

**PENGARUH KEKERINGAN TERHADAP VARIASI ZENITH
TROPOSPHERIC DELAY (ZTD) DI KABUPATEN BOGOR TAHUN 2023
(Studi Kasus : Kabupaten Bogor)**

(Skripsi)

Oleh

**RYO SEPTIAN HARTAWAN
NPM 2115013060**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

**PENGARUH KEKERINGAN TERHADAP VARIASI *ZENITH*
TROPOSPHERIC DELAY (ZTD) DI KABUPATEN BOGOR TAHUN 2023
(Studi Kasus :Kabupaten Bogor)**

Oleh:

Ryo Septian Hartawan

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Geodesi Dan Geomatika
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

ABSTRAK

PENGARUH KEKERINGAN TERHADAP VARIASI *ZENITH TROPOSPHERIC DELAY (ZTD)* DI KABUPATEN BOGOR TAHUN 2023

OLEH

RYO SEPTIAN HARTAWAN

Musim kemarau 2023 yang dipengaruhi fenomena El Niño menyebabkan penurunan curah hujan dan kelembapan udara di Kabupaten Bogor. Kondisi ini berdampak pada perubahan parameter atmosfer, terutama *Zenith Tropospheric Delay (ZTD)* yang diperoleh dari pengamatan GNSS. Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh kekeringan terhadap variasi ZTD serta hubungan antara ZTD dan indeks kekeringan *Standardized Precipitation–Evapotranspiration Index (SPEI)*.

Data GNSS dari stasiun CORS BIG (BAKO, BAK1, CLDO, CTGR) diolah menggunakan metode *Precise Point Positioning (PPP)* melalui CSRS-PPP untuk mendapatkan nilai ZTD dan ZWD. Data curah hujan dan suhu dari NASA *POWER* digunakan untuk menghitung nilai SPEI. Analisis korelasi dilakukan untuk mengevaluasi kesesuaian nilai ZTD CORS dengan ZPD IGS serta keterkaitannya dengan kondisi kekeringan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai ZTD sekitar 2,500 m sampai dengan 2,400 m dan nilai ZWD 0,1500 m sampai dengan 0,1200 m yang menandakan penurunan yang signifikan di puncak kekeringan pada 11 September 2023 dengan nilai terendah di setiap stasiun sebesar 0,1200 m sampai dengan 0,1400 m untuk nilai ZWD dan nilai ZTD sebesar 0,1200 m hingga 2,500 m yang mencerminkan kondisi atmosfer yang lebih kering. Korelasi antara data RINEX CORS dan IGS menunjukkan nilai korelasi $r = 0,6483$ menunjukkan ikatan yang baik, sementara hubungan ZTD dan SPEI mengindikasikan bahwa penurunan ZTD sejalan dengan meningkatnya tingkat kekeringan dengan nilai korelasi r sebesar 0,5 sampai dengan 0,9 yang berarti hubungan yang kuat antara nilai ZTD dan SPEI. Pada uji akurasi untuk nilai SPEI dengan data BNP didapatkan nilai 70% untuk nilai *Overall Accuracy* yang menunjukkan kategori Baik.

Kata Kunci: Kekeringan, ZTD, GNSS, CORS, SPEI.

ABSTRACT

The Influence of Drought on Variations of Zenith Tropospheric Delay (ZTD) in Bogor Regency in 2023

BY

RYO SEPTIAN HARTAWAN

The dry season of 2023, influenced by the El Niño phenomenon, caused a decrease in rainfall and atmospheric humidity in Bogor Regency. These conditions affected atmospheric parameters, particularly the Zenith Tropospheric Delay (ZTD) obtained from Global Navigation Satellite System (GNSS) observations. This study aims to analyze the impact of drought on variations in ZTD and to investigate the relationship between ZTD and the drought index, namely the Standardized Precipitation–Evapotranspiration Index (SPEI). GNSS data from CORS BIG stations (BAKO, BAK1, CLDO, and CTGR) were processed using the Precise Point Positioning (PPP) method through CSRS-PPP to obtain ZTD and Zenith Wet Delay (ZWD) values. Rainfall and air temperature data from NASA POWER were used to calculate SPEI. Correlation analysis was conducted to evaluate the consistency between ZTD derived from CORS RINEX data and ZTD from IGS products, as well as to assess the relationship between ZTD variations and drought conditions. The results show that ZTD values ranged from approximately 2.500 m to 2.400 m, while ZWD values ranged from 0.1500 m to 0.1200 m, indicating a significant decrease during the peak of drought on 11 September 2023. The lowest values recorded at each station ranged from 0.1200 m to 0.1400 m for ZWD and approximately 2.400 m to 2.500 m for ZTD, reflecting drier atmospheric conditions. The correlation between CORS RINEX data and IGS products yielded a correlation coefficient of $r = 0.6483$, indicating a good agreement. Furthermore, the relationship between ZTD and SPEI shows that a decrease in ZTD corresponds to increasing drought severity, with correlation coefficients ranging from $r = 0.5$ to $r = 0.9$, indicating a strong relationship between ZTD and SPEI. Accuracy assessment of SPEI using BNP data resulted in an Overall Accuracy of 70%, which falls into the Good category.

Keyword: Drought, ZTD, GNSS, CORS, SPEI.

LEMBAR PENGESAHAN

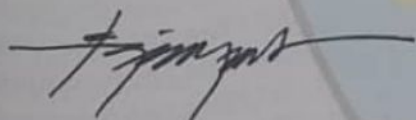
Judul Skripsi : **PENGARUH KEKERINGAN TERHADAP
VARIASI *ZENITH TROPOSPHERIC DELAY*
(ZTD) DI KABUPATEN BOGOR TAHUN 2023**
(Studi Kasus : Kabupaten Bogor)

Nama Mahasiswa : Ryo Septian Hartawan
Nomor Pokok Mahasiswa : 2115013060
Jurusan : Teknik Geodesi dan Geomatika
Fakultas : Teknik

MENYETUJUI

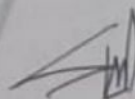
Pembimbing I

Pembimbing II



Dr. Fajriyanto, S.T., M.T.

NIP. 197203022006041002

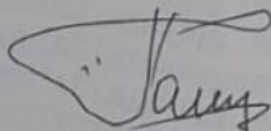


Atika Sari, S.T., M.T.

NIP. 199204062022032007

MENGETAHUI

Ketua Jurusan Teknik Geodesi dan Geomatika



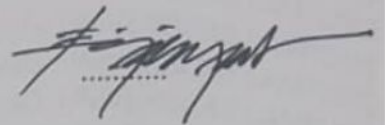
Ir. Fauzan Mardapa M.T., IPM

NIP. 196410121992031002

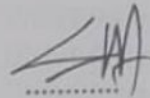
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : Dr. Fajriyanto, S.T., M.T.



Sekretaris : Atika Sari, S.T., M.T.



Penguji Utama Bukan Pembimbing : Safri Yanti Rahayu, S.T., M.T.



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Muhammad Herison, S.T., M.T.

NIP 196910302000031001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 23 Januari 2026

PERNYATAAN KEASLIAN HASIL KARYA

Sebagai civitas akademika Universitas Lampung saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Ryo Septian Hartawan
NPM : 2115013060
Judul Skripsi : Pengaruh Kekeringan Terhadap Variasi *Zenith Tropospheric Delay* (ZTD) di Kabupaten Bogor Tahun 2023 (Studi Kasus : Kabupaten Bogor)
Program Studi : S1 Teknik Geodesi
Jurusan : Teknik Geodesi dan Geomatika
Fakultas : Teknik

Dengan ini menyatakan bahwa:

1. Karya tulis ini bukanlah terjemahan, sebaliknya karya tulis ini adalah gagasan murni dan ide saya sendiri, dengan arahan dosen pembimbing.
2. Dalam karya tulis ini berisi tulisan atau pendapat yang dibuat atau diterbitkan oleh orang lain dan dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama pengarang dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
3. Saya menyerahkan hak milik saya atas karya tulis ini kepada Universitas Lampung, dan oleh karenanya karya tulis ini dapat dikelola oleh Universitas Lampung sesuai dengan semua hukum dan standar etika yang berlaku.
4. Pernyataan ini saya buat dengan jujur, dan jika di kemudian hari ada penyimpangan atau kebohongan, saya bersedia menerima hukuman atau sanksi akademik sesuai dengan peraturan dan norma yang berlaku di Universitas Lampung.

Bandar Lampung, 09 Februari 2026



Ryo Septian Hartawan
NPM. 2115013060

RIWAYAT HIDUP



Penulis lahir di Kabupaten Bogor, Jawa Barat pada tanggal 14 September 2002 sebagai anak pertama dari dua bersaudara dari Bapak Muhamad Helmi Hartawan dan Ibu Puji Astuti. Pendidikan yang pernah dilalui penulis diawali dengan menyelesaikan pendidikan Sekolah Dasar (SD) di SDN 02 Tlajung Udik, Kabupaten Bogor pada tahun 2015, Sekolah Menengah Pertama (SMP) di SMPN 1 Cileungsi pada tahun 2018, dan Sekolah Menengah Atas (SMA) di SMAN 1 Gunung Putri pada tahun 2021. Penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Geodesi dan Geomatika Fakultas Teknik Unila melalui jalur SBMPTN (Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri).

Selama menjadi mahasiswa penulis pernah menjadi aktif di Lembaga Kemahasiswaan Kampus, yaitu Himpunan Mahasiswa Geodesi (HIMAGES) FT Unila di departemen Kaderisasi, Badan Eksekutif Mahasiswa (BEM) FT menjadi Eksekutif Muda. Pada Tahun 2024, penulis melakukan Kerja Praktik di PT. Energi Mega Persada Tbk, Jakarta Selatan dengan judul laporan kerja praktik "KERJA PRAKTIK PADA PT. ENERGI MEGA PERSADA Tbk. JAKARTA SELATAN (kegiatan : *Collecting* Data Lama Seismik 2D, Transformasi Datum Geodetik lokal ke Datum Global, *Updating* Koordinat WGS84)". Penulis melakukan KKN Periode II di Desa Catur Swako, Kecamatan Bumi Agung, Kabupaten Lampung Timur.

PERSEMBAHAN

Skripsi ini dengan segala upaya dan pembelajaran di dalamnya, kupersembahkan setulus hati kepada Allah SWT, Sang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang, karena atas berkat dan rahmat-Nya lah penulisan Skripsi ini dapat terselesaikan. Setiap kesulitan yang terlewati adalah bukti nyata kebesaran dan pertolongan-Nya. Ayahanda Helmi Hartawan dan Ibunda Puji Astuti, sosok yang tak pernah berhenti mengalirkan doa, tetesan keringat, dan kasih sayang abadi. Kalian adalah pilar utama dalam hidupku, sumber inspirasi, dan alasan di balik setiap perjuanganku. Persembahan ini adalah wujud bakti dan cintaku yang tak terhingga.

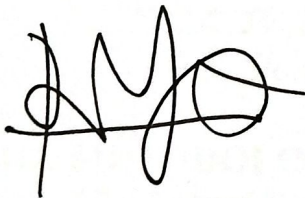
1. Adikku, atas kebersamaan, canda dan tawa, serta pengertian yang selalu mengisi hari hariku.
2. Kedua Orang Tua-ku yang telah memberi doa dan dukungan moral dan moril yang tak terhingga nilainya.
3. Keluarga Besar Budiyono dan Ahmad Rozie yang telah memberi bantuan moral dan moril selama perkuliahan.
4. Dosen pembimbingku, Bapak Fajriyanto dan Ibu Atika Sari, terima kasih atas bimbingan, arahan, dan kesabaran yang luar biasa mantap. Setiap masukan dan saran telah membuat diriku menjadi pribadi yang lebih baik dan mahasiswa yang lebih teliti.
5. Para dosen pengajar di Program Studi Teknik Geodesi dan Geomatika atas ilmu pengetahuan yang telah diberikan dengan penuh dedikasi.
6. Teman-teman seperjuangan Teknik Geodesi dan Geomatika angkatan 21.

