raster berbasis grid satelit. Studi ini ditujukan untuk mempermudah pemodelan spasial pada area yang minim jaringan sensor darat. Hasil penelitian membuktikan bahwa pemanfaatan data grid satelit dalam lingkungan SIG mampu menghasilkan output peta sebaran (seperti peta evapotranspirasi atau curah hujan) yang kontinu, logis, dan bebas dari error batas wilayah (*boundary error*). Integrasi ini sangat direkomendasikan untuk penyusunan database tata ruang dan pengelolaan air wilayah terpencil.

9. Sujianto, S., dkk. (2022)

   Akurasi Data Klimatologi *Nasa Power* Sebagai Alternatif Input Model Evapotranspirasi Penman-Monteith Pada Wilayah Minim Stasiun Pengamatan. Penelitian ini secara khusus melakukan uji validasi dan analisis tingkat akurasi parameter cuaca dari platform *Nasa Power* (suhu, kelembapan, angin, radiasi) sebagai input untuk menghitung nilai evapotranspirasi potensial (ETo) menggunakan rumus standar dunia FAO-56 Penman-Monteith. Hasil uji statistik menunjukkan koefisien korelasi yang sangat kuat ($R^2 > 0.88$) dan tingkat deviasi (RMSE) yang rendah antara data *Nasa Power* dengan stasiun klimatologi bumi bumi terkalibrasi. Penelitian ini menyimpulkan bahwa data klimatologi berbasis grid yang digunakan memiliki tingkat korelasi yang sangat kuat dan deviasi yang terukur terhadap kondisi aktual di permukaan bumi, terutama dalam menyuplai input parameter temperatur dan radiasi harian (Sujianto dkk., 2022). Platform *Nasa Power* adalah opsi substitusi data terbaik yang sah dan akurat bagi pemodelan hidrologi di wilayah perbatasan atau daerah yang mengalami kendala data hilang (*missing data*).

10. Fathoni dkk. (2024)

    Penelitian terbaru ini membahas penggunaan interpolasi IDW (*Inverse Distance Weighting*) dalam SIG untuk memetakan risiko kekeringan. Mereka menemukan bahwa integrasi data satelit ke dalam sistem informasi geografis mampu menghasilkan zonasi wilayah yang jauh lebih detail dibandingkan metode konvensional. Dengan judul kajian Analisis Spasial Distribusi Evapotranspirasi Menggunakan Sistem Informasi Geografis di Wilayah Pesisir.

11. Sari dkk. (2021)

    Sari dkk. (2021) dengan judul kajian Pemetaan Spasial Evapotranspirasi Berbasis Citra Satelit dan SIG *di Pulau Sumatera.* menyimpulkan bahwa penggunaan *Sistem Informasi Geografis* (SIG) mampu mengubah data meteorologi yang bersifat diskrit (terpisah-pisah per stasiun) menjadi sebuah model permukaan yang kontinu. Sari dkk. (2021) juga menegaskan bahwa citra satelit adalah solusi paling efektif untuk melakukan monitoring evapotranspirasi pada wilayah yang luas dan berhutan lebat (seperti Sumatera atau Kalimantan) di mana pemasangan stasiun cuaca fisik di setiap titik adalah hal yang mustahil secara biaya.

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

3.1. LOKASI PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan di seluruh wilayah administratif Provinsi Kalimantan Utara yang secara astronomis terletak pada koordinat 1°21'36" hingga 4°24'55" Lintang Utara dan 114°35'22" hingga 118°44'54" Bujur Timur. Provinsi Kalimantan Utara merupakan provinsi paling utara di Pulau Kalimantan yang berbatasan langsung dengan Negara Malaysia (Sabah dan Serawak) di sebelah utara, Laut Sulawesi dan Provinsi Kalimantan Timur di sebelah timur, serta Provinsi Kalimantan Timur di sebelah selatan dan barat.

Sumber: *Peta Tematik Indonesia*

Gambar 3.1 Batas Wilayah Kalimantan Utara

Cakupan analisis spasial dalam penelitian ini mencakup seluruh 5 (lima) kabupaten/kota di Provinsi Kalimantan Utara, yaitu Kabupaten Bulungan, Kabupaten Malinau, Kabupaten Nunukan, Kabupaten Tana Tidung, dan Kota Tarakan. Pemilihan cakupan seluruh wilayah provinsi didasarkan pada tujuan penelitian untuk menghasilkan peta distribusi ET_0 yang representatif dan komprehensif bagi seluruh wilayah Kalimantan Utara sebagai referensi perencanaan sumber daya air lintas kabupaten.

Tabel 3.1 Data Administrasi Wilayah Provinsi Kalimantan Utara

No	Kabupaten/Kota	Luas(Km^2)	Koordinat Lintang	Koordinat Bujur
1	Kabupaten Bulungan	13.181,92	2°09' - 3°34' LU	116°04' - 117°57' BT
2	Kabupaten Malinau	39.799,90	1°21' - 4°10' LU	114°35' - 116°50' BT
3	Kabupaten Nunukan	14263,68	3°30' - 4°24' LU	115°22' - 118°44' BT
4	Kabupaten Tana Tidung	4.828,58	3°12' - 3°46' LU	116°42' - 117°49' BT
5	Kota Tarakan	657,33	3°14' - 3°26' LU	117°30' - 117°40' BT
Total		**75.467,70**		

Sumber: *BPS Provinsi Kalimantan Utara (2024)*

Pengamatan yang digunakan sebagai basis data klimatologi dalam penelitian ini adalah stasiun-stasiun yang berada di dalam atau berdekatan dengan wilayah Provinsi Kalimantan Utara.

Tabel 3.2 Stasiun Meteorologi BMKG

No	Nama Stasiun	Koordinat X,Y	Wilayah
1	Stasiun Meteorologi Juwata	117.5700 Long & 3.3300 Lat	Kota Tarakan
2	Stasiun Meteorologi Nunukan	117. 6700 Long & 4.1300 Lat	Kab. Nunukan
3	Stasiun Meteorologi Tanjung Harapan	117.2200 Long & 2.5000 Lat	Kab. Bulungan
4	Stasiun Meteorologi Malinau	116.6166 Long & 3.5738 Lat	Kab. Malinau
5	Stasiun Meteorologi Yuvai Semaring	115.6800 Long & 3.8600	Kec. Krayan (Nunukan)
6	Stasiun Meteorologi Kalimarau	117.4338 Long & 2.1456 Lat	Kab. Berau

Sumber: *BMKG (2024)*

3.2. PEDEKATAN PENELITIAN

3.2.1 Penelitian Kuantitatif

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif, yaitu pendekatan penelitian yang berlandaskan pada pengolahan data numerik secara sistematis melalui prosedur matematis dan statistik yang terstandar. Sugiyono (2019) mendefinisikan penelitian kuantitatif sebagai metode penelitian yang berlandaskan pada filsafat positivisme, digunakan untuk meneliti pada populasi atau sampel tertentu, dengan pengumpulan data menggunakan instrumen penelitian dan analisis data bersifat kuantitatif atau statistik, dengan tujuan untuk menguji hipotesis yang telah ditetapkan.

Sifat kuantitatif dalam penelitian ini diwujudkan melalui serangkaian perhitungan matematis nilai ET_0 menggunakan metode Penman Modifikasi FAO berdasarkan data klimatologi numerik yang diperoleh dari platform NASA POWER. Seluruh variabel yang dihitung, mulai dari tekanan uap jenuh, radiasi netto, defisit tekanan uap, hingga nilai akhir ET_0, seluruhnya bersifat terukur dan dapat diverifikasi ulang menggunakan prosedur yang sama.

3.2.2 Deskriptif

Selain bersifat kuantitatif, penelitian ini juga bersifat deskriptif. Tujuan dari penelitian deskriptif ini adalah untuk membuat deskripsi, gambaran, atau lukisan secara sistematis, faktual dan akurat mengenai fakta-fakta, sifat-sifat serta hubungan antar fenomena yang diselidiki.

Dalam konteks penelitian ini, aspek deskriptif diwujudkan melalui penyajian dan interpretasi peta distribusi spasial ET_0 yang menggambarkan kondisi persebaran nilai ET_0 di seluruh wilayah Kalimantan Utara, pola temporal perubahan ET_0 antar musim selama periode 2016–2025, serta perbandingan nilai ET_0 antar wilayah kabupaten/kota di Kalimantan Utara.

3.3. PENGUMPULAN DATA

3.3.1 Waktu Penelitian

Waktu penelitian dalam studi ini sangat penting untuk memastikan bahwa data yang diperoleh benar-benar mencerminkan kondisi aktual. Data klimatologi yang dianalisis mencakup periode 10 tahun, yaitu dari tahun 2016 hingga 2025. Pemilihan rentang waktu 10 tahun didasarkan pada rekomendasi World Meteorological Organization (WMO) bahwa analisis klimatologi yang representatif membutuhkan minimal 10 tahun data pengamatan agar dapat menangkap variabilitas iklim yang memadai dan meredam pengaruh anomali iklim jangka pendek yang secara signifikan memengaruhi pola iklim Kalimantan Utara.

3.3.2 Peralatan Penelitian

Seluruh peralatan yang digunakan dalam penelitian ini bersifat perangkat keras dan perangkat lunak komputer, karena penelitian ini sepenuhnya berbasis data sekunder dari platform data iklim global dan tidak memerlukan pengukuran lapangan langsung. Peralatan tersebut dirinci pada tabel berikut.

Tabel 3.3 Peralatan Penelitian

No	Jenis Peralatan	Fungsi dalam Penelitian
1	Komputer dan Laptop	Menjalankan Seloruh proses analisis
2	ArcGIS(ESRI)	Pembuatan peta tematik distribusi ET_0, layout dan kartografi. Serta Analisis spasial dan interpolasi IDW.
3	Microsoft Excel	Pengolahan data klimatologi dan perhitungan ETP Penman-Modifikasi
4	Platform Nasa Power	Sumber unduhan data satelit harian
5	Google Earth	Verifikasi koordinat stasiun dan orientasi wilayah

Sumber: *Peneliti*

Penggunaan ArcGIS dalam penelitian ini memberikan keuntungan ganda. ArcGIS digunakan untuk proses analisis spasial dan interpolasi IDW karena sifatnya yang open source, mudah dikustomisasi, dan tidak memerlukan lisensi berbayar. ArcGIS juga digunakan pada tahap akhir pembuatan layout peta dan kartografi karena kemampuannya menghasilkan peta dengan kualitas visual dan standar kartografi yang lebih tinggi untuk keperluan publikasi ilmiah.

3.3.3 Teknik Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan sepenuhnya melalui metode pengumpulan data sekunder dari sumber-sumber resmi dan terpercaya yang dapat diakses secara publik. Tidak ada kegiatan pengambilan data primer atau survei lapangan dalam penelitian ini.

Data klimatologi diakses melalui platform NASA POWER (Prediction of Worldwide Energy Resources) berbasis sistem informasi geografis (GIS) dengan menggunakan koordinat geografis (*Latitude* dan *Longitude*) serta elevasi aktual model *MERRA-2* sebagai identifikasi titik lokasi pengamatan. Dari menu penyedia data regional/titik NASA POWER, diperoleh data unsur cuaca historis berupa parameter radiasi matahari gelombang pendek (*All Sky Surface Shortwave Downward Irradiance*), kelembapan relatif pada ketinggian 2 meter (*Relative Humidity at 2 Meters*), suhu rata-rata, maksimum, dan minimum udara pada ketinggian 2 meter (*Temperature at 2 Meters Mean, Max, and Min*), serta kecepatan angin rata-rata pada ketinggian 2 meter (*Wind Speed at 2 Meters*).

Prosedur pengunduhan data dari platform NASA POWER dilakukan dengan tahapan sebagai berikut:

1. Membuka situs resmi layanan data interaktif di https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/.
2. Memilih tipe data (Choose a User Community) yang sesuai (seperti Agroclimatology atau Sustainable Buildings) untuk mendapatkan parameter meteorologi permukaan yang relevan.

3. Memilih skala waktu keluaran data (Choose a Temporal Average) berupa Monthly & Annual untuk memperoleh rekapitulasi data rata-rata bulanan historis.
4. Memasukkan titik lokasi penelitian dengan menginput koordinat geografis (Latitude dan Longitude) masing-masing wilayah kajian di Provinsi Kalimantan Utara.
5. Menentukan rentang tahun pengunduhan data sesuai dengan periode waktu penelitian yang direncanakan, yaitu mulai dari 1 Januari 2016 hingga 31 Desember 2025.
6. Memilih format keluaran file data berupa CSV (Comma Separated Values) untuk kemudahan proses pemisahan variabel data secara digital.
7. Mencentang daftar parameter meteorologi yang dibutuhkan untuk pemodelan evapotranspirasi acuan (ETo), yang meliputi: Suhu Udara (Mean, Max, Min), Relative Humidity, Solar Radiation, dan Wind Speed.
8. Mengunduh file hasil ekstraksi platform, kemudian membuka serta memindahkan seluruh tabel baris parameter meteorologi tersebut ke dalam lembar kerja Microsoft Excel.
9. Mengulangi prosedur pencarian dan pengunduhan yang sama untuk seluruh stasiun/titik tinjauan wilayah kajian yang digunakan dalam penelitian.
10. Melakukan pengecekan konsistensi data hasil unduhan dengan membandingkan tanggal awal dan akhir serta jumlah baris data.

3.3.4 Data Sekunder

Platform NASA POWER *(Prediction of Worldwide Energy Resources)* menggunakan sistem grid berbasis informasi geografis (GIS) dengan resolusi spasial 0.5° x 0.625° berbasis model reanalisis MERRA-2 (*Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2*) serta pengamatan satelit CERES (*Clouds and the Earth's Radiant Energy System*). Data yang tersedia mencakup unsur meteorologi dan energi matahari harian maupun bulanan di seluruh permukaan bumi secara kontinu, yang telah divalidasi secara global oleh badan penerbangan dan antariksa

Amerika Serikat (NASA) untuk kebutuhan analisis pemodelan agroklimatologi dan energi.

Parameter klimatologi yang diunduh dari platform NASA POWER dan digunakan dalam perhitungan ET_0 metode Penman Modifikasi (FAO) dirinci pada tabel berikut.

