

**ANALISIS DEFORMASI BENDUNGAN MARGATIGA  
DI LAMPUNG TIMUR MENGGUNAKAN HITUNGAN KUADRAT  
TERKECIL BERDASARKAN DATA PENGAMATAN *ROBOTIC TOTAL  
STATION***

**SKRIPSI**



**Oleh:**

**Zakiyah Hasnaul Rofifah**

**NIM: 20/456171/TK/50301**

**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK GEODESI  
DEPARTEMEN TEKNIK GEODESI  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS GADJAH MADA  
2024**

**DEFORMATION ANALYSIS OF THE MARGATIGA DAM IN EAST  
LAMPUNG USING LEAST SQUARE ADJUSTMENT BASED ON  
ROBOTIC TOTAL STATION OBSERVATION DATA**

**FINAL PROJECT**



**By:**

**Zakiah Hasnaul Rofifah**

**NIM: 20/456171/TK/50301**

**UNDERGRADUATE STUDY PROGRAM OF GEODETIC ENGINEERING  
DEPARTMENT OF GEODETIC ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
UNIVERSITAS GADJAH MADA  
2024**

**ANALISIS DEFORMASI BENDUNGAN MARGATIGA  
DI LAMPUNG TIMUR MENGGUNAKAN HITUNGAN KUADRAT  
TERKECIL BERDASARKAN DATA PENGAMATAN *ROBOTIC TOTAL  
STATION***

**SKRIPSI**

Untuk memenuhi salah satu persyaratan dalam mencapai derajat Sarjana Teknik  
Program Studi Teknik Geodesi



**Diajukan oleh:**

**Zakiyah Hasnaul Rofifah**

**NIM: 20/456171/TK/50301**

**Kepada:**

**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK GEODESI**

**DEPARTEMEN TEKNIK GEODESI**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS GADJAH MADA**

**2024**

**DEFORMATION ANALYSIS OF THE MARGATIGA DAM  
IN EAST LAMPUNG USING LEAST SQUARE ADJUSTMENT BASED ON  
ROBOTIC TOTAL STATION OBSERVATION DATA**

**FINAL PROJECT**

Submitted as a partial fulfillment of the requirements for obtaining degree of  
Bachelor of Engineering in the Study Program of Geodetic Engineering



**By:**

**Zakivah Hasnaul Rofifah**

**NIM: 20/456171/TK/50301**

**To:**

**UNDERGRADUATE STUDY PROGRAM OF GEODETIC ENGINEERING  
DEPARTMENT OF GEODETIC ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
UNIVERSITAS GADJAH MADA**

**2024**

SKRIPSI

ANALISIS DEFORMASI BENDUNGAN MARGATIGA DI LAMPUNG TIMUR  
MENGUNAKAN HITUNGAN KUADRAT TERKECIL BERDASARKAN DATA  
PENGAMATAN *ROBOTIC TOTAL STATION*

Dipersiapkan dan disusun oleh:

**ZAKIYAH HASNAUL ROFIFAH**

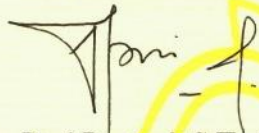
**NIM: 20/456171/TK/50301**

telah dipertahankan di depan Dewan Penguji  
pada tanggal 4 Oktober 2024

Susunan Dewan Penguji:

Ketua/Pembimbing

Anggota I



**Dr. Ir. Dwi Lestari, S.T., M.E., IPM**  
**NIP. 197508301999032002**

**Ir. Nurrohmat Widjajanti, M.T., Ph.D.,**  
**IPU., ASEAN Eng., APEC Eng.**  
**NIP. 196910211994032003**

Anggota II



**Dr. Ir. Bambang Kun Cahyono, S.T., M.Sc.,**  
**IPU.**

**NIP. 198103222005011005**

Skripsi ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan untuk mencapai derajat Sarjana  
Teknik Program Studi Teknik Geodesi  
pada tanggal... **24 OKTOBER 2024**

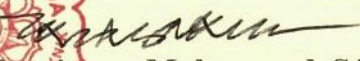
Ketua Program Studi Sarjana Teknik Geodesi



**Heri Sutanta, S.T., M.Sc., Ph.D.**  
**NIP. 197605232002121002**

Menyetujui,

Ketua Departemen Teknik Geodesi



**Prof. Ir. Trias Aditva Kurniawan Muhammad, S.T., M.Sc., Ph.D., IPU.**  
**NIP. 197504222002121002**



## PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Zakiyah Hasnaul Rofifah

NIM : 20/456171/TK/50301

Tahun terdaftar : 2020

Program studi : S-1 Teknik Geodesi

Fakultas/Sekolah : Teknik

Menyatakan bahwa dalam dokumen ilmiah skripsi ini tidak terdapat bagian dari karya ilmiah lain yang telah diajukan untuk memperoleh gelar akademik di suatu lembaga Pendidikan Tinggi, dan juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang/lembaga lain, kecuali yang secara tertulis di sitasi dalam dokumen ini dan disebutkan sumbernya secara lengkap dalam daftar Pustaka.

Dengan demikian, saya menyatakan bahwa dokumen ilmiah ini bebas dari unsur-unsur plagiasi dan apabila dokumen ilmiah Skripsi ini di kemudian hari terbukti merupakan plagiasi dari hasil karya penulis lain, maka penulis bersedia menerima sanksi hukum yang berlaku.

Yogyakarta, 15 Oktober 2024



Hasnaul Rofiah  
20/456171/TK/50301

## HALAMAN PERSEMBAHAN

Skripsi ini dipersembahkan kepada kedua orangtua penulis yang cinta, kasih, dan sabarnya melebihi luasnya samudera. Terimakasih atas segala doa yang dilangitkan sehingga kemudahan selalu menyertai penulis. Tersimpan beribu rasa syukur di setiap hela nafas, terlahir dari keluarga yang sehangat teh di pagi hari. Semoga segala doa baik, keberkahan, serta kebahagiaan selalu mengalir deras untukmu. Sehat selalu dan panjang umur pak, buk.

Juga untuk seorang perempuan tangguh bernama Zakiyah Hasnaul Rofifah. Terimakasih telah menari di tengah gempuran badai dan ombak, dengan hati yang tak pernah rapuh. Badai akan terus mengguncang tetapi pelangi selalu menanti. Tetap menjadi manusia yang baik, menyenangkan, dan terus berproses. Seorang pelukis mencipta warna dari kesulitan dan harmoni kebisingan. Setiap goresannya akan membawamu menuju *masterpiece* kehidupan yang indah.

لا تحزن إن الله معنا

*"Do not be sad; indeed, Allah is with us"*

## KATA PENGANTAR

Puji dan Syukur ke hadirat Allah *Subhanahu Wa Ta'ala* yang telah melimpahkan rahmat, ridho, dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan rintangan demi rintangan dan menuntaskan skripsi dengan judul “Analisis Deformasi Bendungan Margatiga di Lampung Timur Menggunakan Hitungan Kuadrat Terkecil Berdasarkan Data Pengamatan *Robotic Total Station*”. Penyusunan skripsi ini bertujuan untuk memenuhi salah satu persyaratan dalam menyelesaikan studi pada Program Studi Sarjana Teknik Geodesi, Departemen Teknik Geodesi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.

Skripsi ini merupakan buah ketabahan, ketekunan, dan doa yang tiada henti. Seperti hujan yang menunggu saatnya jatuh dengan sabar. Setiap lembar kertas ini terselip harapan bukan hanya sebagai syarat kelulusan melainkan juga menjadi setetes sumbangsih bagi ilmu pengetahuan. Selesaiannya skripsi ini tidak terlepas dari saran, bimbingan, dan dukungan dalam segala bentuk, baik moral maupun material dari berbagai pihak. Dengan penuh rasa syukur, penulis hendak mengungkapkan terimakasih kepada:

1. Bapak Subekti dan Ibu Siti Zulaikah selaku kedua orang tua yang selalu memberikan dukungan, cinta, kasih, sayang, dan doa yang tidak pernah berhenti di setiap langkah hidup penulis.
2. Ibu Dr. Ir. Dwi Lestari, S.T., M.E., IPM. selaku dosen pembimbing penulis yang telah memberikan arahan, bimbingan, dan motivasi kepada penulis dalam menuntaskan skripsi ini.
3. Ir. Nurrohmat Widjajanti, M.T., Ph.D., IPU., ASEAN Eng., APEC Eng. dan Dr. Ir. Bambang Kun Cahyono, S.T., M.Sc., IPU. yang telah memberikan saran dan masukan dalam memaksimalkan skripsi penulis.
4. Bapak Dr. Ir. Bilal Ma'ruf, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing akademik penulis yang telah memberikan dukungan penulis selama menempuh studi di Departemen Teknik Geodesi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.
5. Seluruh dosen, tenaga pendidik, dan *staff* di Departemen Teknik Geodesi yang telah membagikan ilmu, memfasilitasi, serta membantu penulis selama menempuh studi.
6. Bapak Adhityo Susilo, S.T. selaku *Structural monitoring and CORS product Manager* di PT Leica Geosystems Indonesia yang telah mengizinkan penulis menggunakan data untuk mengerjakan skripsi.



7. Hawa' Qurrota A'yun dan Nauffal Muh Irsyaad Adi yang selalu membantu penulis dalam menyelesaikan masalah, menjadi rekan diskusi, mengupayakan segala hal, dan dukungan yang tiada henti dalam penyelesaian skripsi ini.
8. Mbak Frastiwi Widya Azkiya Mas Kresna Hadhinata, dan Mbak Nadia Hanifa Ayuningtyas yang menjadi inspirasi dan membantu penulis dalam penyelesaian skripsi.
9. Teman-teman "kaum tidak cidro", Alya Salsabila D., Mbak Rifka Aulia, Ucik Nugroho, dan Arya Jaya K. yang telah menjadi telinga untuk mendengarkan keluh kesah penulis serta senantiasa membersamai setiap langkah penulis.
10. Teman-teman Teknik Geodesi UGM Galuh Kartika S., Noviana Firdha, Safira Ardelia, Vernika Silviana, Dea Deinda, Muhammad Rifki, Widodo Triwibowo, Nanda Aragani, Praba Sultan, Michael Krisna, Muhammad Odi, dan Bramudya Rizqi Alvianto yang telah berjuang bersama penulis dalam menyelesaikan studi di Departemen Teknik Geodesi.
11. Mohammad Fattah, teman terbaik yang ada di titik terendah penulis, yang memberikan pelajaran berharga yaitu kesabaran, kasih sayang, dan keikhlasan.
12. Teman-teman Sosmas 2020 dan 2021 yang telah memberikan pengalaman dan melukis cerita indah bersama penulis.
13. Teman-teman Balairung Klaten *Association* yang menjadi keluarga dan teman penulis selama studi.
14. Seluruh keluarga besar Teknik Geodesi 2020 alias Kulak Sikat.
15. Semua pihak yang tidak dapat dituliskan satu persatu oleh penulis.

Terimakasih telah hadir dalam kehidupan penulis baik sebagai pendengar, penasihat, maupun penyemangat di setiap langkah ini. Penulis menyadari dalam penulisan skripsi ini masih terdapat kekurangan. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati, penulis memohon maaf atas kekurangan yang ada. Penulis dengan lapang hati menerima segala saran dan kritik yang konstruktif untuk pengembangan penelitian ini. Akhir kata, semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat yang bermakna bagi semua pihak.

Yogyakarta, 26 September 2024.

Zakiah Hasnaul Rofifah

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL.....</b>	<b>i</b>
<b>HALAMAN PERNYATAAN .....</b>	<b>v</b>
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN.....</b>	<b>vii</b>
<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>viii</b>
<b>DAFTAR ISI .....</b>	<b>x</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>xvi</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN.....</b>	<b>xvii</b>
<b>INTISARI.....</b>	<b>xviii</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>xix</b>
<b>BAB 1 PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
I.1 Latar Belakang.....	1
I.2 Rumusan Masalah .....	4
I.3 Tujuan Penelitian .....	4
I.4 Pertanyaan Penelitian .....	4
I.5 Manfaat Penelitian.....	5
I.6 Ruang lingkup .....	5
I.7 Tinjauan Pustaka.....	5
I.8 Hipotesis .....	8
<b>BAB II LANDASAN TEORI.....</b>	<b>10</b>
II.1 Pemantauan Deformasi .....	10
II.2 <i>Robotic Total Station</i> .....	10
II.2.1 Penentuan posisi horizontal dengan metode sudut jurusan atau azimuth dan jarak.....	10
II.2.2 Penentuan posisi vertikal dengan metode trigonometrik.....	11
II.3 Hitungan Kuadrat Terkecil Metode Parameter.....	12
II.4 Persamaan Jarak Horizontal, Vertikal Jarak Miring, dan Sudut.....	14
II.5 Linierisasi Persamaan Pengamatan .....	16
II.5.3 Linearisasi persamaan pengamatan sudut vertikal dengan deret <i>Taylor</i> .....	18
II.6 Bobot Ukuran .....	19
II.7 Iterasi.....	20
II.8 Uji Statistik.....	21
II.8.1 Uji Global .....	21

II.8.2 Data <i>Snooping</i> .....	22
II.9 Besar Nilai Pergeseran .....	23
II.9.1 Uji Signifikasi Nilai Pergeseran .....	23
II.10 Analisis Deformasi .....	24
II.10.1 Uji Kesebangunan Jaring.....	24
II.9.2 Uji Pergeseran Titik .....	25
II.10 Perhitungan Besaran dan Arah Vektor Kecepatan Pergerakan Titik Pantau .....	26
II.11 Curah Hujan .....	27
<b>BAB III PELAKSANAAN .....</b>	<b>28</b>
III.1 Lokasi Penelitian.....	28
III.2 Peralatan dan Bahan Penelitian.....	29
III.3. Pelaksanaan Penelitian.....	30
III.3.1. Persiapan .....	32
III.3.1. Perhitungan Data Curah Hujan .....	33
III.3.2. Hitung Perataan Kuadrat Terkecil Metode Parameter.....	33
III.3.3 Uji Statistik.....	37
III.3.4 Analisis Deformasi .....	38
III.3.5 Uji signifikansi Pergerakan .....	40
III.3.5 Pehitungan Besaran dan Arah Kecepatan Pergerakan Titik Pantau .....	40
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>41</b>
IV.1 Hasil Uji Statistik .....	41
IV.1.1 Hasil Uji Statistik Berdasarkan Data Juli 2023 .....	41
IV.1.1 Hasil Uji Statistik Berdasarkan Data Maret 2024 .....	42
IV.2 Koordinat dan Simpangan Baku Titik Pantau Hasil Hitung Perataan.....	43
IV.2.1 Hasil Koordinat dan Simpangan Baku Titik Pantau Berdasarkan Data Bulan Juli 2023 .....	44
IV.2.2 Hasil Koordinat dan Simpangan Baku Titik Pantau Berdasarkan Data Bulan Maret 2024 .....	51
IV.3 Besar dan Arah Pergerakan Titik Pantau.....	57
IV.3.1 Besar Pergerakan Titik Pantau Berdasarkan Data Juli 2023 .....	57
IV.3.2 Besar Pergerakan Titik Pantau Berdasarkan Data Maret 2024.....	60
IV.3.3 Arah Pergerakan Titik Pantau dalam Satu Bulan.....	64
IV.3 Analisis Deformasi .....	70
IV.2.1 Hasil Uji Kesebangunan Jaring Berdasarkan Data Juli 2023 .....	71
IV.2.2 Hasil Uji Kesebangunan Jaring Berdasarkan Data Maret 2024 .....	71

IV.3.2 Hasil Uji Pergerakan Titik Berdasarkan Data Maret 2024 .....	72
IV. 5 Signifikansi Pergerakan dalam Satu Tahun .....	74
IV. 6 Kecepatan Pergeseran Titik Pantau .....	79
IV.6.1 Kecepatan Pergeseran Titik Pantau Berdasarkan Data Bulan Juli 2023 .....	80
IV.5.2 Kecepatan Pergerakan Titik Pantau Berdasarkan Data Bulan Maret 2024 .....	82
IV. 6. Evaluasi Kestabilan Lereng Bendungan .....	85
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>89</b>
IV.1 Kesimpulan .....	89
IV.2 Saran.....	90
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>91</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>94</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar II.1 Penentuan posisi dengan jarak dan sudut jurusan .....	11
Gambar II.2 Penentuan posisi vertikal dengan metode beda tinggi trigonometrik .....	12
Gambar II.3 Ilustrasi perolehan jarak horizontal dan jarak miring .....	15
Gambar II.4 Ilustrasi perolehan sudut horizontal .....	15
Gambar II.5 Jarak yang terbentuk dari dua titik .....	16
Gambar II.6 Sudut horizontal yang terbentuk dari tiga titik pengamatan .....	17
Gambar III.1 Lokasi Bendungan Margatiga di Lampung Timur .....	28
Gambar III.2 Persebaran titik pantau bendungan .....	29
Gambar III.3 Diagram alir pelaksanaan penelitian .....	31
Gambar III.4 Jaring kontrol titik pantau .....	34
Gambar IV.1 Grafik komponen <i>easting</i> Juli 2023 .....	44
Gambar IV.2 Grafik komponen <i>easting</i> Juli 2023 .....	44
Gambar IV.3 Grafik komponen <i>easting</i> Juli 2023 .....	45
Gambar IV.4 Grafik komponen <i>northing</i> Juli 2023 .....	45
Gambar IV.5 Grafik komponen <i>northing</i> Juli 2023 .....	46
Gambar IV.6 Grafik komponen <i>northing</i> Juli 2023 .....	46
Gambar IV.7 Grafik komponen <i>height</i> Juli 2023 .....	47
Gambar IV.8 Grafik komponen <i>height</i> Juli 2023 .....	47
Gambar IV.9 Grafik komponen <i>height</i> Juli 2023 .....	47
Gambar IV.10 Grafik pengaruh jarak terhadap nilai ketelitian komponen <i>easting</i> .....	49
Gambar IV.11 Grafik pengaruh jarak terhadap nilai simpangan baku komponen <i>northing</i> .....	50
Gambar IV.12 Grafik pengaruh jarak terhadap nilai simpangan baku komponen Z .....	50
Gambar IV.13 Grafik komponen <i>easting</i> Maret 2024 .....	51
Gambar IV.14 Grafik komponen <i>easting</i> Maret 2024 .....	51
Gambar IV.15 Grafik komponen <i>easting</i> Maret 2024 .....	52
Gambar IV.16 Grafik komponen <i>northing</i> Maret 2024 .....	52
Gambar IV.17 Grafik komponen <i>northing</i> Maret 2024 .....	53
Gambar IV.18 Grafik komponen <i>northing</i> Maret 2024 .....	53
Gambar IV.19 Grafik komponen <i>height</i> Maret 2024 .....	54
Gambar IV.20 Grafik komponen <i>height</i> Maret 2024 .....	54
Gambar IV.21 Grafik komponen <i>height</i> Maret 2024 .....	54
Gambar IV.22 Pengaruh jarak terhadap simpangan baku komponen <i>easting</i> .....	55
Gambar IV.23 Pengaruh jarak terhadap simpangan baku komponen <i>Northing</i> .....	56



Gambar IV.24 Pengaruh jarak terhadap simpangan baku komponen <i>height</i> .....	56
Gambar IV.25 Grafik pergeseran titik pantau Juli 2023 .....	58
Gambar IV.26 Grafik pergeseran titik pantau Juli 2023 .....	58
Gambar IV.27 Grafik pergeseran titik pantau Juli 2023 .....	59
Gambar IV.28 Grafik pergeseran titik pantau Juli 2023 .....	59
Gambar IV.29 Grafik pergeseran titik pantau Juli 2023 .....	60
Gambar IV.30 Grafik pergeseran titik pantau Maret 2024 .....	61
Gambar IV.31 Grafik pergeseran titik pantau Maret 2024 .....	61
Gambar IV.32 Grafik pergeseran titik pantau Maret 2024 .....	62
Gambar IV.33 Grafik pergeseran titik pantau Maret 2024 .....	63
Gambar IV.34 Grafik pergeseran titik pantau Maret 2024 .....	63
Gambar IV.35 Vektor pergerakan horizontal dalam satu bulan pada Juli 2023.....	67
Gambar IV.36 Vektor pergerakan horizontal setiap minggu.....	67
Gambar IV.37 Vektor pergerakan horizontal titik pantau bulan Maret 2024 .....	69
Gambar IV.38 Vektor pergerakan horizontal setiap minggu.....	70
Gambar IV.37 Hasil uji pergeseran titik .....	73
Gambar IV.38 Hasil uji pergeseran titik .....	73
Gambar IV.39 Hasil uji pergeseran titik .....	73
Gambar IV.40 Hasil uji signifikansi pergerakan dalam kurun satu tahun .....	75
Gambar IV.41 Hasil uji signifikansi pergerakan dalam kurun satu tahun .....	75
Gambar IV.42 Hasil uji signifikansi pergerakan dalam kurun satu tahun .....	75
Gambar IV.43 Hasil uji signifikansi pergerakan dalam kurun satu tahun .....	76
Gambar IV.44 Hasil uji signifikansi pergerakan dalam kurun satu tahun .....	77
Gambar IV.45 Hasil uji signifikansi pergerakan dalam kurun satu tahun .....	77
Gambar IV.46 Grafik curah hujan bulanan.....	79
Gambar IV.47 Grafik jumlah hari tanpa hujan .....	79
Gambar IV.48 Kecepatan pergerakan titik pantau Juli 2023 .....	80
Gambar IV.49 Kecepatan pergerakan titik pantau Juli 2023 .....	80
Gambar IV.50 Kecepatan pergerakan titik pantau Juli 2023 .....	81
Gambar IV.51 Kecepatan pergerakan titik pantau Juli 2023 .....	81
Gambar IV.52 Kecepatan pergerakan titik pantau Juli 2023 .....	81
Gambar IV.53 Kecepatan pergerakan titik pantau Maret 2024 .....	83
Gambar IV.54 Kecepatan pergerakan titik pantau Maret 2024 .....	83
Gambar IV.55 Kecepatan pergerakan titik pantau Maret 2024 .....	83

Gambar IV.56 Kecepatan pergerakan titik pantau Maret 2024 .....	84
Gambar IV.57 Kecepatan pergerakan titik pantau Maret 2024 .....	84

## DAFTAR TABEL

Tabel IV.1 Hasil uji global berdasarkan data Bulan Juli 2023.....	42
Tabel IV.2 Hasil uji global berdasarkan data Bulan Maret 2024.....	42
Tabel IV.3 Jarak miring titik pantau .....	48
Tabel IV.4 Perbandingan nilai pergerakan titik pantau selama satu bulan dengan akumulasi pergerakan setiap minggu berdasarkan data Bulan Juli 2023.....	65
Tabel IV.5 Perbandingan nilai pergerakan titik pantau selama satu bulan dengan akumulasi pergerakan setiap minggu berdasarkan data Bulan Maret 2024.....	68
Tabel IV.6 Hasil uji kesebangunan jaring berdasarkan data Bulan Juli 2023.....	71
Tabel IV.7 Hasil uji kesebangunan jaring berdasarkan data Bulan Juli 2023.....	72
Tabel IV.7 Klasifikasi pergerakan GeoMos .....	85
Tabel IV.8 Kriteria pergerakan .....	86

## DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A (Data pengamatan bulan Juli 2023 dan Maret 2024) .....	95
LAMPIRAN B (Koordinat Pendekatan) .....	95
LAMPIRAN C (Koordinat dan simpangan baku hasil HKT bulan Juli 2023) .....	95
LAMPIRAN D (Koordinat dan simpangan baku hasil HKT bulan Maret 2024) .....	95
LAMPIRAN E (Hasil perhitungan besar dan arah pergerakan bulan Juli 2023) .....	95
LAMPIRAN F (Hasil perhitungan besar dan arah pergerakan bulan Maret 2024).....	96
LAMPIRAN G (Hasil perhitungan kecepatan pergerakan dan simpangan baku bulan Juli 2023).....	96
LAMPIRAN H (Hasil perhitungan kecepatan pergerakan dan simpangan baku bulan Maret 2024).....	96
LAMPIRAN I ( <i>Script</i> HKT metode parameter).....	96
LAMPIRAN J ( <i>Script</i> uji deformasi) .....	96
LAMPIRAN K ( <i>Script</i> perhitungan kecepatan) .....	96
LAMPIRAN L (Tabel <i>Fisher</i> ) .....	97
LAMPIRAN M (Tabel <i>t student</i> ).....	98
LAMPIRAN N ( <i>Link</i> GEE perhitungan curah hujan) .....	99
LAMPIRAN O (Tabel curah hujan bulanan) .....	99
LAMPIRAN P (Tabel jumlah hari dengan curah hujan dibawah 1 mm) .....	99

## INTISARI

Bendungan Margatiga merupakan bendungan multi fungsi dengan tipe urugan yang terletak di Kabupaten Lampung Timur, Provinsi Lampung. Bendungan berfungsi menahan air sehingga mengalami tekanan akibat pembebanan air dan dari tubuh bendungan itu sendiri. Tekanan tersebut mengakibatkan perubahan bentuk dan dimensi (deformasi), sehingga perlu dilakukan pemantauan deformasi secara berkala untuk menghindari bahaya keruntuhan. Pemantauan deformasi secara berkala membutuhkan teknik pengukuran yang tepat dengan tingkat akurasi tinggi, serta dengan alat dan analisis yang andal. Kemajuan teknologi TS yang dikombinasikan dengan *Automatic Target Recognition* (ATR) menghasilkan *Robotic Total Station* (RTS). Adanya ATR tersebut, RTS dapat secara otomatis menemukan dan melacak target prisma dengan akurasi tinggi. Hasil pengamatan tersebut perlu dianalisis dengan metode yang andal, seperti metode Hitung Kuadrat Terkecil (HKT) yang berfungsi meminimalkan kesalahan data pengukuran dengan solusi terbaik mendekati nilai sebenarnya. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis deformasi bendungan dengan mengamati pergerakan 28 titik pantau di lereng bendungan.

Data penelitian ini yaitu hasil pengamatan menggunakan RTS pada bulan Juli 2023 dan Maret 2024, dengan pemilihan waktu yang diidentifikasi berdasarkan musim saat pengamatan. Hasil pengamatan berupa ukuran sudut horizontal, sudut vertikal, jarak horizontal, dan jarak miring. Metode perhitungan nilai estimasi koordinat dan ketelitian yang diterapkan adalah HKT metode parameter. Analisis deformasi yang dilakukan melalui uji kesebangunan jaring dan uji pergeseran titik dari hasil perhitungan besar dan arah pergerakan pada interval *epoch*. Batas pergerakan maksimum pada penelitian ini sebesar 5 mm ke arah sumbu positif dan negatif. Pergerakan bendungan ini bersifat *non-linier* yang artinya pergerakan dapat mengarah ke sumbu positif maupun negatif tidak mengikuti pola yang tetap sehingga bendungan dapat kembali ke posisi semula. Penelitian ini juga dilakukan uji signifikansi pergerakan bendungan dalam kurun waktu satu tahun dan kecepatan pergerakan untuk mengetahui pengaruh musim terhadap pergerakan bendungan dan mengetahui status kestabilan bendungan.

Besar nilai pergerakan pada bulan Juli 2023 selama satu minggu berkisar antara 0,034 mm s.d. 6,069 mm. Pergeseran dalam satu bulan berkisar antara 0,559 mm s.d. 3,038 mm. Sebagian besar pergerakan kurang dari batas maksimum. Berbeda dengan bulan Maret 2024, terjadi peningkatan pergerakan dalam satu minggu berkisar antara 0,007 mm s.d. 22,058 mm dan dalam satu bulan berada di kisaran 1,281 mm s.d. 14,116 mm. Pergerakan ini menunjukkan sebagian besar melebihi batas maksimum. Pola pergerakan bendungan mengarah ke luar bendungan karena adanya pengaruh pintu air yang digunakan untuk pengontrol air. Bendungan menahan air tersebut sehingga memberikan tekanan ke arah luar bendungan. Dalam kurun waktu antara 2023 dan 2024 terdeteksi adanya pergerakan signifikan pada komponen horizontal dengan tingkat kepercayaan 95%, tetapi tidak dengan komponen vertikalnya. Hal ini disebabkan oleh perbedaan jumlah volume air yang ditahan saat musim kemarau dan musim hujan. Nilai kecepatan pergerakan harian titik pantau kurang dari 5 mm/hari dan pergerakan tahunan sebesar 23 mm/tahun. Berdasarkan standar US Army Corps Engineer (2018) dan tabel kriteria pada penelitian Prasetya & Hendarto (2023), pergerakan masih berada dalam batas aman sehingga, kondisi Bendungan Margatiga dinyatakan stabil dan aman.