9. Kedua orang tua penulis Bapak Muhamad Helmi Hartawan dan Ibu Puji Astuti, juga adik penulis Rico Martino Hartawan yang telah memberikan dukungannya selama penulis dalam menyusun laporan Skripsi ini.
10. Semua pihak yang telah memberikan semangat dan dukungan dalam pembuatan laporan Skripsi.
11. Revindya Pravita Dewi selaku teman baik yang selalu berbagi pengalaman serta mendukung selama kegiatan penyusunan laporan Skripsi.
12. Teman – teman angkatan 2021 Jurusan Teknik Geodesi dan Geomatika serta semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah memberikan bantuan juga dukungan sehingga Skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.

Semoga Skripsi ini dapat menjadi sumber referensi yang bermanfaat untuk menambah pengetahuan bagi para pembaca. Penulis memohon maaf jika terdapat kesalahan atau kekurangan dalam pelaksanaan maupun penulisan Skripsi ini. Demikian yang dapat penulis sampaikan, atas perhatian dan kontribusi dari semua pihak, penulis mengucapkan terima kasih.

Bandar Lampung, 09 Februari 2026

Penulis



Ryo Septian Hartawan

2115013060

MOTTO

Tidak ada rasa bersalah yang bisa mengubah masa lalu, dan tidak ada kekhawatiran yang dapat mengubah masa depan.

(Umar bin Khattab)

If you're afraid to fail, then you're probably going to fail.

(Kobe Bryant)

Mau semalam apapun kamu baru mulai tidur, intinya tetap harus bangun pagi.

(Puji Astuti)

SANWACANA

Puji dan syukur atas kehadiran Allah SWT, yang telah memberikan Rahmat dan hidayah sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi dengan judul **“PENGARUH KEKERINGAN TERHADAP VARIASI *ZENITH TROPOSPHERIC DELAY (ZTD)* DI KABUPATEN BOGOR TAHUN 2023 (Studi Kasus : Kabupaten Bogor)”**. Skripsi ini disusun untuk melengkapi salah satu persyaratan dalam menyelesaikan Skripsi bagi mahasiswa Program Studi S1 Teknik Geodesi dan Geomatika Universitas Lampung.

Dalam hal ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Ahmad Herison, ST.,M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
2. Bapak Ir. Fauzan Mardapa, M.T., IPM., selaku Ketua Jurusan Teknik Geodesi dan Geomatika Universitas Lampung.
3. Bapak Romi Fadly, S.T, M.Eng., selaku koordinator Skripsi Teknik Geodesi dan Geomatika Universitas Lampung
4. Bapak Dr. Fajriyanto, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing I yang telah memberikan banyak arahan dan masukan dalam penyusunan Skripsi.
5. Ibu Atika Sari, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing II yang telah memberikan banyak arahan dan masukan dalam penyusunan Skripsi.
6. Ibu Safri Yanti Rahayu, S.T., M.T. yang berkenan menjadi dosen penguji dan memberikan kritik dan saran pada Skripsi ini.
7. Seluruh Dosen Program Studi Teknik Geodesi dan Geomatika Universitas Lampung meski tidak dapat disebutkan satu persatu.
8. Seluruh staff Program Studi Teknik Geodesi dan Geomatika yang telah membantu dan memberikan pengarahan dalam proses kepengurusan berkas perkuliahan.

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI.....	iv
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR GAMBAR.....	vii
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah.....	4
1.3. Tujuan Penelitian	4
1.4. Manfaat Penelitian	4
1.5. Batasan Masalah Penelitian	4
1.6. Hipotesis	5
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1. Penelitian Terdahulu	6
2.2. Landasan Teori.....	12
2.2.1. Kekeringan.....	12
2.2.2. <i>Global Navigation Satellite System</i> (GNSS).....	14
2.2.3. <i>Continuously Operating Reference Station</i> (CORS)	15
2.2.4. <i>Precise Point Positioning</i> (PPP)	16
2.2.5. <i>Standardized Precipitation Evapotranspiration Index</i> (SPEI)	18
III. METODOLOGI PENELITIAN	22
3.1. Lokasi Penelitian.....	22
3.2. Alat dan Bahan Penelitian.....	23
3.3. Persiapan Penelitian	24
3.4. Tahapan Penelitian.....	25
3.4.1. Tahapan Persiapan.....	26
3.4.2. Studi Literatur.....	26
3.4.3. Pengumpulan Data.....	26
3.5. Tahap Pengolahan.....	26
3.5.1. <i>Precise Point Positioning</i> (PPP).....	27
3.5.2. Pengolahan Data <i>International GNSS Service</i> (IGS) Untuk Mendapatkan Nilai ZTD.....	28
3.6. Tahap Analisis	30
3.6.1. Uji Korelasi Antara ZTD CORS BAKO dan ZTD IGS BAKO....	30
3.6.2. <i>Standardized Precipitation Evapotranspiration Index</i> (SPEI).....	31

IV. HASIL DAN ANALISIS.....	35
4.1. Hasil <i>Precise Point Positioning</i> (PPP).....	35
4.2. Hasil <i>International GNSS Service</i> (IGS).....	44
4.3. Uji korelasi ZTD CORS BAKO dan ZPD IGS BAKO	48
4.4. Hasil SPEI.....	50
4.5. Korelasi SPEI Terhadap Data CORS.....	55
4.6. Uji Akurasi.....	64
V. KESIMPULAN DAN SARAN	66
5.1. Simpulan	66
5.2. Saran.....	67
DAFTAR PUSTAKA	68
LAMPIRAN A.....	71
LAMPIRAN B	84
LAMPIRAN C	86
LAMPIRAN D.....	88
LAMPIRAN E	91

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Penelitian Terdahulu	6
2. Klasifikasi nilai r	18
3. Klasifikasi nilai r^2	18
4. Data dan Rumus SPEI	19
5. Keterangan Rumus SPEI	21
6. Klasifikasi SPEI	21
7. Data yang digunakan	23
8. Alat yang digunakan	24
9. Jumlah titik sampel berdasarkan skala peta	34
10. Klasifikasi <i>Overall Accuracy</i>	34
11. Hasil pengolahan stasiun BAKO	35
12. Hasil pengolahan stasiun BAK1	38
13. Hasil pengolahan stasiun CLDO	40
14. Hasil pengolahan stasiun CTGR	42
15. Nilai ZPD IGS	44
16. Hasil SPEI CORS BAKO	50
17. Hasil SPEI CORS BAK1	51
18. Hasil SPEI CORS CLDO	52
19. Hasil SPEI CORS CTGR	53
20. Hasil nilai korelasi <i>pearson</i> SPEI	61
21. Hasil <i>Confussion Matrix</i>	64

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Hasil penelitian nilai <i>Zenith Tropospheric Delay</i> (ZTD) dari empat stasiun CORS di Lampung pada periode 2016–2020	10
2. Hasil Penelitian perpaduan nilai RTH dan PWV	11
3. Risiko dan Wilayah Terdampak Kekeringan Pulau Jawa	13
4. Peta Bahaya Wilayah Terdampak Kekeringan Pulau Jawa	13
5. Infografis Data Dampak Kekeringan Jawa Barat 2023.....	14
6. Peta Lokasi Penelitian dan Stasiun CORS BIG	22
7. Diagram Alir Penelitian	25
8. Halaman <i>The Canadian Spatial Reference System – Precise point</i>	27
9. Halaman Utama <i>Crustal Dynamics Data Information System</i> (CDDIS).....	28
10. <i>File</i> IGS CDDIS	29
11. <i>Field Output</i> IGS BAKO	30
12. Grafik Nilai ZWD BAKO	37
13. Grafik Nilai ZTD BAKO	37
14. Grafik Nilai ZWD BAK1	39
15. Grafik Nilai ZTD BAK1	39
16. Grafik Nilai ZWD CLDO	41
17. Grafik Nilai ZTD CLDO.....	41
18. Grafik Nilai ZWD CTGR.....	43
19. Grafik Nilai ZTD CTGR.....	43
20. <i>Plot Timeseries</i> ZTD CORS BAKO dan ZPD IGS BAKO	48
21. <i>Scatter Plot</i> ZPD dan ZTD.....	49
22 Grafik Nilai SPEI BAKO.....	51
23. Grafik Nilai SPEI BAKO	52
24. Grafik Nilai SPEI CORS CLDO.....	53
25. Grafik Nilai SPEI CORS CLDO.....	54
26. <i>Scatter Plot</i> SPEI CORS BAKO.....	55
27. <i>Scatter Plot</i> SPEI IGS BAKO.....	55
28. <i>Time Series</i> SPEI CORS BAKO dan IGS BAKO	56
29. <i>Scatter Plot</i> SPEI CORS BAK1.....	57
30. <i>Time Series</i> CORS BAK1	57
31. <i>Scatter Plot</i> SPEI CORS CLDO	58
32. <i>Time Series</i> CORS CLDO.....	58
33. <i>Scatter Plot</i> SPEI CORS CTGR	59
34. <i>Time Series</i> CORS CTGR.....	60
35. <i>Plot</i> nilai sebaran SPEI terhadap stasiun CORS Bulan Juli.....	61
36. <i>Plot</i> nilai sebaran SPEI terhadap stasiun CORS Bulan Agustus.....	62
37. <i>Plot</i> nilai sebaran SPEI terhadap stasiun CORS Bulan September.....	62
38. <i>Plot</i> nilai sebaran SPEI terhadap stasiun CORS Bulan Oktober.....	63
39. Peta Uji <i>Confussion Matrix</i>	65

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Indonesia merupakan negara yang memiliki iklim tropis, yang artinya Indonesia memiliki 2 (dua) musim yaitu musim hujan dan kemarau. Pada tahun 2023 wilayah Indonesia mengalami musim kemarau yang berkepanjangan akibat dipengaruhi oleh fenomena *El Niño*, sebagaimana dilaporkan oleh Badan Meteorologi dan Klimatologi Geofisika (BMKG) dan *World Meteorological Organization* (WMO). Fenomena *El Niño* 2023 menyebabkan berkurangnya intensitas hujan secara signifikan di sebagian wilayah Indonesia, termasuk Jawa Barat, dan meningkatkan potensi terjadinya kekeringan meteorologis maupun hidrologis (Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, 2023, *World Meteorological Organization*, 2023). Kabupaten Bogor yang secara geografis terletak di bagian selatan provinsi Jawa Barat dan memiliki topografi bergelombang hingga pegunungan, pada kondisi normal dikenal sebagai daerah dengan curah hujan tinggi sepanjang tahun akibat pengaruh dari topografi. Sebelum terjadinya kekeringan tahun 2023, wilayah ini termasuk salah satu daerah dengan frekuensi hari hujan tertinggi di Jabodetabek dan memiliki kelembapan udara yang relatif stabil.

Namun berdasarkan Buku Prakiraan Musim Kemarau 2023 yang diterbitkan oleh BMKG, perkiraan musim kemarau terjadi pada bulan Mei 2023 dengan puncak kekeringan berlangsung pada Juli hingga Agustus 2023 (Buku Prakiraan Musim Kemarau 2023). Dalam *website* BMKG juga menyebutkan bahwa puncak musim kemarau 2023 di sebagian wilayah Indonesia juga terjadi pada Juli sampai dengan Agustus 2023. Fenomena kekeringan 2023 berdampak pada perubahan kondisi atmosfer yang dapat memengaruhi sinyal elektromagnetik, termasuk sinyal GNSS.

Dalam konteks penelitian ini, fenomena kekeringan sangat relevan untuk dikaitkan dengan ilmu geodesi, khususnya melalui pengamatan *Zenith Tropospheric Delay* (ZTD) dan *Zenith Wet Delay* (ZWD) dari sinyal GNSS. Parameter seperti ZTD dan ZWD sangat dipengaruhi oleh kandungan uap air dalam atmosfer. Pada periode kekeringan, kandungan uap air menurun sehingga mengakibatkan perubahan nilai ZWD dan berdampak pada variasi ZTD.

Perubahan kondisi atmosfer akibat kekeringan 2023 tersebut tidak hanya berdampak pada sektor meteorologi dan hidrologi, tetapi juga berdampak pada sektor pertanian terutama pertanian tanaman padi yang sangat berdampak membuat produksi padi menurun pada tahun 2023, sebagai contoh di Desa Sukasirna kekeringan mengakibatkan lebih dari 10 hektar lahan sawah mengalami kekeringan dan jumlah panen padi yang biasanya mencapai 5 kuintal mengalami penurunan menjadi 3 kuintal akibat kemarau panjang tahun 2023. (Ajat Nicko, 2023) kekeringan ini juga berimplikasi langsung pada dinamika parameter atmosfer yang dapat diamati melalui teknologi geodesi modern. Dalam konteks inilah, peran pengukuran berbasis GNSS menjadi semakin penting, karena variasi uap air atmosfer yang berubah secara signifikan selama periode kekeringan dapat terekam dengan baik melalui parameter troposfer yang dihasilkan GNSS.