Tabel 3.4 Jenis Data Klimatologi yang Diunduh dari NASA POWER

No.	Parameter	Simbol	Satuan	Kegunaan dalam Perhitungan ETP
1	Suhu Udara Rata-rata 2 Meter	T	°C	Menghitung tekanan uap jenuh (es), kemiringan kurva tekanan uap (Delta), dan ETo
2	Suhu Udara Maksimum 2 meter	Tmaks	°C	Menghitung tekanan uap jenuh (es) rata-rata
3	Suhu Udara Minimum 2 meter	Tmin	°C	Menghitung tekanan uap jenuh (es) rata-rata
4	Kelembapan Udara Relatif 2 meter	RH	%	Menghitung tekanan uap aktual (ea) bersama dengan nilai (es)
6	Kecepatan Angin 2 meter	u2	m/s	dikonversi ke satuan km/hari untuk memenuhi fungsi angin Fu
7	Radiasi matahari bersih	Rs	$MJ/m^2/hari$	Menghitung radiasi netto (Rn)

Sumber: *power.larc.nasa.gov*

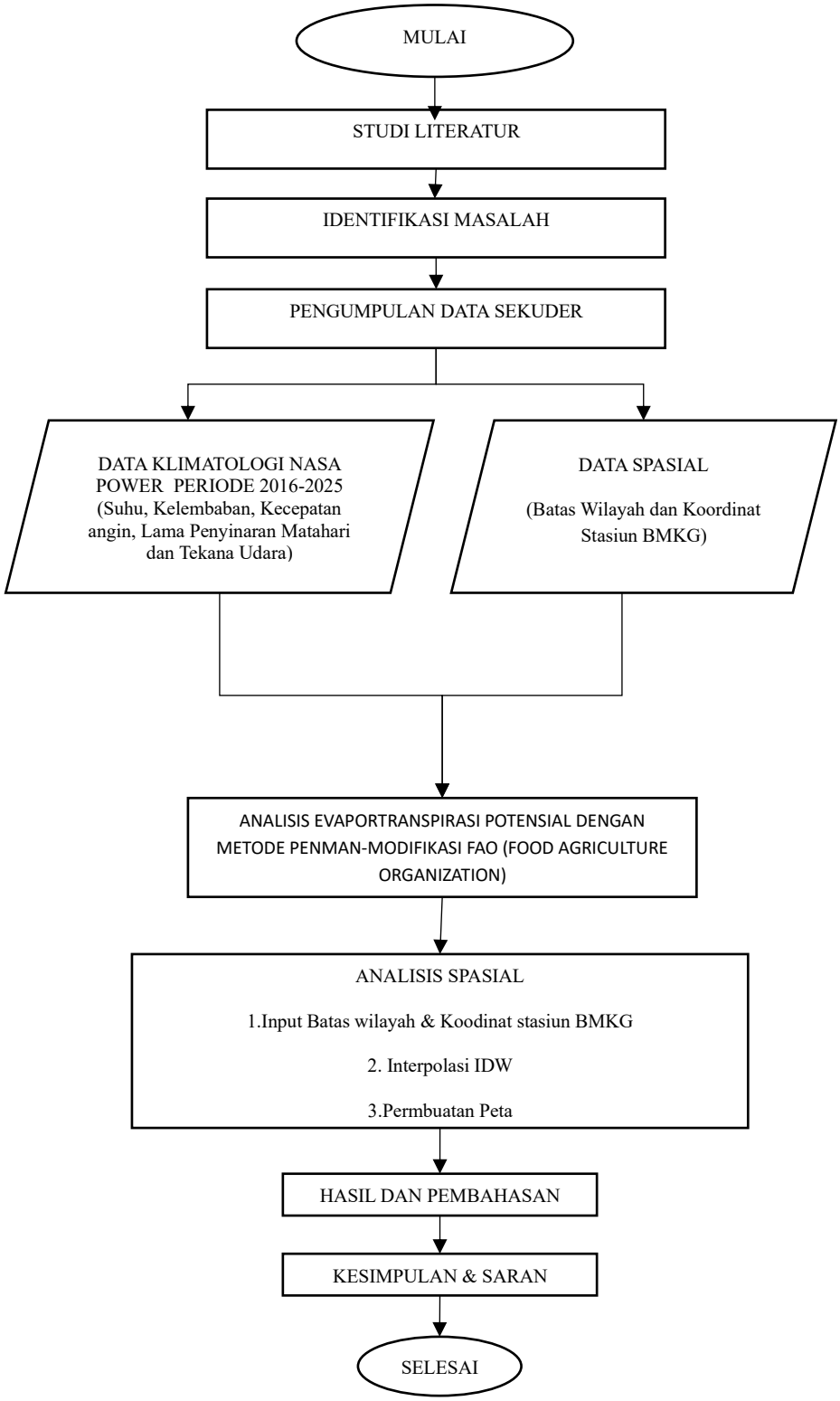
Proses analisis spasial dalam penelitian ini menggunakan kombinasi dua perangkat lunak SIG, yaitu ArcGIS untuk tahap interpolasi dan ArcGIS juga untuk tahap kartografi dan layout peta final.

Tabel 3.5 Pembagian Peran ArcGIS dalam Penelitian

No.	Tahap Pekerjaan	Software	Alasan Pemilihan
1	Input titik koordinat stasiun	ArcGIS	Fleksibel
2	Interpolasi spasial IDW	ArcGIS	Plugin interpolasi gratis dan handal
3	Clipping batas wilayah Kaltara	ArcGIS	Proses cepat dan efisien
4	Klasifikasi nilai ETP	ArcGIS	Kontrol klasifikasi lebih presisi
5	Layout dan desain peta final	ArcGIS	Kualitas kartografi standar publikasi
6	Export peta ke format JPEG/PDF	ArcGIS	Resolusi output lebih tinggi

Sumber: *Peneliti*

3.4.BAGAN ALIR PENELITIAN



BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAHAN

4.1 DATA KLIMATOLOGI RATA-RATA STASIUN

Penelitian ini menggunakan data klimatologi dari 5 (lima) stasiun meteorologi BMKG yang tersebar di Provinsi Kalimantan Utara untuk periode 2016–2025. Data klimatologi rata-rata yang menjadi input perhitungan ET_0 metode Penman-Modifikasi disajikan pada tabel-tabel berikut untuk masing-masing Stasiun.

Karakteristik iklim dan cuaca di wilayah Kabupaten Bulungan diidentifikasi melalui rekapitulasi data parameter klimatologi yang diperoleh dari NASA POWER. Hasil pengolahan data rata-rata bulanan selama periode sepuluh tahun (2016–2025), yang meliputi radiasi surya, kelembapan relatif, temperatur, serta kecepatan angin di Stasiun Bulungan, disajikan secara rinci pada Tabel 4.1 berikut.

Tabel 4.1 Rata-rata Parameter Klimatologi Stasiun Bulungan (2016–2025)

NILAI REKAP RATA-RATA SEMUA PARAMETER													
Parameter	**JAN**	**FEB**	**MAR**	**APR**	**MEI**	**JUN**	**JUL**	**AGS**	**SEP**	**OKT**	**NOV**	**DES**	**Satuan**
Rn (MJ/m²/hari)	14,79	16,25	16,90	17,75	17,24	16,34	16,89	17,73	17,88	17,55	16,85	15,41	MJ/m²/hari
RH (%)	93,17	91,90	92,24	92,38	93,19	93,52	93,40	92,91	92,50	92,67	93,01	93,62	%
T (°C)	24,71	24,76	25,04	25,44	25,74	25,13	25,02	25,09	25,22	25,29	25,27	25,02	°C
Tmax (°C)	29,13	29,36	29,67	29,81	29,91	29,22	29,30	29,36	29,64	29,80	29,63	29,31	°C
Tmin (°C)	21,13	20,78	21,19	21,76	22,60	21,95	21,66	21,82	21,88	21,75	22,00	21,54	°C
u (m/s)	0,109	0,099	0,113	0,121	0,128	0,137	0,122	0,130	0,121	0,128	0,128	0,126	m/s
u (km/hari)	9,418	8,554	9,763	10,454	11,059	11,837	10,541	11,232	10,454	11,059	11,059	10,886	km/hari

Sumber:NASA POWER, diolah Peneliti (2026)

Analisis terhadap kondisi klimatologi wilayah pesisir Kota Tarakan dilakukan untuk memahami fluktuasi parameter lingkungan yang memengaruhi neraca air dan hidrologi setempat. Rekapitulasi nilai rata-rata

bulanan dari data parameter klimatologi Stasiun Tarakan untuk periode tahun 2016 hingga 2025 dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Rata-rata Parameter Klimatologi Stasiun Tarakan (2016–2025)

NILAI REKAP RATA-RATA SEMUA PARAMETER													
Parameter	**JAN**	**FEB**	**MAR**	**APR**	**MEI**	**JUN**	**JUL**	**AGS**	**SEP**	**OKT**	**NOV**	**DES**	**Satuan**
Rn (MJ/m²/hari)	16,06	18,51	18,48	19,08	18,07	17,28	17,16	18,29	18,82	18,25	17,79	16,39	MJ/m²/hari
RH (%)	82,30	80,89	79,91	79,23	80,20	80,88	81,82	81,57	80,77	80,19	80,90	81,98	%
T (°C)	27,42	27,54	27,95	28,39	28,61	27,96	27,72	27,78	27,93	28,11	28,05	27,76	°C
Tmax (°C)	30,59	30,96	31,40	31,81	31,93	31,00	30,66	30,72	30,96	31,31	31,12	30,77	°C
Tmin (°C)	24,76	24,57	24,99	25,87	26,37	25,57	25,17	25,34	25,49	25,57	25,72	25,30	°C
u (m/s)	0,0243	0,0289	0,0262	0,0219	0,0194	0,0191	0,0224	0,0222	0,0220	0,0192	0,0188	0,0195	m/s
u (km/hari)	2,100	2,497	2,264	1,892	1,676	1,650	1,935	1,918	1,901	1,659	1,624	1,685	km/hari

Sumber: NASA POWER, diolah Peneliti (2026)

Kondisi wilayah perbatasan di Kabupaten Nunukan juga memerlukan tinjauan parameter cuaca yang spesifik guna mendukung akurasi analisis spasial. Data rekapitulasi rata-rata parameter klimatologi pada Stasiun Nunukan dalam kurun waktu sepuluh tahun terakhir (2016–2025) terangkum pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3. Rata-rata Parameter Klimatologi Stasiun Nunukan (2016–2025)

NILAI REKAP RATA-RATA SEMUA PARAMETER													
Parameter	**JAN**	**FEB**	**MAR**	**APR**	**MEI**	**JUN**	**JUL**	**AGS**	**SEP**	**OKT**	**NOV**	**DES**	**Satuan**
Rn (MJ/m²/hari)	16,25	17,45	18,09	18,63	18,21	17,68	17,72	18,41	18,60	18,43	17,87	16,70	MJ/m²/hari
RH (%)	92,54	90,99	91,36	91,55	92,50	92,91	92,83	92,31	92,15	92,14	92,59	93,25	%
T (°C)	24,86	24,97	25,25	25,61	25,79	25,14	25,06	25,09	25,23	25,28	25,35	25,08	°C
Tmax (°C)	29,28	29,51	29,79	29,87	29,98	29,23	29,24	29,23	29,35	29,68	29,58	29,44	°C
Tmin (°C)	21,06	20,59	21,14	21,98	22,61	21,83	21,86	21,86	21,84	21,74	22,03	21,80	°C
u (m/s)	0,150	0,144	0,153	0,155	0,162	0,177	0,176	0,184	0,164	0,169	0,162	0,154	m/s
u (km/hari)	12,960	12,442	13,219	13,392	13,997	15,293	15,206	15,898	14,170	14,602	13,997	13,306	km/hari

Sumber: NASA POWER, diolah Peneliti (2026)

Sebagai wilayah dengan karakteristik topografi yang didominasi oleh hutan dan dataran tinggi, pengamatan parameter klimatologi di Kabupaten Malinau menjadi sangat krusial. Karakteristik rata-rata bulanan untuk setiap parameter klimatologi di Stasiun Malinau selama periode 2016–2025 disajikan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Rata-rata Parameter Klimatologi Stasiun Malinau (2016–2025)

NILAI REKAP RATA-RATA SEMUA PARAMETER													
Parameter	**JAN**	**FEB**	**MAR**	**APR**	**MEI**	**JUN**	**JUL**	**AGS**	**SEP**	**OKT**	**NOV**	**DES**	**Satuan**
Rn (MJ/m²/hari)	16,247	17,449	18,091	18,633	18,207	17,677	17,719	18,412	18,600	18,435	17,867	16,703	MJ/m²/hari
RH (%)	92,535	90,993	91,359	91,545	92,498	92,911	92,826	92,308	92,148	92,144	92,594	93,250	%
T (°C)	25,262	25,358	25,622	25,997	26,233	25,643	25,558	25,615	25,706	25,760	25,732	25,485	°C
Tmax (°C)	29,388	29,723	29,964	30,159	30,335	29,716	29,724	29,758	29,892	30,017	29,835	29,586	°C
Tmin (°C)	21,759	21,312	21,850	22,349	23,029	22,453	22,395	22,467	22,403	22,326	22,521	22,235	°C
u (m/s)	0,153	0,137	0,144	0,156	0,163	0,172	0,163	0,169	0,157	0,167	0,172	0,163	m/s
u (km/hari)	13,219	11,837	12,442	13,478	14,083	14,861	14,083	14,602	13,565	14,429	14,861	14,083	km/hari

Sumber: NASA POWER, diolah Peneliti (2026)

Sebagai wilayah dengan karakteristik topografi yang didominasi oleh hutan dan dataran tinggi, pengamatan parameter klimatologi di Kabupaten Malinau menjadi sangat krusial. Karakteristik rata-rata bulanan untuk setiap parameter

klimatologi di Stasiun Malinau selama periode 2016–2025 disajikan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Rata-rata Parameter Klimatologi Stasiun Krayan (2016–2025)

NILAI REKAP RATA-RATA SEMUA PARAMETER													
Parameter	**JAN**	**FEB**	**MAR**	**APR**	**MEI**	**JUN**	**JUL**	**AGS**	**SEP**	**OKT**	**NOV**	**DES**	**Satuan**
Rn (MJ/m²/hari)	16,421	17,436	18,263	18,620	18,106	17,461	17,851	18,305	18,190	17,803	17,055	16,260	MJ/m²/hari
RH (%)	90,419	88,868	88,856	89,565	90,430	90,233	89,221	88,992	89,311	89,716	90,631	91,122	%
T (°C)	20,347	20,483	20,900	21,123	21,391	20,626	20,342	20,422	20,550	20,515	20,650	20,391	°C
Tmax (°C)	25,846	26,104	26,563	26,664	26,603	25,828	25,662	25,738	26,246	26,303	26,435	25,798	°C
Tmin (°C)	15,670	15,280	15,975	16,386	17,214	16,326	15,721	16,044	15,956	15,962	16,307	16,008	°C
u (m/s)	0,250	0,252	0,246	0,250	0,246	0,259	0,294	0,283	0,270	0,266	0,253	0,256	m/s
u (km/hari)	21,600	21,773	21,254	21,600	21,254	22,378	25,402	24,451	23,328	22,982	21,859	22,118	km/hari

Sumber: NASA POWER, diolah Peneliti (2026)

Selain wilayah administrasi Kalimantan Utara, analisis ini juga mencakup wilayah Stasiun Berau sebagai representasi kondisi klimatologi di area batas selatan kajian. Rekapitulasi hasil pengolahan data rata-rata parameter klimatologi untuk Stasiun Berau selama periode sepuluh tahun (2016–2025) ditunjukkan pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Rata-rata Parameter Klimatologi Stasiun Berau (2016–2025)

NILAI REKAP RATA-RATA SEMUA PARAMETER													
Parameter	**JAN**	**FEB**	**MAR**	**APR**	**MEI**	**JUN**	**JUL**	**AGS**	**SEP**	**OKT**	**NOV**	**DES**	**Satuan**
Rn (MJ/m²/hari)	14,789	16,251	16,900	17,753	17,237	16,336	16,894	17,732	17,884	17,551	16,853	17,199	MJ/m²/hari
RH (%)	92,173	91,491	91,221	90,802	91,518	91,854	91,901	91,159	89,749	90,196	91,214	91,935	%
T (°C)	25,261	25,256	25,554	25,932	26,267	25,600	25,398	25,473	25,762	25,898	25,822	25,641	°C
Tmax (°C)	29,657	29,674	30,031	30,247	30,264	29,660	29,596	29,845	30,431	30,605	30,164	29,883	°C
Tmin (°C)	22,132	21,710	22,197	22,429	23,179	22,511	22,034	22,129	22,357	22,689	22,793	22,722	°C
u (m/s)	0,261	0,275	0,265	0,256	0,246	0,252	0,243	0,251	0,245	0,253	0,262	0,255	m/s
u (km/hari)	22,550	23,760	22,896	22,118	21,254	21,773	20,995	21,686	21,168	21,859	22,637	22,032	km/hari

Sumber: NASA POWER, diolah Peneliti (2026)

4.2 NILAI BESARAN EVAPOTRANSPIRASI POTENSIAL BULANAN PER STASIUN

Hasil perhitungan ETP menggunakan metode Penman Modifikasi untuk periode 12 bulan pada stasiun Tarakan dalam periode bulan januari disajikan dalam perhitungan dan tabel. Berikut perhitungan nilai besaran Evapotranspirasi Potensial bulan januari pada Tarakan berserta Rekap Nilai Besaran Periode 12 bulan masing-masing Stasiun yang disajikan dalam tabel.