Kata Kunci : deformasi, bendungan, *robotic total station*, hitung kuadrat terkecil metode parameter, stabilitas lereng.



## **ABSTRACT**

*Margatiga Dam is a multifunctional dam with a type of rock-fill dam. It is located in East Lampung Regency, Lampung Province. The dam functions to hold water and thus experiences pressure due to the water load and the dam's weight. This pressure causes changes in shape and dimensions (deformation), so periodic deformation monitoring is necessary to prevent the risk of collapse. Periodic deformation monitoring requires precise measurement techniques with high accuracy and reliable instruments and analysis methods. The advancement of Total Station (TS) technology combined with Automatic Target Recognition (ATR) has resulted in Robotic Total Station (RTS). With ATR, RTS can accurately locate and track prism targets. The observation results must be analyzed using reliable methods, such as the least squares method, which minimizes measurement errors and provides the best solution close to the actual values. Therefore, this research aims to analyze dam deformation by observing the movement of 28 monitoring points on the dam slope.*

*The research data are the observation results using RTS in July 2023 and March 2024, with observation periods selected based on the seasons. The observation data include horizontal and vertical angles and horizontal and slope distances. The parameterized Least Squares Method is the calculation method for coordinate estimation and accuracy. Deformation analysis was performed through network congruence tests and point displacement tests based on the magnitude and direction of displacement in epoch intervals. The maximum displacement threshold in this study is 5 mm in both positive and negative directions. The dam's displacement is non-linear, meaning it can occur in both positive and negative directions without following a fixed pattern, allowing it to return to its original position. This study also conducted significance tests on dam movement over one year and movement velocity tests to determine the influence of seasons on dam movement and to assess the dam's stability.*

*The magnitude of displacement in July 2023 over one week ranged from 0.034 mm to 6.069 mm. Displacement over one month ranged from 0.559 mm to 3.038 mm, with most movements below the maximum threshold. In contrast, in March 2024, the movement over one week ranged from 0.007 mm to 22.058 mm, and over one month, it ranged from 1.281 mm to 14.116 mm. This movement indicates that most values exceeded the maximum threshold. The dam's movement pattern is directed outward due to the influence of sluice gates used to control water flow. The dam retains water, which exerts pressure outward, away from the dam's core structure. Between 2023 and 2024, significant horizontal movement was detected with 95% confidence, but no significant vertical movement was observed. It is due to differences in the volume of water retained during the dry and rainy seasons. The daily displacement velocity of monitoring points is less than 5 mm/day, and the annual displacement is 23 mm/year. According to the US Army Corps of Engineers (2018) standards and the criteria table in Prasetya & Hendarto's (2023) study, the movement remains within safe limits, and Margatiga Dam is declared stable and safe.*

**Keywords:** *deformation, dam, robotic total station, least squares adjustment parameter method, slope stability.*

## BAB 1

### PENDAHULUAN

#### I.1 Latar Belakang

Bendungan merupakan salah satu sarana multifungsi yang berperan penting bagi keberlangsungan hidup manusia. Terdapat beberapa manfaat penting antara lain peningkatan volume tampungan air, pengendalian banjir, penyedia irigasi, tempat wisata, PLTA, budidaya perikanan, konservasi hewan dan tumbuhan serta arena olahraga air (Yusuf dkk., 2015). Salah satu proyek strategis nasional yaitu proyek Bendungan Margatiga di Provinsi Lampung. Bendungan ini memiliki konstruksi tipe urugan yang didesain dengan kapasitas tampung sebesar 42,31 juta m<sup>3</sup> dengan tinggi mencapai 22,5 m, panjang puncak 321,76 m, dan lebar puncak 7 m. Konstruksi Bendungan Margatiga telah dilakukan sejak tahun 2017 dan direncanakan selesai pada tahun 2024. Bendungan ini nantinya memberikan manfaat bagi masyarakat di Kabupaten Lampung Timur di antaranya sebagai sarana pengairan Daerah Irigasi (DI) di Provinsi Lampung seluas 16.588 Ha, sebagai penyedia air baku sebesar 0,8 m<sup>3</sup>/detik di Lampung Timur dan dapat mereduksi banjir sebesar 83,10 m<sup>3</sup>/detik di sebagian wilayah Bandar Lampung dan Lampung Timur (PUPR, 2023). Kondisi Bendungan Margatiga saat ini telah selesai tahap konstruksi tetapi belum beroperasi. Terdapat kendala mengenai pengadaan tanah di daerah genangan sehingga *impounding* belum dilaksanakan (SIGI-PU, 2024).

Konstruksi bendungan tipe urugan mendominasi sekitar 85% bendungan yang ada di dunia (Sumant dan Govindaraju, 2020), menandakan konstruksi ini andal diterapkan di berbagai macam kondisi geologi maupun topografi suatu wilayah (Li dan Chen, 2015). Meskipun demikian, suatu bangunan apabila memperoleh tekanan dari luar maupun dari beban itu sendiri maka mengalami perubahan bentuk dan dimensi (deformasi). Bendungan berfungsi menahan laju aliran air sehingga bendungan mengalami tekanan akibat pembebanan air dan tekanan dari tubuh bendungan itu sendiri. Tekanan pembebanan air tersebut dipengaruhi oleh jumlah volume air yang ditahan. Volume air yang ditahan bergantung pada kondisi bendungan. Saat musim hujan, curah hujan cenderung lebih tinggi, sehingga volume air yang ditahan lebih banyak dan tekanan pembebanan air juga lebih besar. Sedangkan saat musim kemarau, curah hujan cenderung rendah, volume air lebih sedikit sehingga tekanan pembebanan air juga lebih kecil.

*United States Bureau of Reclamation* (USBR) (2011) menyatakan dampak utama adanya deformasi yaitu hilangnya *freeboard*, kerusakan struktur bangunan pelengkap yang terletak di atas bendungan, hilangnya kepercayaan pada bendungan karena *swayback* (penampakan lendutan), retakan pada bendungan urugan, terbentuknya suatu zona yang mengarah pada *hidrolik fracturing*, dan kegagalan instrumentasi. Peraturan Pemerintah Nomor 37 Tahun 2019 tentang bendungan menjelaskan bahwa salah satu bentuk pemeliharaan dan perawatan bendungan adalah pemantauan deformasi. Pemantauan deformasi bendungan dilakukan dengan mengamati pergerakan posisi titik-titik pantau secara vertikal maupun horizontal. Pemantauan ini dilakukan secara *real-time* dalam kurun waktu tertentu.

Pergerakan bendungan secara vertikal biasa disebut dengan *settlement* dan pergerakan bendungan secara horizontal biasa disebut dengan *displacement* (U.S. Department of the interior Bureau of Reclamation, 2012). Apabila terjadi perubahan posisi yang signifikan dari waktu ke waktu, titik-titik tersebut dapat dinyatakan telah bergeser. Berdasarkan perubahan tersebut, dapat ditentukan apakah bendungan juga mengalami deformasi. Pendeteksian adanya deformasi dilakukan dengan pengamatan perubahan posisi yang sangat teliti. Hasil analisis deformasi sangat bergantung pada ketelitian pengamatan. Pada implementasinya, pemantauan deformasi harus dilakukan berdasarkan teknik pengukuran yang tepat dengan tingkat akurasi tinggi dan dengan alat serta analisis yang andal (Juraev dkk., 2020).

Metode pemantauan terestris dengan *Total Station* (TS) dan ekstraterestris dengan *Global Positioning System* (GPS) telah banyak digunakan dalam pemantauan deformasi karena tingkat akurasi yang tinggi dan ekonomis. TS telah menjadi pilihan populer dalam pemantauan deformasi khususnya pemantauan struktural seperti bendungan. Pengukuran sudut dan jarak memerlukan keterampilan tinggi dari operator. Namun demikian, kemajuan teknologi TS yang mengarah pada penggunaan *precise servomotors*, *MagDrive technology*, *piezo technology* yang dikombinasikan dengan *Automatic Target Recognition* (ATR) telah menciptakan generasi baru yaitu *Robotic Total Station* (RTS). RTS memiliki keunggulan dari segi perekaman data ukuran secara langsung, cepat, dan memiliki akurasi yang tinggi. RTS mendukung metode survei berulang terhadap titik-titik pantau dengan interval waktu tertentu secara otomatis (Wijaya dkk. 2022).

Pemantauan deformasi tubuh Bendungan Margatiga ini dilakukan setiap hari secara terus menerus selama 24 jam dengan RTS Leica TM60 dan GPS. Data hasil pengukuran di

lapangan terintegrasi dengan *software Geodetic Monitoring System* (GeoMoS) milik PT Leica Geosystem. Hasil keluaran pemantauan yaitu *point id*, waktu pengukuran, jarak dari RTS ke prisma (*distance*), koordinat *easting*, *northing*, dan *height*, *longitudinal displacement*, *transverse displacement*, *height displacement*, *vector of horizontal*, *vector of height displacement* (Prasetya dan Hendarto, 2023).

Perhitungan besar pergerakan pada *software GeoMos* menggunakan metode regresi kompleks. Besar pergerakan dihitung dengan menyelisihkan nilai estimasi parameter pada interval *epoch* yang berbeda. Perhitungan nilai estimasi parameter dengan kesalahan acak yang minimal dapat dihasilkan dengan penyelesaian HKT. Metode ini memastikan bahwa jumlah kuadrat residual (selisih antara nilai yang diprediksi dan nilai aktual) berada pada nilai minimum. Metode HKT yang umum digunakan dalam perhitungan estimasi parameter adalah metode parameter. Parameter pada perhitungan ini dicari nilainya dihitung secara langsung. Penyelesaian tersebut didasarkan atas model fungsional yang menyatakan hubungan antara besaran pengamatan dan besaran parameter (Hadiman, 2006). Model ini dibentuk dari pengamatan yang merupakan fungsi dari variabel parameter. Dengan demikian, HKT metode parameter efektif dalam analisis data untuk mencapai akurasi yang tinggi dalam estimasi parameter.

Analisis deformasi pada *software GeoMos* belum meliputi uji kesebangunan jaring dan uji pergeseran titik sehingga pergerakannya hanya dapat diidentifikasi berdasarkan perubahan posisi setiap titiknya saja. Pemantauan struktural seperti bendungan memerlukan analisis pergerakan secara menyeluruh dengan mempertimbangkan kondisi bendungan saat musim kemarau dan musim hujan. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis deformasi Bendungan Margatiga melalui uji kesebangunan jaring dan uji pergeseran titik. Analisis dilakukan berdasarkan nilai pergerakan selama satu bulan dari data pengamatan RTS pada bulan Juli 2023 dan Maret 2024 menggunakan perhitungan HKT metode parameter. Pemilihan data pengamatan didasarkan pada identifikasi musim kemarau (Juli) dan musim hujan (Maret) yang ditentukan dari data curah hujan. Penelitian ini juga menguji signifikansi pergerakan bendungan dalam kurun waktu satu tahun untuk mengetahui pengaruh perbedaan musim terhadap signifikansi pergerakan bendungan serta mengetahui status kestabilan tubuh bendungan.

## **I.2 Rumusan Masalah**

Kondisi Bendungan Margatiga saat ini telah selesai tahap konstruksi tetapi belum beroperasi. Pemantauan deformasi sudah dilakukan sejak proses konstruksi dimulai untuk menghindari terjadinya kegagalan bendungan. Namun demikian, pemantauan deformasi dengan RTS Leica TM60 pada *software* GeoMos belum dilakukan perhitungan uji kesebangunan jaring dan uji pergeseran titik untuk keperluan analisis deformasi. Perhitungan besar nilai pergerakannya masih dilakukan pada setiap titiknya, belum terdapat akumulasi selama satu bulan. Penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan besar nilai dan arah pergerakan tubuh Bendungan Margatiga selama satu bulan menggunakan perhitungan HKT metode parameter, signifikansi pergerakan tubuh bendungan dalam kurun satu tahun, dan status kestabilan tubuh bendungan berdasarkan kecepatan pergerakannya.

## **I.3 Tujuan Penelitian**

Tujuan utama penelitian ini adalah untuk melakukan analisis deformasi terhadap tubuh bendungan menggunakan data pengamatan *Robotic Total Station* (RTS). Tujuan khusus dari penelitian ini diuraikan sebagai berikut:

1. Menghitung besar nilai dan arah pergerakan yang terjadi pada titik pantau di tubuh Bendungan Margatiga selama satu bulan berdasarkan data pengamatan Bulan Juli tahun 2023 dan Bulan Maret 2024.
2. Menguji signifikansi pergerakan bendungan dari tahun 2023 s.d. 2024 untuk mengetahui pengaruh musim terhadap signifikansi pergerakan bendungan.
3. Mengevaluasi kondisi kestabilan tubuh Bendungan Margatiga berdasarkan kecepatan pergerakan.

## **I.4 Pertanyaan Penelitian**

Berdasarkan identifikasi masalah yang telah diuraikan, maka dapat dirumuskan pertanyaan penelitian ini sebagai berikut:

1. Berapa besar nilai dan arah pergerakan yang terjadi pada titik pantau tubuh bendungan Margatiga dalam satu bulan?
2. Apakah musim berpengaruh terhadap signifikansi pergerakan bendungan dalam kurun waktu 2023 s.d 2024?
3. Bagaimana kondisi kestabilan tubuh Bendungan Margatiga?



## **I.5 Manfaat Penelitian**

Analisis deformasi Bendungan Margatiga ini dilakukan untuk mengetahui besar nilai dan arah pergerakan di tubuh Bendungan Margatiga selama satu bulan, mengetahui pengaruh perbedaan musim terhadap signifikansi pergerakan bendungan dalam kurun satu tahun, dan mengevaluasi kondisi kestabilan lereng bendungan berdasarkan kecepatan pergerakannya. Analisis ini dapat digunakan untuk menghindari terjadinya kegagalan bendungan. Selain itu, dapat dimanfaatkan sebagai referensi dalam upaya menambah ketelitian dan keakuratan oleh pihak PT Leica Geosystem. Seperti yang diketahui merupakan pihak yang bertanggung jawab dalam pemantauan Bendungan Margatiga.

## **I.6 Ruang lingkup**

Ruang lingkup penelitian ini, meliputi:

1. Data penelitian yang dianalisis merupakan data sekunder pengamatan pada 28 titik pantau pada tubuh Bendungan Margatiga yang dilakukan oleh PT Leica Geosystem Indonesia.
2. Akuisisi data penelitian dilakukan menggunakan metode terestris berupa pengukuran posisi koordinat horizontal dan vertikal, jarak horizontal, dan jarak miring pada tanggal 1 Juli s.d. 4 Agustus 2023 dan tanggal 1 Maret s.d. 4 April 2024 menggunakan alat RTS.
3. Pengolahan data dilakukan dengan perhitungan koordinat menggunakan hitung perataan kuadrat terkecil metode parameter.
4. Analisis ini tidak melibatkan pendekatan dari aspek lain seperti aspek geoteknik atau aspek bidang ilmu lain melainkan hanya berdasarkan pendekatan aspek geodesi saja.
5. Analisis deformasi yang dilakukan meliputi uji kesebangunan jaring dan uji pergerakan titik.
6. Arah pergerakan bendungan horizontal dua dimensi dan pergerakan vertikal dilihat dari nilai positif atau negatifnya.

## **I.7 Tinjauan Pustaka**

Bendungan urugan merupakan konstruksi yang mendominasi sekitar 85% bendungan yang telah dibuat di seluruh dunia (Sumanth dan Govindaraju, 2020). Hal ini menandakan

bahwa kontruksi yang digunakan merupakan konstruksi yang andal diterapkan dalam berbagai macam kondisi geologi maupun topografi suatu wilayah (Li dan Chen, 2015). Bendungan urugan merupakan bendungan yang terbentuk dari bahan urugan dari *borrow area* yang dipadatkan dengan *vibrator roller* atau alat pemadat yang lain pada setiap hamparan dengan ketebalan tertentu (SNI 8062, 2015). Bendungan ini memiliki kelemahan dalam menahan limpasan air di atas mercu yang dapat berpotensi terjadinya longsor pada bagian hilir dan kegagalan bendungan.

Peraturan Pemerintah Nomor 37 Tahun 2010 tentang bendungan menjelaskan bahwa terjadinya kegagalan bendungan ini dapat dilakukan pencegahan. Salah satunya dengan melakukan pemantauan deformasi pada tubuh bendungan. Deformasi pada bendungan ini umumnya terjadi karena adanya perubahan volume, pergerakan arah lateral atau geser yang terjadi pada tubuh dan fondasi dari bendungan. Hal tersebut dapat mengakibatkan kehilangan tinggi jagaan, kerusakan pada struktur pelengkap yang berada di atas bendungan, retak pada bendungan, menimbulkan rekahan yang dapat menyebabkan *piping*, dan kerusakan alat instrumentasi (Respati, 2022). Szostak-Chrzanowski dan Massiera (2004) menjelaskan bahwa sejak proses konstruksi dimulai, bendungan sudah mengalami deformasi dan kemudian berlanjut hingga operasional bendungan setelah konstruksi. Oleh karena itu, pemantauan tubuh bendungan ini sangat penting dilakukan untuk menjamin keselamatan, keamanan, dan meminimalisir kerugian yang diakibatkan adanya kegagalan bendungan. Hasil analisis deformasi sangat bergantung pada ketelitian pengamatan. Pada implementasinya, pemantauan deformasi harus dilakukan berdasarkan teknik pengukuran yang tepat dengan tingkat akurasi tinggi, dan menggunakan alat serta analisis yang andal (Juraev dkk., 2020).

Metode pengamatan posisi yang diterapkan dalam pemantauan deformasi adalah metode terestris dan ekstraterestris. Pada pemantauan deformasi bendungan, kedua metode ini sama-sama telah banyak digunakan. Secara konvensional, pemantauan deformasi struktur dilakukan menggunakan alat seperti *Total Station* (TS), *Waterpass* (WP), serta *Global Navigation Sattelite System* (GNSS) tipe geodetik (Holst & Kuhlmann, 2016). Pada tahun 2014 dan 2015, Apriyanti melakukan pemantauan deformasi terhadap Bendungan Sermo, Kulon Progo, D.I. Yogyakarta dengan TS metode terestris. Febrina (2016) juga melakukan pengamatan di lokasi yang sama menggunakan metode ekstraterestris yaitu menggunakan teknologi GNSS pada dua *epoch* yaitu tahun 2015 dan 2016.

Seiring dengan perkembangan teknologi, kedua metode ini dapat dikombinasikan untuk memperoleh hasil yang lebih baik. Pada tahun 2023, Prasetya dan Hendarto melakukan pemantuan deformasi secara *real-time* terhadap lereng Terowongan Cisumdawu, Jawa Barat. Penelitian tersebut mengkombinasikan metode terestris dan ekstraterestris, yaitu menggunakan RTS untuk akusisi data pada titik pantau dan GNSS untuk penentuan titik kontrol koordinat. Metode pengamatan jaring memiliki ketelitian hasil koordinat dan analisis pergerakan yang lebih baik daripada metode radial. Hal ini berdasarkan pada penelitian Nathania tahun 2013 yang diketahui bahwa nilai standar deviasi pada metode radial lebih tinggi daripada standar deviasi metode jaring.

Metode analisis deformasi yang telah banyak digunakan salah satunya adalah pendekatan geometrik. Metode ini dikenal dengan nama metode klasik, terdapat tiga tahapan, yaitu hitung perataan koordinat antar kala, uji global kesebangunan jaring dan uji signifikansi pergerakan (Erol, dkk., 2005). Pada tahun 2018, Laudza'i melakukan penelitian di Bendungan Gajah Mungkur, Kabupaten Wonogiri, Provinsi Jawa Tengah dengan pendekatan geometrik. Penelitian ini menggunakan data hasil pengukuran TS pada 32 titik pantau di dua *epoch* yaitu bulan Maret dan Mei tahun 2017. Perhitungan koordinatnya menggunakan Hitung Kuadrat Terkecil (HKT) dengan metode parameter. Berdasarkan hasil koordinat tersebut dilakukan uji kesebangunan, uji pergerakan titik, dan uji signifikansi beda parameter. Setiap uji dilakukan dengan tingkat kepercayaan 95%.

Hasil perhitungan koordinat menggunakan HKT metode parameter tidak jauh berbeda dengan hasil hitungan *software* GeoMos milik PT Leica Geosystem. *Software* ini terintegrasi secara langsung dengan alat *Robotic Total Station*. Pada tahun 2013, Putra melakukan perbandingan hitungan nilai pergerakan lereng tambang menggunakan hitungan kuadrat terkecil metode parameter dengan hasil hitungan *software* GeoMos pada 13 titik pantau di lereng *north highwall* tutupan PT. Adaro Indonesia. Penelitian tersebut menyebutkan hasil perbandingan nilainya tidak berbeda secara signifikan dengan tingkat kepercayaan 95%.

Pengolahan data menjadi koordinat dan simpangan naku dengan metode HKT metode parameter oleh Ayuningtyas (2020) menunjukkan hasil besar pergeseran titik pantau selama seminggu berkisar antara 0,001 s.d. 2,268 m. Sementara itu, besar pergeseran titik pantau akumulasi dalam satu bulan berkisar antara 0,095 s.d. 3,579 m. Nilai kecepatan pergeseran pada lima titik pantau mencapai lebih dari 10 mm/hari, sehingga berdasarkan klasifikasi pergerakan yang digunakan, kondisi kestabilan titik pantau masuk dalam kategori

“evaluasi”. Prasetya dan Hendarto juga melakukan pemantauan pergerakan permukaan lereng dengan RTS di Terowongan Cisumdawu, Jawa Barat pada tahun 2023. Hasil penelitian menunjukkan pergeseran longitudinal, transversal, dan tinggi selama pemantauan selama 40 hari di lereng *outlet* Terowongan Cisumdawu mengalami pergerakan lereng regresif. Kelompok titik target 06, 07, dan 08 yang terletak di kaki lereng antara terowongan kembar mengalami deformasi  $< 15$  mm dan mencapai kestabilan dalam 1 hari. Dengan demikian, selama periode pemantauan menggunakan RTS, lereng *outlet* Terowongan Cisumdawu dalam kondisi aman.

US Army Corps of Engineer (2018) menerbitkan panduan untuk survei deformasi struktur, dengan contoh objek berupa bendungan. Survei deformasi dapat dilakukan pada interval waktu yang panjang untuk mengukur deformasi dalam jangka panjang dan juga pada interval waktu yang pendek untuk memantau pergerakan secara berkelanjutan. Survei deformasi dengan interval waktu yang pendek memerlukan alat dengan akurasi minimal 5 mm. Nilai akurasi minimal tersebut dapat digunakan sebagai ambang batas pergeseran maksimum. Sementara itu, nilai acuan untuk penurunan vertikal yaitu 50 s.d.140 mm/tahun dan untuk pergerakan horizontal yaitu 90 s.d. 100mm/tahun.

Berdasarkan pustaka-pustaka yang telah diuraikan, penelitian ini dilakukan di Bendungan Margatiga, Lampung Timur. Analisis deformasi dilakukan berdasarkan data pengamatan dengan RTS pada bulan Juli 2023 dan bulan Maret 2024. Perbedaan penelitian ini dengan sebelumnya terletak pada kondisi bendungan, desain konstruksi bendungan, spesifikasi alat RTS. Penelitian ini menganalisis deformasi pada tubuh bendungan Margatiga, Lampung Timur. Analisis deformasi yang dilakukan yaitu uji kesebangunan jaring dan uji pergerakan titik. Penelitian ini juga melakukan analisis signifikansi pergerakan dalam kurun waktu satu tahun, dan mengevaluasi kestabilan lereng bendungan berdasarkan hasil perhitungan kecepatan pergeseran.

## **I.8 Hipotesis**

Penelitian ini merupakan analisis deformasi pertama yang dilakukan di Bendungan Margatiga. Kondisi bendungan belum operasional, maka digunakan standar acuan untuk mengetahui nilai batas signifikansi pergerakan pada struktur bendungan urugan. Hal ini bertujuan untuk mengetahui status kestabilan tubuh bendungan dalam upaya menghindari adanya kegagalan bendungan. US Army Corps Engineer (2018) membuat syarat akurasi

survei sebesar  $\pm 5$  mm untuk melakukan pengukuran penurunan pada struktur tanggul. Jika nilai pergerakan melebihi batas akurasi yang telah ditentukan, maka pergerakan tersebut dianggap signifikan secara statistik. Hipotesis yang dapat dinyatakan pada penelitian ini yaitu:

1. Nilai pergerakan pada titik pantau dalam satu bulan lebih kecil dari 5 mm ke arah sumbu positif dan negatif.
2. Pergerakan titik pantau signifikan dalam kurun waktu satu tahun dan musim berpengaruh terhadap signifikansi pergerakan.
3. Kondisi lereng bendungan berada dalam keadaan stabil atau aman.



## BAB II

### LANDASAN TEORI

#### II.1 Pemantauan Deformasi

Deformasi merupakan fenomena di mana objek-objek alam atau buatan manusia mengalami perubahan bentuk dari kondisi awalnya. Perubahan ini biasanya terjadi melibatkan pergeseran posisi, seperti naik, turun, dan bergeser (Hanifa, 2007). Deformasi dapat diartikan sebagai pergerakan suatu titik atau perubahan kedudukan pada suatu obyek secara absolut maupun relatif. Pada umumnya, pergerakan suatu titik dan perubahan kedudukan ini mengacu pada sistem kerangka referensi (absolut atau relatif). Pemantauan deformasi ini digunakan untuk pemantauan pergerakan lempeng tektonik dan penentuan datum global, pembangunan infrastruktur, dan lain-lain (Hekimoglu dkk., 2002). Pemantauan deformasi ini dilakukan dengan mengamati objek atau area tertentu pada waktu tertentu secara terus menerus. Umumnya, titik pantau sudah terpasang secara permanen kemudian dilakukan pengamatan terhadap titik pantau tersebut pada dua kala atau lebih.

#### II.2 Robotic Total Station

*Robotic Total Station* merupakan *Total Station* yang dilengkapi dengan penggerak, sensor *Charge Couple Device* (CCD) dan *Automatic Target Recognition* (ATR) (Meng dkk., 2014). Dengan adanya ATR tersebut, RTS dapat secara otomatis menemukan dan melacak target prisma. ATR dengan sensor CCD untuk menangkap kembalinya laser pada prisma dengan lokasi yang sama (Brown dkk., 2007). RTS dapat menangkap data pergerakan pada koordinat tiga dimensi (X, Y, Z). RTS digunakan dalam pemantauan deformasi karena dapat melakukan pengukuran ulang secara otomatis. Selain itu, tingkat akurasi dan presisinya juga lebih tinggi dari *Total Station* sehingga dapat meningkatkan kapabilitas dalam pemantauan deformasi. RTS memiliki sensor yang banyak (*multi-sensor*) yang saling terintegrasi sehingga diperoleh koordinat titik dengan kombinasi sudut horizontal, sudut vertikal, dan jarak (Lienhart, 2017).