Informasi tentang variasi musiman dari kandungan total uap air di atmosfer sangatlah penting, khususnya dalam penelitian bidang meteorologi, hidrologi, dan perubahan iklim. Salah satu teknologi yang dapat dimanfaatkan dalam bidang meteorologi adalah GNSS untuk mengetahui penyimpangan rambatan sinyal pada atmosfer (Susilo, 2012). Penyimpangan jarak tersebut disebut sebagai *zenith tropospheric delay* (ZTD) yang nilainya dapat dijadikan sebagai koreksi untuk menentukan jarak satelit ke *receiver* akibat perlambatan waktu tempuh sinyal saat melalui troposfer (Kuntjoro, dkk).

Penelitian ini juga memfokuskan pada tingkat kekeringan yang akurat dengan menggunakan *Standardized Precipitation-Evapotranspiration* (SPEI), SPEI dianggap sebagai metode yang teliti dibandingkan indeks lainnya dalam pemantauan kekeringan, SPEI sendiri adalah metode pengembangan dari *Standardized Precipitation Index*(SPI) dimana SPEI lebih memfokuskan suhu dan kelembapan udara (Nanda Fatehah dkk 2022). Data yang digunakan dalam pengolahan SPEI sendiri berasal dari *website NASA Power* yaitu *Precipitation Corrected* (PRECTOTCOR) yang berisikan curah hujan harian dan suhu udara rata-rata untuk mendukung dalam pemantauan pengaruh musim kemarau terhadap *Zentith Tropospheric Delay* (ZTD) yang diperoleh dari sistem *Global Navigation Satellite System* (GNSS). ZTD merupakan parameter yang menggambarkan keterlambatan sinyal satelit akibat atmosfer, khususnya troposfer yang diakibatkan oleh kandungan uap air dan kondisi atmosfer.

Penelitian ini mengambil studi kasus di Kabupaten Bogor dengan menganalisis efek *El Niño* terhadap variasi nilai ZTD yang dihasilkan oleh stasiun CORS BIG, kemudian membandingkannya dengan nilai ZTD dari *International GNSS Service* (IGS), serta menganalisis hubungannya dengan indeks kekeringan SPEI selama periode kemarau tahun 2023. Urgensi penelitian ini terletak pada keunggulan teknologi GNSS dalam menyediakan informasi troposfer yang bersifat kontinu, beresolusi tinggi, dan sensitif terhadap perubahan kandungan uap air di atmosfer. Karena ZTD dan ZWD sangat dipengaruhi oleh jumlah uap air, parameter ini dapat digunakan sebagai indikator dini perubahan atmosfer yang mengarah pada kekeringan sebelum dampaknya terlihat secara langsung di permukaan. Dengan mengintegrasikan data ZTD GNSS dengan indeks SPEI, penelitian ini menawarkan pendekatan yang lebih menyeluruh dan akurat dalam memantau dinamika kekeringan secara spasial dan temporal.

1.2. Rumusan Masalah

Terdapat beberapa rumusan masalah setelah menjabarkan latar belakang dari penelitian ini yaitu, sebagai berikut:

1. Bagaimana ZTD dapat digunakan sebagai indikator untuk mendeteksi atau memantau kondisi kekeringan di Kabupaten Bogor?
2. Bagaimana korelasi antara (*Zenith Thropospheric Delay*) ZTD dan indeks kekeringan?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini yaitu, sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui penggunaan ZTD sebagai pendukung indikator kekeringan di Kabupaten Bogor.
2. Untuk menganalisis korelasi antara ZTD dan *Standardized Precipitation-Evapotranspiration* (SPEI).

1.4. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dalam penelitian ini adalah mendapatkan pengembangan metode pemantauan kekeringan yang lebih akurat dan efektif menggunakan indeks kekeringan SPEI dan data ZTD, serta meningkatkan kemampuan memantau dampak kekeringan pada lingkungan dan masyarakat dengan mengandalkan korelasi antara indeks kekeringan SPEI dan data ZTD sebagai nilai yang akurat dari kekeringan lahan yang terjadi.

1.5. Batasan Masalah Penelitian

Ruang lingkup dijadikan sebagai batasan penelitian, sehingga peneliti dapat memfokuskan penelitian yang akan dilakukan. Ruang lingkup tersebut sebagai berikut:

1. Penelitian ini hanya berfokus pada wilayah Kabupaten Bogor sebagai lokasi studi kasus, sehingga hasil dan analisis tidak mewakili kondisi wilayah lain.
2. Penelitian ini menggunakan indeks kekeringan (SPEI) sebagai parameter tingkat kekeringan dengan menggunakan data curah hujan dan suhu udara dari NASA POWER Tahun 2023.
3. Penelitian ini menggunakan data RINEX GNSS dari Badan Informasi Geospasial (BIG) yang diperoleh dari stasiun CORS Tahun 2023 dengan kode stasiun BAKO, BAK1, CLDO, CTGR yang mencakup daerah penelitian.
4. Analisis hubungan yang dilakukan hanya terbatas pada hubungan (korelasi) antara nilai ZTD dan nilai SPEI, tanpa melakukan pemodelan prediksi atau simulasi lanjutan.

1.6. Hipotesis

Penelitian ini didasarkan pada pemahaman bahwa nilai *Zenith Tropospheric Delay* (ZTD) berkaitan dengan jumlah uap air di atmosfer. Ketika kondisi atmosfer lebih kering, seperti pada musim kemarau, kandungan uap air di udara menurun sehingga nilai ZTD juga cenderung lebih rendah. Sementara itu, indeks kekeringan SPEI menunjukkan tingkat kekeringan berdasarkan perbandingan curah hujan dan suhu. Karena nilai ZTD dan SPEI sama-sama mencerminkan kondisi kelembapan atmosfer, maka diduga bahwa keduanya memiliki hubungan yang saling berkaitan dalam menggambarkan tingkat kekeringan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Terdahulu

Studi literatur diperlukan untuk menunjang penelitian yang akan dilakukan. Studi literatur membantu penulis mendapatkan pengetahuan yang sesuai dengan kebutuhan penelitian. Penelitian terdahulu memberikan pengetahuan dan ide untuk menyusun suatu penelitian. Berikut merupakan beberapa penelitian terdahulu yang penulis jadikan sebagai referensi, yaitu:

Tabel 1. Penelitian Terdahulu

Penulis	Judul	Metode	Hasil Penelitian
(Kuntjoro dkk2018)	Korelasi Musiman antara <i>Zenith Wet Delay</i> (ZWD) dan Debit Sungai di DAS Cikapundung Hulu, Kawasan Bandung Utara, Jawa Barat	Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah menghitung ZWD dari data GPS menggunakan model Saastamoinen, menghitung debit sungai dengan persamaan <i>rating curve</i> , menganalisis pola musimannya dengan analisis harmonik, serta menilai hubungan antara ZWD dan debit menggunakan korelasi <i>Pearson</i> dan analisis spektral.	Hasil penelitian ini adalah menunjukkan bahwa terdapat korelasi musiman yang sangat kuat antara <i>Zenith Wet Delay</i> (ZWD) yang menggambarkan kandungan uap air troposfer dengan debit sungai Cikapundung di kawasan Bandung Utara. Hasil ini menegaskan bahwa parameter troposferik seperti ZWD memiliki potensi besar sebagai indikator hidrologi untuk memantau kondisi kelembapan atmosfer, siklus air, serta perubahan iklim yang berkaitan dengan curah hujan dan aliran permukaan.

Lanjutan Tabel 1. Penelitian Terdahulu

Penulis	Judul	Metode	Hasil Penelitian
(Een Lujainatul Isnaini 2025)	<i>Determination of Zenith Tropospheric Delay (ZTD) Using CORS GNSS Data, 2016–2020 in Lampung</i>	Metode yang digunakan pada jurnal tersebut adalah estimasi <i>Zenith Tropospheric Delay (ZTD)</i> dari data GNSS CORS menggunakan pemrosesan <i>Precise Point Positioning (PPP)</i> melalui <i>platform</i> CSRS-PPP.	Hasil penelitian di jurnal ini bertujuan untuk memperkirakan nilai <i>Zenith Tropospheric Delay (ZTD)</i> menggunakan data pengamatan CORS GNSS di wilayah Lampung selama periode 2016–2020. Data diolah menggunakan metode <i>Precise Point Positioning (PPP)</i> melalui <i>platform</i> CSRS-PPP milik <i>Natural Resources Canada</i> untuk mendapatkan estimasi ZTD dengan akurasi tinggi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai ZTD berfluktuasi mengikuti pola musiman, dengan nilai tertinggi terjadi pada periode Januari hingga awal April yang mencerminkan kondisi udara lembap (musim basah), dan nilai terendah terjadi antara April hingga Oktober saat kandungan uap air di atmosfer menurun (musim kering).
Cahyono dkk., 2023	<i>Improved Drought Monitoring Index Using GNSS-Derived Precipitable Water Vapor over the Loess Plateau Area</i>	Penelitian ini menggunakan metode pengolahan data GNSS untuk memperoleh nilai <i>Zenith Tropospheric Delay (ZTD)</i> , mengubahnya menjadi <i>Precipitable Water Vapor (PWV)</i> , lalu menggabungkan PWV dengan data iklim yang kemudian dikorelasikan dengan data SPEI.	Penelitian dalam jurnal ini bertujuan untuk mengetahui tingkat akurasi pemantauan dalam kondisi kekeringan menggunakan data <i>Precipitable Water Vapor (PWV)</i> yang diperoleh dari observasi GNSS di wilayah Loess Plateau, Tiongkok. Peneliti mengembangkan model baru bernama <i>Revised Thornthwaite (RTH)</i> model, suhu udara dan PWV digabungkan untuk memperbaiki perhitungan evapotranspirasi (ET) yang sebelumnya menggunakan model <i>Thornthwaite (TH)</i> . Model RTH ini digunakan untuk menghitung indeks kekeringan <i>Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI)</i> .

Lanjutan Tabel 1. Penelitian Terdahulu

Audah dkk., 2017	Analisa Penentuan <i>Water Vapor</i> Terhadap Pengaruh Erupsi Gunung Sinabung Menggunakan Data <i>Sugar</i> dan Citra Satelit Terra Modis	Penelitian ini menggunakan pengolahan data GPS <i>SUGAR</i> dan citra <i>Terra</i> MODIS untuk menghitung PWV, yang kemudian dibandingkan melalui validasi dan analisis korelasi.	Dalam penelitian ini menganalisis curah hujan setelah erupsi Gunung Sinabung tahun 2010, dimana menunjukkan bahwa <i>Precipitable Water Vapor</i> (PWV) meningkat secara signifikan dengan nilai mencapai $\pm 66,81\text{mm}$, serta terdapat korelasi antara GPS dan MODIS.
Lujainatul Isnaini dkk., 2018	<i>Determination of Zenith Tropospheric Delay (ZTD) Using CORS GNSS Data, 2016 -2020 in Lampung</i>	Penelitian ini menggunakan pemrosesan data GNSS CORS dengan metode <i>Precise Point Positioning</i> (PPP) melalui CSRS-PPP untuk menghitung nilai ZTD.	Dalam hasil penelitian ini adalah nilai ZTD tertinggi terjadi di stasiun CTBN dengan nilai 2,696 meter, mencerminkan variasi kandungan uap air dan kondisi cuaca yang berbeda-beda di setiap lokasi pengamatan

Perbedaan utama penelitian ini dengan penelitian terdahulu terletak pada fokus spesifik Wilayah penelitian yaitu pada Kabupaten Bogor di Tahun 2023 dengan melakukan analisis pengaruh kekeringan terhadap nilai ZTD CORS dan ZPD IGS dan melakukan analisis korelasi terhadap nilai ZTD dan ZPD dengan indeks kekeringan SPEI.