DATA INPUT (Januari) Stasiun Tarakan Bulan Januari:

T rata-rata: 27,42 °C

T maksimum (T_{maks}): 30,59 °C

T minimum (T_{min}): 24,76 °C

Kelembapan Relatif (RH): 82,30 %

Kecepatan Angin (u): 2,103 km/hari (atau sekitar 0,024 m/s)

Radiasi Bersih (R_n): 16,06 MJ/m²/hari

1. Tekanan Uap Jenuh (e_s)

Menggunakan rumus Magnus-Tetens: $e^{\circ}(T) = 6{,}108 \times \exp\left(\frac{17{,}27 \times T}{T + 237{,}3}\right)$

$e^{\circ}(T_{maks})$ untuk 30,59 °C:

$$e^{\circ}(30{,}59) = 6{,}108 \times \exp\left(\frac{17{,}27 \times 30{,}59}{30{,}59 + 237{,}3}\right) = 6{,}108 \times \exp(1{,}9718)$$
$$= 43{,}88 \text{ mbar}$$

$e^{\circ}(T_{min})$ untuk 24,76 °C:

$$e^{\circ}(24{,}76) = 6{,}108 \times \exp\left(\frac{17{,}27 \times 24{,}76}{24{,}76 + 237{,}3}\right) = 6{,}108 \times \exp(1{,}6324)$$
$$= 31{,}23 \text{ mbar}$$

Tekanan Uap Jenuh Rata-rata (e_s):

$$e_s = \frac{43{,}88 + 31{,}25}{2} \Rightarrow e_s = 37{,}56 \text{ mbar}$$

2. Tekanan Uap Aktual (e_a)

Menggunakan nilai $RH = 82{,}30\%$:

$$e_a = e_s \times \frac{RH}{100} = 37{,}56 \times \frac{82{,}30}{100} \Rightarrow e_a = 30{,}91 \text{ mbar}$$

3. Defisit Tekanan Uap (VPD)

$$VPD = e_s - e_a = 37{,}56 - 30{,}91 \Rightarrow VPD = 6{,}65 \text{ mbar}$$

4. Slope Kurva Tekanan Uap (Δ)

Dihitung pada T rata-rata (27,42 °C):

$$e^{\circ}(27{,}42) = 6{,}108 \times \exp\left(\frac{17{,}27 \times 27{,}42}{27{,}42 + 237{,}3}\right) = 36{,}54 \text{ mbar} = 3{,}654 \text{ kPa}$$

$$\Delta = \frac{4098 \times 3{,}654}{(27{,}42 + 237{,}3)^2} = \frac{14974{,}09}{70076{,}14} \Rightarrow \Delta = 0{,}2137 \text{ kPa/°C}$$

5. Faktor Bobot (W)

Dengan konstanta psikrometrik $\gamma = 0{,}066$ kPa/°C:

$$W = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} = \frac{0{,}2137}{0{,}2137 + 0{,}066} = \frac{0{,}2137}{0{,}2797} \Rightarrow W = 0{,}7640$$

$$(1 - W) = 0{,}2360$$

6. Fungsi Angin $f(u)$

Konversi satuan: u (m/s) × 86,4 = u (km/hari)

u = 0.0243 m/s × 86,4 = 2.1 km/hari

Rumus: f(u) = 0,27 × (1 + u/100)

f(u) = 0,27 × (1 + 2.1/100)

= 0,27 × (1 + 0.02)

= 0,2757 mm/hari

7. Konversi Radiasi Bersih R_n ke mm/hari

Menggunakan faktor konversi penyerapan panas laten (2,45 MJ/kg):

$$R_n = \frac{16{,}059 \text{ MJ/m}^2\text{/hari}}{2{,}45} \Rightarrow R_n = 6{,}555 \text{ mm/hari}$$

8. Suku 1 dan suku 2

Suku 1 $= W \times R_n = 0{,}7640 \times 6{,}555 \Rightarrow$ Suku 1 $= 5{,}0080$ mm/hari

Suku 2 $= (1 - W) \times f(u) \times VPD = 0{,}2360 \times 0{,}2757 \times 6{,}65 \Rightarrow$ Suku 2 $= 0{,}4324$ mm/hari

$E_p =$ Suku 1 + Suku 2 $= 5{,}0080 + 0{,}4327 \Rightarrow E_p = 5{,}4407$ mm/hari

Tabel 4.7 Faktor Koreksi c (Tabel FAO Paper 24)

RH	Angin Lemah (<2 m/s)	Angin Sedang (2–5 m/s)	Angin Kuat (>5 m/s)
RH < 40%	1,00	1,05	1,05
40% ≤ RH ≤ 70%	0,95	1,00	1,05
RH > 70%	**0,80**	0,85	0,85

Sumber: Tabel FAO Paper 24

Maka nilai c berdasarkan tabel adalah 0,80.

9. Hasil Akhir ETo Tarakan Januari

$$ETo = c \times E_p$$

$$ETo = 0{,}80 \times 5{,}4407$$

$$\text{ETo Tarakan Januari} = 4{,}35 \text{ mm/hari}$$

Hasil perhitungan nilai Evapotranspirasi Potensial (ET_0) menggunakan metode Penman-Modifikasi pada Stasiun Tarakan telah dilakukan untuk memahami besaran kehilangan air rata-rata per bulan. Berdasarkan data parameter klimatologi yang telah diolah, berikut adalah rekapitulasi nilai ET_0 bulanan di Stasiun Tarakan selama periode 2016–2025 yang disajikan pada Tabel 4.8

Tabel 4.8 Nilai Besaran Evapotranspirasi Stasiun Tarakan (mm/hari), Periode 2016–2025

Parameter	JAN	FEB	MAR	APR	MEI	JUN	JUL	AGS	SEP	OKT	NOV	DES
e(Tmaks)	43,89	44,82	45,96	47,04	47,36	44,93	44,06	44,21	44,82	45,72	45,26	44,34
e(Tmin)	31,23	30,88	31,66	33,36	34,36	32,77	32,00	32,33	32,61	32,77	33,06	32,25
es (Trata-rata)	36,54	36,80	37,69	38,67	39,16	37,71	37,19	37,32	37,65	38,04	37,91	37,27
es(mbar)	37,56	37,85	38,81	40,20	40,86	38,85	38,03	38,27	38,72	39,25	39,16	38,29
ea(mbar)	30,91	30,62	31,01	31,85	32,77	31,42	31,12	31,22	31,27	31,47	31,68	31,39
VPD (mbar)	6,65	7,23	7,80	8,35	8,09	7,43	6,91	7,05	7,45	7,77	7,48	6,90
Δ	0,21	0,21	0,22	0,22	0,23	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
W	0,76	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77
(1−W)	0,24	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
f(u)	0,28	0,28	0,28	0,28	0,27	0,27	0,28	0,28	0,28	0,27	0,27	0,27
Rn (mm/hari)	6,56	7,56	7,54	7,79	7,38	7,05	7,00	7,47	7,68	7,45	7,26	6,69
Suku 1	5,01	5,78	5,80	6,02	5,71	5,42	5,37	5,73	5,90	5,74	5,59	5,13
Suku 2	0,43	0,47	0,50	0,52	0,50	0,47	0,44	0,45	0,47	0,49	0,47	0,44
Ep (mm/hari)	5,44	6,25	6,30	6,54	6,21	5,89	5,81	6,18	6,38	6,23	6,06	5,57
c	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
ETo (mm/hari)	4,35	5,00	5,04	5,23	4,97	4,72	4,65	4,94	5,10	4,98	4,85	4,46

Sumber: Hasil perhitungan Penman-Modifikasi, diolah Peneliti (2026)

Berdasarkan analisis parameter meteorologi yang berpengaruh pada proses penguapan di Stasiun Bulungan, nilai evapotranspirasi potensial harian telah dihitung untuk menggambarkan karakteristik kebutuhan air di wilayah tersebut. Hasil rekapitulasi nilai ET_0 (mm/hari) untuk Stasiun Bulungan selama periode pengamatan 2016–2025 dirangkum dalam Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Nilai Besaran Evapotranspirasi Stasiun Bulungan (mm/hari), Periode 2016–2025

Parameter	JAN	FEB	MAR	APR	MEI	JUN	JUL	AGS	SEP	OKT	NOV	DES
e(Tmaks)	40,36	40,90	41,63	41,97	42,21	40,57	40,76	40,90	41,56	41,95	41,54	40,78
e(Tmin)	25,07	24,54	25,16	26,06	27,42	26,36	25,90	26,15	26,25	26,04	26,44	25,71
es(Trata-rata)	31,13	31,23	31,75	32,52	33,10	31,92	31,72	31,85	32,10	32,23	32,19	31,72
es(mbar)	32,71	32,72	33,40	34,01	34,82	33,46	33,33	33,52	33,90	33,99	33,99	33,24
ea(mbar)	30,48	30,07	30,81	31,42	32,45	31,30	31,13	31,15	31,36	31,50	31,61	31,12
VPD (mbar)	2,23	2,65	2,59	2,59	2,37	2,17	2,20	2,38	2,54	2,49	2,38	2,12
Δ	0,19	0,19	0,19	0,19	0,20	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
W	0,74	0,74	0,74	0,75	0,75	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74
(1−W)	0,26	0,26	0,26	0,25	0,25	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
f(u)	0,30	0,29	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
Rn (mm/hari)	6,04	6,63	6,90	7,24	7,04	6,67	6,89	7,24	7,30	7,16	6,88	6,29
Suku 1	4,45	4,90	5,11	5,40	5,26	4,95	5,11	5,37	5,42	5,33	5,11	4,66
Suku 2	0,17	0,20	0,20	0,20	0,18	0,17	0,17	0,18	0,19	0,19	0,18	0,16
Ep (mm/hari)	4,63	5,10	5,31	5,60	5,44	5,12	5,28	5,55	5,62	5,52	5,30	4,83
c	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
ETo (mm/hari)	3,70	4,08	4,25	4,48	4,35	4,09	4,22	4,44	4,49	4,42	4,24	3,86

Sumber: Hasil perhitungan Penman-Modifikasi, diolah Peneliti (2026)

Untuk mendukung akurasi analisis hidrologi di wilayah perbatasan, dilakukan perhitungan nilai ET_0 menggunakan metode Penman-Modifikasi dengan input data klimatologi Stasiun Nunukan. Rekapitulasi nilai besaran Evapotranspirasi Potensial (ET_0) rata-rata untuk Stasiun Nunukan selama periode 2016–2025 disajikan pada Tabel 4.10

Tabel 4.10 Nilai Besaran Evapotranspirasi Stasiun Nunukan (mm/hari), Periode 2016–2025

Parameter	JAN	FEB	MAR	APR	MEI	JUN	JUL	AGS	SEP	OKT	NOV	DES
e(Tmaks)	40,71	41,25	41,92	42,12	42,38	40,59	40,62	40,59	40,87	41,66	41,42	41,09
e(Tmin)	24,96	24,25	25,08	26,41	27,44	26,17	26,21	26,21	26,18	26,02	26,49	26,12
es(Trata-rata)	31,41	31,62	32,15	32,85	33,20	31,94	31,79	31,85	32,11	32,21	32,34	31,83
es(mbar)	32,84	32,75	33,50	34,26	34,91	33,38	33,42	33,40	33,53	33,84	33,95	33,60
ea(mbar)	30,39	29,80	30,61	31,37	32,29	31,01	31,02	30,83	30,90	31,18	31,44	31,33
VPD (mbar)	2,45	2,95	2,89	2,90	2,62	2,37	2,40	2,57	2,63	2,66	2,52	2,27
Δ	0,19	0,19	0,19	0,19	0,20	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
W	0,74	0,74	0,74	0,75	0,75	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74
(1−W)	0,26	0,26	0,26	0,25	0,25	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
f(u)	0,30	0,30	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31
Rn (mm/hari)	6,63	7,12	7,38	7,60	7,43	7,22	7,23	7,51	7,59	7,52	7,29	6,82
Suku 1	4,90	5,27	5,49	5,68	5,56	5,36	5,36	5,57	5,64	5,59	5,43	5,06
Suku 2	0,19	0,23	0,23	0,22	0,20	0,19	0,19	0,21	0,21	0,21	0,20	0,18
Ep (mm/hari)	5,10	5,51	5,72	5,90	5,77	5,55	5,56	5,78	5,85	5,80	5,63	5,23
c	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
ETo (mm/hari)	4,08	4,41	4,57	4,72	4,61	4,44	4,44	4,63	4,68	4,64	4,50	4,19

Sumber: Hasil perhitungan Penman-Modifikasi, diolah Peneliti (2026)

Analisis terhadap fluktuasi nilai evapotranspirasi di wilayah pedalaman Malinau dilakukan guna memahami dinamika kehilangan air ke atmosfer akibat kondisi topografi dan iklim setempat. Hasil perhitungan besaran Evapotranspirasi Potensial (ET_0) rata-rata bulanan di Stasiun Malinau untuk kurun waktu 2016–2025 dapat dilihat pada Tabel 4.11

Tabel 4.11 Nilai Besaran Evapotranspirasi Stasiun Malinau (mm/hari), Periode 2016–2025

Parameter	JAN	FEB	MAR	APR	MEI	JUN	JUL	AGS	SEP	OKT	NOV	DES
e(Tmaks)	40,96	41,76	42,34	42,82	43,25	41,74	41,76	41,85	42,17	42,47	42,03	41,43
e(Tmin)	26,05	25,35	26,20	27,01	28,14	27,18	27,08	27,20	27,10	26,97	27,29	26,82
es(Trata-rata)	32,18	32,36	32,87	33,61	34,08	32,91	32,75	32,86	33,03	33,14	33,09	32,60
es(mbar)	33,51	33,56	34,27	34,91	35,70	34,46	34,42	34,52	34,63	34,72	34,66	34,13
ea(mbar)	31,01	30,53	31,31	31,96	33,02	32,02	31,95	31,87	31,91	31,99	32,09	31,82
VPD (mbar)	2,50	3,02	2,96	2,95	2,68	2,44	2,47	2,66	2,72	2,73	2,57	2,30
Δ	0,19	0,19	0,19	0,20	0,20	0,20	0,19	0,19	0,20	0,20	0,20	0,19
W	0,74	0,74	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
(1−W)	0,26	0,26	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
f(u)	0,31	0,30	0,30	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31
Rn (mm/hari)	6,63	7,12	7,38	7,61	7,43	7,22	7,23	7,52	7,59	7,52	7,29	6,82
Suku 1	4,93	5,30	5,52	5,71	5,60	5,39	5,40	5,61	5,68	5,63	5,46	5,08
Suku 2	0,20	0,23	0,23	0,23	0,20	0,19	0,19	0,21	0,21	0,21	0,20	0,18
Ep (mm/hari)	5,13	5,53	5,74	5,93	5,80	5,58	5,59	5,82	5,89	5,84	5,66	5,26
c	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
ETo (mm/hari)	4,10	4,43	4,59	4,75	4,64	4,47	4,47	4,66	4,71	4,67	4,52	4,21

Sumber: Hasil perhitungan Penman-Modifikasi, diolah Peneliti (2026)

Karakteristik iklim dataran tinggi di Krayan memerlukan peninjauan khusus terhadap besaran nilai evapotranspirasi untuk menilai potensi kebutuhan air bagi lahan setempat. Melalui penerapan metode Penman-Modifikasi, hasil rekapitulasi nilai ET_0 rata-rata bulanan di Stasiun Krayan periode 2016–2025 ditampilkan dalam Tabel 4.12