##### II.2.1 Penentuan posisi horizontal dengan metode sudut jurusan atau azimuth dan jarak

*Total Station* menggunakan metode pengukuran jarak yang disebut dengan *Electronic Distance Measurement* (EDM). Prinsip yang digunakan pada metode ini yaitu

perambatan gelombang sehingga menghasilkan pengukuran dengan ketelitian yang tinggi dan jauh (Basuki, 2011). Metode pengukuran dengan azimuth dan jarak adalah metode untuk menentukan posisi suatu titik (titik pantau) mengacu pada hasil pengukuran jarak dan azimuth dari titik referensi yang koordinatnya telah diketahui. Posisi titik pantau dapat ditentukan melalui persamaan (II.1) dan (II.2) (Basuki, 2011).

$$X_B = X_A + d_{AB} \sin \alpha_{AB} \dots \dots \dots (II.1)$$

$$Y_B = Y_A + d_{AB} \cos \alpha_{AB} \dots \dots \dots (II.2)$$

Keterangan:

$X_B$  : absis titik pantau

$Y_B$  : ordinat titik pantau

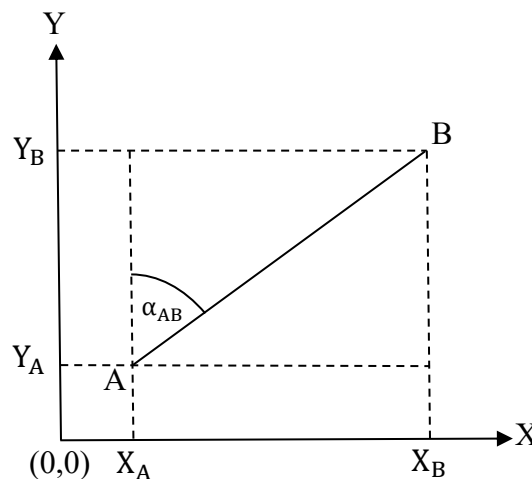
$X_A$  : absis titik referensi

$Y_A$  : ordinat titik referensi

$d_{AB}$  : jarak dari titik referensi ke titik pantau

$\alpha_{AB}$  : azimuth dari titik referensi ke titik pantau

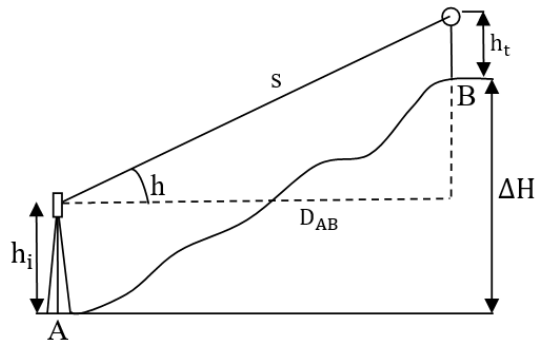
Penentuan posisi dengan jarak dan azimuth diilustrasikan pada Gambar II.1



Gambar II.1 Penentuan posisi dengan jarak dan sudut jurusan (modifikasi dari Basuki, 2011)

## II.2.2 Penentuan posisi vertikal dengan metode trigonometrik

Pengukuran beda tinggi dengan metode trigonometrik adalah pengukuran beda tinggi suatu titik pantau melalui pengukuran sudut miring atau sudut vertikal dari jarak yang telah diketahui (Basuki, 2011). Gambar II.2 menunjukkan ilustrasi metode trigonometrik.



Gambar II.2 Penentuan posisi vertikal dengan metode beda tinggi trigonometrik  
(modifikasi dari Basuki, 2011)

Keterangan Gambar II.2.:

- A : titik referensi/alat
- B : titik pantau/target
- $h_i$  : tinggi alat
- $h_t$  : tinggi target
- $h$  : sudut inklinasi (heling)
- $s$  : jarak miring titik A dan B
- $d_{AB}$  : jarak datar titik A dan B
- $\Delta H$  : beda tinggi titik A dan B

Posisi vertikal dapat diketahui dengan menjumlahkan hasil perhitungan beda tinggi dengan besaran tinggi titik referensi yang ditunjukkan pada persamaan II.3.

$$\Delta H = h_i + d_{AB} \tan(h) - h_t \dots \dots \dots (II.3)$$

### II.3 Hitungan Kuadrat Terkecil Metode Parameter

Salah satu metode yang umum digunakan dalam estimasi parameter adalah HKT metode parameter. Metode ini menghitung parameter yang ditentukan nilainya secara langsung. Model fungsional yang menyatakan hubungan antara besaran pengamatan dan besaran parameter ini menjadi dasar penyelesaiannya. Pada metode ini, hal penting yang perlu diperhatikan yaitu jumlah persamaan sama dengan jumlah pengukuran (Widjajanti, 2001).

Persamaan (II.4) dan (II.5) model fungsional pada metode parameter (Mikhail, 1981)

$$La = F(Xa) \dots \dots \dots (II.4)$$

La merupakan besaran estimasi terbaik pengamatan.

$$F(Xa) = F(Xo + X) \dots \dots \dots (II.5)$$

Nilai estimasi pengamatan ditunjukkan pada persamaan (II.6) dan (II.7).

$$La = Lb + V \dots \dots \dots (II.6)$$

$$Lb + V = F(Xo + X) \dots \dots \dots (II.7)$$

Nilai pengamatan Lb diasumsikan hanya mengandung kesalahan acak, maka nilai pengamatan harus dikoreksikan dengan nilai kesalahan acak V (residu).

Model matematik persamaan (II.9) dilakukan linierisasi dengan deret *Taylor* untuk mendapatkan persamaan pengamatan yang linier. Nilai estimasi residu dapat ditentukan dengan persamaan (II.8).

$$V = AX + L \dots \dots \dots (II.8)$$

Keterangan:

V : vektor residu pengamatan ( $V_1, V_2, \dots, V_n$ )

A : matriks turunan pertama ukuran terhadap parameter

X : matriks parameter dengan dimensi ( $n \times 1$ )

L : matriks persamaan ukuran ( $n \times 1$ )

Persamaan (II.8) dikembangkan menjadi persamaan (II.9).

$$V^T P V = X^T A^T P A X + 2X^T A^T P L + L^T P L \dots \dots \dots (II.9)$$

Sesuai dengan prinsip kuadrat terkecil yaitu  $\Sigma V^T P V = \text{minimum}$ , maka persamaan (II.9) menjadi seperti persamaan (II.10).

$$\frac{\partial V^T P V}{\partial X} = 0 \dots \dots \dots (II.10)$$

Dengan demikian menjadi persamaan (II.11).

$$\frac{\partial V}{\partial X} = \frac{\partial (AX - L)}{\partial X} = A \dots \dots \dots (II.11)$$

Persamaan (II.12) untuk menentukan nilai koreksi estimasi parameter.

$$X = -(A^T P A)^{-1} A^T P L \dots \dots \dots (II.12)$$

Nilai estimasi parameternya seperti pada persamaan (II.13).

$$Xa = Xo + X \dots \dots \dots (II.13)$$

Keterangan:

P :  $\hat{\sigma}_0^2 \cdot \Sigma_{lb}^{-1}$

P : matriks bobot pengamatan, dimensi matriks ( $n \times n$ )

$\hat{\sigma}_0^2$  : varian apriori

$\Sigma_{lb}^{-1}$  : matriks varian kovarian pengukuran

Perhitungan varian aposteori menggunakan persamaan (II.14)

$$\sigma_0^2 = \frac{v^T P v}{n-u} \dots \dots \dots (II.14)$$

Keterangan:

$\sigma_0^2$  : varian aposteori

V : vektor residu pengamatan ( $V_1, V_2, \dots, V_n$ ) dimensi matriks ( $n \times 1$ )

P : matriks bobot pengamatan, dimensi matriks ( $n \times n$ )

n : jumlah pengamatan

u : jumlah parameter

Dengan varian kovarian residu dapat diperoleh ketelitian estimasi residu seperti pada persamaan (II.15).

$$\Sigma_{vv} = \sigma_0^2 (P^{-1} - A(A^T P A)^{-1} A^T) \dots \dots \dots (II.15)$$

Varian kovarian parameter dapat diperoleh ketelitian estimasi parameter seperti pada persamaan (II.16).

$$\Sigma_{xx} = \sigma_0^2 (A^T P A)^{-1} \dots \dots \dots (II.16)$$

Keterangan:

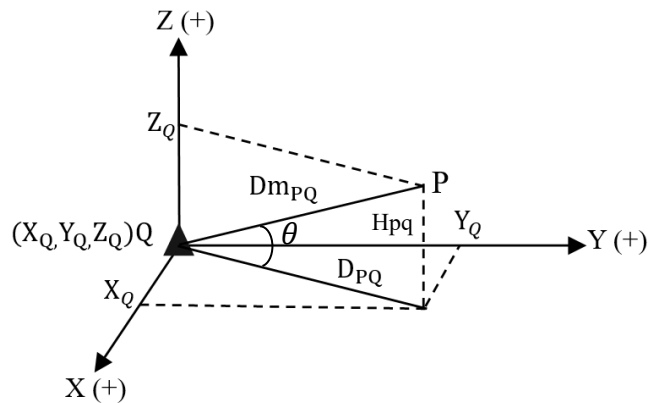
$\Sigma_{vv}$  : matriks varian kovarian residu

$\Sigma_{xx}$  : matriks varian kovarian parameter

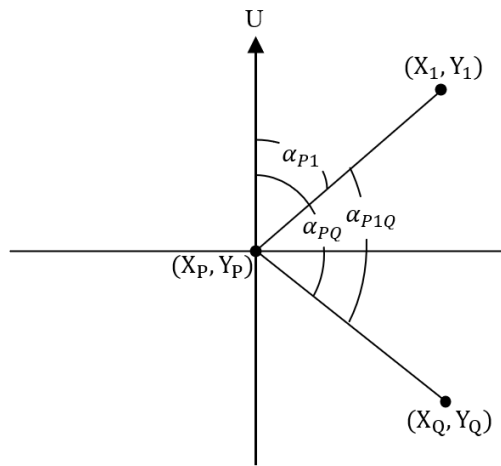
$\sigma_0^2$  : varian aposteori

## II.4 Persamaan Jarak Horizontal, Vertikal Jarak Miring, dan Sudut

Pengukuran jarak horizontal, jarak miring, dan sudut dapat menghasilkan koordinat dalam bentuk tiga dimensi (X, Y, dan Z) seperti pada Gambar II.3 dan II.4. (Widjajanti, 2017)



Gambar II.3 Ilustrasi perolehan jarak horizontal dan jarak miring



Gambar II.4 Ilustrasi perolehan sudut horizontal

Hubungan fungsionalnya dapat ditunjukkan pada persamaan (II.17) s.d. (II.20).

$$D_{PQ} = \sqrt{(X_Q - X_P)^2 + (Y_Q - Y_P)^2} \dots\dots\dots (II.17)$$

$$Dm_{PQ} = \sqrt{(X_Q - X_P)^2 + (Y_Q - Y_P)^2 + (Z_Q - Z_P)^2} \dots\dots\dots (II.18)$$

$$\beta_{P1Q} = \alpha_{PQ} - \alpha_{P1}$$

$$\beta_{P1Q} = \left( \text{atan} \frac{(X_Q - X_P)}{(Y_Q - Y_P)} \right) - \left( \text{atan} \frac{(X_1 - X_Q)}{(Y_1 - Y_Q)} \right) \dots\dots\dots (II.19)$$

$$\theta_{PQ} = \frac{\text{asin}(Z_Q - Z_P)}{\sqrt{(X_Q - X_P)^2 + (Y_Q - Y_P)^2 + (Z_Q - Z_P)^2}} \dots\dots\dots (II.20)$$

Keterangan:

X : absis

Y : ordinat

$Z$  : tinggi

$D_{PQ}$  : jarak datar dari titik P ke titik Q

$Dm_{PQ}$  : jarak miring antara titik P dan Q

$\beta_{PQ1}$  : sudut horizontal yang dibentuk antara titik 1, P, dan Q

$\theta_{PQ}$  : sudut vertikal yang dibentuk dari titik P dan Q

## II.5 Linierisasi Persamaan Pengamatan

Secara umum, persamaan matematik yang melibatkan data ukuran dan data parameter bersifat *non-linier*, sehingga diperlukan proses linierisasi dengan deret *Taylor* (Ghilani, 2010). Persamaan (II.20) menunjukkan proses linierisasi dengan deret *Taylor* (Widjajanti, dkk., 2017).

$$F(x) = Lb + V = F(X_0) + \frac{\partial F(X)}{\partial (X)_{X=X_0}} X + \dots \dots \dots (II.21)$$

Keterangan:

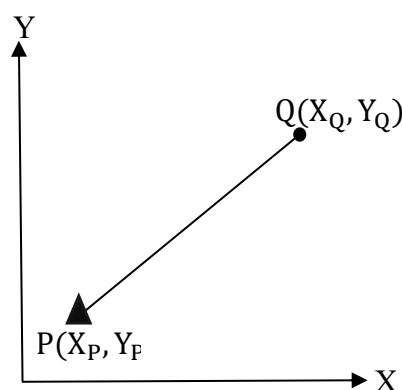
$F(x)$  : nilai pengamatan

$Lb$  : selisih nilai estimasi

$V$  : residu

### II.5.1. Linierisasi persamaan pengamatan jarak dengan deret *Taylor*

Gambar (II.5) menunjukkan bahwa jarak dapat terbentuk berdasarkan nilai resultan dari dua titik (Widjajanti, dkk., 2017)



Gambar II.5 Jarak yang terbentuk dari dua titik  
(modifikasi dari Ayuningtyas, 2020)

Berdasarkan Gambar (II.5), model matematika pengamatan jarak horizontal dapat ditunjukkan pada persamaan (II.21).



$$F(x) = D_{PQ} = \sqrt{(X_P - X_Q)^2 + (Y_P - Y_Q)^2} \dots\dots\dots (II.22)$$

Titik A diasumsikan telah diketahui koordinatnya, sehingga dapat dilakukan linierisasi dengan deret *Taylor* pada persamaan (II.21) terhadap  $X_P$  dan  $Y_Q$  kemudian diperoleh persamaan linearisasi (II.22) dan (II.23) .

$$\frac{\partial F}{\partial X_P} = \frac{X_P - X_Q}{D_{PQ}} \dots\dots\dots (II.23)$$

$$\frac{\partial F}{\partial Y_P} = \frac{Y_P - Y_Q}{D_{PQ}} \dots\dots\dots (II.24)$$

Linierisasi persamaan pada pengamatan jarak miring sama seperti pada jarak horizontal tetapi ditambahkan dengan komponen Z. Persamaan (II.24) model matematik pengamatan jarak miring.

$$F(x) = Dm_{PQ} = \sqrt{(X_P - X_Q)^2 + (Y_P - Y_Q)^2 + (Z_P - Z_Q)^2} \dots\dots\dots (II.25)$$

Apabila persamaan (II.24) diturunkan terhadap parameter  $Z_P$ , maka didapatkan persamaan (II.25) s.d. (II.27).

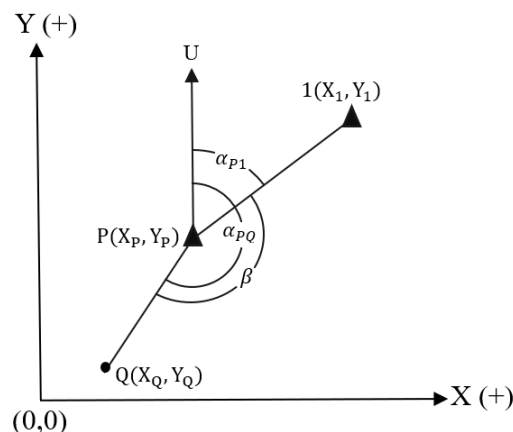
$$\frac{\partial F}{\partial X_P} = \frac{X_P - X_Q}{Dm_{PQ}} \dots\dots\dots (II.26)$$

$$\frac{\partial F}{\partial Y_P} = \frac{Y_P - Y_Q}{Dm_{PQ}} \dots\dots\dots (II.27)$$

$$\frac{\partial F}{\partial Z_P} = \frac{Z_P - Z_Q}{Dm_{PQ}} \dots\dots\dots (II.28)$$

## II.5.2 Linearisasi persamaan pengamatan sudut horizontal dengan deret *Taylor*

Besaran sudut horizontal diperoleh dari selisih bacaan arah horizontal antara dua titik pada azimuth tertentu (Widjajanti, dkk., 2017), seperti pada Gambar II.6.



Gambar II.6 Sudut horizontal yang terbentuk dari tiga titik pengamatan

Berdasarkan Gambar (II.6) dapat dituliskan persamaan model pengamatan matematik pengamatan sudut (II.28).

$$F(x) = \beta = (\arctan \frac{(X_Q - X_P)}{(Y_Q - Y_P)}) - (\arctan \frac{(X_1 - X_P)}{(Y_1 - Y_P)}) \dots\dots\dots (II.29)$$

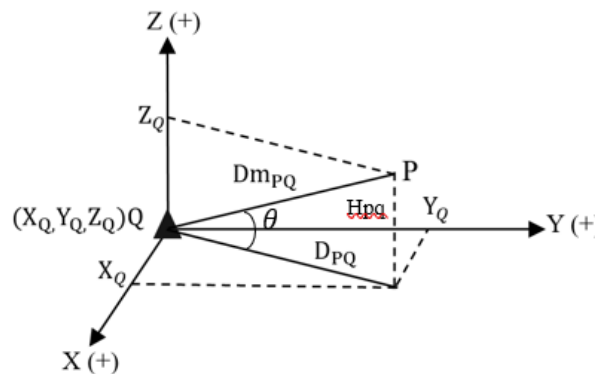
$X_Q$  dan  $Y_Q$  merupakan nilai parameter dari persamaan (II.28). Apabila persamaan (II.28) diturunkan terhadap parameter tersebut, maka diperoleh persamaan (II.29) dan (II.30)

$$\frac{\partial \beta}{\partial X_Q} = \frac{-(Y_Q - Y_P)}{(X_Q - X_P)^2 + (Y_Q - Y_P)^2} \dots\dots\dots (II.30)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial Y_Q} = \frac{(X_Q - X_P)}{(X_Q - X_P)^2 + (Y_Q - Y_P)^2} \dots\dots\dots (II.31)$$

### II.5.3 Linearisasi persamaan pengamatan sudut vertikal dengan deret *Taylor*

*Heling* merupakan sudut miring yang terbentuk antara dua titik terhadap arah datar. Bentuk geometri dari perolehan sudut heling ditunjukkan pada Gambar II.7 (Ghilani, 2010).



Gambar II.7 Sudut vertikal perbandingan antara selisih ketinggian titik pantau dengan alat dan jarak miring.

$$F(x) = \theta_{PQ} = \frac{\arcsin(Z_P - Z_Q)}{\sqrt{(X_Q - X_P)^2 + (Y_Q - Y_P)^2 + (Z_Q - Z_P)^2}} \dots\dots\dots (II.32)$$

$Z_Q$  merupakan nilai parameter dari persamaan (II.32). Apabila persamaan (II.32) diturunkan terhadap parameter tersebut, maka diperoleh persamaan (II.33).

$$\frac{\partial \beta}{\partial X_Q} = \frac{-\sqrt{(Y_Q - Y_P)^2 + (X_Q - X_P)^2}}{(X_Q - X_P)^2 + (Y_Q - Y_P)^2 + (Z_Q - Z_P)^2} \dots\dots\dots (II.33)$$

## II.6 Bobot Ukuran

Ketelitian pada setiap pengamatan memiliki nilai yang bervariasi, sehingga untuk menyelesaikan hasil pengamatan dengan ketelitian itu sendiri diperlukan bobot ukuran (Hadiman, 2006). Bobot ukuran merupakan pembanding ketelitian dari suatu besaran pengamatan terhadap pengamatan lain. Persamaan (II.34) menunjukkan pemberian bobot suatu pengamatan yang mana bobot pengamatan tersebut berbanding terbalik dengan varian pengamatan (Widjajanti, dkk. 2017).

$$P_i = k/\sigma_i^2 \dots\dots\dots (II.34)$$

$$k = \sigma_0^2$$

Persamaan (II.35) menjadi persamaan (II.36)

$$P_i = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_i^2} \dots\dots\dots (II.35)$$

$$\sigma_i^2 = \frac{\Sigma(X-X_i)^2}{n-1} \dots\dots\dots (II.36)$$

Keterangan:

$P_i$  : bobot ukuran

$\sigma_0^2$  : varian apriori

$\sigma_i^2$  : varian hasil pengukuran

$X$  : nilai rata-rata ukuran

$X_i$  : ukuran ke-i

$n$  : banyak ukuran

Terdapat berbagai macam varian pengukuran, yaitu varian jarak datar, varian jarak miring, varian sudut horizontal, dan varian sudut vertikal. Model varian mengandung nilai presisi dan akurasi dari alat yang digunakan, sehingga nilai matriks bobotnya menjadi bervariasi. Varian jarak ditunjukkan pada persamaan (II.37) dan varian sudut horizontal ditujukan pada persamaan (II.38) (Mikhail dan Gracie, 1981).

$$\sigma_d^2 = a^2 + (b \times s)^2 \dots\dots\dots (II.37)$$

$$\sigma^2 = \sigma_\beta^2 = \sigma_{BC}^2 + \sigma_{BR}^2 + \sigma_{BP}^2 + \sigma_{BT}^2 \dots\dots\dots (II.38)$$

Keterangan:

$a$  : ketelitian jarak (tidak terpengaruh jarak)

$b$  : ketelitian relatof alat (terpengaruh jarak)

- $s$  : jarak ukuran (dalam km)
- $\sigma_{BC}$  : kesalahan pemusatan alat ukur sudut
- $\sigma_{BR}$  : kesalahan pembacaan piringan horizontal dan vertikal
- $\sigma_{BP}$  : kesalahan akibat pembidikan (teropong dari alat ukur)
- $\sigma_{BT}$  : kesalahan akibat salah bidik target (terpengaruh jarak)

Dalam hal ini:

$$\sigma_{BC}^2 = \left[ \frac{\sigma_{C1}^2}{d_1^2} + \frac{\sigma_{C2}^2}{d_2^2} + \frac{\sigma_{C3}^2}{d_1^2 d_2^2} (d_1^2 + d_2^2 - 2d_1 d_2 \cos \beta_1) \right] \rho'^2$$

$$\sigma_{BR}^2 = \frac{\sigma_R^2}{2n^2}$$

$$\sigma_{BP}^2 = \frac{\sigma_P^2}{n}$$

$$\sigma_{BT}^2 = \frac{d_1^2 + d_2^2}{d_1^2 d_2^2} \sigma_T^2 (\rho'^2)$$

Keterangan:

- $\sigma_{C1}^2, \sigma_{C2}^2$  : ketelitian pemusatan target
- $\sigma_{C3}^2$  : kesalahan pemusatan alat
- $\rho''$  : 206264,8062 ( $180 \times 3600/\pi$ )
- $\sigma_R$  : 3 x d (untuk piringan horizontal 10" s.d 1')
- $d$  : pembacaan terkecil piringan horizontal
- $\sigma_P$  : 60"/M
- $M$  : perbesaran teropong
- $n$  : jumlah pengamatan
- $\sigma_T^2$  : ketelitian target

## II.7 Iterasi

Penyelesaian persamaan tidak linier pada HKT dilakukan dengan linierisasi deret *Taylor*. Penderetan tersebut mengabaikan suku orde kedua dan seterusnya sehingga mengakibatkan hasil hitungan tidak memenuhi model matematis. Untuk menghilangkannya, dilakukan hitungan secara berulang-ulang (iterasi) hingga model matematis terpenuhi. Iterasi dilakukan setelah memperoleh nilai X (matriks parameter) dan menjumlahkannya

dengan nilai matriks pendekatan tertentu ( $X_0$ ). Hasil penjumlahan tersebut menghasilkan nilai matriks baru yang digunakan sebagai pendekatan baru ( $X_a$ ) pada hitungan perataan berulang (Uotila, 1988). Nilai pendekatan baru ditunjukkan oleh persamaan (II.38).

$$X = -(A^T P A)^{-1} A^T P L$$

$$X_a = X_0 + X \dots \dots \dots (II.39)$$

Dalam hal ini,  $X_a$  merupakan koordinat pendekatan baru pada iterasi pertama yang kemudian digunakan untuk memperoleh nilai matriks koreksi patameter yang baru ( $X_1$ ). Nilai matriks koreksi parameter yang baru ( $X_1$ ) pada iterasi pertama menghasilkan nilai koreksi matriks yang kemudian digunakan untuk memperoleh nilai pendekatan pada iterasi kedua ( $X_{a1}$ ) pada persamaan (II.40).

$$X_1 = -(A^T P A)^{-1} A^T P L$$

$$X_{a1} = X_1 + X \dots \dots \dots (II.40)$$

Nilai pendekatan pada iterasi ketiga dan seterusnya dapat diperoleh dengan nilai koreksi matriks yang dihasilkan pada iterasi sebelumnya. Proses iterasi akan terus berlangsung hingga memenuhi syarat penghentian. Syarat penghentian proses iterasi (Uotila, 1988) yaitu:

1.  $X_i$  mendekati atau sama dengan nol, dalam hal ini nilai  $i$  akan semakin besar.
2. Selisih  $V_i - V_{i-1}$  mendekati nol.
3. Nilai  $V_i^T P V_i$  stabil.
4.  $F(L_\alpha, X_\alpha)$  mendekati nol.

## II.8 Uji Statistik

Uji statistik perlu dilakukan setelah hitung perataan untuk memastikan bahwa data hasil pengamatan di lapangan tidak terdapat kesalahan kasar (*blunder*) dan sistematis. Pengujian statistik dilakukan terhadap nilai varian hasil hitungan aposteriori dan varian apriori untuk menganalisis keseuaiannya. Uji statistik meliputi uji global dan data *snooping* (Widjajanti, 2001).

### II.8.1 Uji Global

Uji global merupakan uji yang dilakukan untuk memastikan ada atau tidak adanya kesalahan *blunder* maupun kesalahan sistematis. Pengujian ini dilakukan dengan

membandingkan varian apriori dan varian aposteori dari unit bobot menggunakan tabel *Fisher* (Mikhail dan Ackermann, 1981).

Persamaan (II.41) dan (II.42) hipotesis pada uji global

$$H_0: \sigma_o^2 = \hat{\sigma}_o^2 \dots\dots\dots(II.41)$$

$$H_a: \sigma_o^2 < \hat{\sigma}_o^2 \dots\dots\dots(II.42)$$

$H_0$  diterima apabila memenuhi syarat pada persamaan (II.43)

$$\frac{\hat{\sigma}_o^2}{\sigma_o^2} < F_{1-\alpha, r, \infty} \dots\dots\dots(II.43)$$

Keterangan:

$\hat{\sigma}_o^2$  : varian aposteori

$\sigma_o^2$  : varian apriori

$F_{1-\alpha_0), r, \infty}$  : nilai statistik dari tabel *Fisher* dengan derajat signifikan ( $\alpha_0$ ) dengan derajat kebebasan (r).

Apabila  $H_0$  diterima, hasil pengukuran tidak dipengaruhi oleh kesalahan sistematis dan kesalahan *blunder* yang artinya memenuhi sebaran normal. Begitupun sebaliknya, apabila  $H_0$  ditolak, terdapat indikasi kemungkinan pengukuran dipengaruhi oleh kesalahan kasar. Adanya kesalahan sistematis dan kesalahan blunder dapat dideteksi dengan *uji blunder* dan data *snooping* pada setiap pengukuran.