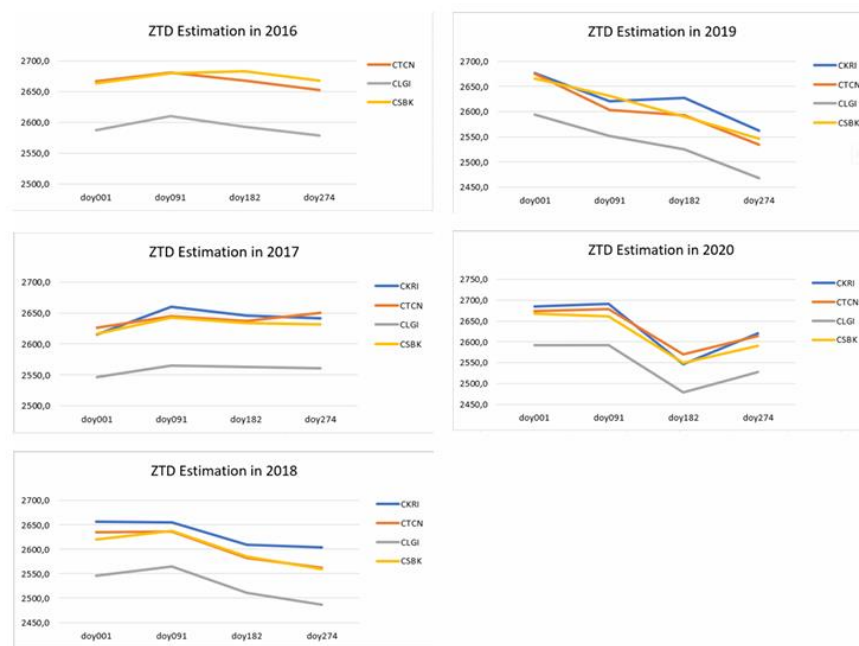
Berikut ini merupakan penjabaran dari penelitian terdahulu:

1. Kuntjoro dkk., 2018

Penelitian ini menunjukkan bahwa nilai ZWD harian di Bandung Utara berada pada kisaran 10–35 cm, dan pola musimannya sangat mirip dengan pola musiman debit Sungai Cikapundung, yang keduanya dikendalikan oleh dinamika Monsun Asia dan Australia; hasil korelasi linier menunjukkan bahwa rata-rata ZWD berkorelasi sangat kuat dengan rata-rata debit sungai, dengan koefisien determinasi sekitar 90% untuk debit periode panjang (1971 sampai dengan 2016) dan sekitar 78% untuk debit periode pendek (2011 hingga 2015), serta analisis spektral menegaskan bahwa ZWD dan debit didominasi oleh siklus satu tahunan dengan nilai koherensi sangat tinggi (0,985) dan perbedaan fasa hampir nol, sehingga ZWD berpotensi menjadi prediktor hidrologi yang lebih baik dibandingkan curah hujan tunggal.

2. Een Lujainatul Isnaini dkk., 2025

Hasil penelitian menunjukkan bahwa estimasi nilai *Zenith Tropospheric Delay* (ZTD) dari empat stasiun CORS di Lampung pada periode 2016–2020 memperlihatkan variasi spasial dan temporal yang jelas, dengan nilai ZTD cenderung lebih tinggi pada musim hujan (sekitar Januari hingga April) dan menurun pada musim kemarau (sekitar April hingga Oktober), mencerminkan perubahan kandungan uap air di troposfer; nilai ZTD tertinggi tercatat di stasiun CKRI pada DOY 091 tahun 2020 sebesar 2691,0 mm, sedangkan nilai terendah muncul pada DOY 182 tahun 2020 sebesar 2546,4 mm, dan pola serupa terlihat di stasiun lainnya, termasuk anomali pada tahun 2020 ketika ZTD kembali meningkat pada DOY 274, yang mengindikasikan kemungkinan pergeseran awal musim hujan serta dinamika atmosfer regional yang memengaruhi distribusi uap air.

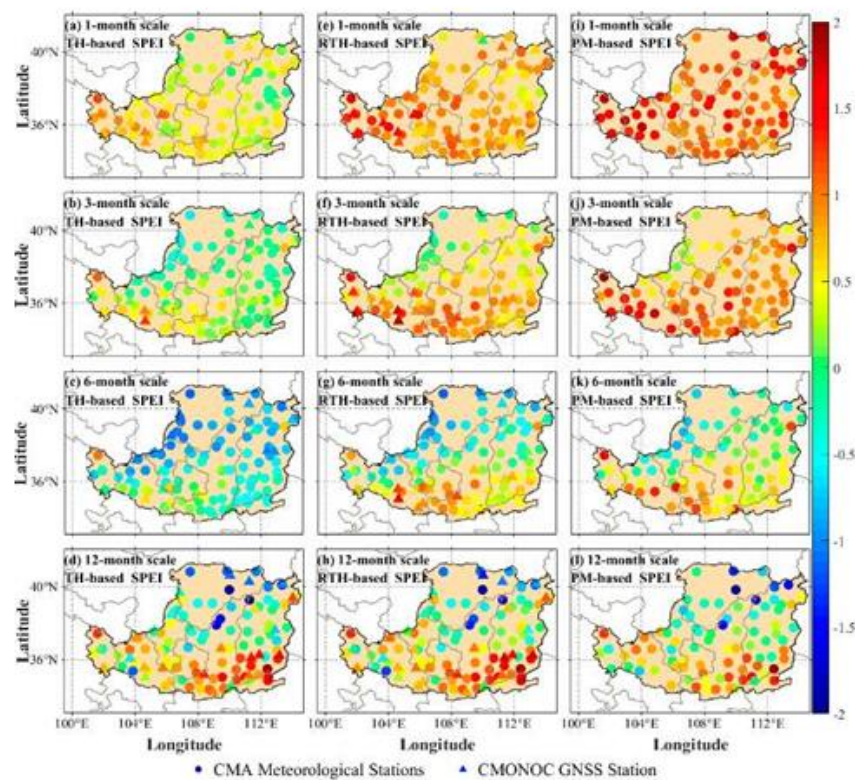


Gambar 1. Hasil penelitian nilai *Zenith Tropospheric Delay* (ZTD) dari empat stasiun CORS di Lampung pada periode 2016–2020

Sumber : (Een Lujainatul Isnaini dkk., 2025)

3. Cahyono dkk., 2023

Hasil penelitian menunjukkan bahwa model *Revised Thornthwaite* (RTH), yang memadukan suhu (T) dan *Precipitable Water Vapor* (PWV) berbasis GNSS, mampu secara signifikan meningkatkan akurasi evapotranspirasi (ET) serta indeks kekeringan SPEI dibandingkan model TH standar; ET residu antara model PM dan TH terbukti memiliki hubungan linier kuat dengan PWV dan T, sehingga koreksi ET melalui model RTH menghasilkan penurunan RMS dari 34,2 mm menjadi 12,3 mm dan peningkatan akurasi hingga 61,6%, serta korelasi ET terhadap model PM yang meningkat dari 0,93 menjadi 0,98. Pada evaluasi indeks kekeringan, SPEI berbasis RTH menunjukkan kesesuaian yang jauh lebih baik dengan SPEI berbasis PM, dibuktikan dengan nilai RMS yang lebih kecil pada seluruh stasiun dan peningkatan akurasi rata-rata sebesar 48 hingga 49% pada skala 1 sampai dengan 3 bulan, serta performa kuat dalam analisis kasus April 2013 yang memperlihatkan keunggulan indeks RTH di 88 stasiun meteorologi dan 31 stasiun GNSS.



Gambar 2. Hasil Penelitian perpaduan nilai RTH dan PWV

Sumber: (Zhao dkk., 2019)

4. Audah dkk., 2017

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pola distribusi *Precipitable Water Vapor* (PWV) di wilayah terdampak erupsi Gunung Sinabung pada tahun 2010 memperlihatkan kondisi atmosfer yang lebih basah, terlihat dari peta spasial yang memperlihatkan sebaran PWV tinggi hampir di seluruh wilayah pengamatan; nilai PWV hasil GPS berada pada kisaran 47,65–66,81 mm, sedangkan PWV dari citra MODIS lebih bervariasi yaitu 13,02–80,05 mm, dan uji korelasi antara keduanya menghasilkan koefisien korelasi 0,0173, menunjukkan hubungan positif tetapi sangat lemah akibat penyebaran stasiun *SUGAR* yang tidak merata serta perbedaan karakteristik pengukuran kedua sensor tersebut.

5. (Een Lujainatul Isnaini et al., 2025)

Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai *Zenith Tropospheric Delay* (ZTD) di empat stasiun CORS di Lampung selama periode 2016 hingga 2020 mengalami variasi spasial dan temporal yang jelas, dengan nilai ZTD cenderung tinggi pada musim hujan (Januari hingga April) dan lebih rendah pada musim kemarau (April hingga Oktober), mencerminkan perubahan kandungan uap air troposfer; nilai tertinggi tercatat pada stasiun CKRI dengan 2691,0 mm pada DOY 091 tahun 2020, sedangkan nilai terendah muncul pada CKRI sebesar 2546,4 mm pada DOY 182 tahun 2020, dan pola serupa terlihat di stasiun CLGI, CSBK, dan CTCN, termasuk anomali musim pada tahun 2020 yang menunjukkan peningkatan kembali ZTD dari Juli ke Oktober, mengindikasikan potensi pergeseran awal musim hujan serta dinamika atmosfer yang tidak seragam antar wilayah.

2.2. Landasan Teori

Didalam penelitian ini memerlukan landasan teori guna untuk mempermudah peneliti untuk mengembangkan metode yang akan digunakan serta menambah informasi terkait dengan penelitian yang dilakukan.

2.2.1. Kekeringan

Kekeringan merupakan salah satu bencana meteorologi yang paling sering terjadi di Indonesia dan sangat dipengaruhi oleh variabilitas iklim regional. Kekeringan terjadi juga disaat jumlah curah hujan jauh dibawah normal dalam periode waktu tertentu, yang mengakibatkan berkurangnya ketersediaan air di tanah, udara, dan lingkungan. Kekeringan merupakan hal yang lazim terjadi di Indonesia dan dapat terjadi di setiap wilayahnya dengan ditandai berkurangnya jumlah curah hujan dalam satu musim (Supratono dkk. 2016).

Berdasarkan laporan dari *website* BNPB(2023) kekeringan mulai dilaporkan terjadi di Bogor pada bulan Mei, dengan peningkatan jumlah wilayah terdampak pada bulan Juni hingga puncaknya di bulan Agustus 2023, hal ini sejalan dengan pernyataan dari *Website* Krisis Kesehatan dari Kemenkes yang menyebutkan bahwa informasi awal kekeringan di Kecamatan Cisarua, Kabupaten Bogor yang terjadi pada bulan Agustus 2023(Dinas Kesehatan Kabupaten Bogor, 2023).

Menurut data *InaRisk* BNPB (2023), sebagian besar wilayah di Kabupaten Bogor termasuk kedalam kategori dan bahaya kekeringan sedang hingga tinggi, terutama di wilayah selatan dan tenggara yang jauh dari sumber air utama serta memiliki lahan pertanian luas.



Gambar 3. Risiko dan Wilayah Terdampak Kekeringan Pulau Jawa

Sumber: (BNPB, 2023)



Gambar 4. Peta Bahaya Wilayah Terdampak Kekeringan Pulau Jawa

Sumber: (BNPB, 2023)

Global Navigation Satellite Systems (GNSS) merupakan istilah yang digunakan untuk menggambarkan kumpulan sistem satelit yang berfungsi dalam penentuan posisi, navigasi, serta sinkronisasi waktu secara global. Sistem-sistem yang tergabung dalam GNSS mencakup *Global Positioning System* (GPS) milik Amerika Serikat, *Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema* (GLONASS) milik Rusia, Galileo dari Uni Eropa, *BeiDou Navigation Satellite System* (BDS) milik Tiongkok, serta sistem navigasi regional seperti *Quasi-Zenith Satellite System* (QZSS) dari Jepang dan *Indian Regional Navigation Satellite System* (IRNSS) milik India. Salah satu pengembangan penting dari teknologi ini adalah munculnya bidang GNSS Meteorologi, yaitu pemanfaatan data GNSS untuk keperluan analisis atmosfer dan cuaca. Dalam penerapannya, GNSS Meteorologi menggunakan jaringan penerima sinyal GNSS di permukaan bumi, yang dikenal sebagai *Continuously Operating Reference Station* (CORS). Stasiun ini beroperasi secara kontinu untuk merekam data perlambatan sinyal satelit saat melewati atmosfer (Wijaya, 2023.).