Tabel 4.12 Nilai Besaran Evapotranspirasi Stasiun Krayan (mm/hari), Periode 2016–2025

Parameter	JAN	FEB	MAR	APR	MEI	JUN	JUL	AGS	SEP	OKT	NOV	DES
e(Tmaks)	33,31	33,82	34,75	34,96	34,83	33,27	32,95	33,10	34,11	34,22	34,49	33,22
e(Tmin)	17,80	17,36	18,15	18,64	19,64	18,56	17,86	18,23	18,13	18,14	18,54	18,19
es(Trata-rata)	23,89	24,09	24,72	25,06	25,47	24,30	23,88	24,00	24,19	24,14	24,34	23,95
es(mbar)	25,56	25,59	26,45	26,80	27,24	25,92	25,40	25,67	26,12	26,18	26,52	25,70
ea(mbar)	23,11	22,74	23,50	24,00	24,63	23,39	22,67	22,84	23,33	23,49	24,03	23,42
VPD (mbar)	2,45	2,85	2,95	2,80	2,61	2,53	2,74	2,83	2,79	2,69	2,48	2,28
Δ	0,15	0,15	0,15	0,15	0,16	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
W	0,69	0,69	0,70	0,70	0,70	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69
(1−W)	0,31	0,31	0,30	0,30	0,30	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31
f(u)	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,34	0,34	0,33	0,33	0,33	0,33
Rn (mm/hari)	6,70	7,12	7,45	7,60	7,39	7,13	7,29	7,47	7,42	7,27	6,96	6,64
Suku 1	4,63	4,93	5,20	5,32	5,19	4,95	5,03	5,17	5,15	5,03	4,83	4,59
Suku 2	0,25	0,29	0,29	0,28	0,25	0,26	0,29	0,29	0,29	0,27	0,25	0,23
Ep (mm/hari)	4,88	5,22	5,49	5,59	5,45	5,20	5,32	5,46	5,43	5,31	5,08	4,82
c	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
ETo (mm/hari)	3,90	4,17	4,39	4,47	4,36	4,16	4,26	4,37	4,35	4,25	4,07	3,86

Sumber: Hasil perhitungan Penman-Modifikasi, diolah Peneliti (2026)

Sebagai bagian dari analisis komprehensif wilayah kajian, nilai Evapotranspirasi Potensial (ET_0) juga dihitung untuk Stasiun Berau guna melengkapi gambaran spasial di wilayah batas selatan. Rekapitulasi hasil perhitungan besaran nilai ET_0 harian rata-rata bulanan untuk Stasiun Berau pada periode 2016–2025 disajikan pada Tabel 4.13

Tabel 4.13 Nilai Besaran Evapotranspirasi Stasiun Berau (mm/hari), Periode 2016–2025

Parameter	JAN	FEB	MAR	APR	MEI	JUN	JUL	AGS	SEP	OKT	NOV	DES
e(Tmaks)	41,60	41,64	42,51	43,04	43,08	41,61	41,46	42,05	43,49	43,93	42,83	42,15
e(Tmin)	26,65	25,98	26,76	27,14	28,40	27,27	26,49	26,65	27,02	27,57	27,74	27,63
es(Trata-rata)	32,17	32,16	32,74	33,48	34,15	32,83	32,44	32,58	33,14	33,41	33,26	32,91
es(mbar)	34,13	33,81	34,63	35,09	35,74	34,44	33,98	34,35	35,26	35,75	35,29	34,89
ea(mbar)	31,46	30,93	31,59	31,86	32,71	31,64	31,22	31,31	31,64	32,24	32,19	32,07
VPD (mbar)	2,67	2,88	3,04	3,23	3,03	2,81	2,75	3,04	3,61	3,50	3,10	2,81
Δ	0,19	0,19	0,19	0,20	0,20	0,19	0,19	0,19	0,20	0,20	0,20	0,20
W	0,74	0,74	0,75	0,75	0,75	0,75	0,74	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
(1−W)	0,26	0,26	0,25	0,25	0,25	0,25	0,26	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
f(u)	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
Rn (mm/hari)	6,04	6,63	6,90	7,25	7,04	6,67	6,90	7,24	7,30	7,16	6,88	7,02
Suku 1	4,49	4,93	5,15	5,43	5,30	4,98	5,14	5,40	5,46	5,37	5,15	5,25
Suku 2	0,23	0,25	0,26	0,27	0,24	0,23	0,23	0,25	0,30	0,29	0,26	0,23
Ep (mm/hari)	4,71	5,18	5,40	5,70	5,54	5,21	5,37	5,65	5,76	5,66	5,41	5,48
c	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
ETo (mm/hari)	3,77	4,14	4,32	4,56	4,44	4,17	4,29	4,52	4,61	4,53	4,33	4,38

Sumber: Hasil perhitungan Penman-Modifikasi, diolah Peneliti (2026)

Berdasarkan tabel-tabel nilai Evapotranspirasi potensial di Provinsi Kalimantan Utara menunjukkan variasi yang nyata baik secara spasial maupun temporal. Secara spasial, Stasiun Tarakan secara konsisten mencatat nilai ETP tertinggi di setiap bulan sepanjang tahun, sementara Stasiun Bulungan mencatat nilai terendah pada sebagian besar bulan.

4.3 ANALISIS BULANAN EVAPORTRANSPIRASI POTENSIAL

Analisis nilai Evapotranspirasi Potensial (ET_0) secara bulanan dilakukan untuk mengetahui karakteristik dinamika pelepasan uap air ke atmosfer pada masing-masing stasiun pengamatan di wilayah kajian selama periode sepuluh tahun (2016–2025). Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan metode Penman-Modifikasi, fluktuasi nilai ET_0 bulanan sangat dipengaruhi oleh karakteristik geografis, topografi, serta variasi parameter klimatologi lokal spesifik dari masing-masing stasiun.

Secara umum, pola sebaran nilai ET_0 di seluruh stasiun menunjukkan tren pergerakan bimodal (memiliki dua puncak kenaikan), di mana fase peningkatan pertama terjadi pada periode Maret hingga April, dan puncak kedua terjadi pada periode Agustus hingga September. Pola ini berkolerasi langsung dengan posisi semu matahari tahunan di wilayah ekuator yang memicu peningkatan radiasi surya (R_n) dan suhu udara maksimum pada bulan-bulan tersebut.

Stasiun Tarakan mencatat nilai evapotranspirasi bulanan yang relatif paling tinggi dibandingkan dengan stasiun pengamatan lainnya. Nilai ET_0 tertinggi di stasiun ini terjadi pada bulan April sebesar 5,23 mm/hari, sedangkan nilai terendah tercatat pada bulan Januari sebesar 4,35 mm/hari. Tingginya nilai ET_0 di Kota Tarakan secara konsisten sepanjang tahun disebabkan oleh letak geografisnya sebagai wilayah kepulauan/pesisir yang memiliki hembusan kecepatan angin (u) yang jauh lebih kencang (berkisar antara 1,62 hingga 2,51 km/hari) serta temperatur rata-rata udara yang tinggi (27,4 °C – 28,6 °C).

Stasiun Bulungan Berbeda dengan wilayah pesisir Tarakan, Stasiun Bulungan merepresentasikan wilayah daratan utama yang mencatat nilai ET_0 cenderung paling rendah di antara seluruh stasiun kajian. Nilai ET_0 maksimum di Stasiun Bulungan terjadi pada bulan Februari sebesar 4,08 mm/hari, sementara nilai

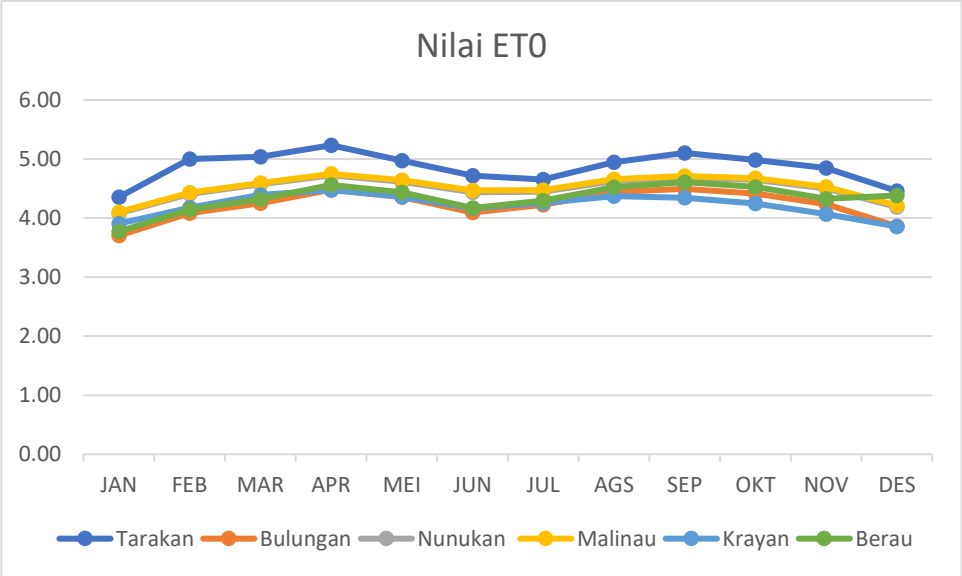
minimum berada pada bulan Januari yaitu sebesar 3,70 mm/hari. Rendahnya nilai pelepasan uap air di kawasan ini dipengaruhi oleh tingkat kelembapan relatif (RH) yang sangat tinggi sepanjang tahun, dengan rata-rata bulanan berada di kisaran 91,9% hingga 93,6%. Kelembapan yang tinggi ini memperkecil defisit tekanan uap di udara, sehingga laju evaporasi menjadi lebih lambat.

Pada Stasiun Nunukan yang berada di wilayah perbatasan utara, fluktuasi nilai ET_0 bergerak secara stabil dengan rentang nilai antara 4,08 mm/hari hingga 4,72 mm/hari. Nilai tertinggi dicapai pada bulan April (4,72 mm/hari) yang didorong oleh tingginya radiasi surya bersih sebesar 18,63 $MJ/m^2/hari$ pada bulan tersebut. Karakteristik cuaca di Nunukan menunjukkan transisi yang moderat antara pengaruh wilayah laut dan daratan, menghasilkan distribusi energi permukaan yang konstan.

Sebagai kawasan pedalaman yang didominasi oleh topografi berhutan tebal, Stasiun Malinau menunjukkan karakteristik nilai ET_0 yang hampir serupa dengan Stasiun Nunukan. Besaran nilai ET_0 rata-rata bulanan berkisar antara 4,10 mm/hari (Januari) hingga mencapai puncaknya sebesar 4,75 mm/hari pada bulan April. Pola ini sejalan dengan peningkatan nilai temperatur maksimum (T_{max}) di Malinau yang mencapai 30,15 °C pada bulan April, yang mempercepat suplai energi panas untuk proses penguapan vegetasi dan permukaan air.

Stasiun Krayan merepresentasikan wilayah dataran tinggi (*highland*) yang unik. Meskipun memiliki temperatur udara rata-rata yang sangat rendah dan sejuk (berkisar antara 20,3 °C hingga 21,3 °C), nilai ET_0 di Krayan tetap tergolong signifikan, dengan nilai berkisar antara 3,86 mm/hari (Desember) hingga 4,47 mm/hari (April). Fenomena ini dapat dijelaskan melalui tingginya nilai radiasi surya bersih (R_n) yang menembus atmosfer dataran tinggi (mencapai 18,62 $MJ/m^2/hari$ pada bulan April) serta diperkuat oleh hembusan angin yang konstan dan lebih bebas dari hambatan topografi kasar (rata-rata angin 0,24 hingga 0,29 km/hari).

Stasiun Berau sebagai batas selatan wilayah kajian mempelihatkan nilai fluktuasi ET_0 yang cukup tinggi dengan variasi bulanan berkisar antara 3,77 mm/hari pada bulan Januari hingga mencapai nilai tertinggi sebesar 4,61 mm/hari pada bulan September. Kenaikan nilai ET_0 pada bulan September ini dipicu oleh penurunan kelembapan udara relatif (RH) ke titik terendah (89,7%) serta peningkatan radiasi matahari bersih (R_n sebesar 17,88 $MJ/m^2/hari$) yang memicu penguapan lebih masif di akhir musim kemarau.



Sumber: *Peneliti*

Gambar 4.1 Nilai Evapotranspirasi Potensial

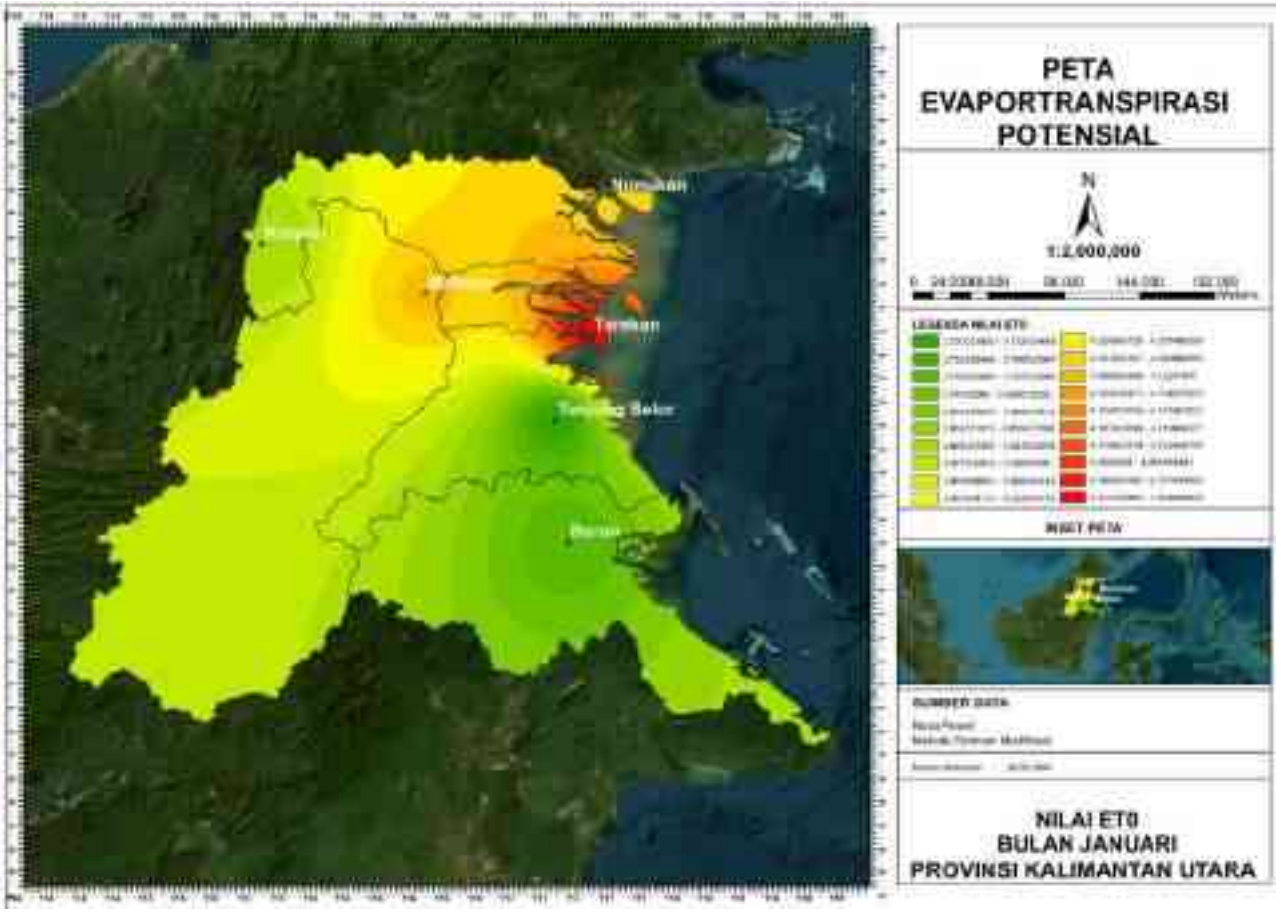
Tabel 4.14 Nilai Besaran Evapotranspirasi Stasiun Berau (mm/hari), Periode 2016–2025