## II.8.2 Data Snooping

Data *snooping* dilakukan apabila dalam pengujian global  $H_0$  ditolak, yakni untuk menemukan data pengamatan yang mengandung kesalahan kasar. Data *snooping* dilakukan hingga uji varian aposteori diterima. Susunan  $H_0$  dan  $H_a$  dalam data *snooping* (Widjajanti, 1997) yaitu:

$H_0$  : Hasil pengamatan tidak dipengaruhi kesalahan kasar

$H_a$  : Hasil pengamatan dipengaruhi oleh kesalahan kasar

$H_0$  diterima apabila memenuhi persamaan II.44.

$$|W_i| \leq F_{1-\alpha, r, \infty}^{1/2} \dots\dots\dots(II.44)$$

$$W_i = \frac{v_i}{\sigma_{v_i}} \dots\dots\dots(II.45)$$

Keterangan:

$V_i$  : koreksi pengamatan ke i

$\sigma_{Vi}$  : simpangan baku koreksi pengamatan ke  $i$

$F_{1-\alpha, r, \infty}^{1/2}$  : nilai statistik dari tabel *Fisher*

## II.9 Besar Nilai Pergeseran

Nilai pergeseran diperoleh setelah proses perhitungan hitung kuadrat terkecil. Besar pergeseran tersebut merupakan nilai dari beda koordinat titik pantau antara dua *epoch*. Persamaan II.45 s.d. II.47 merupakan perhitungan nilai pergeseran koordinat.

$$dX = \hat{X}_{i+1} - \hat{X}_i \dots \dots \dots (II.46)$$

$$dY = \hat{Y}_{i+1} - \hat{Y}_i \dots \dots \dots (II.47)$$

$$dZ = \hat{Z}_{i+1} - \hat{Z}_i \dots \dots \dots (II.48)$$

### II.9.1 Uji Signifikansi Nilai Pergeseran

Penelitian ini menggunakan uji signifikansi untuk mengetahui signifikansi pergerakan titik pantau dalam kurun waktu satu tahun. Uji ini dilakukan dengan menghitung beda koordinat pada dua *epoch* yang berbeda dibagi dengan akar kuadrata resultan simpangan bakunya. Persamaan II.49 model matematis uji signifikansi (widjajanti, 2010):

$$T = \left| \frac{X_i - X_{i+1}}{\sqrt{S_{xi}^2 + S_{xi+1}^2}} \right| < t_{f \alpha/2} \dots \dots \dots (II.49)$$

Keterangan:

$T$  : nilai uji  $t$  hitungan

$t_{f \alpha/2}$  : distribusi  $t$  pada tabel  $t$  dengan tingkat kepercayaan  $\alpha$

$X_i$  : koordinat titik pantau pada *epoch* 1

$X_{i+1}$  : koordinat titik pantau pada *epoch* 2

$S_{xi}$  : simpangan baku koordinat titik pantau pada *epoch* 1

$S_{xi+1}$  : simpangan baku koordinat titik pantau pada *epoch* 2

Dalam uji signifikansi ini, nilai koordinat pada kedua epoch tersebut besarnya sama, sehingga

$$H_o : X_i - X_{i+1} = 0$$

$$H_a : X_i - X_{i+1} \neq 0$$

$H_o$  diterima apabila  $< T < t_{f \alpha/2}$  yang menandakan besar pergeseran tersebut tidak signifikan. nilai uji  $t$  diperoleh berdasarkan pada tabel  $t$  yang ditunjukkan pada lampiran J



Nilai tersebut didapatkan dengan melihat derajat kebebasan (*dof*) dan derajat signifikan ( $\alpha_0$ ).

## II.10 Analisis Deformasi

Analisis merupakan penarikan kesimpulan mengenai karakteristik fenomena secara keseluruhan berdasarkan unsur-unsur pembentuk struktur tersebut. Deformasi adalah perubahan bentuk, posisi, dan dimensi dari suatu benda (Kuang, 1996). Pemantauan deformasi pada titik pengamatan biasanya dilakukan secara berulang pada *epoch* yang berbeda.

Metode analisis deformasi dibagi menjadi dua klasifikasi, yaitu analisis geometrik dan analisis interpretasi fisik (Chzranowski dan Chen, 1986). Analisis deformasi metode geometrik dilakukan dengan analisis pergerakan titik pantau dengan uji kesebangunan jaring dan uji pergeseran titik (Widjajanti, 2001).

### II.10.1 Uji Kesebangunan Jaring

Uji kesebangunan jaring dilakukan untuk mendeteksi adanya kemungkinan perubahan bentuk jaring pada masing-masing *epoch* dengan uji global pada semua koordinat jaring pemantauan. Tahapan uji kesebangunan jaring deformasi sebagai berikut (Widjajanti, 1997):

1. Pemodelan hitungan berdasarkan pasangan koordinat titik pantau dari kedua *epoch* pada persamaan II.50.

$$U_d V_d + d = 0 \dots\dots\dots (II.50)$$

Keterangan:

$U_d$  : matriks koefisien koreksi pengamatan

$d$  : vektor pergerakan titik pantau

$V_d$  : vektor koreksi pergerakan

2. Menghitung nilai korelat pergerakan K. Persamaan (II.51) dan (II.52) menunjukkan nilai korelat pergerakan.

$$K = (U_d Q_d U_d^T)^{-1} d \dots\dots\dots (II.51)$$

$$Q_d = \begin{bmatrix} Q^{(f)} & 0 \\ 0 & Q^{(k)} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (II.52)$$

Keterangan:

$Q^{(f)}$  : matriks kofaktor parameter *epoch* pertama

$Q^{(k)}$  : matriks kofaktor parameter *epoch* kedua

3. Menghitung nilai koreksi pergerakan titik pantau  $V_d$  dan  $\bar{V}_d$  melalui persamaan (II.53) dan (II.54).

$$V_d = -Q_d U_d^T K \dots \dots \dots (II.53)$$

$$\bar{V}_d = Q_d^{-1} V_d \dots \dots \dots (II.54)$$

4. Menghitung varian nilai pergerakan melalui persamaan (II.55) dan (II.56):

$$\text{Varian apriori pergerakan } (\sigma_{0d}^2) = \frac{\hat{\sigma}_0^{2(j)} + \hat{\sigma}_0^{2(k)}}{2} \dots \dots \dots (II.55)$$

$$\text{Varian aposteori pergerakan } (\hat{\sigma}_{0d}^2) = \frac{V_d^T Q_d^{-1} V_d}{r} \dots \dots \dots (II.56)$$

5. Penyusunan hipotesis

Ho : bentuk jaringan tidak mengalami perubahan ( $\hat{\sigma}_{0d}^2 = \sigma_{0d}^2$ )

Ha : bentuk jaringan mengalami perubahan ( $\hat{\sigma}_{0d}^2 > \sigma_{0d}^2$ )

6. Penetapan derajat signifikan ( $\alpha_0$ )

7. Penentuan nilai batas ( $F_{1-\alpha, \infty, r}$ ) dari tabel *Fisher* dengan argument  $\alpha_0$  dan r (jumlah persamaan syarat).

8. Pengujian hipotesis nol (Ho) menggunakan persamaan (II.57)

$$\text{Hipotesis nol ditolak apabila : } \frac{\hat{\sigma}_{0d}^2}{\sigma_{0d}^2} > F_{1-\alpha, \infty, r} \dots \dots \dots (II.57)$$

Ho diterima apabila mengindikasikan jaring pantau tidak mengalami pergeseran sehingga jaring masih sebangun. Begitupun sebaliknya, Ho ditolak apabila mengindikasikan adanya pergeseran pada jaring pemantuan yang menandakan adanya ketidaksebangunan jaring pantau.

## II.9.2 Uji Pergeseran Titik

Uji pergeseran titik dilakukan pada setiap titik pantau dengan data *snooping* untuk mengindikasi adanya pergerakan setiap titik pantau. Uji pergeseran titik dilakukan dengan tujuan mengetahui titik pantau yang mengalami pergeseran. (Widjajanti, 1997).

Tahapan untuk uji pergerakan titik deformasi yaitu:

1. Menyusun hipotesis

Ho : titik pantau ke-i tidak mengalami pergerakan.

Ha : titik pantau ke-i mengalami pergerakan.

2. Menetapkan derajat signifikan ( $\alpha_0$ ).

3. Menentukan nilai batas ( $F_{1-\alpha_0, \infty, r}$ ) dari tabel *Fisher* dengan r (derajat kebebasan).

4. Menghitung nilai  $W_{di}$  dengan persamaan (II.59).

$$N_d = U_d^T (U_d Q_d U_d^T)^{-1} U_d \dots \dots \dots (II.58)$$

$$W_{di} = \frac{Q_d^{-1} V_{di}}{\sigma_{0d} \sqrt{N_{di}}} \dots \dots \dots (II.59)$$

5. Menguji hipotesis

$$|W_{di}| \leq F_{1-\alpha_0, \infty, r}$$

Ho diterima apabila titik ke i tidak mengalami pergseran, begitupun sebaliknya Ho ditolak apabila titik ke i mengalami pergerakan.

## II.10 Perhitungan Besaran dan Arah Vektor Kecepatan Pergerakan Titik Pantau

Besar nilai kecepatan pergseran titik pantau dapat dilakukan perhitungan dengan persamaan (II.60) (Ghilani, 2010)

$$V = \frac{X_t - X_{t_0}}{t - t_0} \dots \dots \dots (II.61)$$

Keterangan:

$X_t$  : koordinat titik pantau pada *epoch* t

$X_{t_0}$  : koordinat titik pantau pada *epoch*  $t_0$

V : kecepatan pergerakan

Persamaan (II.62) dan (II.63) menunjukkan resultan vektor pergerakan dan arah vektor pergerakan horizontal. Pergerakan vertikalnya ditunjukkan dengan nilai positif atau negatifnya. Apabila nilai kecepatan positif, maka pergerakan terjadi ke arah atas, jika kecepatan negatif, pergerakan terjadi ke arah bawah.

$$V_R = \sqrt{V_n^2 + V_e^2} \dots \dots \dots (II.62)$$

$$\alpha = \tan \frac{V_e}{V_n} \dots \dots \dots (II.63)$$

Keterangan:

$V_R$  : resultan kecepatan pergerakan horizontal

$\alpha$  : arah vektor pergerakan horizontal

$V_n$  : kecepatan pergerakan pada komponen *northing*

$V_e$  : kecepatan pergerakan pada komponen *easting*

## II.11 Curah Hujan

Hujan merupakan salah satu bentuk presipitasi berupa titik-titik cairan (Tjasyono, 2012). Curah hujan merupakan unsur iklim paling dominan di Indonesia dengan tingkat keanekaragaman yang sangat tinggi serta fluktuasi yang signifikan. Curah hujan sering digunakan sebagai pembeda iklim di Indonesia (Tjasyono, 2004). Sebagai negara kepulauan dengan kondisi atmosfer dinamis, Indonesia mengalami perubahan distribusi curah hujan yang menunjukkan variabilitas serta pergeseran yang cepat (Aldrin & Susanto, 2003; Giarno dkk., 2012; Sucahyono & Ribudiyanto, 2013). Topografi yang kompleks juga semakin memperkuat kerumitan pola cuaca, terutama terkait dengan pengaruh curah hujan (Prasetyo dkk., 2018).

Terdapat beberapa alternatif untuk menghitung estimasi data hujan, salah satunya yaitu menggunakan data hujan satelit. Pada pengamatan penginderaan jauh, curah hujan dihitung dengan pengetahuan gelombang elektromagnetik yang dipancarkan dari awan kemudian ditangkap oleh satelit/radar. Estimasi curah hujan satelit ini dapat mencakup area yang luas dengan berbagai resolusi spasial dan temporal (Martin & Scherer, 1973). Satelit memiliki keunggulan dibandingkan dengan pengamatan permukaan yaitu resolusi spasial dan temporal yang tinggi serta waktu yang nyata (Shresta dkk., 2017), sehingga lebih ekonomis.

Satelit curah hujan yang sering digunakan sebagai alternatif data yaitu satelit *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data* (CHIRPS), *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM), *Global Precipitation Measurement* (GPM), *Fifth Generation of ECMWF Atmospheric Reanalysis of the Global Climate* (ERAS), *Global Satellite Mapping of Precipitation* (GSMaP), dan *Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information Using Artificial Neural Network* (PERSIANN). Namun demikian, hasil estimasi curah hujan dari data penginderaan jauh memiliki variasi keakuratan di berbagai tempat dan waktu. Validasi estimasi curah hujan CHIRPS menunjukkan bahwa CHIRPS berkinerja dengan baik dalam memperkirakan curah hujan bulanan dan tahunan (Shresta dkk., 2018; Bai dkk., 2018; Gao dkk., 2018). Dalam konteks wilayah topis, CHIRPS dengan produk satelit lain di Indonesia menunjukkan bahwa estimasi CHIRPS sangat akurat.

## BAB III

### METODE PENELITIAN

#### III.1 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Bendungan Margatiga, Desa Negeri Jumanten, Kecamatan Margatiga, Kabupaten Lampung Timur, Provinsi Lampung. Secara geografis bendungan ini terletak pada  $105^{\circ}26'26''$  LS. Area penelitian ini ditunjukkan pada Gambar III.1.



Gambar III.1 Lokasi Bendungan Margatiga di Lampung Timur (Google earth, 2015)

Kotak merah pada Gambar III.1 menunjukkan daerah lokasi pemantauan bendungan Margatiga. Penelitian ini dilakukan pada tubuh bendungan dengan 28 titik pantau dan dua titik referensi. Titik RTS001 merupakan titik berdirinya alat dan titik BMR001 merupakan titik *backsight*. Distribusi titik pantau penelitian ini ditunjukkan pada Gambar III.2.





Gambar III.2 Persebaran titik pantau bendungan (*Google Satellite*)

## III.2 Peralatan dan Bahan Penelitian

### III.2.1 Peralatan Penelitian

Peralatan dalam penelitian ini meliputi *hardware* dan *software*. Peralatan yang digunakan diuraikan sebagai berikut:

#### *Hardware:*

1. Laptop digunakan sebagai *hardware* untuk mengolah data titik dan menganalisis deformasi dengan spesifikasi sebagai berikut:
  - a. CPU: Intel(R) Core (TM) i5-1035G1.
  - b. GPU: Nvidia GeForce MX330.
  - c. RAM: 8 GB.

#### *Software:*

1. *Software* Matlab 2022 untuk melakukan perataan HKT.
2. Microsoft SQL Server Management Studio 19 untuk melihat data yang terhubung dengan *software* GeoMos Monitor 8.2.2.

3. *Software* ArcMap 10.8 untuk visualisasi data dan hasil.
4. *Software* QGIS Dekstop 3.26.1 untuk melakukan *layouting* peta.
5. Microsoft office Excel 365 untuk menunjang perhitungan dan pencatatan hasil hitungan.
6. Microsoft Office Word 365 untuk menyusun laporan penelitian.
7. *Google Earth Engine* untuk memperoleh data curah hujan.

### III.2.2 Bahan Penelitian

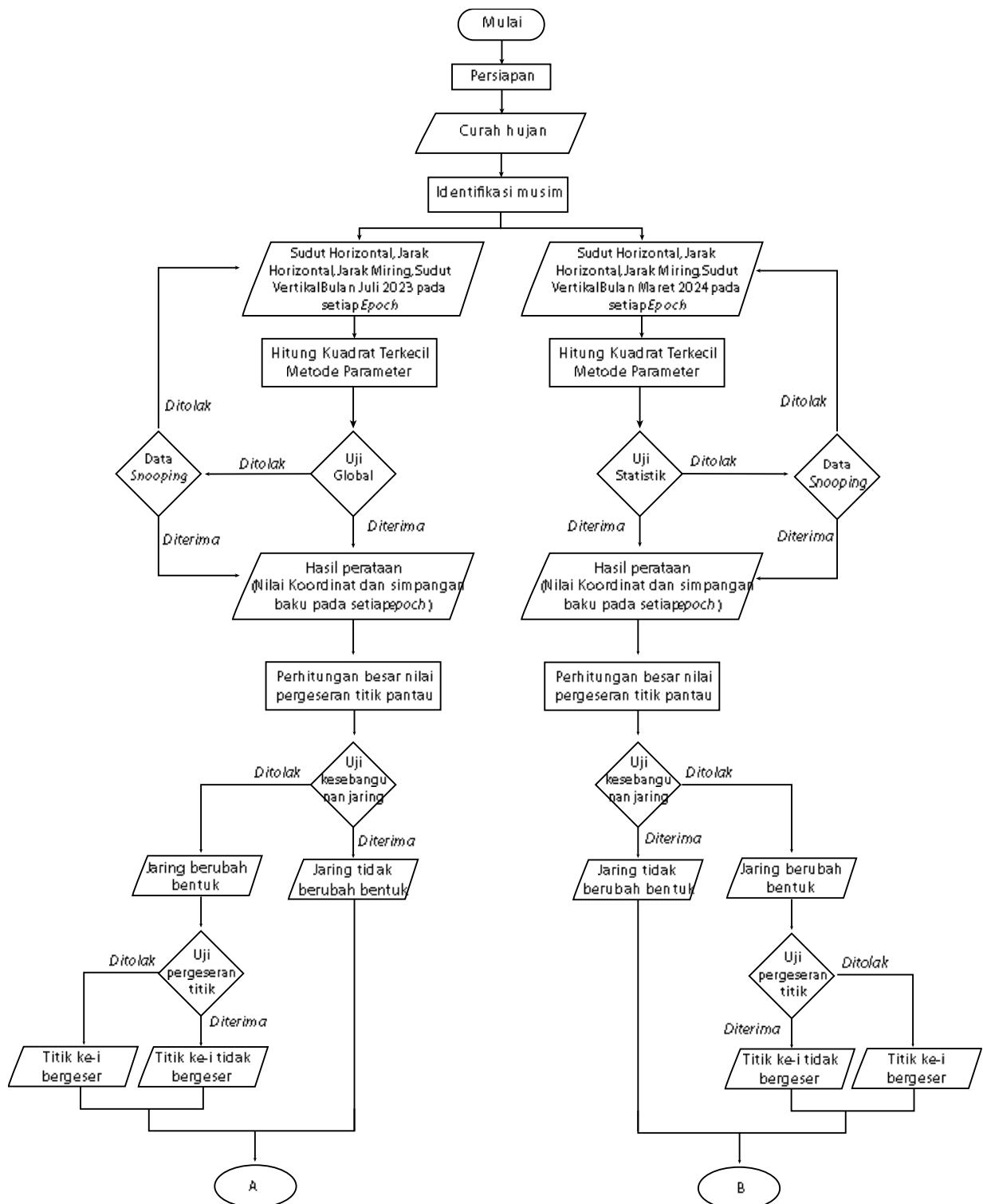
Bahan pada penelitian ini merupakan data sekunder yang diperoleh dari hasil pengamatan RTS Leica Nova TM60 (RTS001) terhadap 28 titik pantau. Titik pantau tersebar merata di seluruh tubuh bendungan. Titik tersebut diantaranya titik P002, P003, P004, P005, P006, P007, P008, P009, P010, P011, P012, P013, P014, P015, P016, P017, P018, P019, P020, P021, P022, P023, P024, P025, P026, P027, P028, P029, dan P030. Terdapat dua titik sebagai referensi yaitu titik RTS001 sebagai tempat berdirinya alat dan titik BMR001 merupakan titik *backsight*. Penelitian ini dilakukan dengan kerangka absolut yaitu titik RTS001 dianggap tidak mengalami pergerakan atau berada pada lokasi yang aman atau tidak terdeformasi.

Data yang digunakan dalam perhitungan kuadrat terkecil yaitu data hasil pengamatan sudut horizontal, jarak horizontal, jarak miring, dan sudut vertikal pada bulan Juli hingga Agustus 2023 dan bulan Maret hingga April 2024. RTS merekam data setiap satu jam sekali selama 24 jam. Penelitian ini menggunakan data yang direkam pada pukul 08.00 s.d. 10.00 WIB. Pemilihan waktu pengamatan ini untuk meminimalisir adanya pengaruh suhu terhadap hasil pengukuran. Penelitian oleh Sari (2016) menjelaskan bahwa rentang temperatur 21,1°C s.d. 36,4 °C di setiap kenaikan temperatur 1 derajat celsius, besar nilai koreksi sudut horizontal rerata sebesar 0,00000087 radian dan nilai koreksi sudut vertikal rerata sebesar - 0,00000033 radian.

### III.3. Pelaksanaan Penelitian

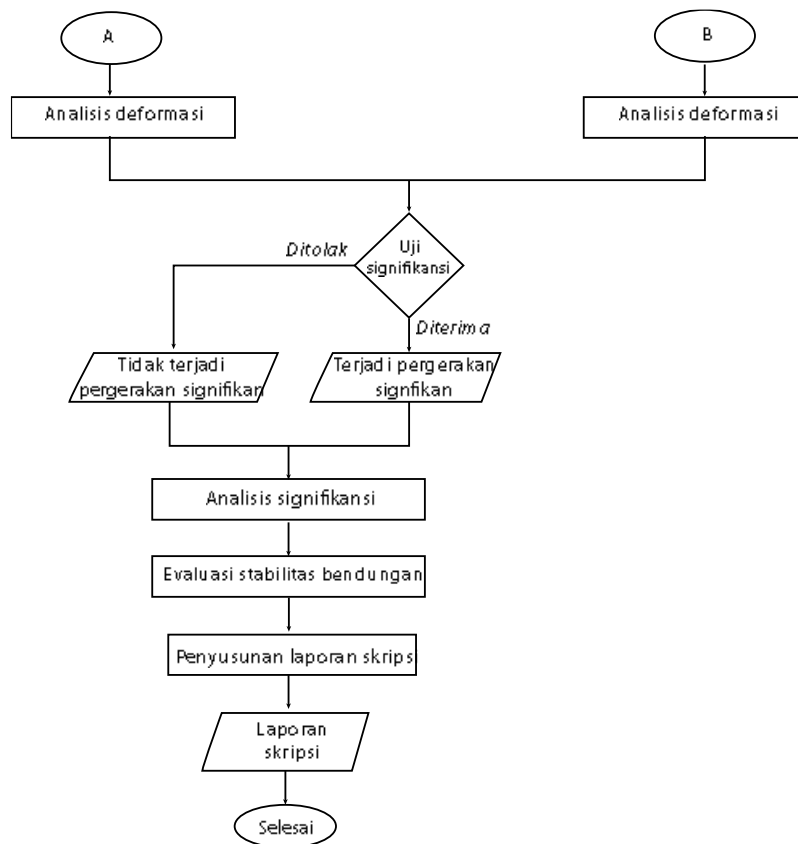
Penelitian dilakukan melalui beberapa tahapan. Secara umum, tahapan tersebut yaitu persiapan, pengolahan data dengan HKT metode parameter dengan *software* Matlab 2022, analisis deformasi, analisis signifikansi, evaluasi stabilitas bendungan, dan penyusunan laporan hasil penelitian. Gambar III.3 menunjukkan tahapan penelitian.





Gambar III.3 Diagram alir pelaksanaan penelitian

### Lanjutan Gambar III.3



#### III.3.1. Persiapan

Tahapan persiapan meliputi tahapan studi literatur dan *filtering* data pemantauan. Studi literatur merupakan tahapan awal yang dilakukan pada penelitian ini. Studi literatur sangat penting dilakukan karena menjadi dasar teoritis dalam suatu penelitian, memberikan ringkasan umum mengenai topik yang dibahas, dan memberikan gambaran terkait *gap* penelitian tersebut (Ramadhani, dkk. 2014). Penelitian ini memiliki fokus utama pada topik analisis deformasi menggunakan RTS.

Umumnya, tahapan studi literatur pada suatu penelitian bersumber kepada buku, penelitian, maupun tesis. Pada penelitian ini, studi literatur yang digunakan bersumber dari buku *surveying* yang terkhusus pada penerapan teknologi *surveying* dengan RTS. selain itu, penelitian ini juga menggunakan sumber dari penelitian maupun tesis yang berkaitan dengan analisis deformasi terhadap bendungan.

*Filtering* data hasil pemantauan RTS dengan *software* SQL Server Management Studio. *Software* ini telah terhubung dengan *database* Bendungan Margatiga. Data yang digunakan yaitu data sudut horizontal, jarak horizontal, jarak miring, dan sudut vertikal pada

masing-masing titik pantau. Data pengamatan dipilih antara pukul 08.00 s.d. 10.00 WIB untuk meminimalisir adanya pengaruh suhu terhadap hasil pengukuran.

### III.3.1. Perhitungan Data Curah Hujan

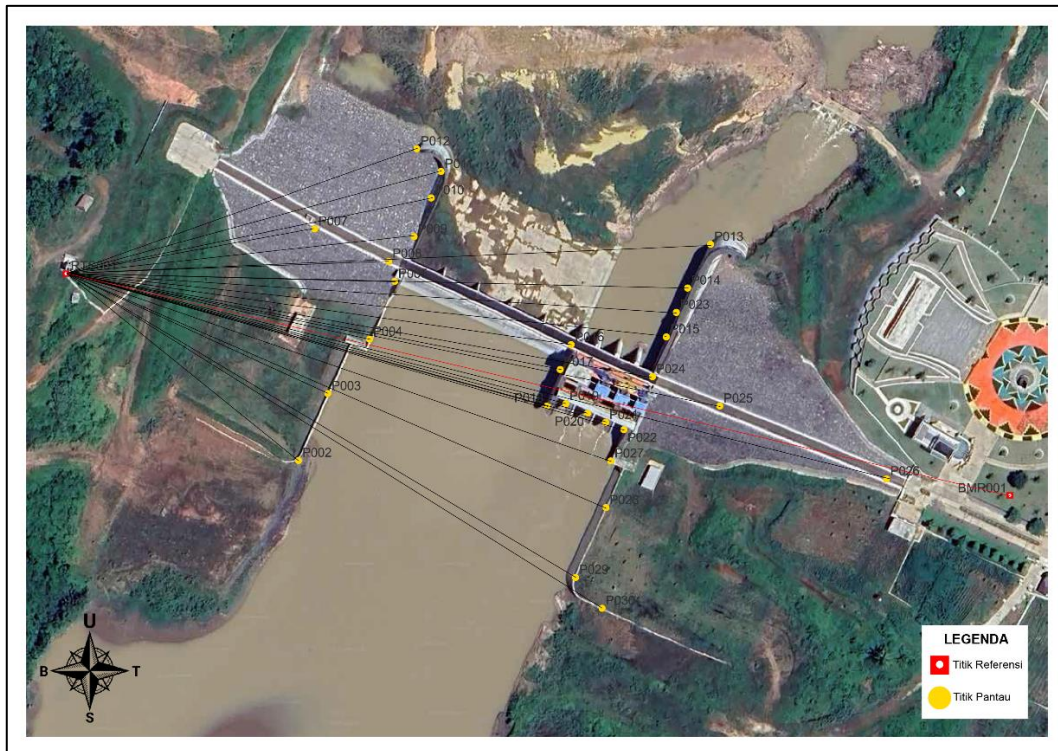
Data curah hujan digunakan untuk mengidentifikasi musim yang terjadi saat pengamatan. Hal ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh musim terhadap signifikansi pergerakan bendungan dalam kurun waktu satu tahun. Data curah hujan diperoleh dengan *Google Earth Engine* (GEE) dengan *script* yang terlampir pada Lampiran M. Data curah hujan yang digunakan diperoleh dari satelit *Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Station* (CHIRPS) selama sepuluh tahun terakhir. *Link* GEE disajikan pada Lampiran M.

Data kemudian diolah menggunakan *Software Microsoft Excel* untuk dicari nilai *maximum*, *minimum*, dan *average* pada setiap bulannya. Curah hujan divisualisasikan dalam bentuk grafik batang. Apabila grafik mulai meninggi dan terus tinggi selama beberapa bulan dapat diidentifikasi sebagai musim hujan. Sebaliknya, apabila grafik mulai menurun dan terus turun hingga beberapa bulan dapat diidentifikasi sebagai musim kemarau. Oleh karena itu, data pengamatan yang digunakan pada penelitian ini yaitu bulan Juli s.d. Agustus 2023 yang diasumsikan mewakili bulan kering atau musim kemarau dan bulan Maret s.d. April 2024 yang diasumsikan mewakili bulan basah atau musim hujan.

### III.3.2. Hitung Perataan Kuadrat Terkecil Metode Parameter

Tahapan perataan HKT metode parameter ini dilakukan dengan *software* Matlab 2022. *Script* yang digunakan terdapat pada Lampiran I. Dalam penyusunan persamaan disajikan jaring kontrol titik pantau pada gambar III.4. Pada Gambar III.4 dapat dilihat titik pantau disimbolkan dengan lingkaran berwarna kuning, titik referensi ditampilkan dengan kotak berwarna merah, dan jaring kontrol titik pantau ditunjukkan dengan garis berwarna hitam.

Gambar III.4 memperlihatkan jaring kontrol yang digunakan merupakan jaring radial. Titik berdiri alat hanya tersedia satu buah di lapangan, yaitu berada di sebelah barat. Sedangkan titik *backsight*nya berada di sebelah timur, sehingga terdapat beberapa sudut yang runcing. Titik pantau tersebar merata pada lereng bendungan. Hal ini dapat mempengaruhi titik pantau yang berada di sebelah timur mengalami perambatan kesalahan yang besar.