2.2.3. *Continuously Operating Reference Station* (CORS)

Continuously Operating Reference Station (CORS) merupakan jaringan stasiun referensi geodesi permanen yang berbasis pada *Global Navigation Satellite System* (GNSS) dan berfungsi secara terus-menerus untuk merekam serta mengirimkan data pengamatan satelit.

Di Indonesia, jaringan ini dikenal dengan nama Ina-CORS yang dikelola oleh Badan Informasi Geospasial (BIG) sebagai lembaga resmi penyelenggara data geospasial nasional. Hingga tahun 2022, sistem Ina-CORS telah memiliki 397 stasiun aktif yang tersebar di seluruh wilayah Indonesia. Data hasil pengamatan dari setiap stasiun dikirimkan secara otomatis ke pusat *server* BIG untuk diolah dan disediakan bagi pengguna yang membutuhkan informasi geospasial dengan ketelitian tinggi. Melalui sistem ini, Indonesia mampu menyediakan layanan survei dan pemetaan berbasis GNSS yang lebih akurat, efisien, serta mendukung berbagai kegiatan penelitian, pemantauan deformasi, dan aplikasi geospasial nasional.

2.2.4. *Precise Point Positioning (PPP)*

Precise Point Positioning merupakan metode penentuan posisi absolut menggunakan data CORS GNSS, dalam metode ini dapat menentukan hasil *Zenith Tropospheric Delay* (ZTD). (Azis, Suhandri, dan Wijaya 2018). Dalam penentuan nilai ZTD memerlukan nilai rata-rata dari beberapa penundaan sinyal yang asalnya dari penerima sinyal yang sama. (Zhao dkk. 2018).

Precise Point Positioning (PPP) merupakan metode penentuan posisi absolut berbasis GNSS yang menggunakan observasi satu stasiun penerima secara mandiri tanpa memerlukan stasiun referensi terdekat, Prinsip utama PPP adalah pemodelan matematis yang sangat teliti terhadap seluruh sumber kesalahan pada pengamatan GNSS, parameter yang diestimasi dalam solusi PPP meliputi koordinat stasiun, kesalahan jam penerima, ambiguitas fase (yang diperlakukan sebagai parameter *float* atau *integer*), serta parameter atmosfer, khususnya *Zenith Tropospheric Delay* (ZTD). Dalam konteks atmosfer, PPP memisahkan keterlambatan troposfer menjadi *Zenith Hydrostatic Delay* (ZHD) dan *Zenith Wet Delay* (ZWD).

Estimasi *Zenith Tropospheric Delay* (ZTD) diperoleh melalui pengolahan data GNSS menggunakan metode *Precise Point Positioning* (PPP). Proses pengolahan dilakukan melalui platform daring *Canadian Spatial Reference System – Precise Point Positioning* (CSRS-PPP) milik *Natural Resources Canada* (NRC) yang dapat diakses pada laman <https://webapp.csr-scrs.nrcan-rncan.gc.ca>. Metode PPP dipilih karena memiliki kemampuan untuk mengestimasi parameter secara absolut tanpa memerlukan hubungan antar stasiun. Tidak seperti metode diferensial yang membutuhkan stasiun acuan, PPP memungkinkan setiap stasiun diolah secara mandiri. Hasil estimasi ZTD dari metode ini didasarkan pada koreksi orbit dan jam satelit yang sangat presisi, sehingga menghasilkan parameter atmosfer yang akurat untuk digunakan dalam analisis lanjutan. (Een Lujainatul Isnaini. 2025)

2.2.4.1. Zenith Tropospheric Delay (ZTD)

Sinyal rambat yang berasal dari satelit GNSS berupa gelombang elektromagnetik ke *receiver* melalui medium atmosfer, sehingga menyebabkan adanya bias sinyal pada lapisan troposfer. Nilai (ZTD) ini diperoleh dari pengamatan CORS, estimasi nilai ZTD setiap stasiun berbeda-beda. Selain itu nilai ZTD ini dapat digunakan untuk penentuan *Precipitable Water Vapor* (PWV) pada lapisan troposfer. (Lujainatul Isnaini 2016)

Global Navigation Satellite System (GNSS) sinyal mengalami keterlambatan saat melintasi atmosfer netral (troposfer), yang dikenal sebagai *tropospheric delay*, dan komponen ini merupakan salah satu sumber kesalahan utama dalam pengamatan GNSS. Dalam arah *zenith*, keterlambatan tersebut diproyeksikan sebagai *Zenith Tropospheric Delay* (ZTD), yang terdiri dari *Zenith Hydrostatic Delay* (ZHD) dan *Zenith Wet Delay* (ZWD). ZHD sendiri terutama disebabkan oleh tekanan atmosfer kering dan dapat dihitung dari tekanan permukaan, sementara ZWD berkaitan dengan kandungan uap air yang lebih variabel (Oikonomou et al., 2018).

Penundaan total sinyal GNSS yang disebabkan oleh troposfer dikenal dengan istilah *Zenith Total Delay* (ZTD). ZTD merupakan total keterlambatan sinyal GNSS dalam arah vertikal (*zenith*) dan terdiri atas dua komponen utama, yaitu *Zenith Hydrostatic Delay* (ZHD) yang relatif stabil karena disebabkan oleh tekanan udara kering, dan *Zenith Wet Delay* (ZWD) yang lebih bervariasi karena dipengaruhi oleh kandungan uap air di troposfer. Kedua komponen tersebut menjadi dasar dalam berbagai pendekatan estimasi atmosfer menggunakan data GNSS, baik dalam aplikasi geodesi maupun meteorologi. Berikut adalah rumus untuk mendapatkan hasil ZTD: Berikut adalah rumus untuk mendapatkan hasil ZTD:

$$ZTD = ZHD + ZWD \quad \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan :

ZHD = *Zenith Hydrostatic Delay* (ZHD)

ZWD = *Zenith Wet Delay* (ZWD).

Pada data ZTD tersebut kemudian dapat dilakukan uji korelasi *pearson* dengan untuk mengetahui hubungan antara keduanya dan arah hubungan linearnya, dalam korelasi *pearson* ini terdapat nilai r dan nilai determinasi yaitu r^2 klasifikasi untuk mengetahui pengelompokkan dari sangat lemah sampai dengan hubungan yang kuat, berikut adalah klasifikasi untuk nilai r :

Tabel 2. Klasifikasi nilai r

Nilai r	Klasifikasi
0,00 – 0,10	Sangat Lemah
0,10 – 0,30	Lemah
0,30 – 0,50	Sedang
0,50 – 0,70	Kuat
$\geq 0,70$	Sangat Kuat

Sumber : JACOB COHEN, 1988

Dalam korelasi *pearson* selain nilai r terdapat juga nilai determinasi yaitu nilai r^2 dengan nilai klasifikasi yang berbeda. Berikut merupakan klasifikasi untuk nilai determinasinya:

Tabel 3. Klasifikasi nilai r^2

Nilai r^2	Klasifikasi
0,00 – 0,19	Sangat Lemah
0,19 – 0,33	Lemah
0,33 – 0,67	Sedang
$\geq 0,67$	Kuat

Sumber : Wynne W. Chin, 1998

2.2.5. *Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)*

Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) merupakan salah satu indeks kekeringan yang banyak digunakan dalam kajian perubahan iklim karena memanfaatkan data curah hujan (P) dan evapotranspirasi potensial (PET) sebagai

parameter utama dalam perhitungannya. Keunggulan dari indeks ini terletak pada kemampuannya untuk mendeteksi tingkat kekeringan yang dipengaruhi oleh peningkatan suhu global, sebab SPEI tidak hanya memperhitungkan jumlah presipitasi, tetapi juga mengintegrasikan proses kehilangan air melalui evapotranspirasi, sehingga memberikan gambaran yang lebih komprehensif terhadap kondisi kekeringan yang berkaitan dengan perubahan iklim. (Anggun Dwi Utami dkk, 2025).

Evapotranspirasi merupakan proses gabungan antara evaporasi, yaitu penguapan air dari permukaan tanah, sungai, dan danau, serta transpirasi, yaitu pelepasan uap air dari jaringan tanaman ke atmosfer. Evapotranspirasi potensial (PET) menggambarkan jumlah air yang secara teoritis dapat diuapkan dan ditranspirasikan oleh tanaman dalam kondisi ketersediaan air yang cukup. Besarnya nilai PET sangat dipengaruhi oleh unsur-unsur iklim seperti suhu udara, radiasi matahari, kecepatan angin, dan tekanan udara. Karena suhu udara berhubungan langsung dengan peningkatan konsentrasi gas rumah kaca, maka PET menjadi salah satu indikator yang peka terhadap perubahan iklim, terutama dalam menggambarkan tingkat kebutuhan air tanaman di suatu wilayah (Fibriana dkk, 2018). Berikut adalah data dan rumus untuk mencari SPEI:

Tabel 4. Data dan Rumus SPEI

Jenis Data	Sumber	Parameter	Satuan	Fungsi
Curah hujan (PRECTOTCORR)	Nasa Power	P_mm	mm	Menentukan <i>input</i> air
Suhu rata-rata perbulan (T2M)	Nasa Power	T_mean	°C	Menghitung evaporasi
<i>Zenit Wet Delay</i> (ZWD)	CORS GNSS	ZWD	m	Menghitung pwv
Suhu rata-rata udara (Tm)	Turunan dari suhu	K	K	Komponen konversi Bevis

Untuk menghitung indeks kekeringan memiliki beberapa tahapan pengolahan yang dilakukan yaitu:

1. Konversi ZWD menjadi pqv menggunakan metode Bevis (1992)
2. Perhitungan evapotranspirasi potensial (ET_{th}) menggunakan metode Thornwaite (1948)
3. Perhitungan defisit air ($D = P - ET$) untuk memperoleh indeks kekeringan melalui standarisasi *z-score* berdasarkan Vicente-Serrano et al. (2010)

Berikut adalah rumus perhitungannya:

1. Konversi ZWD menjadi PWV (Bevis et al., 1992):

$$PWV = \pi \times ZWD \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\pi = \frac{10^5}{\left(\frac{3,739 \times 10^5}{T_m} + 22,1\right)} \times \frac{1}{461,495} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$T_m = 70,2 + 0,72 \times (T_{mean} + 273,15) \quad \dots\dots\dots (4)$$

2. Evapotranspirasi Potensial (Thornthwaite, 1948)

$$ET_{th} = 0,49239 + 0,01792T_{mean} - \dots\dots\dots (5)$$

$$0,0000771T_{mean}^2 + 0,000000675T_{mean}^3$$

3. Defisit Air

$$D = P - ET_{th} \quad \dots\dots\dots (6)$$

4. *Standardized Precipitation Evapotranspiration Index* (SPEI):

$$SPEI = \frac{D - \bar{D}}{\sigma_D} \quad \dots\dots\dots (7)$$

Dari rumus diatas memiliki keterangan sebagai berikut:

Tabel 5. Keterangan Rumus SPEI

Simbol	Keterangan
ZWD	<i>Zenith Wet Delay</i> (m)
PWV	<i>Precipitable Water Vapor</i> (mm)
π	Faktor konversi Bevis
T_mean	Suhu udara rata-rata bulanan (°C)
T_m	Suhu rata-rata atmosfer (K)
P	Curah hujan bulanan (mm)
ET_th	Evapotranspirasi potensial metode <i>Thornthwaite</i> (mm)
D	Defisit air (P - ET) (mm)
SPEI	<i>Standardized Precipitation Evapotranspiration Index</i> (tanpa satuan)

Dari hasil perhitungan SPEI tersebut kemudian diklasifikasikan rentang SPEI sebagai berikut:

Tabel 6. Klasifikasi SPEI

Rentang SPEI	Kategori
$\geq 2,0$	Sangat Basah
1,5 - 1,99	Basah Berat
1,0 - 1,49	Basah Sedang
-0,99 - 0,99	Normal
-1,49 - -1,0	Kering Sedang
-1,99 - -1,5	Kering Berat
$\leq -2,0$	Sangat Kering