No	Kabupaten/kota	Besaran Nilai Evapotranspirasi Potensial ET0 (mm/hari)											
		JAN	FEB	MAR	APR	MEI	JUN	JUL	AGS	SEP	OKT	NOV	DES
1	Tarakan	4,35	5,00	5,04	5,23	4,97	4,72	4,65	4,94	5,10	4,98	4,85	4,46
2	Bulungan	3,70	4,08	4,25	4,48	4,35	4,09	4,22	4,44	4,49	4,42	4,24	3,86
3	Nunukan	4,08	4,41	4,57	4,72	4,61	4,44	4,44	4,63	4,68	4,64	4,50	4,19
4	Malinau	4,10	4,43	4,59	4,75	4,64	4,47	4,47	4,66	4,71	4,67	4,52	4,21
5	Krayan	3,90	4,17	4,39	4,47	4,36	4,16	4,26	4,37	4,35	4,25	4,07	3,86
6	Berau	3,77	4,14	4,32	4,56	4,44	4,17	4,29	4,52	4,61	4,53	4,33	4,38

Sumber: *Nilai ET0, diolah Peneliti*

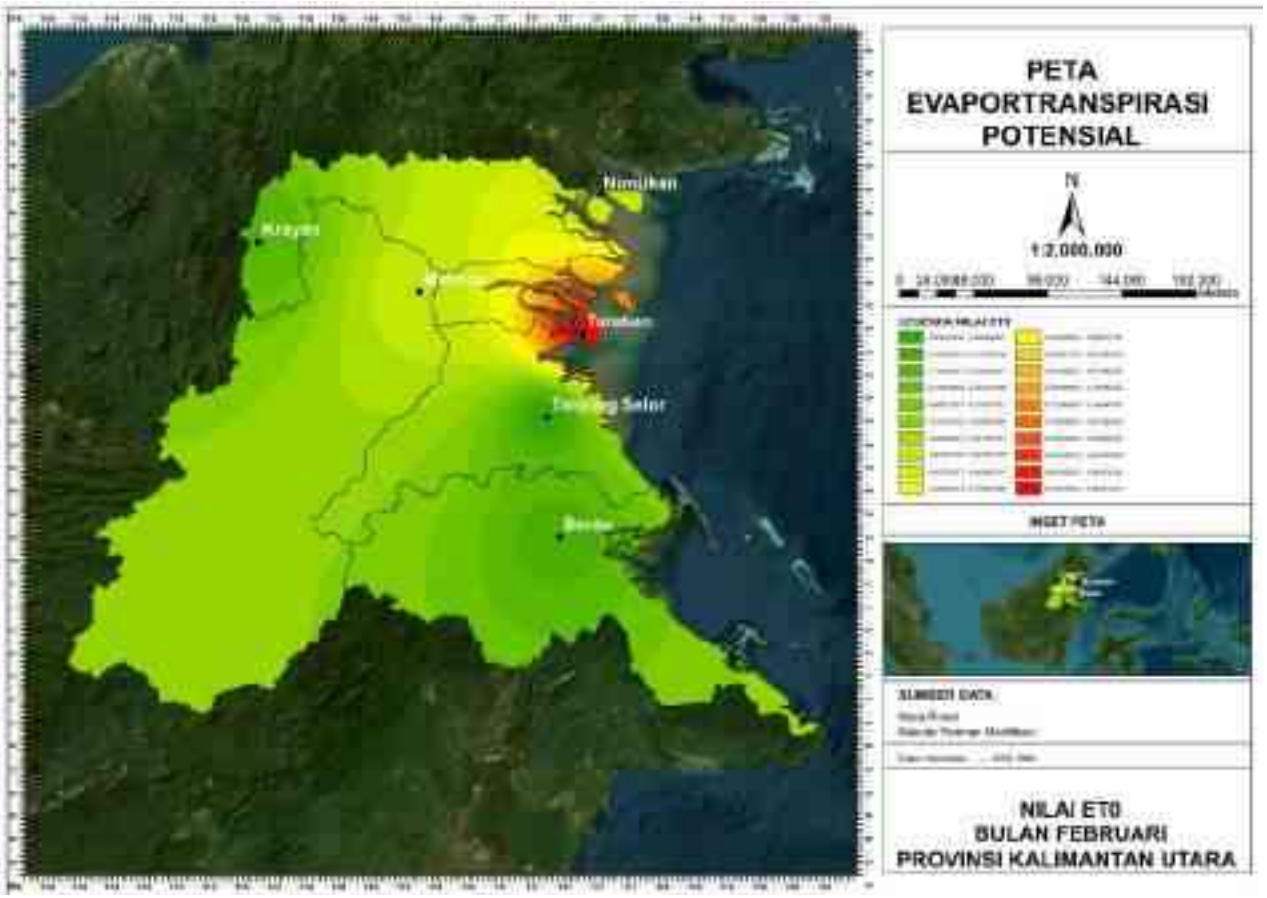
4.4 PEMETAAN EVAPORTRANSPIRASI POTENSIAL

Hasil pemetaan dan interpolasi nilai evapotranspirasi potensial bulan Januari – Desember menggunakan metode IDW di wilayah Kalimantan Utara:



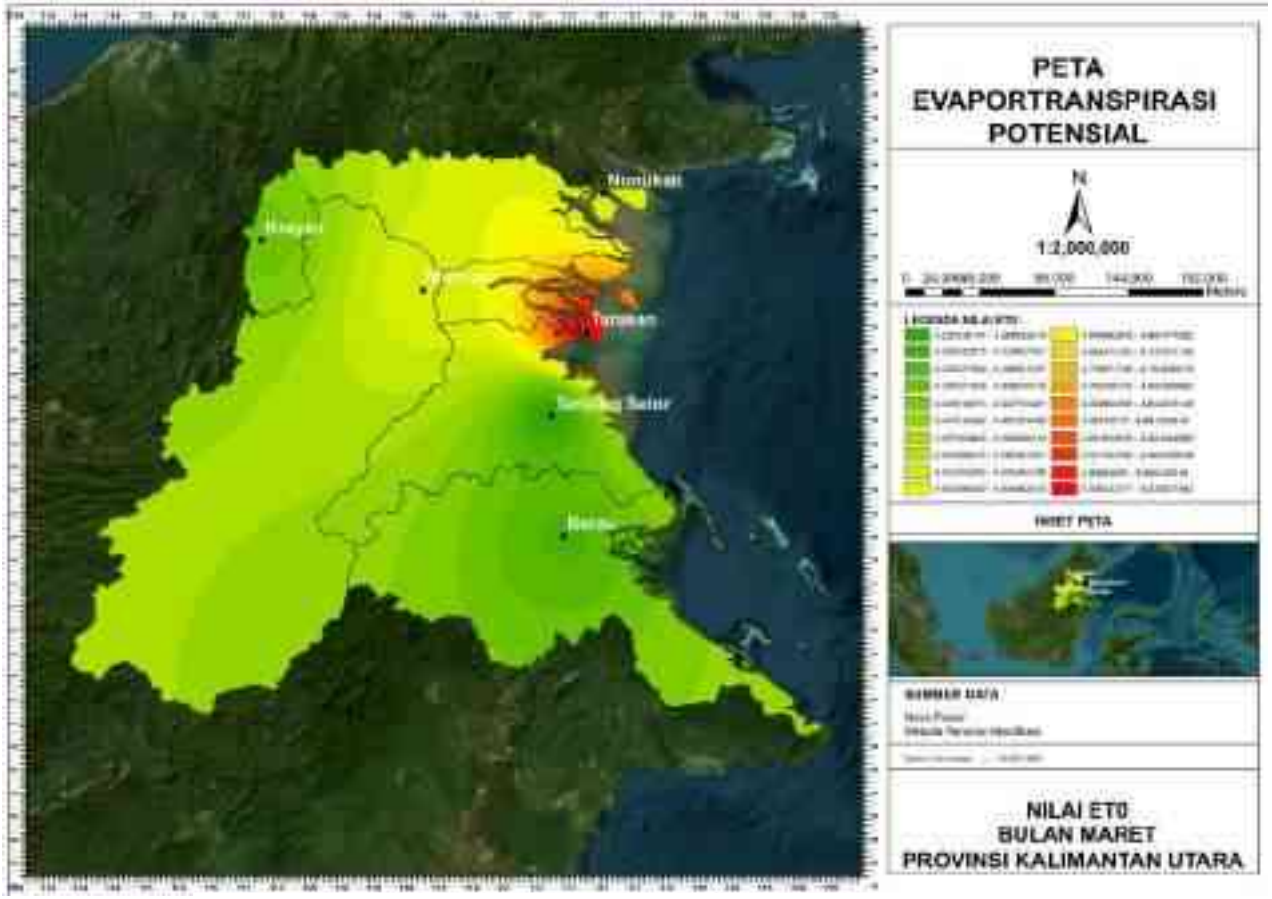
Sumber: *Peneliti*

Gambar 4.2 Peta Eto Bulan Januari



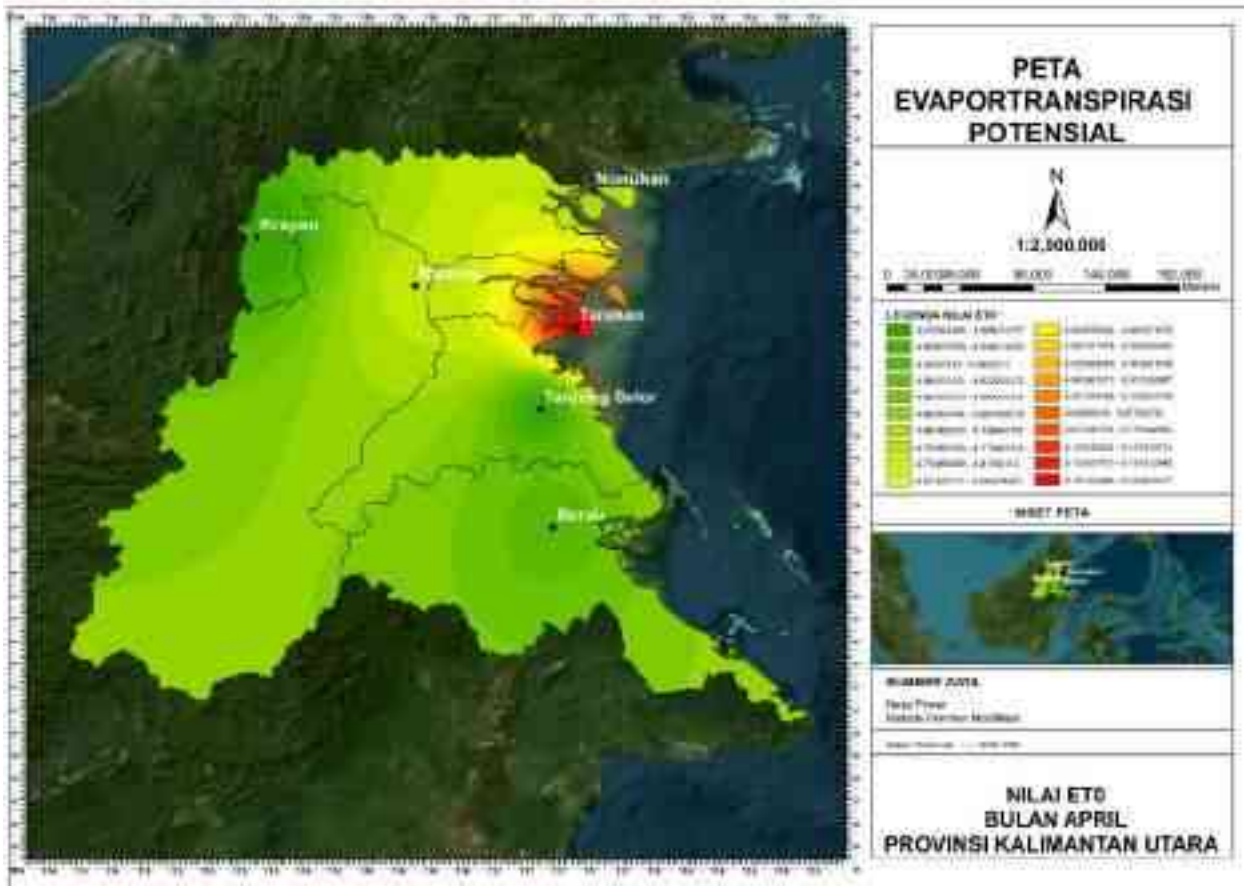
Sumber: *Peneliti*

Gambar 4.3 Peta Eto Bulan Februari



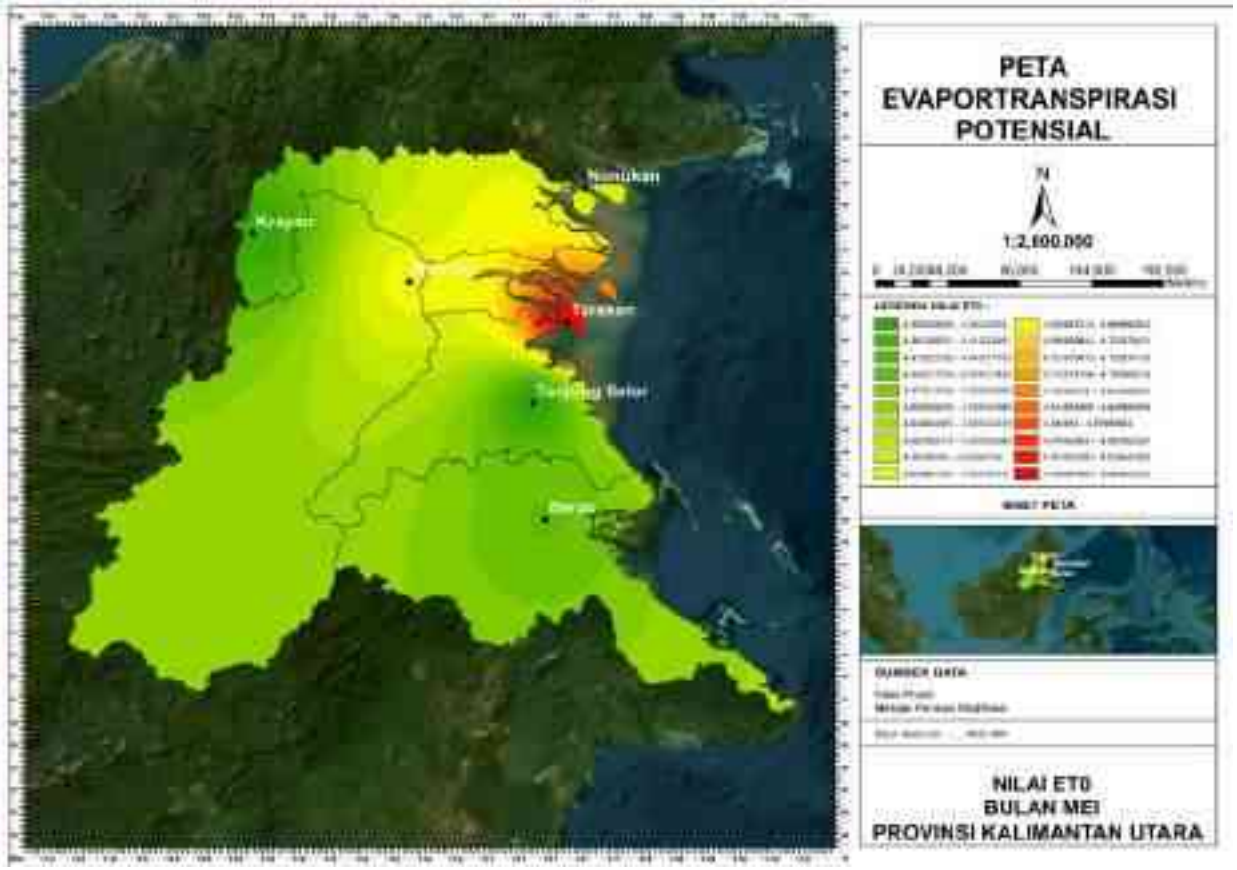
Sumber: *Peneliti*

Gambar 4.4 Peta Eto Bulan Maret



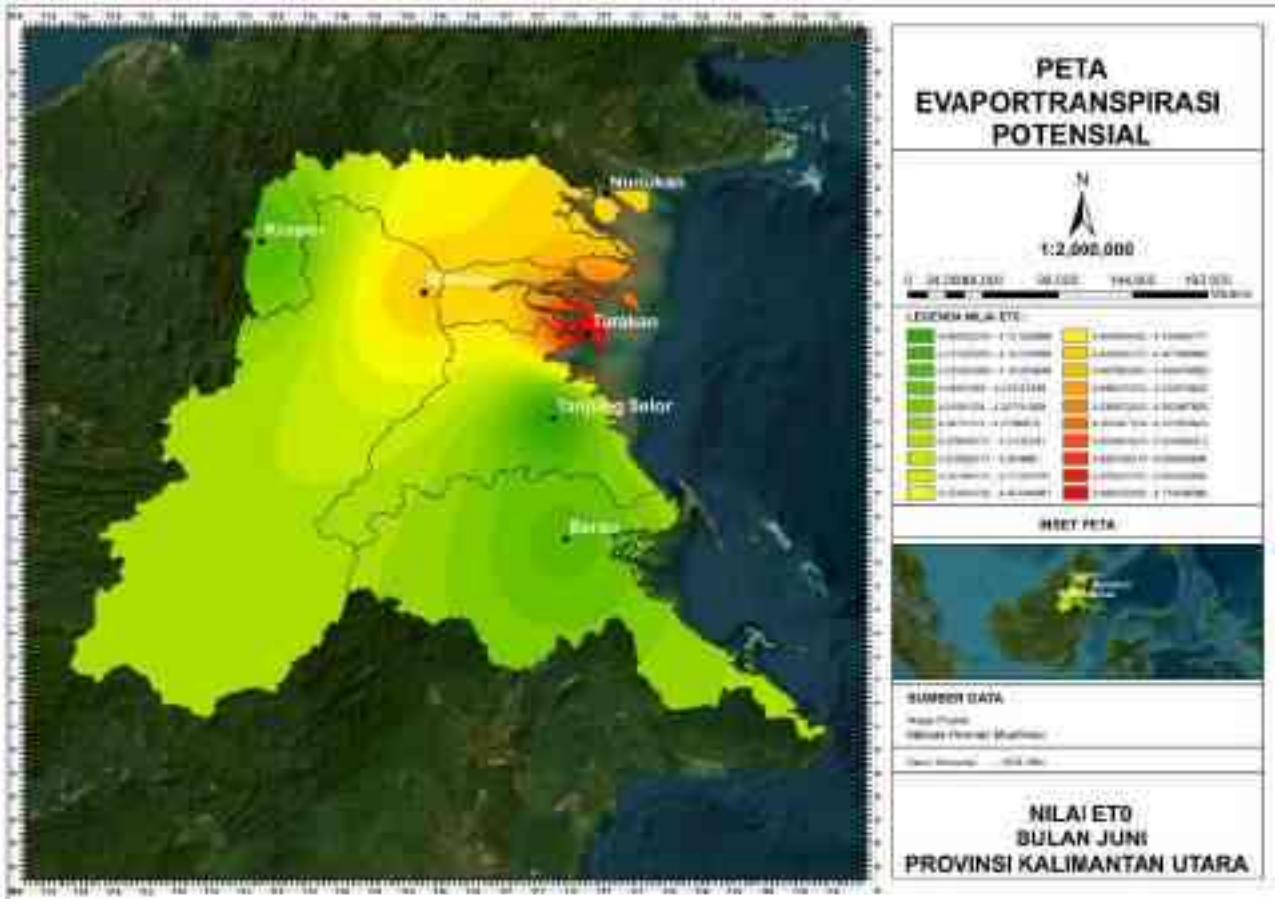
Sumber: *Peneliti*

Gambar 4.5 Peta Eto April



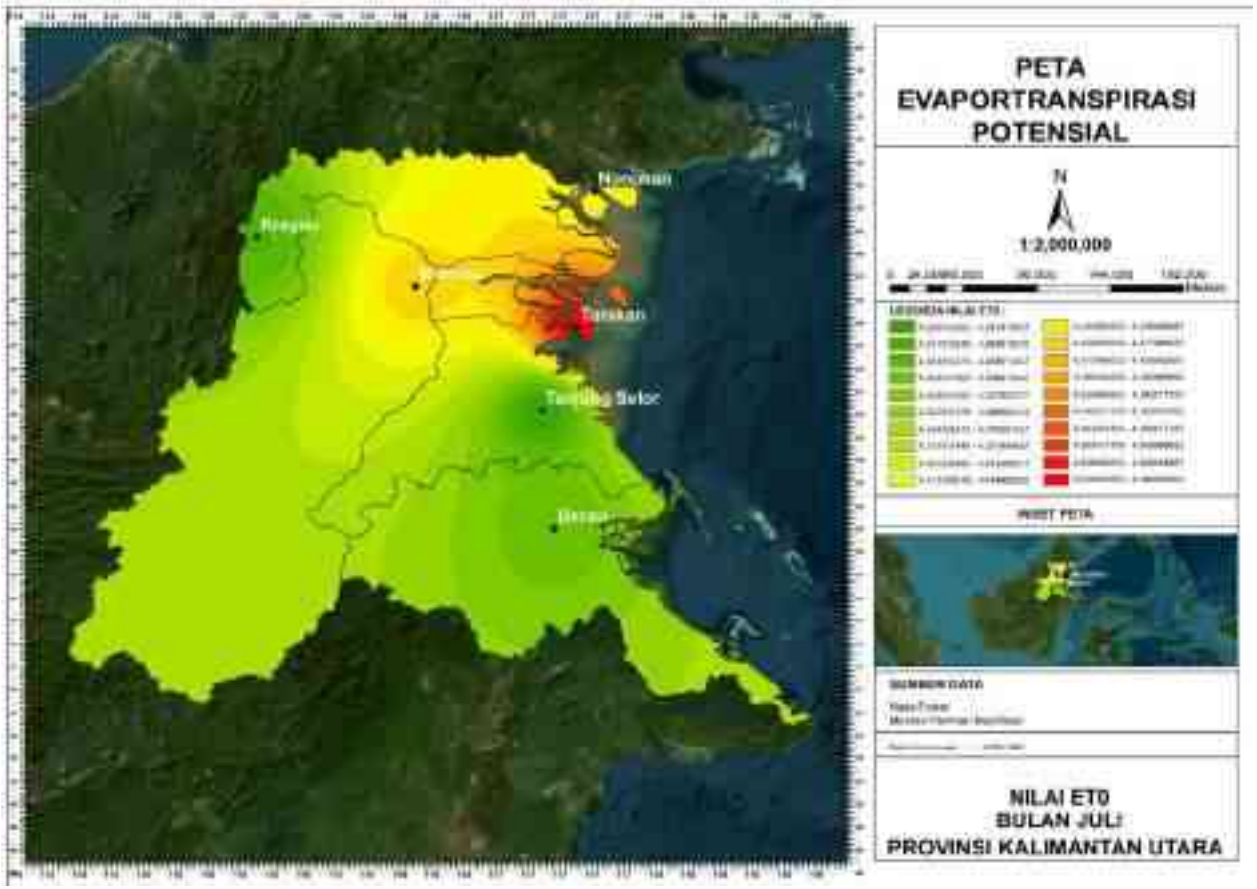
Sumber: *Peneliti*

Gambar 4.6 Peta Eto Bulan Mei



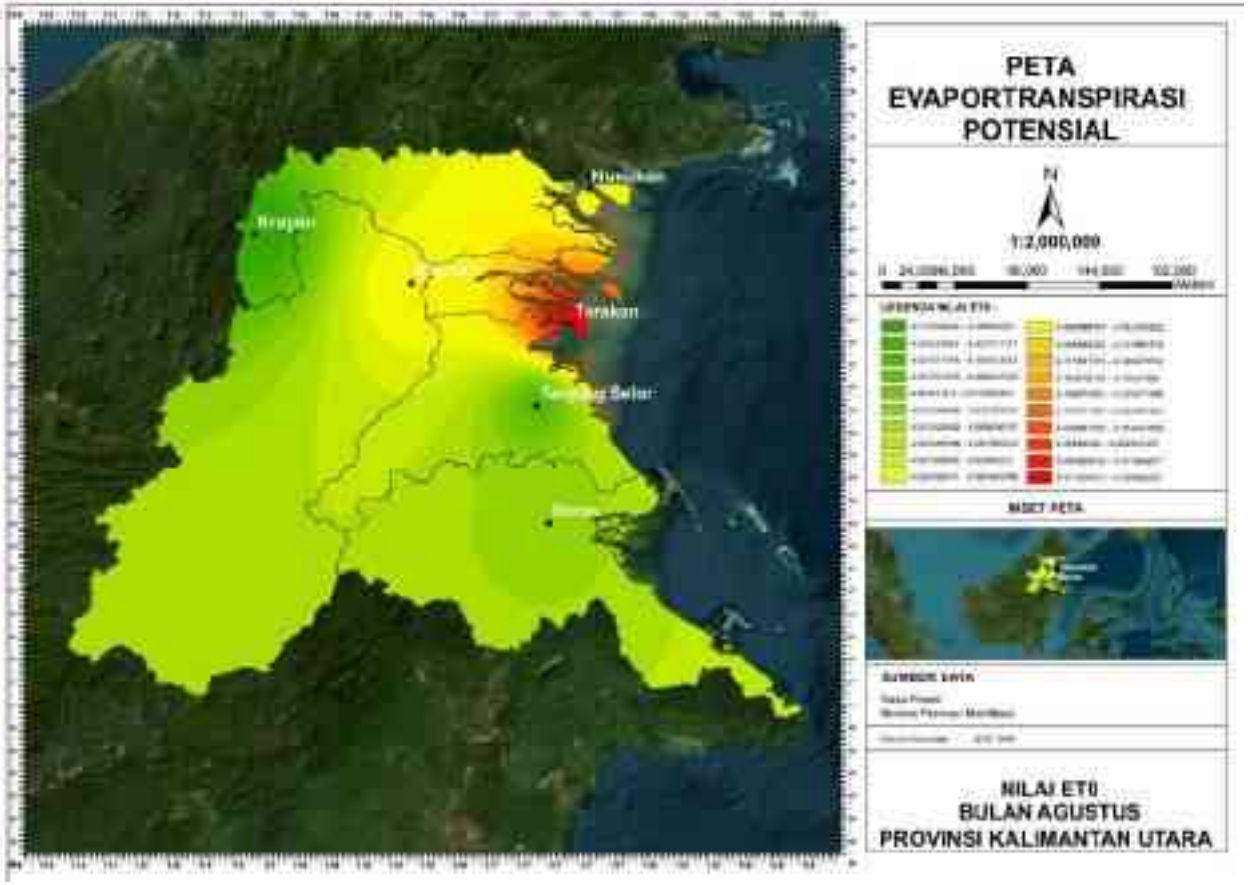
Sumber: *Peneliti*

Gambar 4.7 Peta Eto Bulan Juni



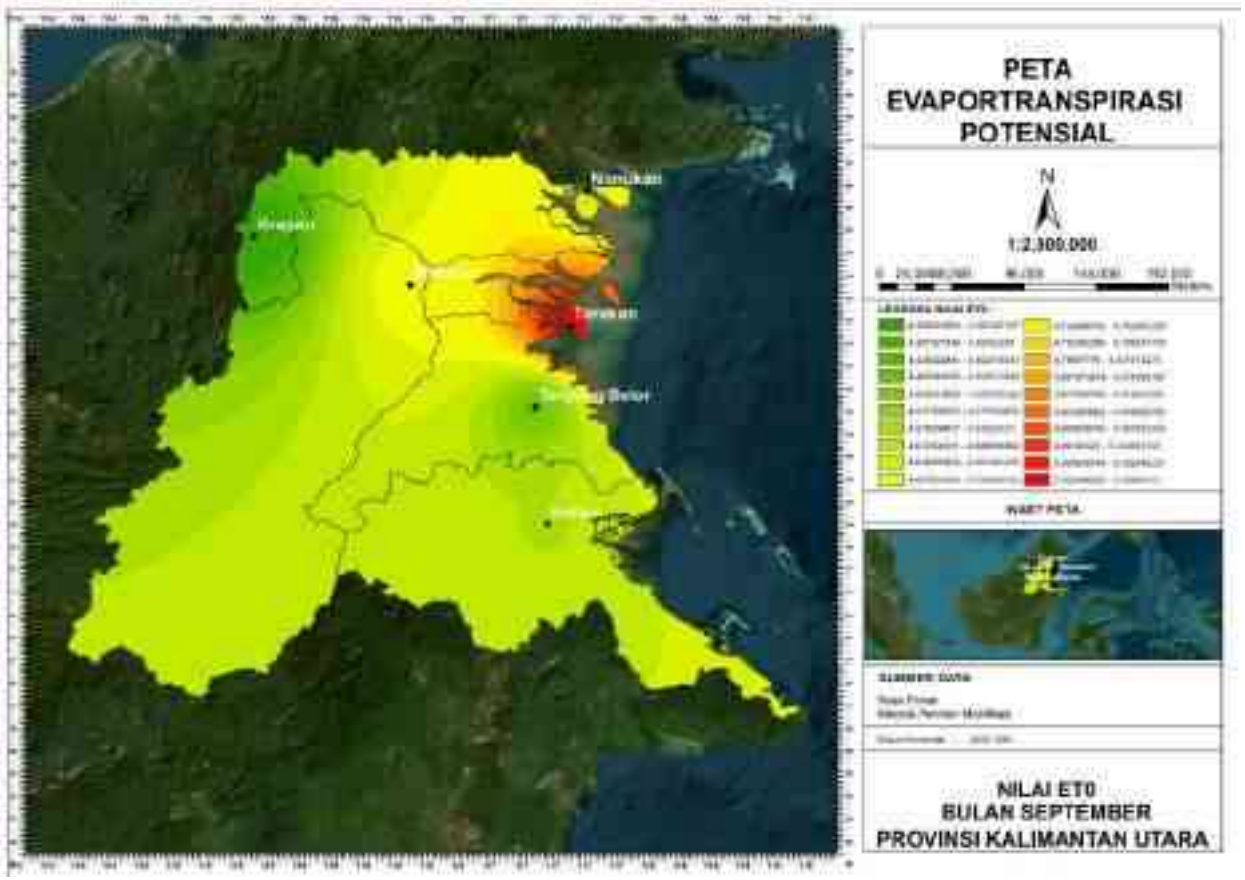
Sumber: *Peneliti*

Gambar 4.8 Peta Eto Bulan Juli



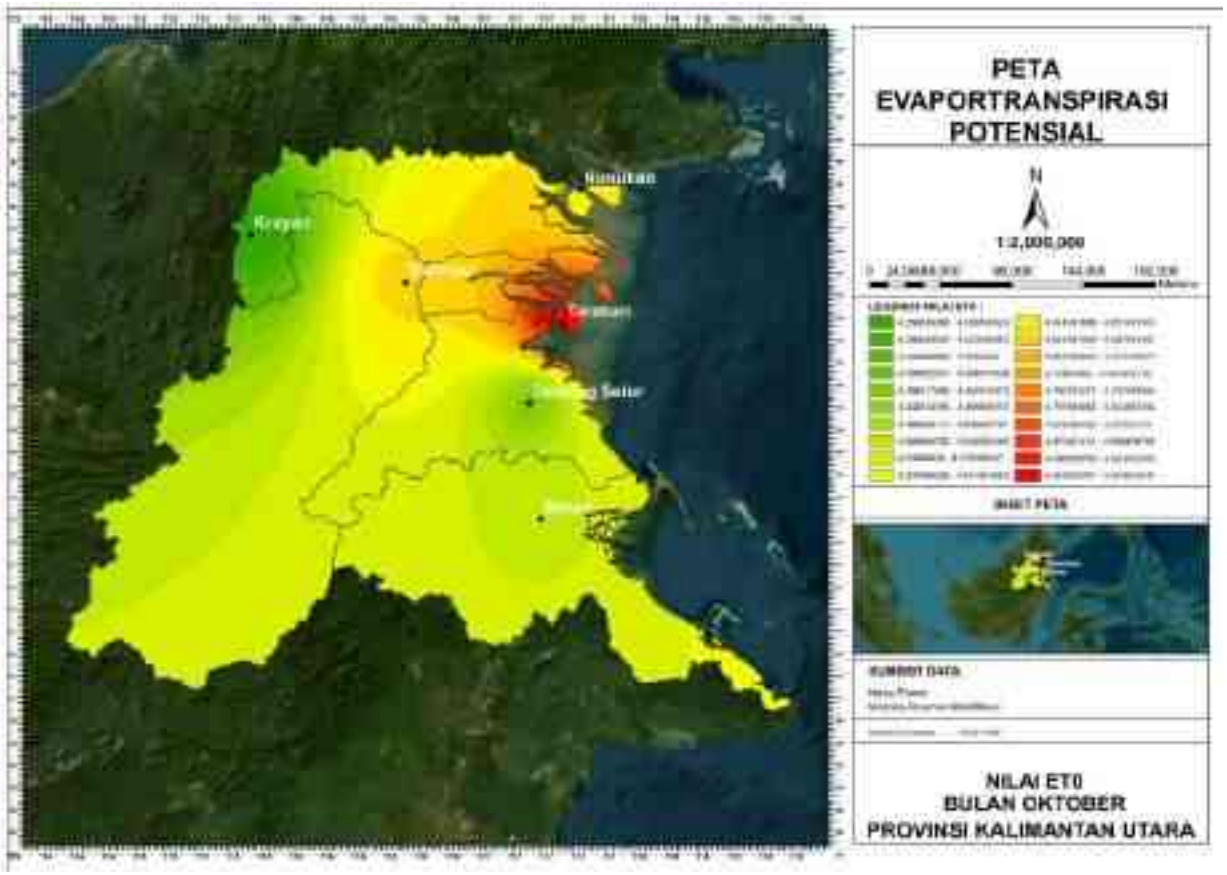
Sumber: *Peneliti*

Gambar 4.9 Peta Eto Bulan Agustus



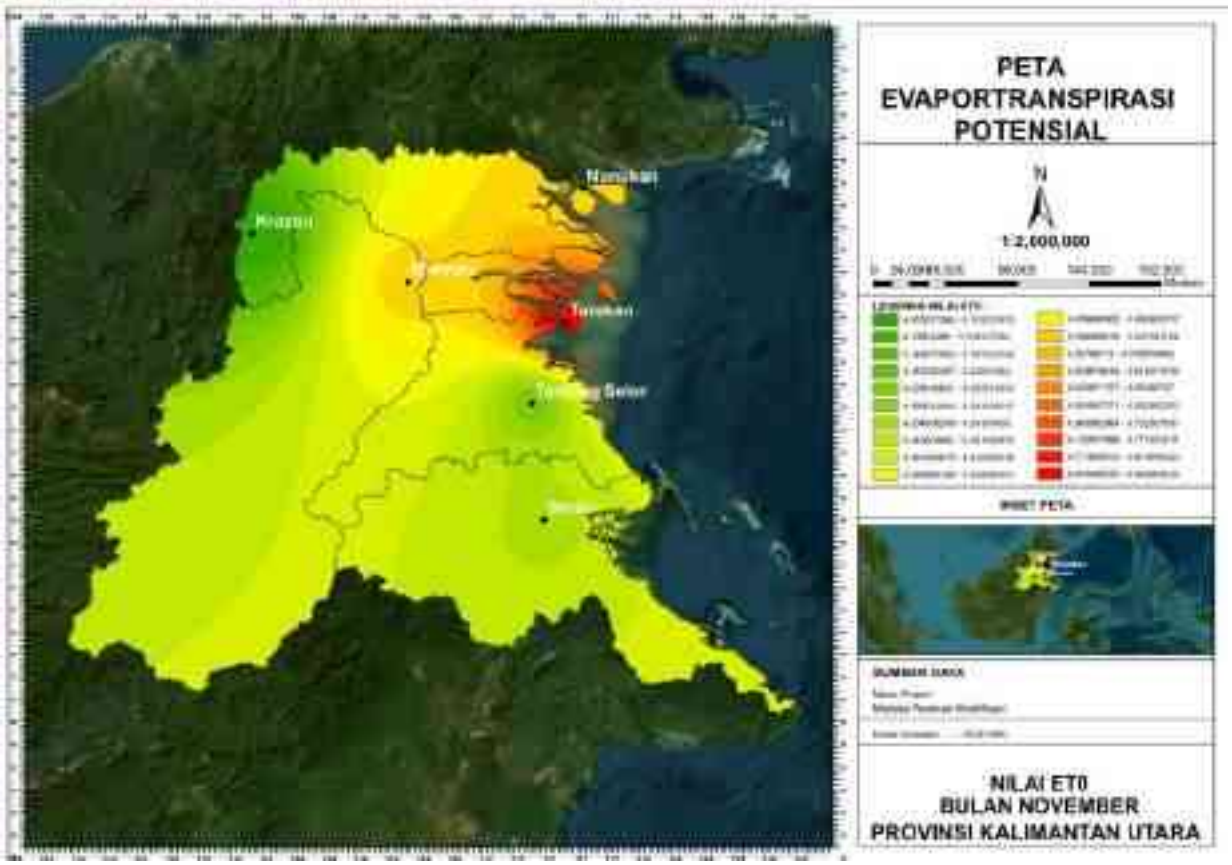
Sumber: *Peneliti*

Gambar 4.10 Peta Eto Bulan September



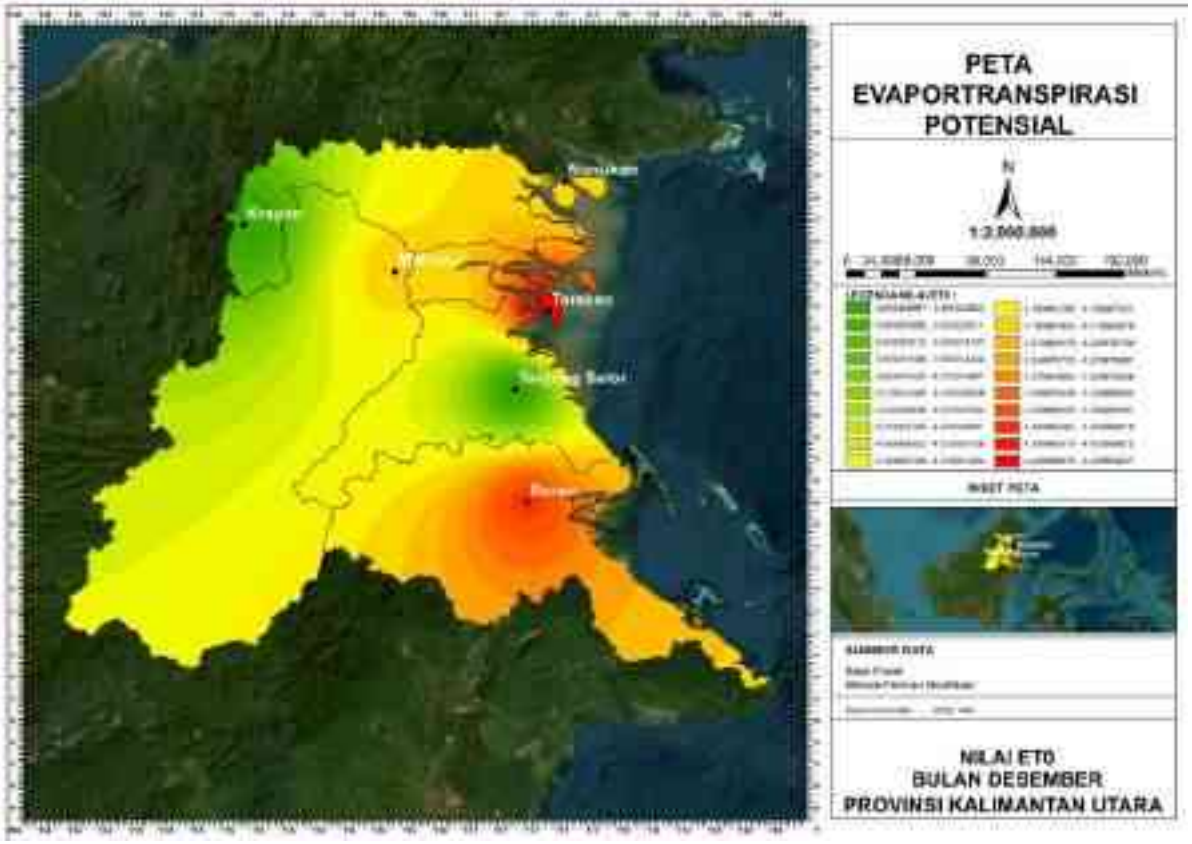
Sumber: *Peneliti*

Gambar 4.11 Peta Eto Bulan Oktober



Sumber: *Peneliti*

Gambar 4.12 Peta Eto Bulan November



Sumber: *Peneliti*

Gambar 4.13 Peta Eto Bulan Desember

4.5 DESKRIPSI PETA SEBARAN ET_0 BULANAN

Berdasarkan peta sebaran hasil interpolasi Inverse Distance Weighting (IDW) menunjukkan bahwa pada bulan April, nilai Evapotranspirasi Potensial (ET_0) di wilayah Kalimantan Utara berada pada rentang antara 4,12 mm/hari hingga 5,23 mm/hari. Wilayah dengan konsentrasi nilai ET_0 tertinggi didominasi oleh warna merah/oranye tua yang terdistribusi di bagian timur Kalimantan Utara, khususnya di Kota Tarakan dan sebagian pesisir Kabupaten Bulungan. Sebaliknya, nilai ET_0 yang relatif lebih rendah (diwakili warna hijau/kuning muda) tersebar di wilayah interior daratan bagian barat, seperti Kecamatan Krayan dan sebagian wilayah Kabupaten Malinau.

Peta sebaran visual ET_0 pada bulan Januari dengan nilai berkisar antara 3,70 mm/hari hingga 4,35 mm/hari. Secara spasial, dominasi warna hijau menyelimuti hampir sebagian besar wilayah Kalimantan Utara, menandakan penurunan laju penguapan secara umum jika dibandingkan dengan bulan-bulan lainnya. Nilai ET_0 terendah tercatat di Kabupaten Bulungan bagian dalam dan sekitarnya sebesar 3,70 mm/hari.

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan mengenai Besaran Nilai Evapotranspirasi Potensial Di Wilayah Kalimantan Utara menggunakan Sistem Informasi Geografis, Maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Besaran Nilai ET_0 di Wilayah Kalimantan Utara.

   Pada Tarakan memiliki nilai ET_0 maksimum mencapai 5,23 mm/hari pada bulan April dan minimum sebesar 4,35 mm/hari pada bulan Januari. Pada Bulungan memiliki nilai ET_0 maksimum hanya berkisar 4,49 mm/hari pada bulan September dan minimum sebesar 3,70 mm/hari pada bulan Januari. Pada Nunukan memiliki nilai ET_0 maksimum 4,72 mm/hari pada bulan April dan minimum sebesar 4,08 mm/hari pada bulan Januari. Pada Malinau memiliki nilai ET_0 maksimum 4,75 mm/hari pada bulan April dan minimum sebesar 4,10 mm/hari pada bulan Januari. Pada Krayan memiliki nilai ET_0 maksimum 4,47 mm/hari pada bulan April dan minimum sebesar 4,86 mm/hari pada bulan Desember. Pada Berau memiliki nilai ET_0 maksimum 4,56 mm/hari pada bulan April dan minimum sebesar 3,77 mm/hari pada bulan Januari.