Gambar III.4 Jaring kontrol titik pantau

III.3.2.1 Menghitung koordinat pendekatan. Tahapan awal hitung koordinat pendekatan yaitu menentukan azimuth yang terbentuk dari titik berdiri alat, *backsight*, dan titik pantau. Perhitungan koordinat pendekatan pada tiga komponen X, Y, dan Z dengan persamaan (II.1), (II.2), dan (II.3).

$$X_{002} = X_{RTS001} + Hd \sin \alpha \dots\dots\dots(II.1)$$

$$Y_{002} = Y_{RTS001} + Hd \cos \alpha \dots\dots\dots(II.2)$$

$$Z_{002} = Z_{RTS001} + Vd \dots\dots\dots(II.3)$$

RTS didirikan di atas tiang yang ditanam sehingga tinggi alat tidak akan berubah-ubah. Prisma reflektor titik pantau juga dipasang pada lereng bendungan. RTS dan prisma reflektor tersebut diatur dengan ketinggian 0 m. Oleh karena itu, perhitungan komponen Z tersebut tidak dilakukan perhitungan dengan tinggi alatnya. Terdapat 84 persamaan pada matriks  $X_0$  berupa komponen X, Y, dan Z dari 28 titik pantau.

III.3.2.2. Membuat persamaan matematis pengamatan. Persamaan matematis pengamatan terbentuk dari persamaan sudut dan jarak. Penelitian ini menggunakan persamaan sudut horizontal, persamaan jarak horizontal, persamaan jarak miring, dan persamaan sudut vertikal. Persamaan tersebut masing-masing berjumlah 28 titik pantau sehingga menghasilkan 112 persamaan. Hal ini sudah memenuhi syarat perhitungan pada metode parameter yaitu terdapat ukuran lebih.

- 1) Persamaan matematis sudut horizontal ini terbentuk dari perhitungan dengan persamaan (II.29). Mengacu pada Gambar III.4 titik pantau dikelompokkan menjadi tiga persamaan yang berbeda. Hal ini didasarkan pada letak kuadran sudut tangen yang berbeda sehingga terbentuk model matematis sebagai berikut:

- a. Bagian satu yaitu pada titik P007, P008, P009, P010, P011, P012, dan P013.

$$\beta_{P007BA} = \left( \left( \text{atan} \frac{(X_B - X_A)}{(Y_B - Y_A)} + 180^\circ \right) - \text{atan} \frac{(X_{P007} - X_A)}{(Y_{P007} - Y_A)} \right)$$

- b. Bagian dua yaitu pada titik P002, P003, P108, P019, P020, P021, P022, P026, P027, P028, P020, dan P030.

$$\beta_{P002BA} = \left( \left( \text{atan} \frac{(X_B - X_A)}{(Y_B - Y_A)} + 180^\circ \right) - \left( \text{atan} \frac{(X_{P002} - X_A)}{(Y_{P002} - Y_A)} + 180^\circ \right) \right)$$

- c. Bagian tiga yaitu pada titik P004, P005, P014, P015, P016, P017, P023, P024, dan P025.

$$\beta_{P004BA} = \left( \left( \text{atan} \frac{(X_{P004} - X_A)}{(Y_{P004} - Y_A)} + 180^\circ \right) - \left( \text{atan} \frac{(X_B - X_A)}{(Y_B - Y_A)} + 180^\circ \right) \right)$$

- 2) Persamaan matematis jarak horizontal dihitung melalui persamaan (II.22) sehingga menghasilkan model matematik sebagai berikut:

$$HD_{X002RTS001} = \sqrt{(X_{002} - X_{RTS001})^2 + (Y_{002} - Y_{RTS001})^2}$$

⋮

$$HD_{X028RTS001} = \sqrt{(X_{028} - X_{RTS001})^2 + (Y_{028} - Y_{RTS001})^2}$$

- 3) Persamaan matematis jarak miring dihitung melalui persamaan (II.25) sehingga diperoleh model matematik sebagai berikut:

$$SD_{X002RTS001} = \sqrt{(X_{002} - X_{RTS001})^2 + (Y_{002} - Y_{RTS001})^2 + (Z_{002} - Z_{RTS001})^2}$$

⋮

$$SD_{X028RTS001} = \sqrt{(X_{028} - X_{RTS001})^2 + (Y_{028} - Y_{RTS001})^2 + (Z_{028} - Z_{RTS001})^2}$$

- 4) Persamaan sudut vertikal dihitung melalui persamaan (...) sehingga diperoleh model matematik sebagai berikut:

$$\gamma_{002A} = \sin^{-1} \left( \frac{Z_{RTS001} - Z_{P002}}{\sqrt{(X_{002} - X_{RTS001})^2 + (Y_{002} - Y_{RTS001})^2 + (Z_{002} - Z_{RTS001})^2}} \right)$$

### III.3.2.3 Menyusun matriks A. Matriks A merupakan matriks turunan pertama ukuran

terhadap parameternya. Penelitian ini berdimensi 112 x 84 untuk matriks A. Berikut ini merupakan bentuk dari matriks A:

$$A_{(112 \times 84)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial X_1} & \frac{\partial F_1}{\partial Y_1} & \frac{\partial F_1}{\partial Z_1} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial X_{84}} & \frac{\partial F_1}{\partial Y_{84}} & \frac{\partial F_1}{\partial Z_{84}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial F_{112}}{\partial X_1} & \frac{\partial F_{112}}{\partial Y_1} & \frac{\partial F_{112}}{\partial Z_1} & \dots & \frac{\partial F_{112}}{\partial X_{84}} & \frac{\partial F_{112}}{\partial Y_{84}} & \frac{\partial F_{112}}{\partial Z_{84}} \end{bmatrix}$$

III.3.2.4 Menyusun matriks P. Matriks P atau matriks bobot merupakan perbandingan matriks varian apriori dengan varian dari setiap hasil pengukuran. Pada penelitian ini, varian apriori yang digunakan berdasar pada bacaan terkecil dari alat yaitu sebesar 0.1” sehingga varian apriori yang digunakan sebesar 0,1. Varian hasil pengukuran merupakan varian jarak dan sudut yang dilakukan perhitungan dengan persamaan (II.37) dan (II.38). Perhitungan menyesuaikan dengan ketelitian alat yang digunakan. Ketelitian alat yang digunakan pada penelitian ini adalah 1+1 ppm, ketelitian pemusatan alat 0,0015 m, perbesaran teropong yaitu 30X, dan bacaan terkecil alat yaitu 0.1”.

Perhitungan varian sudut vertikal dan sudut horizontal menggunakan persamaan yang sama yaitu persamaan (II.38) sehingga diperoleh nilai varian yang sama. Perhitungan varian jarak horizontal dan perhitungan varian jarak miring menggunakan persamaan (II.37). Perbedaannya terletak pada jarak yang digunakan. Varian jarak horizontal menggunakan jarak horizontal sedangkan varian jarak miring menggunakan jarak miring. Matriks P pada penelitian ini berukuran (112x112).

$$P_{(112 \times 112)} = \begin{bmatrix} \frac{0,1}{\sigma^2_{\beta 2BA}} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \frac{0,1}{\sigma^2_{HD2A}} & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & 0 & \frac{0,1}{\sigma^2_{SD2A}} & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & 0 & \frac{0,1}{\sigma^2_{\gamma 2A}} & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & 0 & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 & \frac{0,1}{\sigma^2_{\beta 2BA}} & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 & \frac{0,1}{\sigma^2_{HD2A}} & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 & \frac{0,1}{\sigma^2_{SD2A}} & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & \frac{0,1}{\sigma^2_{\gamma 2A}} \end{bmatrix}$$

### III.3.2.5 Melakukan penyusunan matriks F. Matriks F merupakan matriks sisa.

Elemen matriksnya berisi selisih dari nilai ukuran di lapangan dengan pendekatannya.

Matriks F ini berdimensi (112 x 1). Berikut merupakan matriks F yang digunakan:

$$F_{112 \times 1} = \begin{bmatrix} \beta_{0002BA} - \beta_{002BA} \\ HD_{0002A} - HD_{002A} \\ SD_{0002A} - SD_{002A} \\ \gamma_{0002A} - \gamma_{002A} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \beta_{0030BA} - \beta_{030BA} \\ HD_{0030A} - HD_{030A} \\ SD_{0030A} - SD_{030A} \\ \gamma_{0030A} - \gamma_{030A} \end{bmatrix}$$

III.3.2.6 Melakukan penyusunan matriks X. Matriks X tersusun atas parameter-parameter yang ditentukan nilainya. Matriks ini terdiri atas nilai parameter ( $X_0$ ) yang telah dikoreksi dengan persamaan (II.12). Matriks X berdimensi (84 x 1).

III.3.2.7 Melakukan penyusunan matriks V. Matriks V merupakan matriks koreksi yang berisi besaran-besaran koreksi pengamatannya. Matriks V didapatkan dengan hasil hitungan dari elemen matriks A, matriks P, dan matriks F. Dimensi matriks V yaitu (84 x 1).

III.3.2.8 Melakukan perhitungan nilai matriks varian kovarian parameter dan varian kovarian residu. Matriks varian kovarian diperoleh melalui perhitungan perkalian dari aposteor dengan matriks kofaktornya seperti pada persamaan (II.16). Diagonal utama dari matriks ini merupakan matriks varian setiap parameter. Nilai akar kuadrat dari varian merupakan nilai simpangan baku (ketelitian) pada setiap parameter.

III.3.2.9 Melakukan proses iterasi. Iterasi dilakukan untuk menyelesaikan persamaan tidak linier. Proses ini dilakukan dengan berulang-ulang hingga syarat diberhentikan sudah tercapai sehingga nilai yang dimiliki sudah cukup kecil dan tidak memiliki pengaruh terhadap nilai parameter. Syarat diberhentikan iterasi pada penelitian ini mengacu pada Uotila (1988) yaitu ketika nilai  $X_i$  sudah mendekati atau sama dengan nol. Pada penelitian ini, iterasi diberhentikan ketika nilai  $X_i \leq 0,001$  m. Hal ini dikarenakan bacaan terkecil pada pengukuran jarak dengan RTS yaitu 0,001.

## **III.3.3 Uji Statistik**

Uji statistik yang dilakukan meliputi uji global dan data *snooping*. Data *snooping* dilakukan apabila terjadi penolakan pada uji global. Uji ini dilakukan untuk mengetahui



adanya kesalahan pada data pengamatan. Uji statistik dilakukan pada setiap *epoch* pengukuran.

**III.3.3.1 Uji Global.** Uji global dilakukan untuk mendeteksi adanya kesalahan sistematis maupun kesalahan *blunder*. Tahapan yang dilakukan pada uji global yaitu:

1. Menentukan hipotesis awal.

$$H_0: \sigma_o^2 = \hat{\sigma}_o^2$$

$$H_a: \sigma_o^2 < \hat{\sigma}_o^2$$

2. Membandingkan nilai varian aposteriori ( $\hat{\sigma}^2$ ) dengan varian apriori ( $\sigma^2$ ).
3. Mencari nilai uji pada tabel *Fisher* dengan tingkat kepercayaan 95%. Tabel *Fisher* yang digunakan terdapat pada Lampiran L.
4.  $H_0$  diterima apabila memenuhi syarat persamaan (II.43).

**III.3.3.2 Data *Snooping*.** Data *snooping* dilakukan untuk mengetahui data ukuran yang mengandung kesalahan kasar. Tahapan yang dilakukan pada data *snooping* yaitu:

1. Menentukan hipotesis awal.

$H_0$  : Hasil pengamatan tidak dipengaruhi kesalahan kasar.

$H_a$  : Hasil pengamatan dipengaruhi oleh kesalahan kasar.

2. Membandingkan nilai koreksi pengamatan ( $V_i$ ) dengan simpangan baku pengamatannya ( $\sigma_{vi}$ ).
3. Mencari nilai uji pada tabel *Fisher* dengan tingkat kepercayaan 95%.
4.  $H_0$  diterima apabila memenuhi persamaan II.44.

### III.3.4 Analisis Deformasi

Analisis deformasi dilakukan setelah diperoleh nilai pergerakannya. Kemudian dilakukan uji kesebangunan jaring dan uji pergerakan titik untuk mengetahui apakah titik tersebut mengalami deformasi atau tidak. Data masukan pada analisis deformasi ini adalah data koordinat dan simpangan baku pada dua *epoch* yang berbeda. Perhitungan analisis ini dilakukan dengan *software* Matlab 2022.

**III.3.4.1. Uji kesebangunan jaring.** Uji kesebangunan jaring dilakukan untuk mengetahui adanya pergerakan secara umum yaitu terhadap kesesuaian dan kesempurnaan dari jaring tersebut. Tahapan dalam uji kesebangunan jaring sebagai berikut:

1. Menentukan hipotesis awal

$$H_0 : \text{bentuk jaringan tidak mengalami perubahan } (\hat{\sigma}_{0d}^2 = \sigma_{0d}^2)$$

$H_a$  : bentuk jaringan mengalami perubahan ( $\hat{\sigma}_{0d}^2 > \sigma_{0d}^2$ )

2. Menentukan model matematis titik pantau dengan persamaan (II.50). Pada penelitian ini, terdapat 28 titik pantau dan tiga komponen koordinat (X, Y, dan Z). Oleh karena itu, model matematis yang terbentuk terdapat 84 model matematis.
3. Membuat matriks koefisien pengamatan  $U_d$ . Matriks ini berisi turunan pertama dari model matematis terhadap parameter pada kedua *epoch*. Dimensi matriks  $U_d$  pada penelitian ini berukuran (84 x 168).
4. Membuat matriks pergerakan titik pantau ( $d$ ). Matriks ini berisi nilai pergerakan pada setiap komponen koordinat dua *epoch* yang berbeda. Dimensi matriks ini yaitu (84 x 1).
5. Melakukan perhitungan nilai korelat pergerakan ( $K$ ) dengan persamaan (II.51).
6. Melakukan penyusunan matriks kofaktor ( $Q_d$ ) melalui persamaan (II.52).
7. Melakukan perhitungan nilai koreksi pergerakan titik pantau  $V_d$  dan  $\bar{V}_d$  melalui persamaan (II.53) dan (II.54).
8. Melakukan perhitungan varian nilai pergerakan melalui persamaan (II.55) dan (II.56).
9. Menguji kesebangunan jaring menggunakan persamaan (II.57) dengan tingkat kepercayaan 95%. Apabila terjadi penolakan pada  $H_0$  maka perlu dilakukan uji pergeseran titik. Hal ini menandakan adanya perubahan bentuk pada jaring pantau.

III.3.4.2. Uji pergeseran titik. Uji pergeseran titik dilakukan untuk mengetahui titik mana yang mengalami pergeseran. Tahapan dalam uji pergerakan titik sebagai berikut:

1. Menyusun hipotesis yang digunakan pada uji pergerakan titik yaitu:  
 $H_0$ : titik ke- $i$  teridentifikasi tidak mengalami pergerakan.  
 $H_a$ : titik ke- $i$  teridentifikasi mengalami pergerakan.
2. Menetapkan derajat signifikan ( $\alpha_0$ ) menggunakan tingkat kepercayaan 95%.
3. Menentukan nilai batas ( $F_{1-\alpha_0, \infty, f}$ ) dari tabel sebaran *Fisher* dengan  $f$  merupakan persamaan syarat.
4. Melakukan perhitungan nilai  $W_{di}$  pada setiap titik pantau berdasarkan persamaan (II.58) dan (II.59).

5. Melakukan uji hipotesis dengan persamaan (II.59). Adanya penolakan pada  $H_0$  menandakan pergerakan pada titik pantau tersebut.

### III.3.5 Uji signifikansi Pergerakan

Uji signifikansi digunakan untuk mengetahui signifikansi pergerakan titik pantau dalam kurun waktu satu tahun. Data masukan pada uji ini yaitu nilai estimasi parameter pada dua *epoch* yang berbeda. Tahapan dalam uji signifikansi pergerakan sebagai berikut:

1. Menyusun hipotesis yang digunakan:

$$H_0 : X_i - X_{i+1} = 0$$

$$H_a : X_i - X_{i+1} \neq 0$$

2. Menetapkan derajat signifikan ( $\alpha_0$ ) menggunakan tingkat kepercayaan 95%.
3. Menentukan nilai batas ( $t_{f\alpha/2}$ ) dari tabel sebaran *Fisher* dengan  $f$  merupakan persamaan syarat.
4. Melakukan perhitungan nilai  $T$  pada setiap titik pantau berdasarkan persamaan (II.49).
5. Melakukan uji hipotesis dengan persamaan (II.49). Adanya penolakan pada  $H_0$  menandakan pergerakan pada titik pantau tersebut signifikan.

### III.3.5 Pehitungan Besaran dan Arah Kecepatan Pergerakan Titik Pantau

Perhitungan besar nilai dan arah vektor kecepatan dilakukan dengan *software* Matlab 2022. Perhitungan ini dilakukan dengan data pergerakan dalam satu minggu. Data tersebut kemudian dibagi dengan interval waktu pada kedua *epoch* yaitu tujuh hari, sehingga diperoleh nilai kecepatan pergerakan titik pantau dalam sehari. Perhitungan kecepatan untuk bulanan dan tahunan. Data pergerakan yang digunakan merupakan data dari dua *epoch* yang berbeda dengan interval waktu yang telah ditentukan. Tahapan yang dilakukan dalam perhitungan besar dan arah vektor kecepatan pergerakan sebagai berikut:

1. Menghitung besar kecepatan titik pantau melalui persamaan (II.53).
2. Menghitung arah vektor kecepatan pergerakan melalui persamaan (II.55).
3. Melakukan *plotting* vektor kecepatan dengan *software* ArcMap 10.8.

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas mengenai analisis deformasi Bendungan Margatiga di Lampung Timur berdasarkan hasil pengolahan data pengukuran dengan RTS pada 28 titik pantau yang terletak di lereng bendungan. Pengolahan data dilakukan dengan hitung perataan kuadrat terkecil metode parameter. Data yang digunakan berupa sudut ukuran, data jarak datar, dan data jarak miring. Hasil yang didapatkan pada penelitian ini meliputi:

1. Hasil uji statistik.
2. Koordinat dan simpangan baku titik pantau hasil hitungan perataan kuadrat terkecil metode parameter.
3. Besar dan arah pergerakan titik pantau.
4. Hasil analisis deformasi antar dua *epoch*.
5. Kecepatan pergerakan.
6. Signifikansi pergerakan bendungan.
7. Evaluasi kestabilan lereng bendungan.

#### IV.1 Hasil Uji Statistik

Tahapan yang dilakukan setelah perataan yaitu uji statistik. Uji statistik ini meliputi uji global dan data *snooping*. Uji global pada penelitian ini dilakukan menggunakan tabel *Fisher* yang terdapat pada Lampiran L dengan tingkat kepercayaan 95%. Terdapat 112 data ukuran ( $n$ ) dan 84 parameter ( $u$ ) sehingga nilai derajat kebebasan yang digunakan adalah  $n - u = 112 - 84 = 28$ . Varian apriori yang digunakan sebesar 0,1. Hal ini berdasarkan pada ketelitian alat yang digunakan yaitu 0,1". Hipotesis awal uji global ini menyatakan pengukuran tidak mengandung kesalahan sistematis maupun *blunder*. Uji dilakukan dengan membandingkan varian aposteori dan varian apriori dari unit bobot dengan nilai distribusi tabel *Fisher*.  $H_0$  diterima apabila  $\frac{\hat{\sigma}_o^2}{\sigma_o^2} < F_{1-\alpha, r, \infty}$  yang mengindikasikan pengukuran tidak mengandung kesalahan acak. Apabila  $H_0$  ditolak artinya pengukuran mengandung kesalahan kasar sehingga perlu dilakukan uji statistik selanjutnya yaitu Data *snooping*.

##### IV.1.1 Hasil Uji Statistik Berdasarkan Data Juli 2023

Uji Statistik yang dilakukan berdasarkan data Juli 2023 ini terdapat perbedaan pada *epoch* 5. Jumlah titik yang digunakan hanya 27 karena adanya kekosongan data di titik P026

pada *epoch* 5. Hal ini berpengaruh terhadap nilai derajat kebebasan, nilai uji, dan nilai tabel *Fisher*. Meskipun begitu, hasil uji statistik dinyatakan diterima. Tabel IV.2 menunjukkan nilai uji lebih kecil daripada nilai tabel *Fishernya*. Hal ini mengindikasikan pengukuran tidak mengandung kesalahan tak acak. Oleh karena itu, tidak perlu dilakukan data *snooping*. Tabel IV.2 merupakan hasil uji global yang dilakukan pada kelima *epochnya* berdasarkan pada data Juli 2023.

Tabel IV.1 Hasil uji global berdasarkan data bulan Juli 2023

<i>Epoch</i>	<i>Derajat kebebasan</i>	Varian Apriori	Varian Aposteori	Nilai Uji	Nilai Tabel <i>Fisher</i> ( $\alpha = 0,05$ )	Hasil Uji
1	28	0,1	0,049	0,488	1,48	Diterima
2	28	0,1	0,049	0,488	1,48	Diterima
3	28	0,1	0,049	0,488	1,48	Diterima
4	28	0,1	0,059	0,588	1,48	Diterima
5	27	0,1	0,045	0,451	1,49	Diterima

#### IV.1.1 Hasil Uji Statistik Berdasarkan Data Maret 2024

Uji statistik berdasarkan data Maret 2024 ini juga memiliki perbedaan jumlah titik pantau pada *epoch* 3 s.d. *epoch* 5. Hanya terdapat 27 titik yang digunakan. Hal ini dikarenakan terdapat kekosongan data pada titik P030 dalam tiga *epoch* berturut-turut. Perbedaan jumlah titik tersebut memberikan dampak terhadap nilai derajat kebebasan, nilai uji, dan nilai tabel *Fisher*. Meskipun begitu, hasil uji statistik dinyatakan diterima. Tabel IV.3 menunjukkan nilai uji lebih kecil daripada nilai tabel *Fishernya*. Hal ini mengindikasikan hasil pengukuran tidak mengandung kesalahan *blunder*. Oleh karena itu, tidak perlu dilakukan data *snooping*. Tabel IV.2 merupakan hasil uji global yang dilakukan pada kelima *epochnya* berdasarkan pada data Maret 2024.

Tabel IV.2 Hasil uji global berdasarkan data Bulan Maret 2024

Epoch	Derajat kebebasan	Varian Apriori	Varian Aposteori	Nilai Uji	Nilai Tabel <i>Fisher</i> ( $\alpha = 0,05$ )	Hasil Uji
1	28	0,1	0,049	0,488	1,48	Diterima
2	28	0,1	0,049	0,491	1,48	Diterima
3	28	0,1	0,043	0,435	1,49	Diterima
4	28	0,1	0,048	0,483	1,49	Diterima
5	27	0,1	0,051	0,507	1,49	Diterima

## IV.2 Koordinat dan Simpangan Baku Titik Pantau Hasil Hitung Perataan

Sub bab ini disajikan koordinat dan simpangan baku titik pantau hasil pengolahan data dengan HKT metode parameter pada masing-masing *epoch*. Penelitian ini terbagi menjadi lima *epoch* yang berbeda dengan rentang waktu akuisisi pada pukul 08.00-10.00 WIB. Pengamatan pada 2023, kelima *epoch* tersebut yaitu:

1. *Epoch* 1 pada tanggal 7 Juli 2023
2. *Epoch* 2 pada tanggal 14 Juli 2023
3. *Epoch* 3 pada tanggal 21 Juli 2023
4. *Epoch* 4 pada tanggal 28 Juli 2023
5. *Epoch* 5 pada tanggal 4 Agustus 2023

Pengamatan pada tahun 2024, sebagai berikut:

1. *Epoch* 1 pada tanggal 7 Maret 2024
2. *Epoch* 2 pada tanggal 14 Maret 2024
3. *Epoch* 3 pada tanggal 21 Maret 2024
4. *Epoch* 4 pada tanggal 28 Maret 2024
5. *Epoch* 5 pada tanggal 4 April 2024

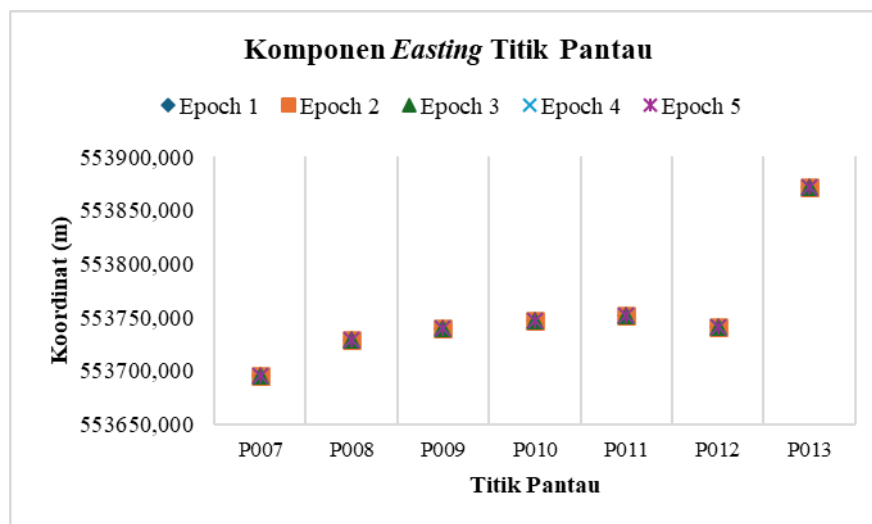
HKT metode parameter ini menggunakan data masukan berupa data ukuran sudut horizontal, data ukuran jarak horizontal, data ukuran jarak miring, dan data ukuran sudut vertikal pada 28 titik pantau. Data ukuran tersebut dapat dilihat pada Lampiran A. Perhitungan dilakukan menggunakan *software* Matlab 2022 dengan *script* yang terlampir pada Lampiran I. Penyajian nilai koordinat pada penelitian ini menggunakan sistem koordinat WGS UTM zone 48S. Lampiran C merupakan hasil nilai koordinat dan simpangan baku pada setiap *epoch*. Dalam melakukan analisis, hasil perhitungan tersebut ditampilkan dalam bentuk *plotting* titik pada setiap komponen *easting*, *northing*, dan *height* pada masing-masing *epoch*.

Penelitian ini terdapat 28 titik pantau yang dikelompokkan menjadi tiga bagian yaitu bagian satu, bagian dua, dan bagian tiga. Bagian satu terletak pada utara bendungan yang terdiri atas titik P007, P008, P009, P010, P011, P012, dan P013. Bagian dua terletak pada selatan bendungan, terdiri atas titik P002, P003, P108, P019, P020, P021, P022, P026, P027, P028, P020, dan P030 dan bagian tiga terletak pada tengah bendungan yaitu titik P004, P005, P014, P015, P016, P017, P023, P024, dan P025. Pengelompokkan bagian titik pantau ini didasarkan pada persamaan pengamatan yang digunakan karena sudut tangen memiliki

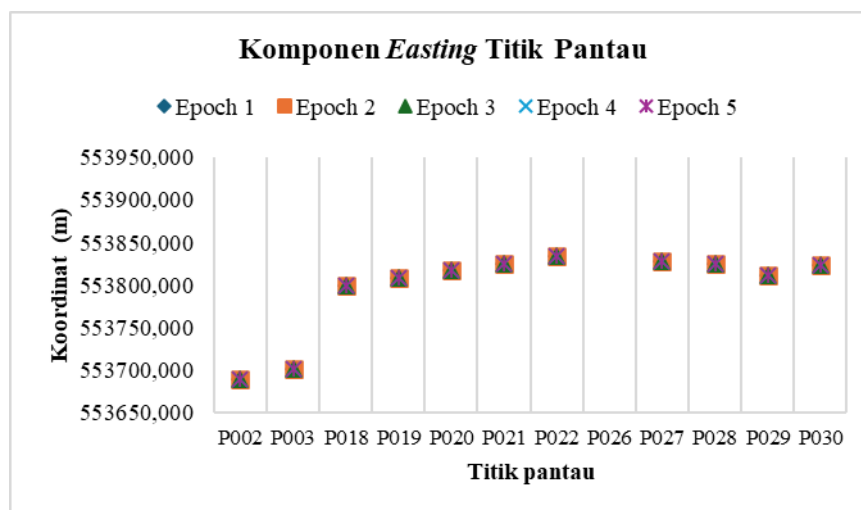
pembagian kuadran yang berbeda dengan sinus dan cosinus. Tangen merupakan rasio sinus terhadap kosinus ( $\tan = \sin/\cos$ ). Positif di kuadran I dan III, negatif di kuadran II dan IV.