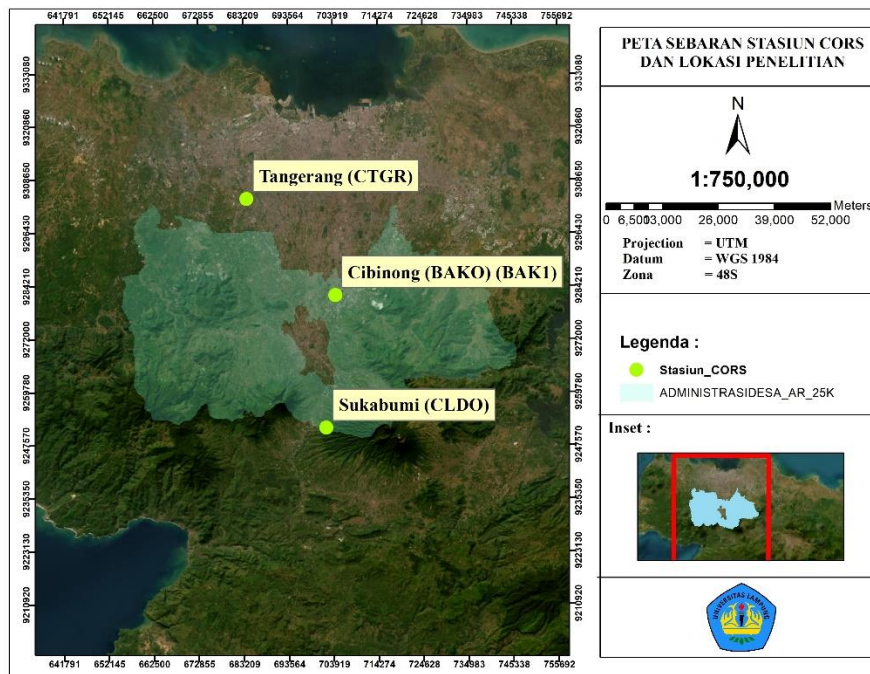
Sumber : (Dikshit et al., 2020)

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian ini berlokasi di Kabupaten Bogor, Provinsi Jawa Barat yang terletak pada astronomi wilayah di $106^{\circ}23'00''$ – $107^{\circ}13'00''$ Bujur Timur $6^{\circ}18'00''$ – $7^{\circ}00'00''$ LS Lintang Selatan. Kecamatan Jonggol memiliki luas 2.710,62 Km².

Kabupaten Bogor secara administratif terdiri dari 40 kecamatan, 417 Desa dan 19 kelurahan dan berbatasan langsung dengan Kota Depok, Tangerang, Selatan, Kabupaten Sukabumi, Bekasi, Karawang.



Gambar 6. Peta Lokasi Penelitian dan Stasiun CORS BIG

3.2. Alat dan Bahan Penelitian

Dalam penelitian ini ada beberapa data yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut:

Tabel 7. Data yang digunakan

Data	Sumber	Format
Data Curah hujan yang sudah dikoreksi dan disesuaikan dengan data satelit PRECTOTCOR(<i>PrecipitationCorrected</i>) tahun 2023 di Website NASA Power https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/ dalam bentuk CSV (<i>Comma-Separated Values</i>)	NASA POWER (https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/)	Tabular
Data observasi CORS GPS Bulan Maret hingga Desember 2023	Kode Stasiun CORS BIG: 1. CTGR (Tangerang) 2. BAKO (Bogor) 3. BAK1 (Bogor) 4. CLDO (Sukabumi)	RINEX
Data IGS (<i>International GNSS Service</i>) Dalam bentuk file troposfer (.trop) Bulan Maret hingga Desember 2023	NASA CDDIS (<i>Crustal Dynamics Data Information System</i>)	RINEX
Data kerentanan kekeringan tahun 2023	Website <i>Ina.risk</i>	Raster

Alat yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut:

Dalam penelitian ini ada beberapa alat yang digunakan selama pengolahan data, antara lain sebagai berikut:

Tabel 8. Alat yang digunakan

Alat	Keterangan
Laptop Lenovo Thinkpad L380 Intel Core i7 8thGen	Digunakan untuk pengolahan data dan penyusunan laporan penelitian.
Pengolahan GIS	Digunakan untuk pengolahan data.
Website <i>Natural Resources Canada (NRC)</i>	Digunakan untuk pengolahan data.
Software Pemrograman	Digunakan untuk pengolahan data.
Microsoft Word	Digunakan untuk menyusun laporan penelitian.

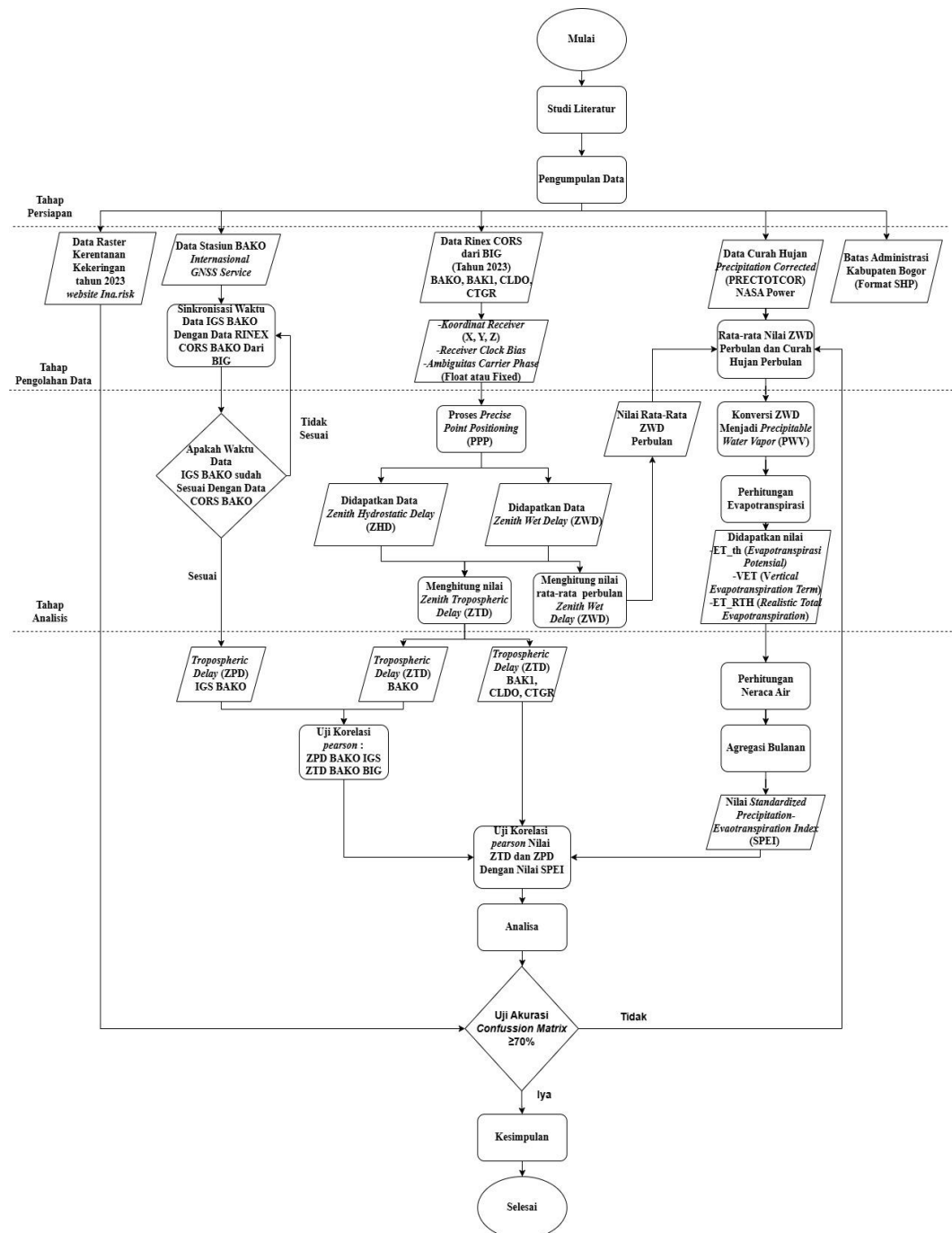
3.3. Persiapan Penelitian

Tahapan persiapan ini dimulai dengan studi literatur untuk menambah pengetahuan tentang apa yang dijadikan bahan penelitian. Studi literatur ini juga bertujuan untuk mengumpulkan informasi yang berkaitan dengan teori-teori penelitian sebagai referensi.

Studi literatur dilakukan dengan menelaah berbagai sumber ilmiah seperti jurnal, buku, laporan institusi, serta dokumen teknis yang berhubungan dengan pengamatan atmosfer menggunakan GNSS, indeks kekeringan SPEI, fenomena El Niño, serta karakteristik klimatologis wilayah penelitian. Kegiatan ini bertujuan untuk mengumpulkan dan menyintesis informasi mengenai teori troposfer, *Zenith Tropospheric Delay* (ZTD), *Zenith Wet Delay* (ZWD), teknik pemrosesan GNSS dengan metode *Precise Point Positioning* (PPP), serta konsep dasar perhitungan SPEI beserta data pendukungnya.

3.4. Tahapan Penelitian

Berikut merupakan tahapan-tahapan yang dilakukan pada penelitian ini yang dapat dilihat pada (gambar 7).



Gambar 7. Diagram Alir Penelitian

3.4.1. Tahapan Persiapan

Pada tahap penelitian ini terdapat langkah-langkah yang dikerjakan seperti identifikasi masalah, mempelajari literatur yang dipelajari dari jurnal penelitian, buku serta *website* seputar penelitian yang akan dilaksanakan, dalam tahapan ini juga dilakukan pengumpulan data.

3.4.2. Studi Literatur

Studi literatur ini ditujukan untuk mengkaji temuan dan teori yang dilakukan sebelumnya terkait dengan pengaruh kekeringan terhadap nilai *Zenith Tropospheric Delay* (ZTD) dan untuk mengetahui hubungan antara nilai *Standardized Precipitaion Evapotranspiration* (SPEI) dan nilai ZTD pada musim kemarau atau pada saat kekeringan.

3.4.3. Pengumpulan Data

Pengumpulan data ini bertujuan untuk mendapatkan data yang akan digunakan dalam penelitian ini, seperti yang sudah dijelaskan pada tabel 2, data yang dibutuhkan adalah data curah hujan harian dan suhu temperatur tahun 2023 dari NASA *Power*, data RINEX CORS dari BIG tahun 2023 dengan kode stasiun BAKO, BAK1, CLDO, CTGR, data pendukung dari IGS dengan satelit BAKO.

3.5. Tahap Pengolahan

Dalam tahapan pengolahan ada beberapa tahapan yang dilakukan untuk data RINEX CORS BIG dengan kode stasiun BAKO dan IGS BAKO, dimana data tersebut diolah dengan metode *Precise Point Positioning* (PPP) untuk data RINEX CORS BIG dan sinkronisasi nilai ZTD antara RINEX CORS BIG stasiun BAKO dengan data IGS BAKO.

3.5.1. *Precise Point Positioning (PPP)*

Pengolahan data yang dilakukan adalah dengan metode *Precise Point Positioning* (PPP). Dari hasil pengolahan tersebut didapatkan nilai ZTD dan ZWD. Data RINEX CORS BIG yang sudah ada diolah melalui *website* dari *Natural Resources Canada* (NRC) berupa *The Canadian Spatial Reference System – Precise point Positioning* (CSRS – PPP) yang dapat diakses melalui *link* berikut <https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/>

The screenshot shows the web application interface for CSRS-PPP. It includes the following elements:

- Email for results (required):** A text input field containing the email address `ryoseptian1243@gmail.com`.
- Processing mode:** Two radio buttons, **Static** (selected) and **Kinematic**.
- Reference Frame:** Two buttons, **NAD83** and **ITRF**, with **ITRF** being the active selection.
- Vertical datum:** A dropdown menu currently set to **CGVD2013**.
- Contribute to passive control maintenance? (What is this?)**: A checkbox that is currently unchecked, with a link to [What is this?](#)
- Official Canadian federal or provincial geodetic marker number:** An empty text input field.
- More options:** A link at the bottom left to expand the form.