2. Distribusi Spasial Nilai ET_0 di Wilayah Kalimantan Utara

   Berdasarkan peta sebaran hasil interpolasi Inverse Distance Weighting (IDW) Pada peta distribusi spasial, Tarakan secara konsisten ditampilkan dalam warna merah tua hingga merah pekat yang mencerminkan anomali ET_0 positif tertinggi di seluruh wilayah kajian. Pada peta distribusi spasial, wilayah Malinau ditampilkan dalam warna jingga saat mencapai nilai maksimum pada April, Pada saat nilai minimum di bulan Januari, warna Malinau bergeser menjadi hijau muda yang menggambarkan berkurangnya laju penguapan. Pada peta distribusi spasial, Nunukan berwarna jingga saat April dan bergeser ke hijau muda saat

Januari. Pada peta, Krayan selalu tampil dalam warna kuning hingga kuning–jingga sepanjang tahun, tidak pernah mencapai warna merah seperti Tarakan maupun warna hijau tua seperti Bulungan. Pada peta, Bulungan ditampilkan dalam warna kuning–jingga saat September dan hijau tua saat Januari. Berau justru tampil sebagai titik merah yang lebih mencolok dibanding stasiun-stasiun Kalimantan Utara lainnya, menandakan bahwa pada puncak musim hujan di Kalimantan Utara, kondisi iklim Berau di Kalimantan Timur justru lebih kondusif untuk evapotranspirasi. Pada bulan minimum Januari, warna Berau di peta adalah hijau tua yang merupakan nilai terendah kedua setelah Bulungan.

5.2 SARAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka dapat diberikan saran-saran sebagai berikut:

1. Mengingat Stasiun Tarakan memiliki nilai ET_0 yang sangat tinggi (puncaknya > 5 mm/hari), perencanaan kebutuhan air irigasi untuk sektor pertanian dan perkebunan di wilayah pesisir harus diperhitungkan secara lebih longgar guna mengantisipasi defisit air yang masif akibat penguapan yang tinggi, terutama pada bulan April dan September.
2. Meskipun nilai ET_0 di Bulungan relatif rendah karena kelembapan yang tinggi, fluktuasi musiman tetap terjadi. Data evapotranspirasi rata-rata bulanan ini diharapkan dapat diintegrasikan dengan data curah hujan (CH) untuk menyusun analisis Neraca Air Terdistribusi, sehingga potensi surplus atau defisit air permukaan dapat dipetakan secara lebih akurat demi mendukung ketersediaan air bersih (misalnya untuk kebutuhan air baku PDAM).
3. Hasil pemetaan interpolasi menggunakan metode *Inverse Distance Weighted* (IDW) yang telah dilakukan menunjukkan variasi spasial yang jelas. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk mengombinasikan metode interpolasi berbasis stasiun ini dengan pemodelan neraca energi berbasis citra satelit guna meminimalkan efek bias topografi, khususnya

pada area transisi dataran rendah menuju dataran tinggi Krayan yang ekstrem.