#### IV.2.1 Hasil Koordinat dan Simpangan Baku Titik Pantau Berdasarkan Data Bulan Juli 2023

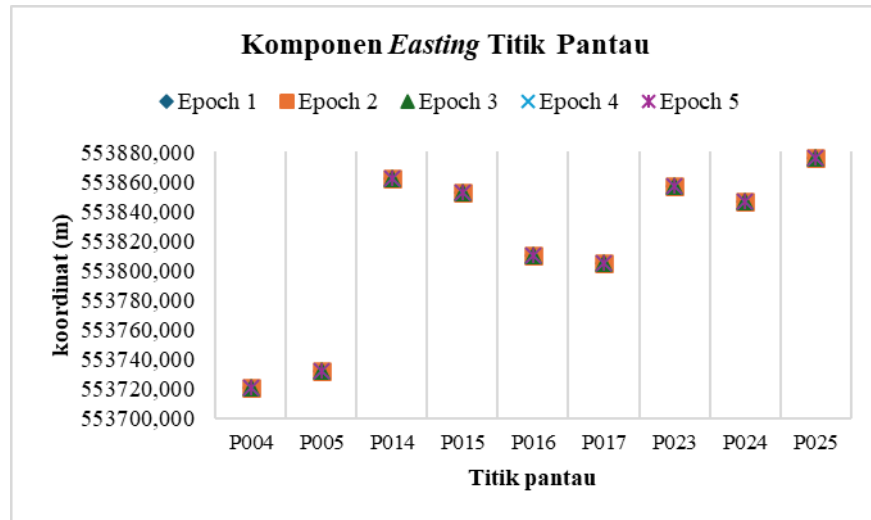
Pada hasil koordinat dan simpangan baku berdasarkan data bulan Juli ini, titik P026 tidak dilakukan perekaman pada *epoch* 4 sehingga mengakibatkan kekosongan data. Hal ini membuat grafik koordinat dan simpangan baku tidak tervisualisasikan dengan baik. Estimasi koordinat titik-titik pantau masing-masing *epoch* untuk tahun 2023 ditampilkan pada Gambar IV.1 s.d. IV.9, sementara ketelitian titik-titik pantau ditunjukkan pada Gambar IV.10 s.d. IV.12.



Gambar IV.1 Grafik komponen *easting* Juli 2023

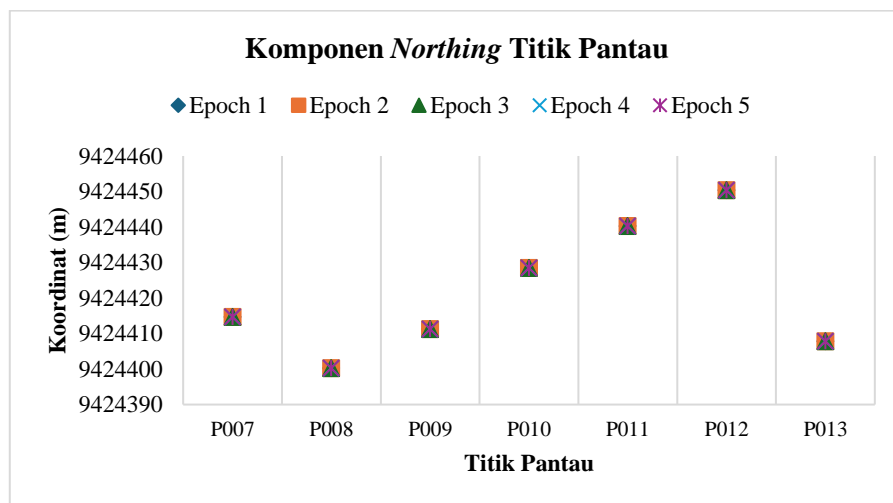


Gambar IV.2 Grafik komponen *easting* Juli 2023



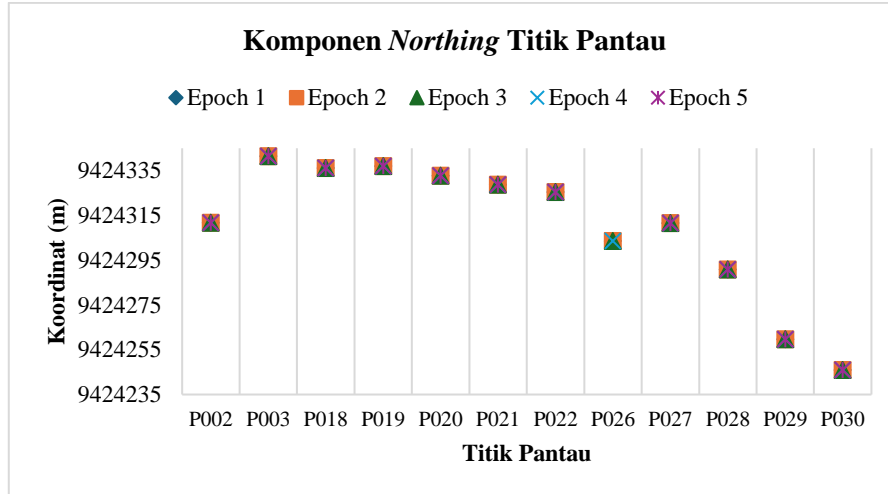
Gambar IV.3 Grafik komponen *easting* Juli 2023

Gambar IV.1 s.d. IV.3 menunjukkan nilai komponen *easting* masing-masing titik pada lima *epoch*. Nilai komponen *easting* tersebut divisualisasikan dalam simbol yang berbeda-beda sesuai dengan *epoch*nya. Berdasarkan gambar tersebut, dapat dilihat bahwa kelima simbol saling bertumpukan satu sama lain. Hal ini menandakan bahwa nilai koordinat estimasi pada suatu titik pantau tersebut dari *epoch* ke *epoch* tidak jauh berbeda. Perbedaan nilai komponen *easting* pada setiap *epoch*nya hanya berkisar *sub-milimeter* sehingga perubahan nilai komponen *easting* tersebut tidak terlihat begitu jelas pada grafik.

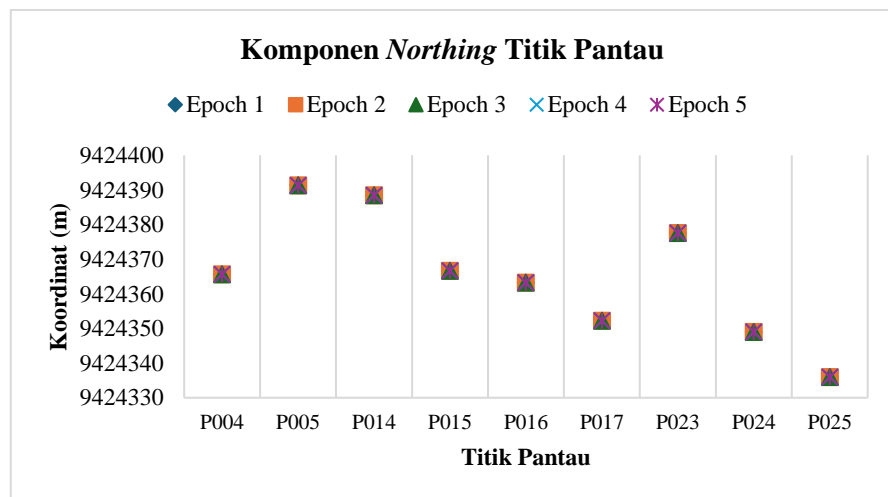


Gambar IV.4 Grafik komponen *northing* Juli 2023



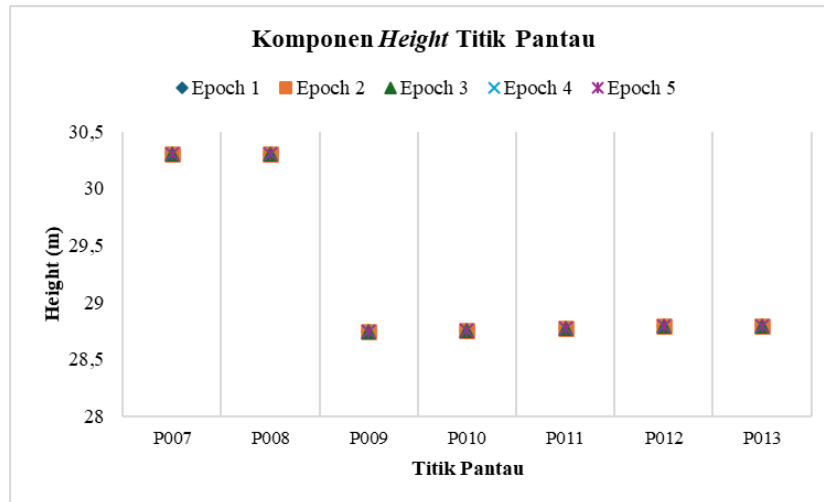


Gambar IV.5 Grafik komponen *northing* Juli 2023

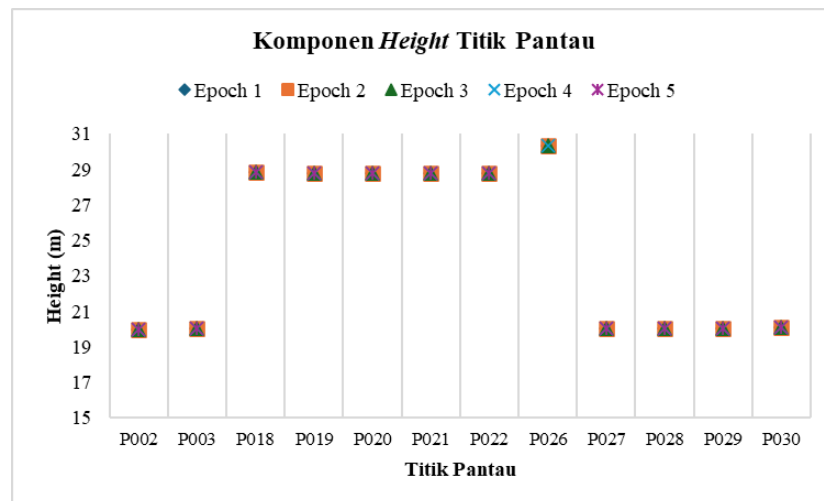


Gambar IV.6 Grafik komponen *northing* Juli 2023

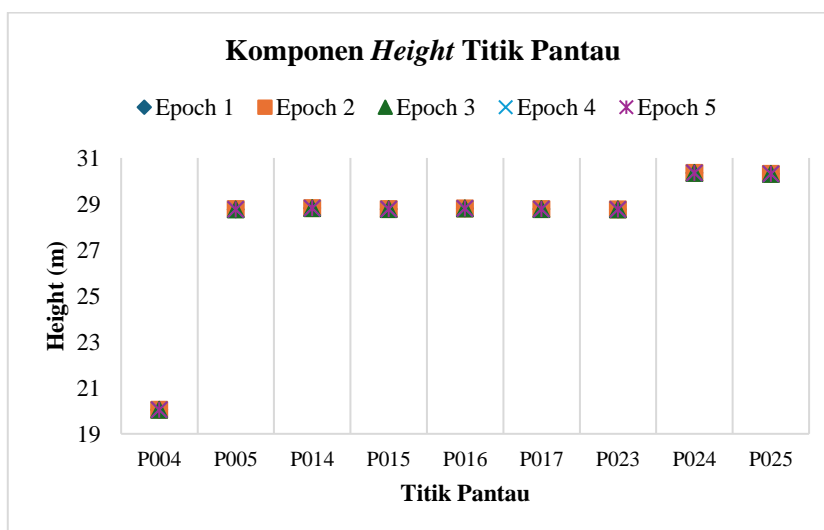
Nilai komponen *northing* titik pantau pada lima *epoch* ditampilkan pada Gambar IV.4 s.d. IV.6. Setiap *epoch* ditandai dengan simbol yang berbeda. Terlihat simbol tersebut saling tumpang tindih, yang menunjukkan bahwa nilai komponen *northing* hampir sama pada setiap *epoch*nya. Perbedaan nilai komponen *northing* hanya sebesar skala *sub-milimeter*, sehingga perubahan pada grafik tidak tampak jelas. Hal ini menunjukkan titik tersebut tidak mengalami pergeseran yang berarti.



Gambar IV.7 Grafik komponen *height* Juli 2023



Gambar IV.8 Grafik komponen *height* Juli 2023



Gambar IV.9 Grafik komponen *height* Juli 2023

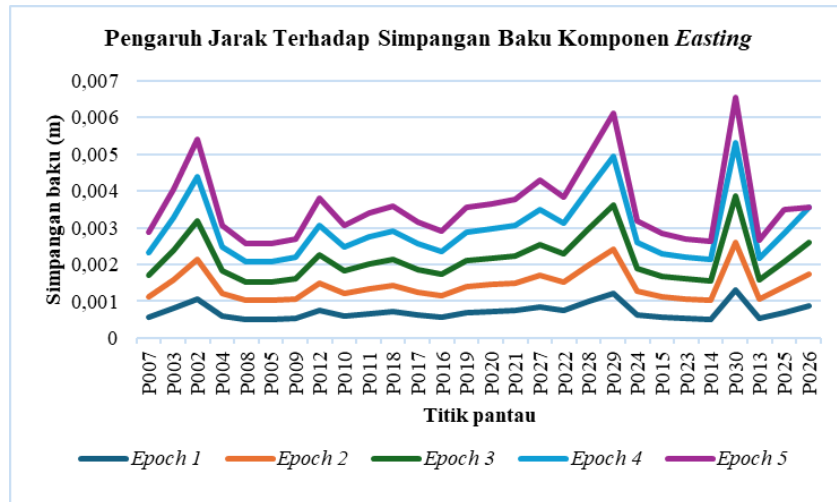
Dalam Gambar IV.7 hingga IV.9, nilai komponen *height* titik pantau pada lima *epoch* tidak menunjukkan perubahan yang besar. Terlihat simbol komponen *height* setiap *epoch* pada grafik saling bertumpukan. Perubahan yang terjadi hanya berkisar pada fraksi *sub-milimeter*. Grafik tampak seolah tidak mengalami perubahan.

Secara umum, nilai ketelitian estimasi posisi titik pantau berkisar antara 0,48 s.d. 3,149 mm. Nilai simpangan baku 28 titik pantau pada masing-masing *epoch* ditampilkan dalam grafik setiap komponen koordinatnya. Berdasarkan prinsip HKT, titik pantau yang memiliki nilai simpangan baku paling kecil yaitu titik dengan jarak terdekat dari titik referensi. Sebaliknya, yang terjauh dari titik referensi memiliki nilai simpangan baku paling besar. Dalam hal ini, nilai simpangan baku setiap titik pantau pada masing-masing *epoch* dipengaruhi oleh jarak dari titik pantau ke titik referensi. Tabel IV.1 menampilkan jarak masing-masing titik pantau ke titik referensi. Pada tabel tersebut data jarak yang digunakan merupakan data jarak miring. Hal ini dikarenakan jarak miring sudah mewakili ketiga posisi titik komponen *easting*, *northing*, dan *height*.

Tabel IV.3 Jarak miring titik pantau

Titik	Jarak Miring (m)	Titik	Jarak Miring (m)	Titik	Jarak Miring (m)
P002	134,553	P012	166,024	P022	257,839
P003	129,991	P013	287,155	P023	272,190
P004	139,869	P014	276,729	P024	264,947
P005	146,680	P015	268,673	P025	296,777
P007	112,864	P016	227,088	P026	376,319
P008	144,009	P017	224,120	P027	257,105
P009	156,088	P018	222,205	P028	262,587
P010	166,252	P019	229,956	P029	264,663
P011	173,241	P020	240,382	P030	281,856
		P021	249,184		

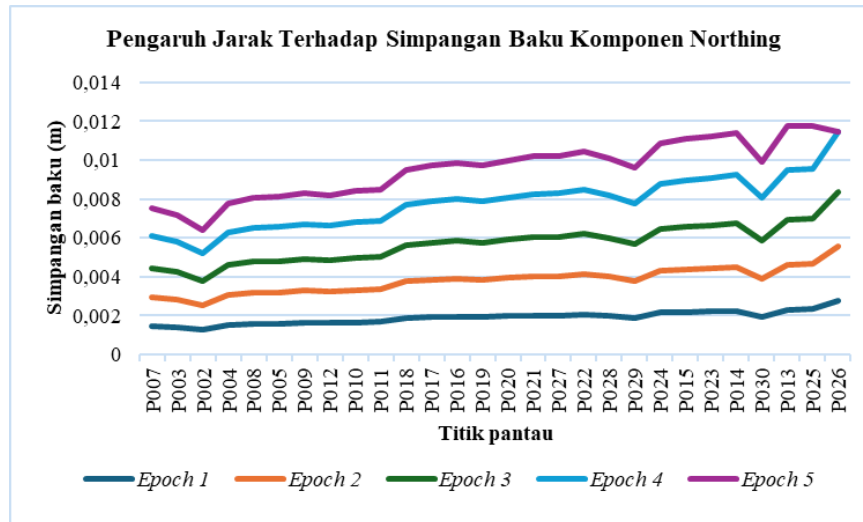
Tabel IV.1 menunjukkan jarak setiap titik pantau terhadap titik berdiri alat berbeda-beda. Titik pantau terdekat dari titik berdiri alat yaitu titik P007 dengan jarak 112,864 m. Titik pantau terjauh dari titik berdiri alat yaitu titik P026 dengan jarak 376,319 m. Pengaruh jarak miring terhadap nilai simpangan titik pantau disajikan pada Gambar IV.10 s.d. IV.12.



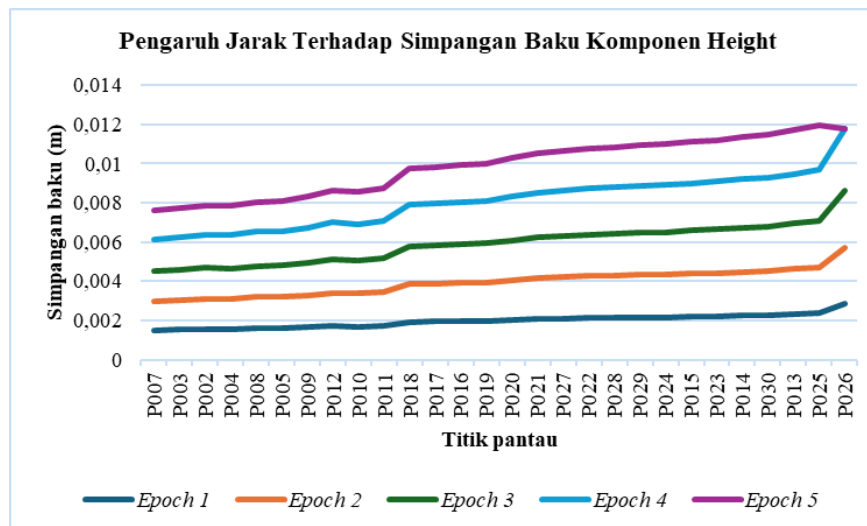
Gambar IV.10 Grafik pengaruh jarak terhadap nilai ketelitian komponen *easting*

Gambar IV.10 menunjukkan grafik pengaruh jarak terhadap ketelitian komponen *easting*, di mana jarak titik pantau telah diurutkan dari yang terdekat ke yang terjauh. Pola yang terlihat dari grafik tersebut tidak merepresentasikan prinsip HKT, karena terdapat kenaikan pola pada jarak yang dekat dan penurunan pada jarak yang jauh. Simpangan baku terbesar terlihat pada titik P030 pada *epoch* 4 dengan jarak 281,856 m sebesar 0,129 mm, sedangkan simpangan baku terkecil yaitu titik P005 pada *epoch* 4 dengan jarak 141,680 m sebesar 0,49 mm. Hal ini mungkin terjadi karena pengaruh posisi alat terhadap titik pantau. Titik pantau yang posisinya sejajar dengan sumbu X titik berdiri alat memiliki nilai ketelitian yang relatif kecil dibandingkan dengan titik pantau yang tidak sejajar, meskipun jaraknya lebih jauh. Titik P007 berjarak lebih dekat dengan titik berdiri alat, tetapi posisi titik P005 sejajar dengan sumbu X titik berdiri alat. Hal ini menjadikan titik P005 memiliki nilai simpangan baku terkecil. Titik P026 berada sejajar dengan sumbu X titik referensi sehingga titik P026 memiliki simpangan baku yang lebih kecil dari titik P030.

Kambar IV.11 menunjukkan pola grafik pengaruh jarak terhadap nilai simpangan baku komponen *northing* lebih representatif terhadap prinsip HKT dibandingkan komponen *easting*. Masih terdapat pola menurun pada titik-titik tertentu yaitu pada titik P002, P011, P029, dan P030. Nilai simpangan baku terbesar berada di titik P026 dengan jarak 376,319 m pada *epoch* 4 dengan nilai 3,07 mm dan nilai simpangan baku terkecil berada di titik P002 dengan jarak 134,553 m pada *epoch* 5 dengan nilai 1,22 mm. Hal ini mungkin terjadi karena titik P002, P011, P029, dan P030 memiliki posisi tidak sejajar dengan sumbu X titik berdiri alat.



Gambar IV.11 Grafik pengaruh jarak terhadap nilai simpangan baku komponen *northing*

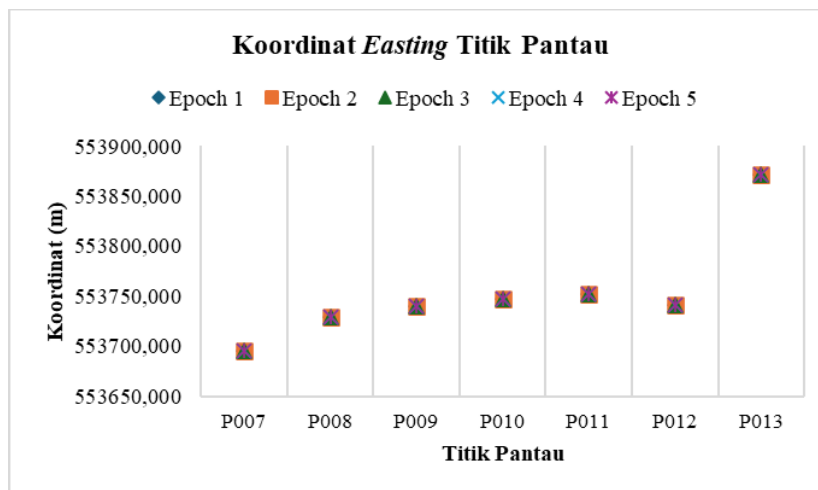


Gambar IV.12 Grafik pengaruh jarak terhadap nilai simpangan baku komponen Z

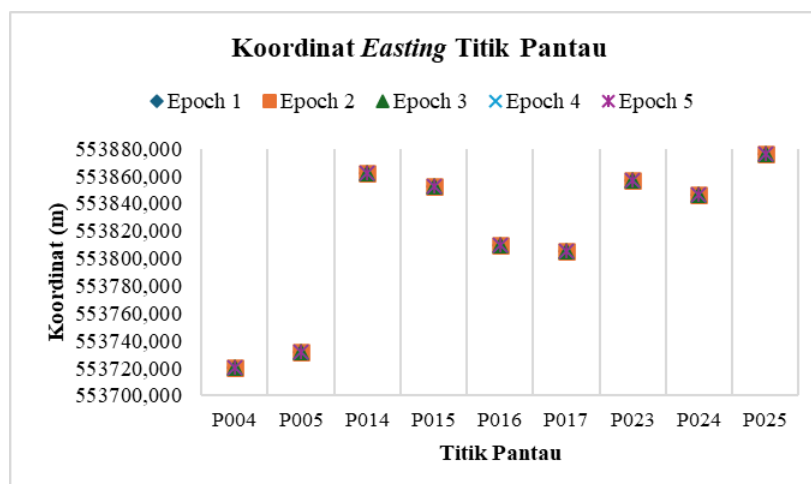
Gambar IV.12 menampilkan pola simpangan baku sudah sesuai dengan prinsip HKT. Nilai simpangan baku meningkat seiring dengan bertambahnya jarak titik pantau dari titik berdiri alat. Nilai simpangan baku terbesar terdapat pada titik P026 *epoch* 4 dengan jarak 376,319 m sebesar 3,15 mm dan nilai simpangan baku terkecil pada titik P007 *epoch* 5 dengan jarak 112,864 m sebesar 1,45 mm. Titik P026 merupakan titik terjauh dan P007 merupakan titik terdekat dari titik referensi.

## IV.2.2 Hasil Koordinat dan Simpangan Baku Titik Pantau Berdasarkan Data Bulan Maret 2024

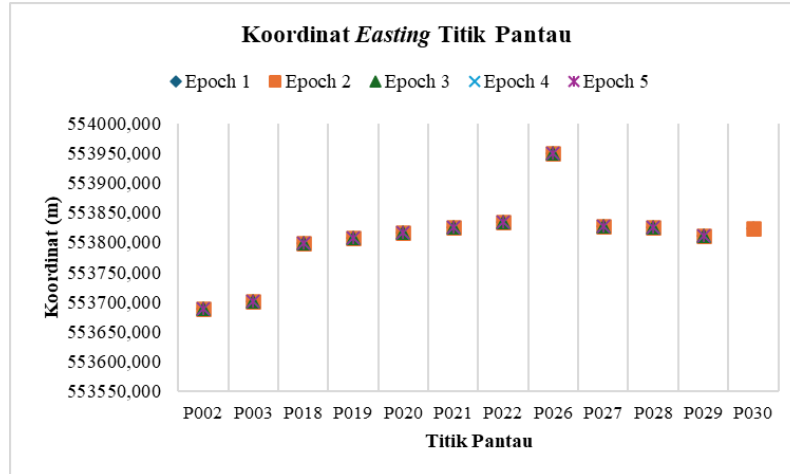
Hasil koordinat dan simpangan baku berdasarkan data Bulan Maret ini, terdapat data titik yaitu titik P030 yang tidak dilakukan perekaman pada tiga *epoch* yaitu *epoch* 3,4, dan 5. Meskipun begitu, tetap dilakukan perhitungan karena berdasarkan hasil *filtering* data, bulan Maret memiliki data yang lebih lengkap dibandingkan dengan data pada bulan sebelumnya dan setelahnya pada tahun 2024. Estimasi koordinat titik-titik pantau masing-masing *epoch* untuk tahun 2024 ditampilkan pada Gambar IV.13 s.d. IV.21, sementara ketelitian atau simpangan baku titik-titik pantau ditunjukkan pada Gambar IV.22 s.d. IV.24.