Gambar 8. Halaman *The Canadian Spatial Reference System – Precise point positioning* (CSRS – PPP)

Dalam proses pengolahan *Precise Point Positioning* (PPP) menggunakan referensi ITRF seperti pada gambar 8 sesuai dengan tahun pengambilan. PPP menggunakan referensi *International Terrestrial Reference Frame* (ITRF). ITRF adalah sistem referensi global yang digunakan sebagai kerangka acuan posisi stasiun GNSS diseluruh dunia.

Penggunaan ITRF dalam PPP sangat penting karena memastikan bahwa estimasi posisi dan parameter turunan seperti ZTD tidak terpengaruh oleh ketidaksesuaian sistem koordinat, sehingga hasil analisis atmosfer yang diperoleh dari data CORS BIG tetap valid dan dapat diintegrasikan dengan studi GNSS meteorologi skala regional maupun global. Dalam proses pengolahan ini data menghasilkan *output* nilai

ZHD dan ZWD. Pemrosesan dilakukan secara daring untuk data setiap stasiun CORS BIG yang diolah. Didalam *file* hasil pengolahan PPP ini terdapat nilai ZTD yang dibutuhkan.

3.5.2. Pengolahan Data *International GNSS Service* (IGS) Untuk Mendapatkan Nilai ZTD

Dalam penelitian ini menggunakan *file* pendukung untuk pembanding nilai *Zenith Tropospheric Delay* (ZTD), data IGS yang digunakan adalah data untuk stasiun BAKO dikarenakan dalam IGS hanya tersedia stasiun BAKO untuk di Indonesia.

Dalam pengumpulan data tersebut menggunakan *website Crustal Dynamics Data Information System* (CDDIS). Pengolahan data dari stasiun IGS BAKO dilakukan menggunakan berkas hasil estimasi troposfer berformat .TRO, yang diperoleh dari hasil *International GNSS Service* (IGS).



Gambar 9. Halaman Utama *Crustal Dynamics Data Information System* (CDDIS)

Untuk format IGS menggunakan doy, yang dimana harus disesuaikan dengan tanggal data RINEX CORS BIG stasiun BAKO. Pada gambar 9 diperlihatkan contoh data IGS yang tersedia di tahun 2023.



Gambar 10. File IGS CDDIS

Sebelum mengunduh data IGS harus memilih nama *file IGS00PSFIN_20230670000_01D_05M_BAKO00IDN_TRO.TRO* seperti yang terdapat pada gambar 8. Format *file* nama tersebut yang sesuai dengan stasiun BAKO di tahun 2023. Didalam *file* tersebut berisi beberapa blok penting yang digunakan untuk membandingkan nilai ZTD CORS BIG. Salah satu isi blok tersebut adalah *field output* utama yaitu:

1. TROTOT : *Total Zenith Tropospheric Delay (ZTD)*
2. TGNTOT : *North gradient*
3. TGETOT : *East gradient*
4. STDDEV : *Ketidakpastian estimasi tiap parameter*

+TROP/SOLUTION							
*SITE	____EPOCH____	TROTOT	STDDEV	TGNTOT	STDDEV	TGETOT	STDDEV
BAKO	23:060:00000	2615.1	4.1	0.053	0.583	1.342	0.777
BAKO	23:060:00300	2614.9	4.0	0.048	0.570	1.342	0.768
BAKO	23:060:00600	2614.7	3.8	0.043	0.565	1.342	0.764
BAKO	23:060:00900	2614.9	3.7	0.058	0.550	1.341	0.755
BAKO	23:060:01200	2615.3	3.6	0.072	0.544	1.340	0.752
BAKO	23:060:01500	2615.3	3.5	0.085	0.530	1.340	0.742
BAKO	23:060:01800	2615.3	3.4	0.097	0.524	1.339	0.739
BAKO	23:060:02100	2615.6	3.4	0.111	0.511	1.338	0.730
BAKO	23:060:02400	2615.9	3.3	0.125	0.506	1.337	0.727
BAKO	23:060:02700	2615.7	3.3	0.117	0.493	1.334	0.718
BAKO	23:060:03000	2615.6	3.3	0.109	0.489	1.330	0.715
BAKO	23:060:03300	2615.4	3.2	0.096	0.476	1.327	0.705

Gambar 11. *Field Output* IGS BAKO

Dari keterangan *field output* diatas yang menjadi nilai ZTD adalah *Field* TROTOT, yang merupakan estimasi total keterlambatan troposfer pada zenit, dihitung oleh sistem pengolahan IGS secara global. IGS sudah mengestimasi nilai total ZTD, sehingga pada penelitian ini nilai TROTOT digunakan secara langsung tanpa melakukan pemisahan komponen lagi. Nilai ZTD dari TROTOT tersebut yang digunakan untuk membandingkan nilai ZTD CORS BIG.

3.6. Tahap Analisis

Setelah tahap pengolahan data selesai, selanjutnya dilakukan analisis hasil yang dilakukan dengan dua cara, yaitu dengan menguji korelasi nilai ZTD CORS BAKO dan ZTD IGS BAKO dan analisis hubungan antara nilai ZTD kondisi kekeringan yang direpresentasikan oleh nilai SPEI.

3.6.1. Uji Korelasi Antara ZTD CORS BAKO dan ZTD IGS BAKO

Setelah mendapatkan nilai ZTD dari CORS BAKO dan IGS BAKO perlu dilakukannya analisis hubungan antara keduanya dengan korelasi *pearson* Metode ini dipilih karena mampu mengukur kekuatan dan arah hubungan linear antara dua variabel kontinu, sehingga cocok untuk mengevaluasi konsistensi dan kesesuaian variasi ZTD yang dihasilkan oleh dua sumber data yang berbeda namun berbasis

observasi GNSS yang sama. Dengan menggunakan korelasi *Pearson*, tingkat linearitas antara ZTD CORS BAKO dan ZTD IGS BAKO dapat dipetakan secara kuantitatif, sehingga hasilnya memberikan gambaran objektif terkait reliabilitas nilai ZTD yang diperoleh dari pengolahan RINEX melalui metode PPP.

Perhitungan koefisien korelasi *pearson* ini didasarkan pada persamaan:

$$r = \frac{\sum (X_i - \bar{X}) (Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2 \cdot \sum (Y_i - \bar{Y})^2}} \dots\dots\dots (8)$$

Setelah koefisien korelasi dihitung, nilai *r* tersebut diinterpretasikan untuk melihat seberapa baik kesesuaian estimasi ZTD dari CORS BAKO terhadap estimasi referensi IGS BAKO. Apabila nilai $r > 0,7$ maka hubungan keduanya dapat dikategorikan kuat, sedangkan jika $r > 0,9$ maka hubungan tersebut dapat dianggap sangat kuat dan menunjukkan bahwa pengolahan PPP pada CORS BAKO menghasilkan estimasi ZTD yang konsisten dengan model dan koreksi atmosfer yang digunakan pada produk IGS. Dengan demikian, korelasi *Pearson* ini menjadi salah satu bentuk uji validasi internal untuk menilai kualitas estimasi troposfer dari pengolahan RINEX CORS BIG, khususnya dalam konteks penggunaan data pada periode musim kemarau.

3.6.2. *Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)*

Pembuatan *Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)* adalah untuk mengetahui nilai kekeringan, *Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)* berdasarkan kombinasi data meteorologi dan parameter atmosfer dari pengamatan *Global Navigation Satellite System (GNSS)*. Dalam penelitian ini perhitungan dilakukan menggunakan data CORS BAKO, data meteorologi NASA POWER, dan seluruh proses pengolahan ini dilakukan secara *time series* bulanan periode Juli hingga Oktober 2023, karena menurut BMKG bulan tersebut adalah musim kemarau yang terjadi di tahun 2023 dan menurut Dinas Kesehatan

Kabupaten Bogor kejadian kekeringan terjadi dibulan Agustus 2023(Buku Prakiraan Musim Kemarau 2023, Dinas Kesehatan Kabupaten Bogor, 2023).

3.6.2.1. Pengolahan SPEI

Pada penelitian ini, komponen evapotranspirasi dihitung menggunakan pendekatan gabungan yang terdiri dari ET_{th}, VET, dan ET_{RTH}. ET_{th} merupakan evapotranspirasi potensial yang dihitung menggunakan metode *Thornthwaite* berdasarkan nilai temperatur rata-rata bulanan (T_{mean}). Selanjutnya, VET digunakan untuk merepresentasikan peningkatan proses penguapan yang dipengaruhi oleh kandungan uap air atmosfer, yang diperoleh dari nilai PWV hasil konversi ZWD GNSS. VET dihitung menggunakan model regresi sesuai penelitian terdahulu. Kedua komponen tersebut digabungkan sehingga membentuk ET_{RTH} (*Realistic Thornthwaite Evapotranspiration*), yaitu evapotranspirasi aktual yang lebih menggambarkan kondisi atmosfer tropis secara realistis. ET_{RTH} kemudian digunakan dalam perhitungan neraca air bulanan sebagai langkah penting sebelum proses standardisasi menjadi SPEI 1, SPEI 3, dan SPEI 6. Dalam pengolahan nilai SPEI menggunakan rumus nomor 2 sampai dengan rumus nomor 7 untuk mendapatkan nilai SPEI.

3.6.2.2. Uji Korelasi SPEI terhadap ZPD IGS dan CORS

Untuk memvalidasi hubungan SPEI dengan kondisi atmosfer GNSS digunakan korelasi *Pearson*:

$$r = \frac{\sum(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X_i - \bar{X})^2 \cdot \sum(Y_i - \bar{Y})^2}} \dots\dots\dots (9)$$

Dalam uji korelasi nilai SPEI terhadap ZPD IGS dan ZTD CORS adalah dengan korelasi *pearson* dengan keterangan rumus sebagai berikut:

1. X = SPEI 1
2. Y = ZTD IGS atau ZTD CORS

Penggunaan SPEI skala 1 bulan (SPEI-1) karena skala tersebut paling sensitif untuk mendeteksi respon kekeringan jangka pendek terhadap perubahan curah hujan dan evapotranspirasi pada bulan yang sama. Mengingat data GNSS ZTD/ZWD yang digunakan juga telah dirata-bulankan (*monthly mean*), maka penggunaan SPEI-1 untuk menilai hubungan langsung antara variabilitas kadar uap air atmosfer (PWV dari ZWD) dengan kondisi neraca air permukaan pada skala waktu pendek.

Metode perhitungan SPEI dalam penelitian ini menggunakan pendekatan *Z-score*, Metode *Z-score* digunakan dalam perhitungan SPEI karena data yang digunakan hanya berupa data bulanan dengan jumlah yang terbatas. *Z-score* adalah metode yang digunakan untuk melihat seberapa jauh suatu nilai berbeda dari nilai rata-rata kondisi normalnya, sehingga nilai positif menunjukkan kondisi lebih basah dan nilai negatif menunjukkan kondisi lebih kering dibandingkan kondisi rata-rata normalnya. Metode ini dipilih karena sesuai dengan data yang menunjukkan bulan musim kemarau dari Juli sampai Oktober 2023. Dengan *Z-score*, nilai SPEI tetap mampu menunjukkan kondisi basah–kering secara kuantitatif melalui deviasi dari kondisi normal.

3.6.2.3. Uji Akurasi *Confussion Matrix*

Nilai hasil SPEI yang sudah dilakukan pengolahan kemudian akan dilakukan visualisasi peta untuk mengetahui sebaran kekeringan yang terjadi di Kabupaten Bogor pada tahun 2023. Proses *Inverse Distance Weighting* (IDW) dilakukan agar mengetahui nilai klasifikasi kekeringan di lokasi penelitian, kemudian peta yang dihasilkan akan divalidasi dengan peta kerentanan kekeringan dari *website Ina.risk*.