4. Bagi wilayah pedalaman bervegetasi rapat seperti Malinau dan batas selatan Berau, lonjakan nilai ET_0 dan suhu maksimum pada bulan April dan September harus dijadikan indikator peringatan dini kesiapan menghadapi bencana kekeringan meteorologis dan potensi kebakaran hutan, akibat tingginya laju kehilangan air pada permukaan tanah dan kanopi tumbuhan.
5. Fenomena tingginya radiasi surya bersih (R_n) di dataran tinggi Krayan mengindikasikan bahwa wilayah perbatasan ini memiliki potensi pemanfaatan Energi Baru Terbarukan berbasis Pembangkit Listrik Tenaga Surya yang sangat baik, di samping peruntukan analisis hidrologi wilayah tangkapan air.

DAFTAR PUSTAKA

Guntur, A. (2024).

Analisis Spasial dan Interpolasi Data Meteorologi untuk Teknik Sipil. Jakarta: Penerbit Informatika.

Harto, S. (2021).

Hidrologi: Teori, Analisis, Contoh Penyelesaian. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.

Prahasta, E. (2021).

Sistem Informasi Geografis: Konsep-Konsep Dasar (Perspektif Geodesi & Geomatika). Bandung: Informatika.

Putra, R. A., dkk. (2022).

Manajemen Sumber Daya Air dan Analisis Neraca Air Wilayah. Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan, 7(2), 45-58.

Sari, N. M., dkk. (2021).

Penerapan Sistem Informasi Geografis dalam Pemetaan Evapotranspirasi Menggunakan Metode Penman-Monteith. Jurnal Penginderaan Jauh dan SIG, 12(1), 12-25.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998).

Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Rome: Food and Agriculture Organization. *(Catatan: Ini adalah kitab wajib/rujukan utama untuk rumus Penman-Monteith).*

Al Safi, H. I., & Sarma, A. K. (2021).

Application of GIS and Interpolation Techniques for Hydrological and Meteorological Data Modeling. Journal of Hydrologic Engineering, 26(4), 115-128.

Sudirman, H., dkk. (2023).

Karakteristik Hidrometeorologi Wilayah Kalimantan: Tantangan dan Peluang. Samarinda: Universitas Mulawarman Press.

Syahputra, M. R. (2022).

Visualisasi Data Raster dan Pemetaan Tematik untuk Perencanaan Infrastruktur. Bandung: ITB Press.

Triatmodjo, B. (2020).

Hidrologi Terapan. Yogyakarta: Beta Offset.

Badan Pusat Statistik Provinsi Kalimantan Utara. (2024).

Provinsi Kalimantan Utara Dalam Angka 2024. Tanjung Selor: BPS Kaltara.

Hasan, M. F. (2022).

Sistem Informasi Geografis dan Penginderaan Jauh untuk Manajemen Sumber Daya Air. Yogyakarta: Andi Offset.

Pratomo, A., & Fathoni, A. (2023).

Analisis Komparatif Interpolasi Spasial IDW dan Kriging Menggunakan ArcGIS dan QGIS untuk Pemetaan Klimatologi. Jurnal Geodesi dan Geomatika, 18(2), 89-102.

Ramdhan, M. (2023).

Metode Penelitian untuk Tugas Akhir Teknik Sipil dan Kebencanaan. Bandung: Alfabeta.

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

Muhammad Dian Nugraha, lahir di Kelurahan Karang Anyar Kecamatan Tanjung Palas, 24 Maret 2003, Merupakan Putra kedua Bapak Yuyun Gunawan dan Ibu Juliana, Lulus Taman Kanak-kanan Tahun 2009, Sekolah Dasar Negeri 004 Tanjung Palas lulus Tahun 2014, Sekolah Pertama Negeri 1 Tanjung Palas lulus tahun 2017, Sekolah Menengah Atas Negeri 1 Tanjung Palas Jurusan IPA lulustahun 2020. Pada tahun 2022, masuk Perguruan Tinggi jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Kaltara.

Dari bulan April s/d Juli 2025 Melaksanakan Kuliah Kerja Pratik pada PT. Borneo Geo Survey di Kecamatan Tanjung Selor. Bulan Agustus s/d September 2025 Melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN-BBM) di Desa Long Sam Kecamatan Tanjung Palas Barat.

Tempat tinggal di jalan Kimas Aji Kertosono RT.001 No.17, Kelurahan Karang Anyar, Kecamatan Tanjung Palas, Kabupaten Bulungan, Provinsi Kalimantan Utara.

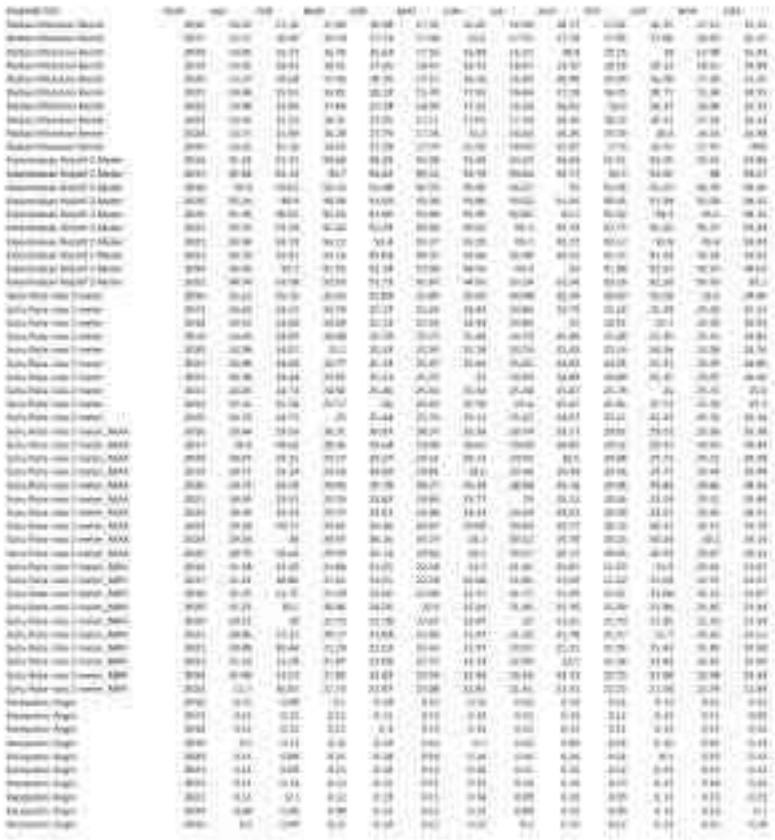
LAMPIRAN

A. Dokumentasi Ujial Seminar Proposal

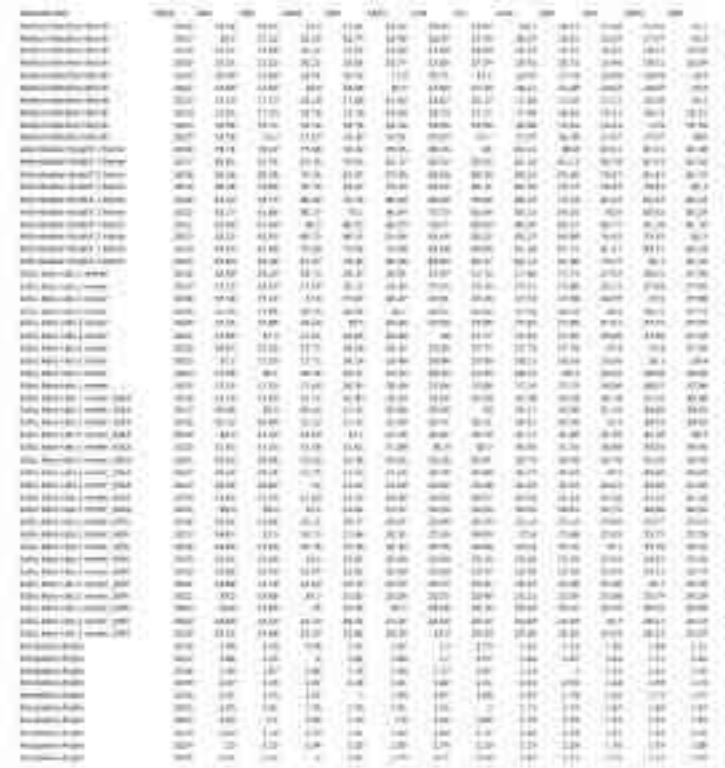
B. Dokumentasi Ujian Seminar Hasil

C. Dokumentasi Ujian Seminar Akhir

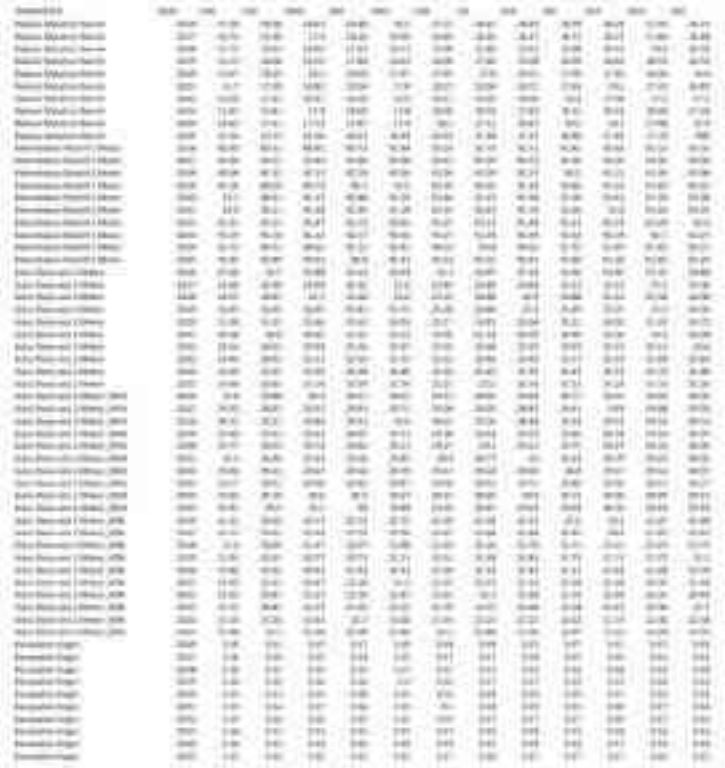
D. Tabel Data Mentah Nasa Power Bulungan



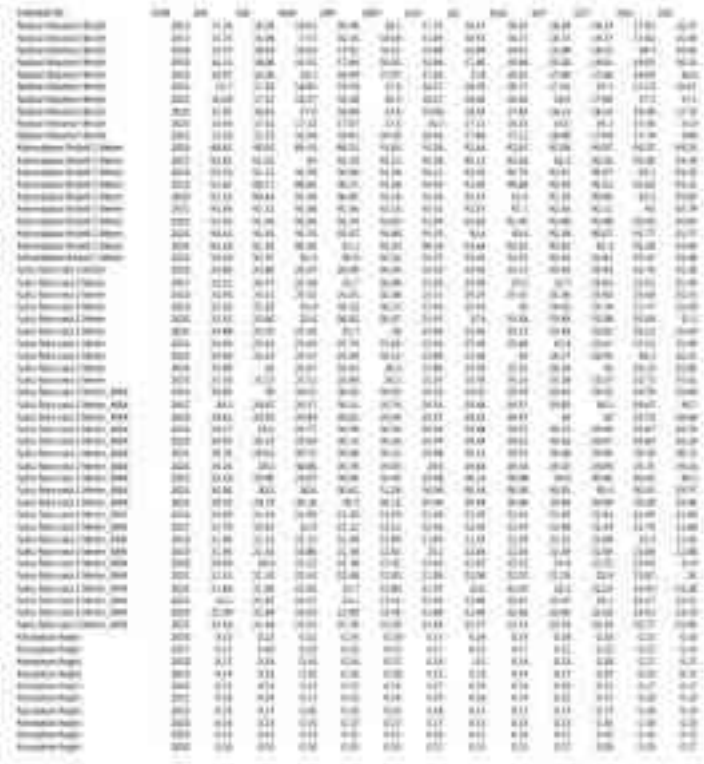
E. Tabel Data Mentah Nasa Power Tarakan



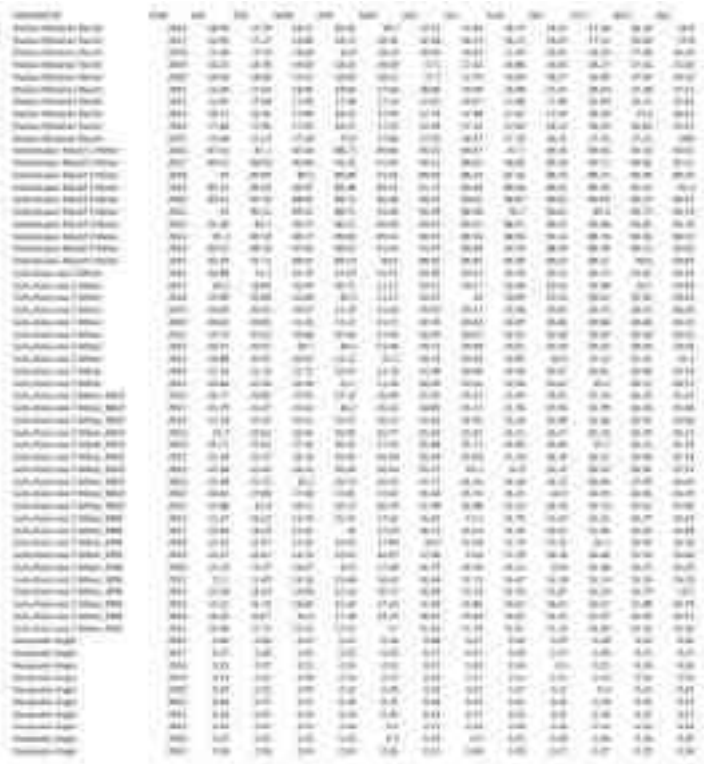
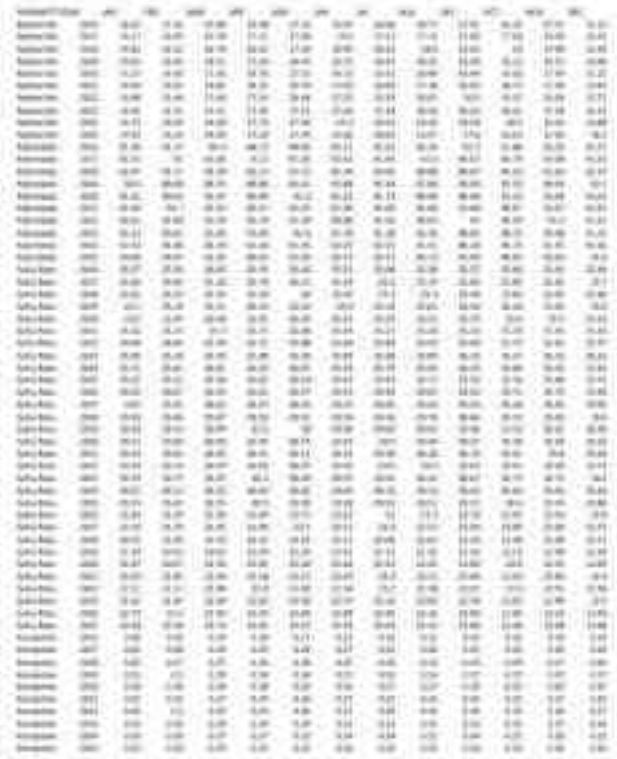
F. Tabel Data Mentah Nasa Power Nunukan



G. Tabel Data Mentah Nasa Power Malinau



H. Tabel Data Mentah Nasa Power Krayan



I. Tabel Data Mentah Nasa Power Berau