Gambar IV.13 Grafik komponen *easting* Maret 2024

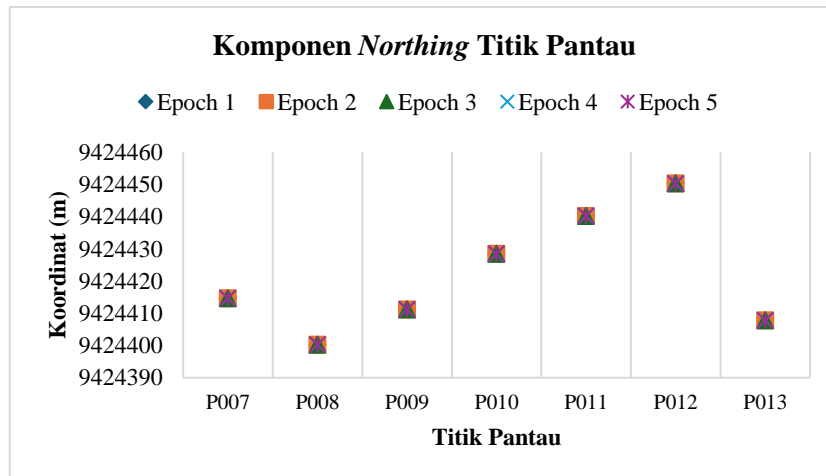


Gambar IV.14 Grafik komponen *easting* Maret 2024

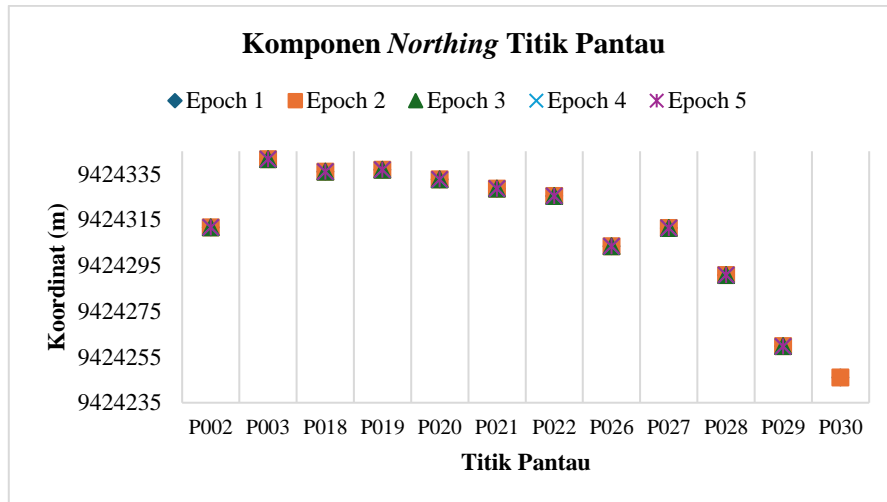


Gambar IV.15 Grafik komponen *easting* Maret 2024

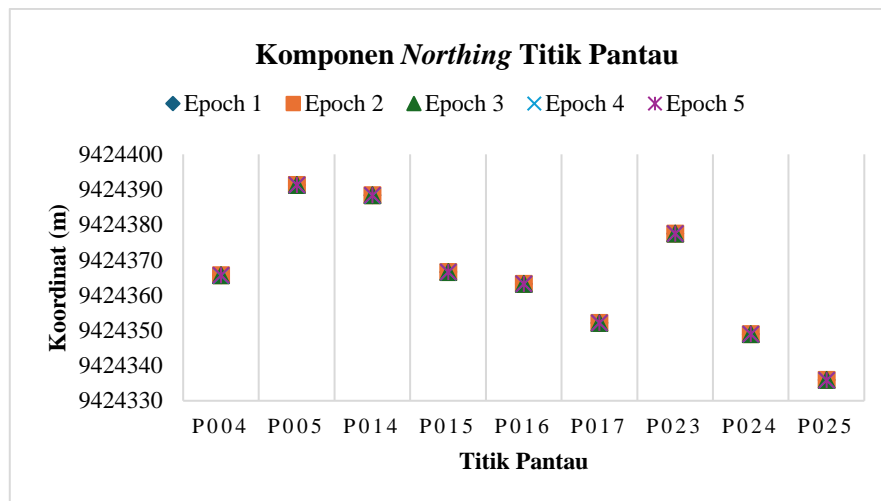
Nilai komponen *easting* 28 titik pantau pada Gambar IV.13 s.d. IV.15 dalam *epoch* 1 s.d 5 divisualisasikan dalam simbol yang berbeda-beda. Grafik tersebut menunjukkan tidak ada perubahan yang besar pada nilai komponen *easting* dari *epoch* ke *epoch*. Kelima simbol tersebut berada pada satu lokasi yang sama. Perubahan nilai komponen *easting* hanya berada pada fraksi milimeter sehingga nilai perbedaannya tidak terlihat jelas pada grafik.



Gambar IV.16 Grafik komponen *northing* Maret 2024



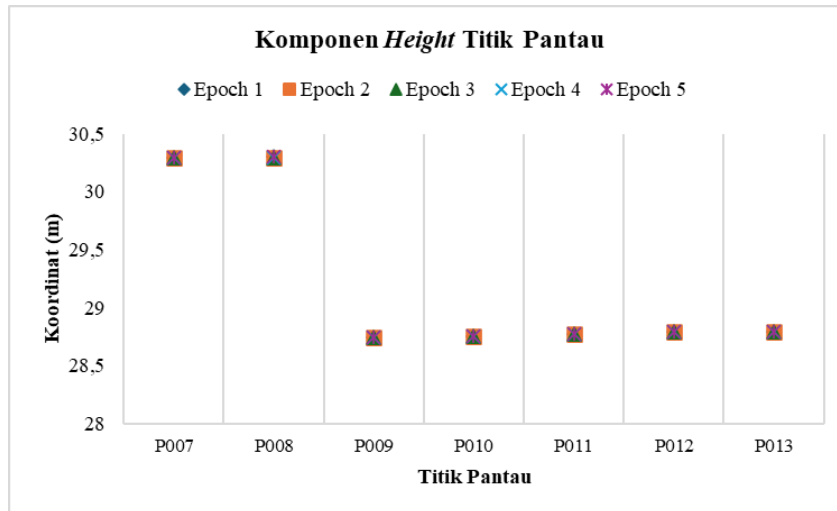
Gambar IV.17 Grafik komponen *northing* Maret 2024



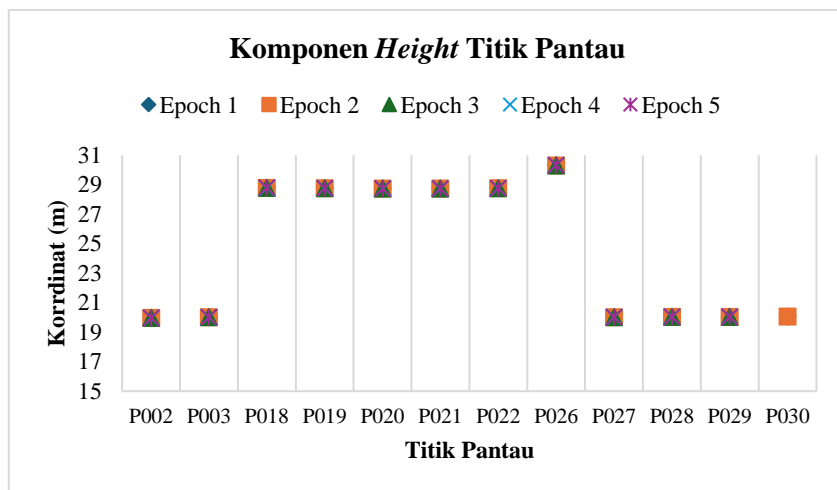
Gambar IV.18 Grafik komponen *northing* Maret 2024

Gambar IV.16 s.d IV.18 menunjukkan nilai komponen *northing* titik pantau pada kelima *epoch*. Nilai komponen *northing* pada 28 titik pantau tersebut tidak menunjukkan adanya perubahan nilai yang besar. Hal tersebut dapat dilihat dari *plotting* simbol komponen *northing* setiap *epoch*nya yang berada pada lokasi yang sama. Terdapat sedikit perbedaan tetapi hanya pada fraksi milimeter sehingga perbedaannya tidak terlihat jelas pada gambar.

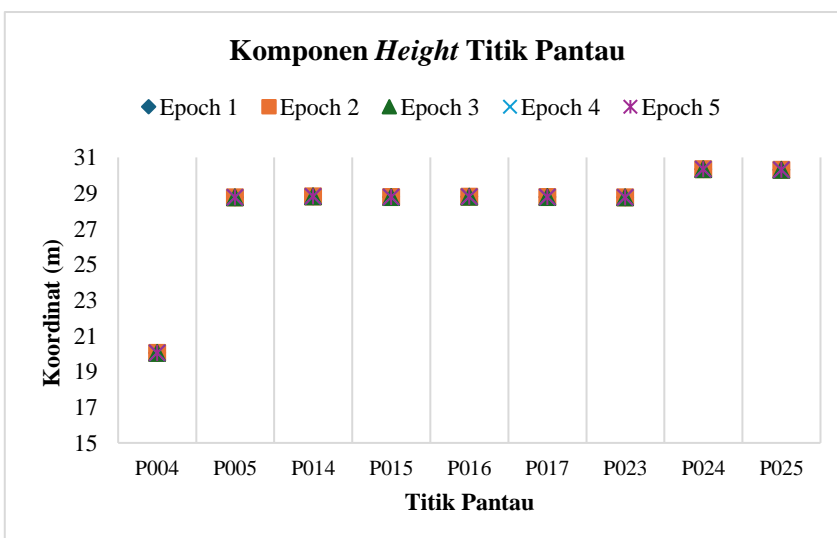




Gambar IV.19 Grafik komponen *height* Maret 2024

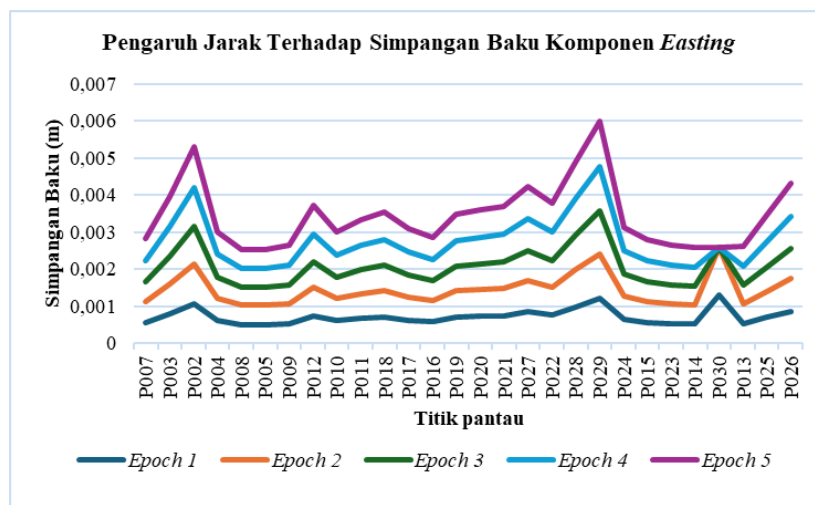


Gambar IV.20 Grafik komponen *height* Maret 2024



Gambar IV.21 Grafik komponen *height* Maret 2024

Berdasarkan Gambar IV.19 s.d. IV.21, nilai komponen *height* pada 28 titik pantau kelima *epoch* tersebut tidak menunjukkan adanya perubahan nilai yang besar. Perubahan tersebut hanya mencapai fraksi milimeter sehingga secara visual pola grafik yang terbentuk seperti tidak mengalami perubahan. Pola yang terbentuk tersebut seragam dan hampir sama pada setiap titiknnya. Artinya tidak ada titik pantau yang mengalami perubahan yang besar. Terdapat satu titik pantau yang tidak dilakukan perekaman data pada *epoch* 3 s.d. *epoch* 5 yaitu titik P030 sehingga hanya terlihat perubahan nilai pada dua *epoch* saja. Terlihat bahwa pada *epoch* 2 terdapat perubahan nilai yang cukup besar yang ditunjukkan dengan simbol kotak berwarna oranye bergeser ke atas.

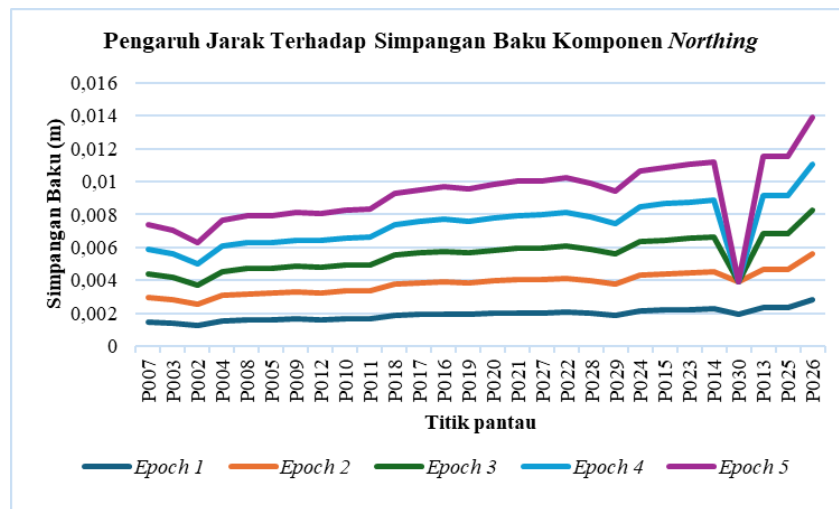


Gambar IV.22 Pengaruh jarak terhadap simpangan baku komponen *easting*

Berdasarkan Gambar IV.22, nilai simpangan baku terbesar terletak pada titik P030 dengan jarak 281,856 m pada *epoch* 2 sebesar 1,3 mm dan nilai simpangan baku terkecil pada titik P005 dengan jarak 141,680 m sebesar 1,2 mm pada *epoch* 3. Namun, dari *epoch* 3 s.d. *epoch* 5 terdapat perbedaan nilai simpangan baku terbesarnya. Kondisi ini terjadi karena adanya kekosongan data pada titik P030 yang mengakibatkan perbedaan nilai simpangan baku terbesar pada *epoch* 3 s.d. *epoch* 5. Titik dengan simpangan baku terbesar terletak pada titik P029 dengan jarak 264,663 m pada *epoch* 5 sebesar 1,23mm.

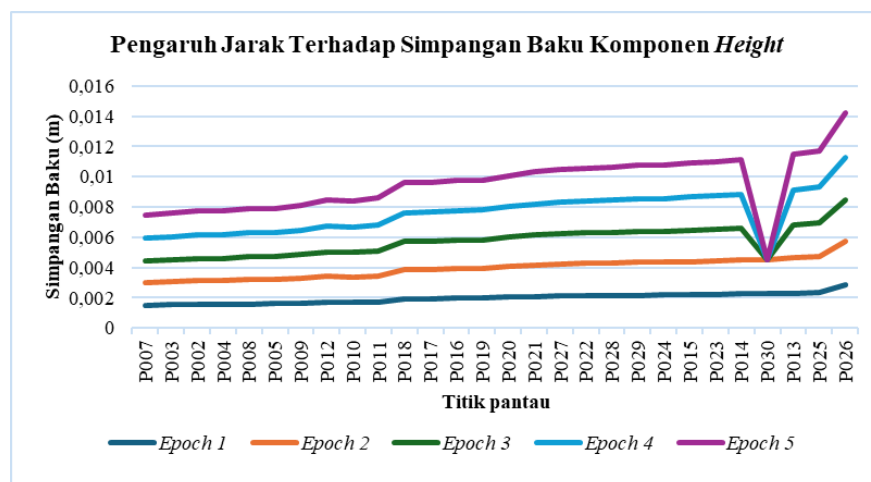
Pola grafik yang terbentuk belum merepresentasikan prinsip HKT. Pola tersebut masih tidak beraturan, terdapat kenaikan pada jarak dekat dan terdapat penurunan pada jarak yang jauh. Titik P030 dan P029 bukan merupakan titik dengan jarak terjauh. Titik P005 bukan merupakan titik dengan jarak terdekat dari titik referensi. Hal ini mungkin terjadi karena pengaruh posisi titik P005 yang sejajar dengan sumbu X titik berdiri alat sehingga memiliki nilai simpangan baku paling kecil. Titik P026 berada sejajar dengan sumbu X titik

berdiri alat. Oleh karena itu, titik P026 bukan yang memiliki nilai simpangan baku terbesar. Dengan demikian, posisi alat terhadap titik pantau sangat berpengaruh.



Gambar IV.23 Pengaruh jarak terhadap simpangan baku komponen *Northing*

Gambar IV.23 terlihat bahwa simpangan baku terbesar terdapat pada titik P026 dengan jarak 376,319 m pada *epoch* 3 sebesar 2,64 mm dan nilai terkecil pada titik P002 dengan jarak 134,553 m pada *epoch* 3 sebesar 1,2 mm. Pola simpangan baku yang terbentuk hampir sesuai dengan prinsip hitungan kuadrat terkecil. Namun, masih terdapat pola penurunan pada titik terjauh yaitu titik P029 dan P030. Titik P002 bukan merupakan titik dengan jarak terdekat dari titik referensi. Hal ini mungkin terjadi karena pengaruh posisi alat terhadap titik pantau. Titik P002, P029, dan P030 berada tidak sejajar dengan sumbu X titik berdiri alat sehingga memiliki nilai simpangan baku yang relatif kecil meskipun dengan jarak yang cukup jauh dari titik berdiri alat.



Gambar IV.24 Pengaruh jarak terhadap simpangan baku komponen *height*

Gambar IV.24 terlihat bahwa simpangan baku terbesar terdapat pada jarak 376,319 m atau titik P026 pada *epoch* 3 dengan nilai 2,708 mm dan nilai terkecil pada jarak 112,864 m atau titik P007 pada *epoch* 3 dengan nilai 1,419 m. Pola simpangan baku yang terbentuk pada grafik ini sesuai dengan prinsip HKT, di mana nilai simpangan baku terus meningkat beriringan dengan meningkatnya jarak titik pantau. Titik P026 merupakan titik terjauh dan P007 merupakan titik terdekat dari titik referensi. Grafik dengan pola menurun pada titik P030 di *epoch* 3 s.d. 5 terjadi karena adanya kekosongan data pada *epoch* tersebut.

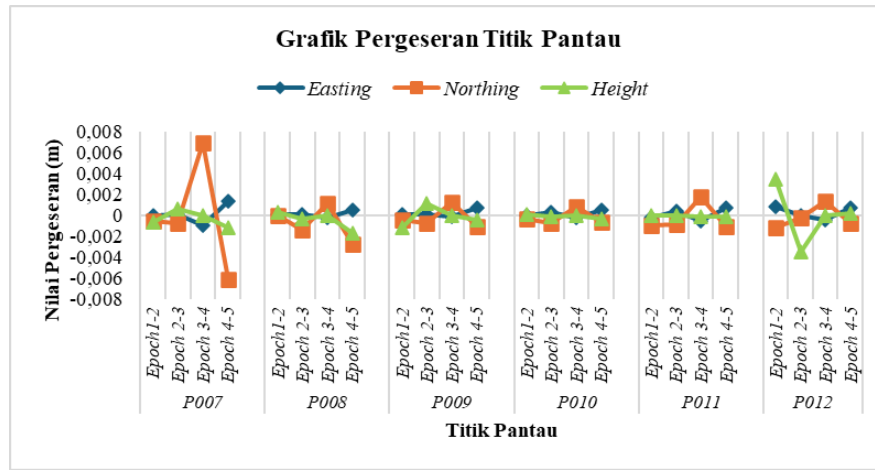
### IV.3 Besar dan Arah Pergerakan Titik Pantau

Perhitungan besar dan arah pergerakan titik pantau pada sub bab ini dilakukan pada *software* Matlab 2022. *Script* yang digunakan dapat dilihat pada Lampiran J. Pergerakan dibedakan menjadi dua yaitu pergerakan secara horizontal dan vertikal. Nilai besar pergerakan disajikan dalam bentuk grafik sementara arah pergerakannya disajikan dalam vektor. Perhitungan besar dan arah pergerakan ini menggunakan interval *epoch* sebagai berikut:

1. *Epoch* 1 s.d. 2
2. *Epoch* 2 s.d. 3
3. *Epoch* 3 s.d. 4
4. *Epoch* 4 s.d. 5
5. *Epoch* 1 s.d. 5

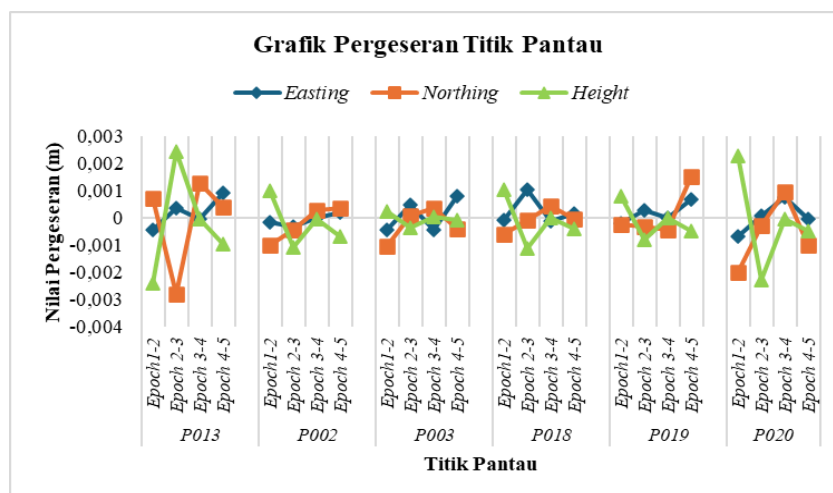
#### IV.3.1 Besar Pergerakan Titik Pantau Berdasarkan Data Juli 2023

Besar nilai pergerakan titik pantau didapatkan dengan hitung selisih nilai estimasi koordinat hasil HKT pada interval *epoch*. Hasil perhitungan ditampilkan dalam bentuk tabel pada Lampiran E. Visualisasi nilai pergerakan titik pantau antar interval *epoch* disajikan dalam bentuk grafik. Grafik tersebut berisi besar nilai pergerakan komponen horizontal dan vertikalnya. Seperti yang diketahui bahwa komponen horizontal memiliki dua sumbu yaitu sumbu X dan Y. Oleh karena itu, pada grafik ini disajikan grafik besar nilai pergerakan pada setiap komponen *easting*, *northing*, dan *height* untuk setiap titik dengan interval *epoch*nya. Pergerakan bendungan ini memiliki batas maksimum yaitu 5 mm ke arah sumbu positif dan 5 mm ke arah sumbu negatif. Hal ini berdasarkan pada syarat akurasi survei menurut US Army Corps Engineer (2018) yaitu sebesar  $\pm 5$  mm. Apabila pergerakan melebihi batas maksimum, maka titik tersebut dapat dinyatakan mengalami pergerakan secara signifikan.



Gambar IV.25 Grafik pergeseran titik pantau Juli 2023

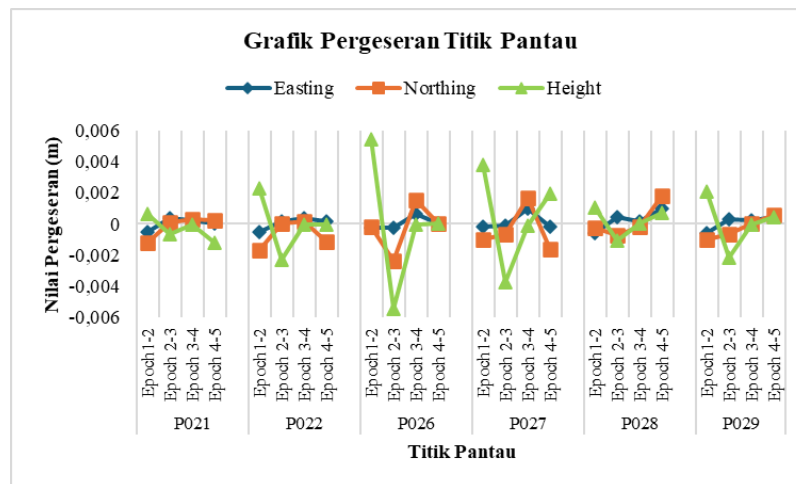
Gambar IV.25 menunjukkan grafik pergerakan pada titik pantau P007, P008, P009, P010, P011, dan P012. Grafik tersebut dapat dilihat bahwa pola pergerakan setiap titik pantau cenderung bervariasi pada setiap interval *epoch*nya. Terdapat pergerakan ke arah sumbu positif dan sumbu negatif. Secara umum, besar pergerakan titik pantau kurang dari batas maksimum yaitu 5 mm ke arah sumbu positif dan ke arah sumbu negatif. Namun, terdapat satu titik yang mengalami pergerakan cukup besar yaitu titik P007 sebesar 0,007 mm pada interval *epoch* 3 s.d. 4 ke arah sumbu positif dan ke arah sumbu negatif pada *epoch* 4 s.d. 5 sebesar 0,006 mm. Komponen *northing* pada titik P007 mengalami pergerakan yang cukup signifikan. Meskipun begitu, nilai pergerakannya hanya pada fraksi milimeter.



Gambar IV.26 Grafik pergeseran titik pantau Juli 2023

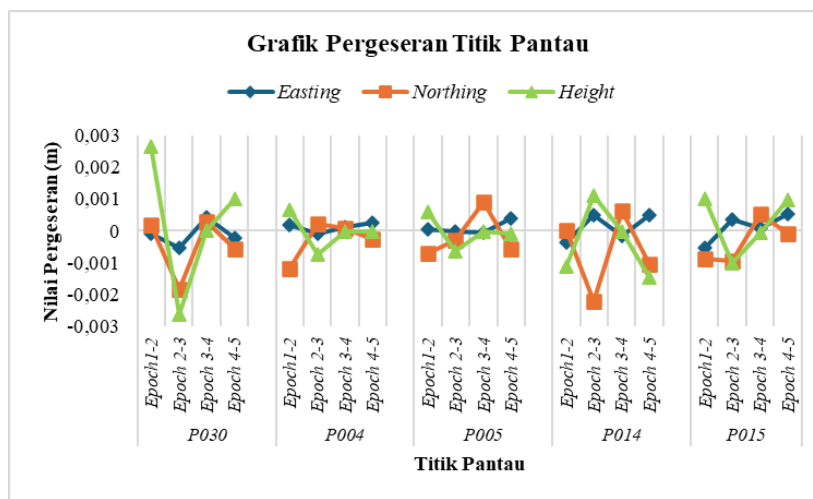
Grafik pergerakan pada titik pantau P013, P002, P003, P018, P019, dan P020 ditunjukkan pada Gambar IV.26. Secara umum, pola pergerakan titik pantau pada setiap interval *epoch*nya cenderung bervariasi dengan pergerakan ke arah sumbu positif dan ke arah

sumbu negatif. Pergerakan pada keenam titik ini memiliki nilai kurang dari batas maksimum yang berarti tidak terjadi pergerakan yang signifikan.



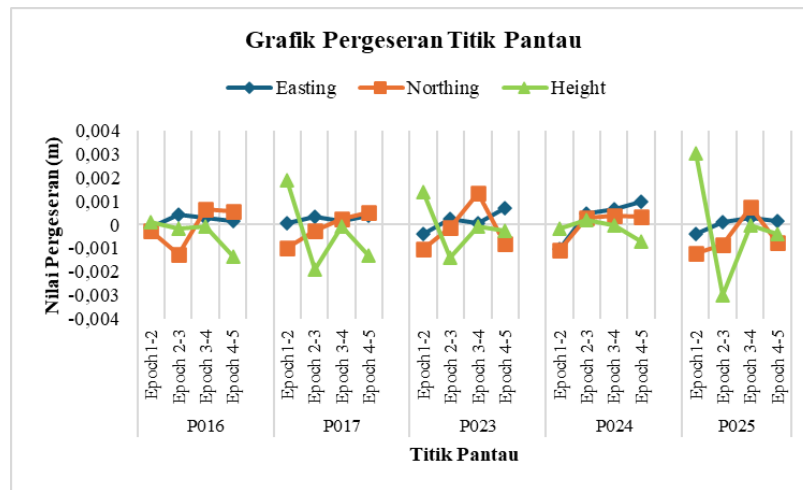
Gambar IV.27 Grafik pergeseran titik pantau Juli 2023

Grafik pergerakan pada titik pantau P021, P022, P026, P027, P028, dan P029 pada Gambar IV.27 tersebut menunjukkan pola pergerakan pada setiap titik pantauanya cenderung bervariasi terhadap interval *epoch*nya. Pergerakan tersebut mengarah ke sumbu positif dan ke sumbu negatif. Nilai pergerakan pada grafik menunjukkan tidak ada titik yang memiliki nilai pergerakan melebihi 5 mm ke arah sumbu positif maupun negatif.



Gambar IV.28 Grafik pergeseran titik pantau Juli 2023

Gambar IV.28 menunjukkan grafik pergerakan pada titik pantau P030, P004, P005, P014, dan P015 tidak menunjukkan adanya pergerakan yang signifikan. Secara umum, nilai pergerakannya kurang dari 5 mm ke arah positif maupun negatif. Pola pergerakannya bervariasi cenderung naik ke arah sumbu positif dan turun ke arah sumbu negatif terutama pada komponen *height*nya.