Setelah peta IDW dibuat selanjutnya adalah melakukan validasi dengan mengambil titik sampel sesuai dengan metode penentuan sampel yaitu *stratified random* dan *proposional sampling*, dengan mengambil sampel secara acak (*random sampling*) dengan peraturan BIG Nomor 3 tahun 2014 untuk jumlah sampelnya, agar sesuai dengan BIG harus dilakukan perhitungan sebagai berikut :

Tabel 9. Jumlah titik sampel berdasarkan skala peta

Skala	Kelas Kerapatan	Minimal Plot	Total Sampel Minimal (TSM)
1:25,000	5	30	50
1:50,000	3	20	30
1:250,000	2	10	20

Sumber : Peraturan BIG Nomor 3 Tahun 2014,

$$A = TSM + \frac{luas\ (ha)}{1.500} \dots\dots\dots (10)$$

$$A = TSM + \frac{266,383}{1.500}$$

$$A = 177,589 \approx 178$$

A : Jumlah Sampel Minimal

TSM : Total Sampel Minimal

Berdasarkan rumus diatas didapatkan minimal sampel adalah 178 sampel, hasil validasi menggunakan peta kerentanan cucaca dari *website ina.risk*. validasi dilakukan dengan membandingkan kecocokan data hasil analisis dengan data kerentanan *ina.risk*. Dalam uji akurasi tersebut terdapat klasifikasi dari *overall accuracy* sebagai berikut:

Tabel 10. Klasifikasi *Overall Accuracy*

Overall Accuracy	Kategori
> 85 %	Sangat Baik
70 – 85 %	Baik
< 70 %	Kurang

Sumber: Denih dkk., 2024

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Simpulan

Berdasarkan penelitian pengaruh kekeringan terhadap variasi *zenith tropospheric delay* (ZTD) di Kabupaten Bogor tahun 2023 yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Analisis variasi nilai *Zenith Tropospheric Delay* (ZTD) menunjukkan respon atmosfer yang jelas terhadap dinamika musim kemarau. Berdasarkan hasil *time series*, nilai ZTD pada seluruh stasiun CORS (BAKO, BAK1, CLDO, dan CTGR) mengalami penurunan yang signifikan selama periode Juli hingga Oktober 2023, dengan puncak kekeringan terjadi pada bulan September 2023. Penurunan ini mencerminkan berkurangnya kandungan uap air atmosfer akibat kondisi kering yang dominan pada musim kemarau. Validasi terhadap data ZTD IGS BAKO mengonfirmasi kesesuaian pola yang tinggi antara ZTD CORS dan IGS, dengan nilai korelasi *Pearson* $r = 0,648$, yang termasuk kategori kuat menurut Cohen (1988). Hasil ini menunjukkan bahwa data ZTD dari pengamatan GNSS cukup sensitif dalam merepresentasikan perubahan kelembapan atmosfer pada skala musiman.
2. Indeks kekeringan SPEI-1 terbukti memiliki korelasi positif dengan ZTD dan dapat dijadikan indikator pendukung dalam memantau kondisi atmosfer. Nilai SPEI-1 menunjukkan penurunan dari kondisi normal/basah menuju kondisi kering hingga kering berat pada Agustus–September 2023, pada bulan September 2023 adalah puncak terjadinya kekeringan. Korelasi *Pearson* antara SPEI dan ZTD pada seluruh stasiun menunjukkan hubungan positif yang signifikan: kuat pada CORS BAKO ($r = 0,672$), sangat kuat pada IGS BAKO ($r = 0,929$), serta kategori sedang–kuat pada BAK1 ($r = 0,533$), CLDO ($r =$

0,482), dan CTGR ($r = 0,489$). Hasil ini menegaskan bahwa ZTD dapat digunakan sebagai parameter atmosferik tambahan untuk mengidentifikasi tingkat kekeringan dan dinamika uap air dalam skala waktu bulanan. Serta dalam uji akurasi dengan *confussion matrix* didapatkan nilai yang dikategorikan baik yaitu sebesar 70%

5.2. Saran

Pada penelitian pengaruh kekeringan terhadap variasi *zenith tropospheric delay* (ZTD) di Kabupaten Bogor tahun 2023 yang telah dilakukan terdapat saran sebagai berikut:

1. Penelitian selanjutnya perlu menggunakan periode data yang lebih panjang dan cakupan spasial yang lebih luas. Penggunaan data multi-tahun sangat disarankan untuk mendapatkan pemahaman yang lebih baik mengenai pola musiman, variabilitas antar-tahun, serta tren jangka panjang dari ZTD dan SPEI. Analisis lintas tahun juga memungkinkan identifikasi fenomena iklim ekstrem seperti El Niño atau La Niña terhadap dinamika troposfer. Selain itu, memperluas jumlah stasiun CORS yang dianalisis akan meningkatkan representativitas spasial dan kualitas pemodelan kondisi atmosfer regional.
2. Peningkatan kelengkapan data GNSS sangat diperlukan guna mendukung akurasi estimasi troposfer pada penelitian selanjutnya. Beberapa stasiun masih menunjukkan *data gap* atau tidak tersedianya data yang berpotensi memengaruhi nilai ZTD dan hasil korelasi dengan SPEI. Oleh karena itu, pemeliharaan perangkat *receiver*, antena, dan sistem akuisisi data perlu dilakukan secara berkala. Selain itu, penelitian berikutnya sebaiknya mengintegrasikan parameter atmosfer lain seperti *Precipitable Water Vapor* (PWV), radiosonde, ERA5, atau data meteorologi permukaan untuk memberikan verifikasi silang (*cross-validation*) dan memperkuat interpretasi hubungan antara kondisi kekeringan dan dinamika troposfer.

DAFTAR PUSTAKA

- Ajat Nicko. 2023. Kekeringan Bikin Puluhan Hektare Lahan Sawah di Bogor Alami Gagal Panen. PANGANNEWS.
- Anggun D, M., Rusmayadi, G., dan Joko Priatmadi, B., 2025. *Analysis of Spatio-Temporal Drought in South Kalimantan with SPEI Index on Seasonal ENSO Occurrences*. 21(2).
- Audah, S., Nur Cahyadi, M., Taufik, M., K. J., Tuan, T., dan K., Arief Rahman Hakim, J., Keputih, K., dan Surabaya, S. 2017. Analisa Penentuan *Water Vapor* Terhadap Pengaruh Erupsi Gunung Sinabung Menggunakan Data Sugar dan Citra Satelit *Terra Modis*. *Jurnal Inotera*, 2(1). <http://sopac.ucsd.edu/map.shtml>
- Azis, R. A., Suhandri, H. F., dan Wijaya,. 2018. Ketelitian Posisi Pengamatan GNSS Metode *Precise Point Positioning* dan Metode Penentuan Posisi Relatif. In *ITB Indonesian Journal of Geospatial* (Vol. 05, Number 2).
- Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG). 2023. 63% Wilayah Sudah Masuk Musim Kemarau, Indonesia Bersiap Hadapi *El Nino*. BMKG.
- Badan Nasional Penanggulangan Bencana. 2023. Kekeringan di Pulau Jawa. <https://Data.Bnpb.Go.Id/>.
- Bevis, M., Businger, S., Herring, T. A., Rocken, C., Anthes, R. A., and Ware, R. H. 1992. *GPS Meteorology' Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System*. In *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH* (Vol. 97, Number D14).
- Buku Prakiraan Musim Kemarau 2023 BMKG
- Cahyono, B. E., Rahagian, R., dan Nugroho, A. T. 2023. Analisis Produktivitas Padi berdasarkan Indeks Kekeringan (NDWI dan NDDI) Lahan Sawah menggunakan Data Citra Sentinel-2A di Kecamatan Ambulu. *INDONESIAN JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*, 13(1), 88. <https://doi.org/10.13057/ijap.v13i1.70682>

- Denih, A., Anggraeni, I., dan Runanto. 2024. Analisis Perubahan Luas Lahan Hijau di Kota Bogor Dengan Citra Landsat 8 Menggunakan *Normalized Difference Vegetation Index*. *Jurnal Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, 11(6), 1313–1324. <https://doi.org/10.25126/jtiik.2024118771>
- Dikshit, A., Pradhan, B., and Alamri, A. M. 2020. *Short-Term Spatio-Temporal Drought Forecasting Using Random Forests Model at New South Wales, Australia*. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/app10124254>
- Dinas Kesehatan Kabupaten Bogor. 2023. Kekeringan di BOGOR, JAWA-BARAT, 02-08-2023.
- Donny H., Muhammad A., dan Winnie M.. 2024. Pemetaan Spasial Kekeringan Menggunakan Metode *Standardized Precipitation Index* (SPI) di DAS Blega, Kabupaten Bangkalan. *Jurnal Teknik*, 16(2), 67–78. <https://doi.org/10.30736/jt.v16i2.1241>
- Een L., Hafiz M., R., Akbar W., dan Aulia T., 2025. *Determination of Zenith Tropospheric Delay (ZTD) Using CORS GNSS Data*, 2016 sampai dengan 2020 In Lampung. *Jurnal Inotera*, 10(2), 346–354. <https://doi.org/10.31572/inotera.vol10.iss2.2025.id520>
- Fibriana, R., Ginting, Y. S., Ferdiansyah, E., dan Mubarak, S. 2018. Agrotekma *Jurnal Agroteknologi dan Ilmu Pertanian Analisis Besar atau Laju Evapotranspirasi pada Daerah Terbuka Large Analysis or Evapotranspiration Rate in the Open Area*. In *Agrotekma* (Vol. 2, Number 2). <http://ojs.uma.ac.id/index.php/agrotekma>
- JACOB COHEN. 1988. *Statistical Power Analysis For The Behavioral Science. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data* .
- Kuntjoro, W., Tanuwijaya, Z. A. J., Pramansyah, A., Dudy, D., Wijaya Kelompok, D., 2018. Korelasi Musiman Antara *Zenith Wet Delay* (ZWD) dan Debit Sungai di Das Cikapundung Hulu, Kawasan Bandung Utara, Jawa BaraT (*Seasonal Correlation Between Zenith Wet Delay And River Discharge In The Upper Cikapundung Watersheed, North Bandung Region, West Java*).
- Lujainatul Isnaini, E., dan Surya Perdana, R., 2025. Studi Teknik Geomatika, P., Teknologi Infrastruktur dan Kewilayahan, J., Teknologi Sumatera Jl Terusan Ryacudu, I., Huwi, W., Jati Agung, K., Halaman | 90 Penentuan *Zenith Tropospheric Delay* Menggunakan Data CORS GNSS. Retrieved <http://holt.oso.chalmers.se/loading/>.

- Nanda Fatehah, T., Satria Putra, Y., Adriat Prodi Geofisika, R., Universitas Tanjungpura, F., Kunci, K., dan David, M. 2022. Variasi Temporal Kekeringan Menggunakan *Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index* (SPEI) di Kalimantan Barat. *PRISMA FISIKA*, 10(2), 183–186. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dat>
- Oikonomou, C., Tymvios, F., Pikridas, C., Bitharis, S., Balidakis, K., Michaelides, S., Haralambous, H., and Charalambous, D. 2018. *Tropospheric Delay Performance for GNSS Integrated Water Vapor Estimation by Using GPT2w Model, ECMWF's IFS Operational Model In Situ Meteorological Data. Advances in Geosciences*, 45, 363–375. <https://doi.org/10.5194/adgeo-45-363-2018>
- Peraturan BIG Nomor 3 Tahun 2014.
- Supratono, D., Razie, F., Aryadi, M., and Studi Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan Hidup, P. 2016. *Prediction of Meteorological Drought Potential On Forest And Land Fire With Standardized Precipitation Index In The Banjar District*. 12(3).
- Susilo, D. D. W. W. K. J. E. 2012. Pemantauan *Precipitable Water Vapor* (PWV) di Wilayah Jawa Barat menggunakan GPS Kontinyu. Bandung: Institut Teknologi Bandung. . *Indonesian Jurnal of Geospatial*, 35–36.
- Thornthwaite, C. W. 1948. *An Approach toward a Rational Classification of Climate*. In *Geographical Review* (Vol. 38, Number 1).
- Wijaya, D. 2018. *GNSS Meteorologi*. Retrieved <https://www.researchgate.net/publication/372825066>
- World Meteorological Organization. 2023. *World Meteorological Organization declares onset of El Niño conditions*. For Further Information.
- Wynne W. Chin. 1998. *The Partial Least Squares Approach to Structural Equation Modeling*. LAWRENCE ERLBAUM ASSOCIATES.
- Zhao, Q., Ma, X., Yao, W., Liu, Y., Du, Z., Yang, P., and Yao, Y. 2019. *Improved Drought Monitoring Index Using GNSS-Derived Precipitable Water Vapor Over The Loess Plateau Area. Sensors (Switzerland)*, 19(24). <https://doi.org/10.3390/s19245566>
- Zhao, Q., Yao, Y., Yao, W., and Li, Z. 2018. *Real-Time Precise Point Positioning-Based Zenith Tropospheric Delay For Precipitation Forecasting. Scientific Reports*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26299-3>