Gambar IV.29 Grafik pergeseran titik pantau Juli 2023

Gambar IV.29 menyajikan grafik pergerakan pada titik pantau P016, P017, P023, P024, dan P025. Grafik tersebut menunjukkan kecenderungan pola pergerakan setiap titik pantainya yang bervariasi pada setiap interval *epoch*. Pola pergerakan tersebut ada yang ke arah sumbu positif dan ke arah sumbu negatif. Nilai pergerakan titik pantau hanya berkisar kurang dari 5 mm. Hal ini mengidentifikasi bahwa tidak terdapat pergerakan yang signifikan.

Gambar IV.25 s.d. IV.29 menunjukkan pola pergerakan pada setiap komponen *easting*, *northing*, dan *height*. Apabila nilai pergerakan tersebut dibuat absolut, nilai pergerakan pada komponen *northing* lebih besar dibandingkan dengan komponen *easting*. Hal ini dapat diidentifikasi berdasarkan rentang nilainya. Nilai pergerakan komponen *easting* berkisar pada 0,0005 s.d. 1,340mm sedangkan nilai pergerakan komponen *northing* berkisar pada 0,006 s.d. 6,91mm. Sementara itu, pola pergerakan komponen *height* cenderung turun dengan nilai pergerakan pada rentang 0,001 s.d. 5,428mm.

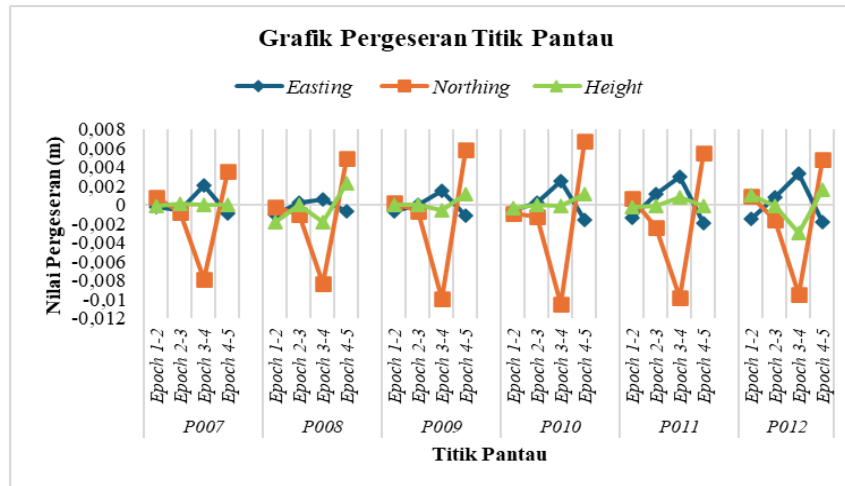
Pergerakan pada bulan Juli 2023 ini relatif stabil dengan besar pergerakan hanya mencapai fraksi *sub*-milimeter. Nilai pergerakannya cenderung lebih kecil dari batas maksimum yang ditetapkan. Dengan demikian, hipotesis satu pada penelitian ini dinyatakan diterima. Titik pantau pada bulan Juli 2023 ini tidak mengalami pergerakan yang signifikan baik horizontal maupun vertikal. Hal ini mungkin terjadi karena pada bulan ini bendungan dalam kondisi kering atau pada musim kemarau.

### IV.3.2 Besar Pergerakan Titik Pantau Berdasarkan Data Maret 2024

Besar pergerakan titik pantau pada bulan Maret 2024 dapat dilihat pada Lampiran F. Gambar IV.30 menunjukkan grafik pergerakan titik pantau P007, P008, P009, P010, P011,

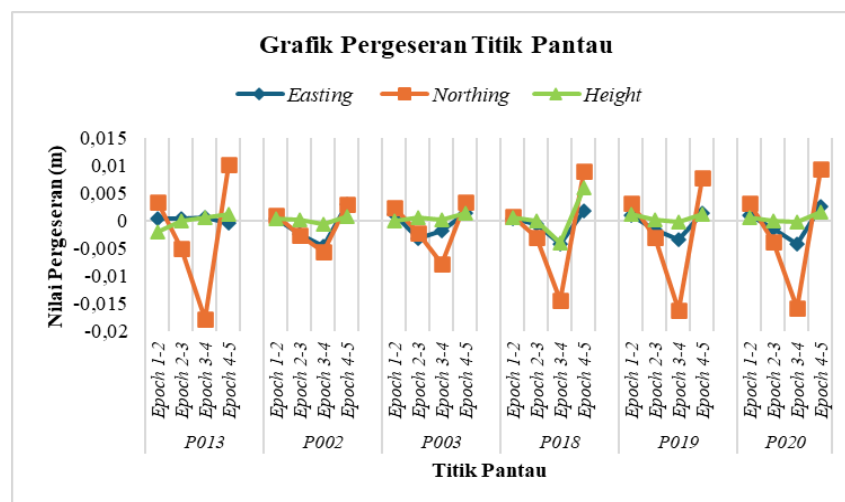


dan P012. Grafik tersebut memiliki pola pergerakan yang cukup bervariasi pada setiap interval *epoch*. Terdapat pola pergerakan yang mengarah ke sumbu positif dan ke sumbu negatif. Berbeda dengan pergerakan pada bulan Juli 2023, pergerakan pada bulan Maret 2024 ini memiliki nilai pergerakan yang cukup besar.



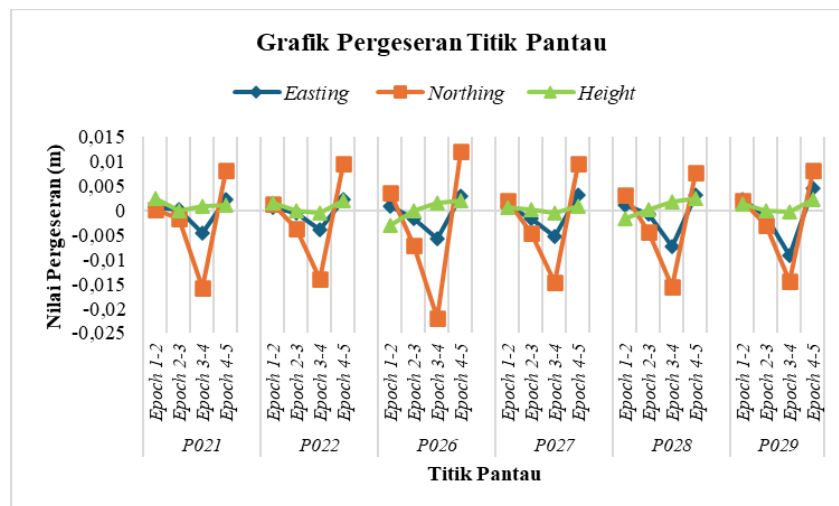
Gambar IV.30 Grafik pergeseran titik pantau Maret 2024

Gambar IV.30 menunjukkan nilai pergerakan paling besar dan signifikan terjadi pada komponen *northing* pada interval *epoch* 3 s.d. 4 dan *epoch* 4 s.d. 5. Hal ini mungkin terjadi karena adanya pergerakan pada titik pantau. Namun demikian, besar pergerakannya hanya mencapai fraksi milimeter saja. Nilai pergerakan paling besar terjadi pada titik P010 interval *epoch* 3 s.d. 4 sebesar 10 mm ke arah sumbu positif. Besar pergerakan pada komponen *easting* dan *height* kurang dari 5 mm ke arah positif dan negatif sehingga tidak terjadi pergerakan yang signifikan. Pola grafik kedua komponen yang terbentuk cenderung konstan dengan arah pergerakan ke arah sumbu positif dan negatif.



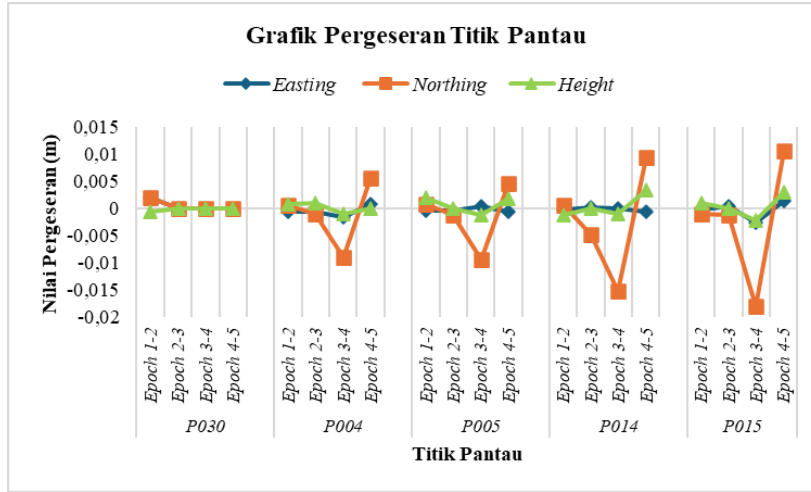
Gambar IV.31 Grafik pergeseran titik pantau Maret 2024

Gambar IV.31 menunjukkan grafik pergerakan pada titik pantau P013, P002, P003, P018, P019, dan P020. Secara umum, pola pergerakan setiap titik pantau pada interval *epoch* cenderung bervariasi dengan pergerakan ke arah sumbu positif dan ke arah sumbu negatif. Setiap komponen memiliki pola yang berbeda-beda di setiap titiknya. Berdasarkan grafik tersebut komponen *easting* dan *northing* memiliki pola dengan pergerakan yang cukup signifikan terutama pada komponen *northing*. Hal ini mengidentifikasi adanya pergerakan horizontal yang cukup signifikan pada *epoch* 3 s.d. 4 dan *epoch* 4 s.d. 5. Sementara itu, untuk komponen *height*nya memiliki pola yang cenderung konstan dengan nilai pergerakan lebih kecil dari batas maksimum pergerakan. Hal ini berarti tidak ada pergerakan vertikal yang signifikan.



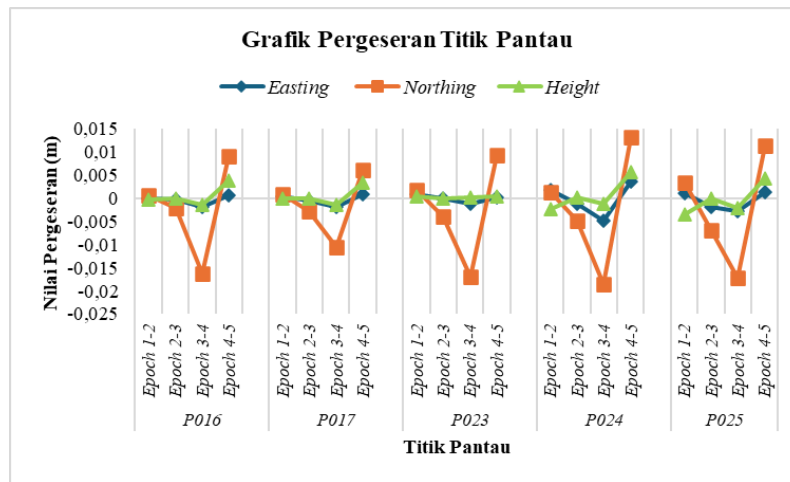
Gambar IV.32 Grafik pergeseran titik pantau Maret 2024

Grafik pergerakan titik pantau P021, P022, P026, P027, P028, dan P029 ditampilkan Gambar IV.32. Gambar tersebut menunjukkan pola pergerakan pada setiap titik pantauanya relatif sama terhadap interval *epoch*nya. Ketiga komponen tersebut cenderung mengalami pergerakan ke arah sumbu positif dan ke arah sumbu negatif. Pola pergerakan tersebut juga menunjukkan adanya pergerakan horizontal yang signifikan ditampilkan dengan grafik ke arah sumbu negatif dan kemudian kembali ke arah positif dengan nilai pergerakan yang besar. Nilai pergerakan paling besar terjadi pada titik P026 *epoch* 3 s.d. 4 sebesar lebih dari 20 mm ke arah sumbu negatif. Komponen *height* memiliki pola yang cenderung konstan dengan nilai pergerakan kurang dari batas maksimum pergerakan yang menandakan tidak ada pergerakan vertikal yg signifikan.



Gambar IV.33 Grafik pergeseran titik pantau Maret 2024

Gambar IV.33 menampilkan grafik pergerakan pada titik pantau P030, P004, P005, P014, dan P015. Grafik tersebut tidak menunjukkan adanya pergerakan signifikan pada komponen *easting* dan *height* nya. Nilai pergerakan hanya berkisar kurang dari 5 mm. Pola pergeseran tersebut cenderung konstan di semua titik pada setiap interval *epoch*nya. Berbeda dengan komponen *northing* yang selalu memiliki pola yang cenderung naik ke arah sumbu positif turun ke arah sumbu negatif dengan nilai pergerakan yang cukup besar. Nilai pergerakan paling besar terjadi di titik P015 pada interval *epoch* 3 s.d 4 dengan nilai mendekati 20 mm. Namun demikian, nilai pergerakan tersebut hanya berada pada fraksi milimeter.



Gambar IV.34 Grafik pergeseran titik pantau Maret 2024

Gambar IV.34 menampilkan grafik pergerakan pada titik pantau P016, P017, P023, P024, dan P025. Grafik tersebut tidak menunjukkan adanya pergerakan yang signifikan untuk komponen *easting* dan *height*nya. Nilai pergerakan tersebut hanya berkisar kurang

dari 5 mm ke arah sumbu positif dan negatif. Pola pergerakan cenderung konstan di semua titik pada setiap interval *epoch*nya. Hanya saja sedikit perbedaan pada titik P024 dan P025, pola komponen *easting* dan *height* nya cenderung bervariasi. Komponen *northing* yang selalu memiliki pola yang cenderung naik ke arah sumbu positif turun ke arah sumbu negatif dengan nilai pergerakan yang cukup besar. Nilai pergerakan paling besar terjadi di titik P024 pada interval *epoch* 3-4 dengan nilai mendekati 20 mm ke arah sumbu negatif. Nilai pergerakan tersebut mencapai fraksi sentimeter.

Gambar IV.30 s.d. IV.34 menunjukkan pola pergerakan pada setiap komponen *easting*, *northing*, dan *height*. Apabila nilainya dibuat absolut, nilai pergerakan pada komponen *northing* lebih besar daripada komponen *easting*. Hal ini dapat diidentifikasi berdasarkan rentang nilainya. Nilai besar pergerakan komponen *easting* antara 0,007 s.d. 9 mm, sedangkan nilai pergerakan komponen *northing* antara 5 hingga 22 mm. Pola pergerakan komponen *height* cenderung turun.

Nilai pergerakan pada bulan Maret 2024 ini lebih besar daripada bulan Juli 2023. Besar pergerakannya mencapai fraksi sentimeter. Nilai pergerakan pada komponen *easting* dan *northing* sebagian besar lebih besar dari batas maksimum yang ditetapkan. Nilai pergerakan *height* lebih kecil dari batas maksimum. Dengan demikian, hipotesis satu pada penelitian ini dinyatakan ditolak. Titik pantau pada bulan Maret 2024 ini mengalami pergerakan horizontal yang signifikan tetapi tidak dengan pergerakan vertikalnya. Hal ini mungkin terjadi karena pada bulan ini bendungan dalam kondisi basah atau pada musim hujan, sehingga bendungan mendapatkan tekanan air yang menyebabkan pergerakan horizontal bendungan.

### IV.3.3 Arah Pergerakan Titik Pantau dalam Satu Bulan

Pergerakan horizontal diperoleh berdasarkan resultan dari komponen *easting* dan komponen *northing*. Komponen horizontal memiliki dua sumbu yaitu sumbu *easting* dan sumbu *northing*. Penentuan arah pergerakan horizontal ini dinyatakan dalam vektor yang diperoleh dari azimuth perpindahan titik pantau pada setiap interval *epoch*. Arah pergerakan vertikal hanya mengacu pada nilai pergerakan positif dan negatif saja. Nilai pergeseran positif menunjukkan adanya kenaikan titik atau arah naik, sebaliknya nilai pergerakan negatif menunjukkan adanya penurunan titik atau arah turun.

Penelitian ini disajikan arah pergerakan horizontal dan vertikal titik pantau selama satu bulan. Nilai pergeseran horizontal dan pergerakan vertikal ini diperoleh berdasarkan

data pada interval *epoch* 1 s.d. 5 dan akumulasi pergerakan perminggu selama satu bulan. Tabel IV.4 menunjukkan perbandingan nilai pergerakan selama satu bulan dengan akumulasi pergerakan perminggu selama satu bulan. Hasil perhitungan azimuth pada setiap interval *epoch* disajikan pada Lampiran E.

Tabel IV.4 Perbandingan nilai pergerakan titik pantau selama satu bulan dengan akumulasi pergerakan setiap minggu berdasarkan data Bulan Juli 2023

Titik	Pergeseran Horizontal (mm)		Pergeseran Vertikal (mm)	
	<i>Epoch</i> 1 s.d. 5	Akumulasi Pergeseran	<i>Epoch</i> 1 s.d. 5	Akumulasi Pergeseran
P007	0,571	14,421	-1,188	-1,188
P008	3,039	5,463	-1,715	-1,715
P009	1,339	3,877	-0,465	-0,465
P010	1,031	2,910	-0,355	-0,355
P011	1,258	5,039	-0,181	-0,181
P012	1,367	4,154	0,147	0,147
P013	0,877	5,919	-1,028	-1,028
P002	0,875	2,239	-0,821	-0,821
P003	1,082	3,087	-0,189	-0,189
P018	0,969	2,238	-0,490	-0,490
P019	0,886	2,808	-0,515	-0,515
P020	2,327	4,641	-0,541	-0,541
P021	0,559	2,353	-1,291	-1,291
P022	2,631	3,413	-0,107	-0,107
P027	1,641	5,949	1,851	1,851
P028	1,250	5,606	0,691	0,691
P029	1,084	2,419	0,317	0,317
P030	1,967	2,774	1,003	1,003
P004	1,245	3,031	-0,099	-0,099
P005	0,738	2,257	-0,150	-0,150
P014	2,683	3,043	-1,517	-1,517
P015	1,450	3,792	0,915	0,915
P016	0,825	3,192	-1,441	-1,441
P017	1,049	3,014	-1,411	-1,411
P023	0,921	2,825	-0,297	-0,297
P024	1,070	3,775	-0,735	-0,735
P025	2,079	3,565	-0,444	-0,444

Tabel IV.4 menunjukkan nilai pergerakan horizontal dan vertikal pada interval *epoch* 1 s.d. 5 dan akumulasi nilai pergerakan setiap minggu. Tabel tersebut dapat dilihat bahwa nilai pergerakan horizontal dan vertikal pada interval *epoch* 1 s.d. 5 dengan akumulasi nilai pergerakan setiap minggu terdapat perbedaan. Besar perbedaan tersebut berada pada fraksi

milimeter. Perbedaan ini terjadi karena pergerakan bendungan tidak linear. Gambar IV.36 menampilkan arah pergerakan pada setiap interval *epoch* berbeda-beda. Bendungan yang bergerak akan sangat mungkin kembali ke posisi semula karena deformasi bendungan bersifat elastik. Ketika suatu materi mengalami deformasi akan kembali ke posisi semula setelah gaya deformasinya tidak bekerja lagi pada materi tersebut. Hal ini dipengaruhi oleh tekanan air yang berbeda-beda.

Besar nilai pergerakan vertikal selama satu bulan sama dengan hasil akumulasi nilai pergerakan vertikal setiap minggunya. Hal ini menunjukkan bendungan bergerak secara vertikal perlahan karena adanya proses konsolidasi. Proses ini penting untuk memastikan bahwa struktur bendungan dapat menahan tekanan air yang besar dalam jangka panjang tanpa terjadi penurunan yang signifikan atau kerusakan pada bendungan.

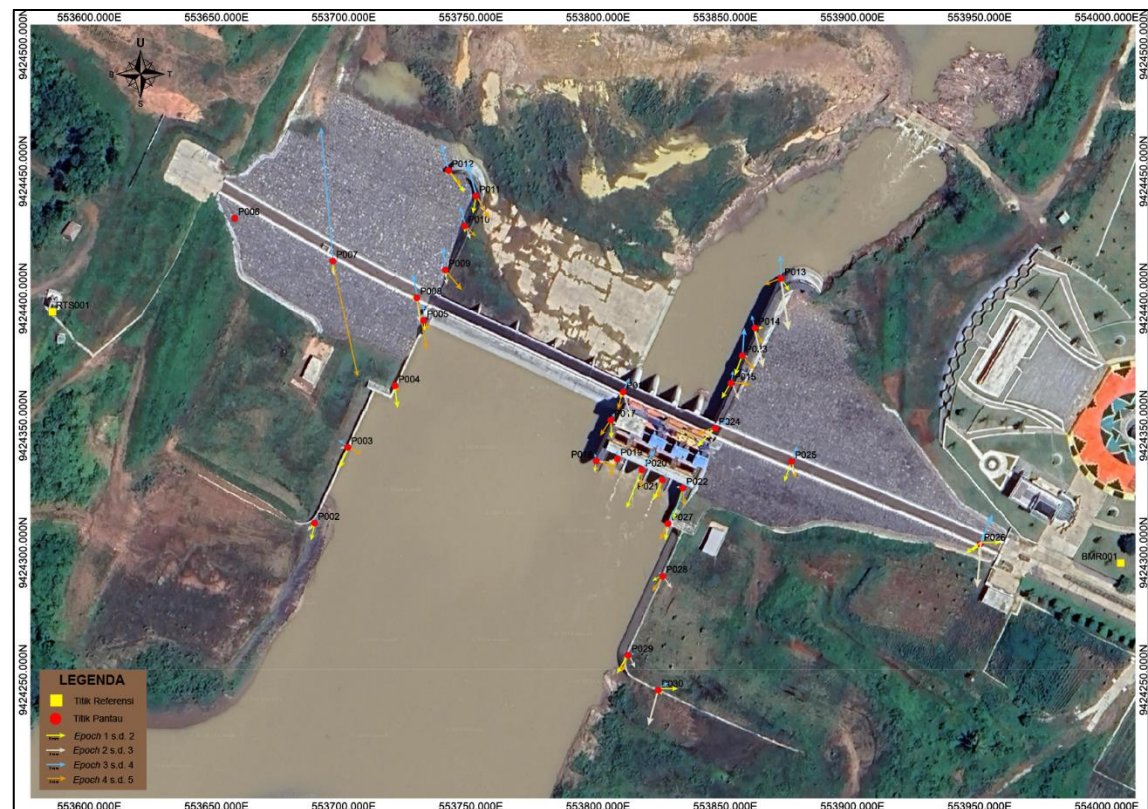
Terdapat kemungkinan lain yang mendukung adanya perubahan nilai tersebut yaitu karena pada saat awal dibangun struktur bendungan masih dalam proses mencari keseimbangan terhadap gaya yang bekerja sehingga membutuhkan waktu untuk stabil. Hal ini dibuktikan dengan munculnya variasi hanya di tahun 2023 tetapi di tahun 2024 sudah relatif stabil. Dilihat dari strukturnya, kestabilan arah horizontal membutuhkan waktu dalam prosesnya lebih lama dibandingkan posisi vertikalnya, artinya gaya yang bekerja lebih dominan pada gaya arah horizontal.

Vektor pergerakan horizontal dalam satu bulan disajikan pada Gambar IV.35. Anak panah berwarna biru menunjukkan arah pergerakan titik pantau, lingkaran berwarna merah merupakan titik pantaunya, dan kotak berwarna kuning adalah titik referensi yang digunakan yaitu titik berdiri alat (RTS001) dan *backsight* (BMR001). Arah anak panah tersebut menunjukkan pergerakan yang sebagian besar mengarah pintu air. Air secara alami akan mengalir menuju pintu air karena gravitasi dan mencari ruang untuk mengalir. Ketika pintu air terbuka, air akan berkumpul dan mengalir melalui pintu, sementara sebagian air yang tidak mengalir menuju pintu akan tetap di area bendungan. Hal ini menciptakan kondisi air yang lebih tenang. Bendungan dalam hal ini berfungsi menahan air sehingga air yang tidak mengalir akan tertampung dan lebih tenang karena aliran yang terbatas. Bulan Juli 2023 diidentifikasi mengalami musim kemarau sehingga meskipun volume air yang tertahan hanya sedikit, tetapi bendungan tetap mengalami tekanan air. Bendungan tetap mengalami tekanan akibat sisa air yang tertampung dan distribusi berat struktur itu sendiri.





Gambar IV.35 Vektor pergerakan horizontal dalam satu bulan pada Juli 2023



Gambar IV.36 Vektor pergerakan horizontal setiap minggu



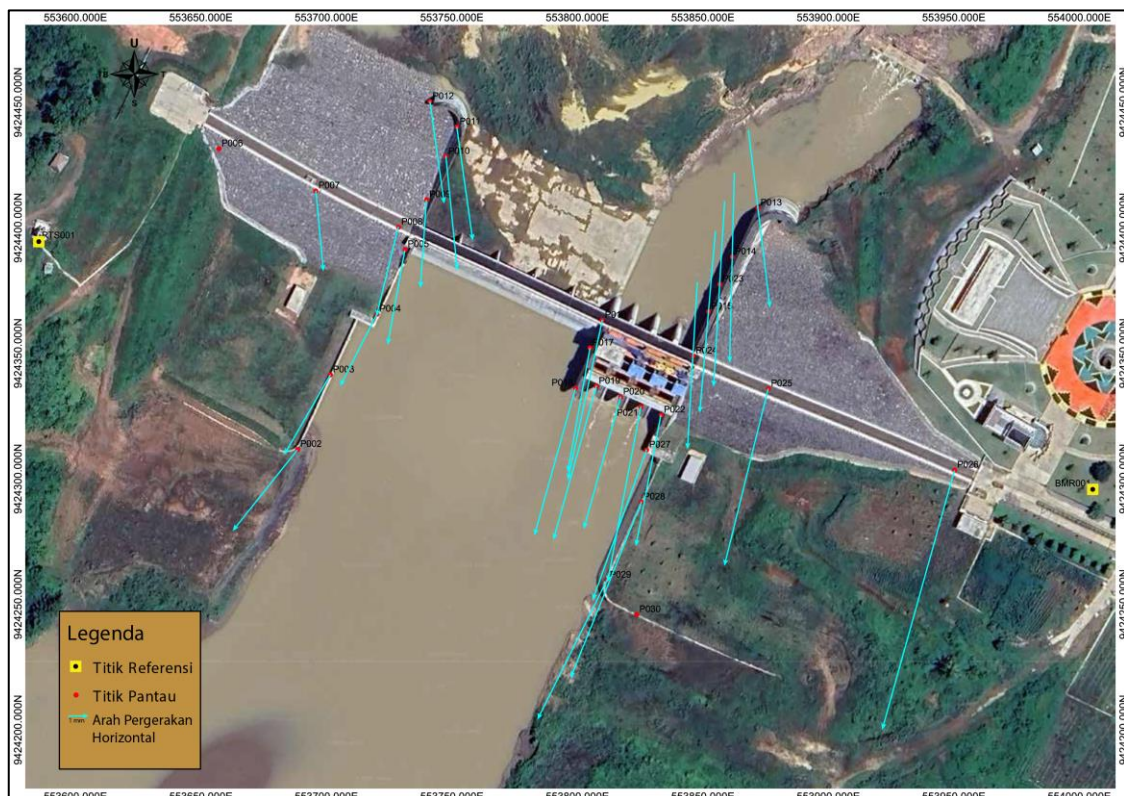
Nilai dan arah pergerakan horizontal dan vertikal titik pantau selama satu bulan berdasarkan data Bulan Maret ini juga disajikan pada pembahasan. Terdapat perbedaan letak kekosongan data titik pantau. Pada Bulan Juli, terdapat kekosongan data pada titik pantau yaitu titik P026 sedangkan Bulan Maret kekosongan data tersebut terjadi pada titik pantau P030. Kedua titik tersebut memang terletak paling jauh dari titik berdiri alat, sehingga mungkin saja terjadi tidak terekamnya data. Perbandingan nilai pergerakan *epoch* 1 s.d. 5 atau dalam satu bulan dengan akumulasi pergerakan dalam seminggu yang disajikan dalam Tabel IV.5.

Tabel IV.5 Perbandingan nilai pergerakan titik pantau selama satu bulan dengan akumulasi pergerakan setiap minggu berdasarkan data Bulan Maret 2024

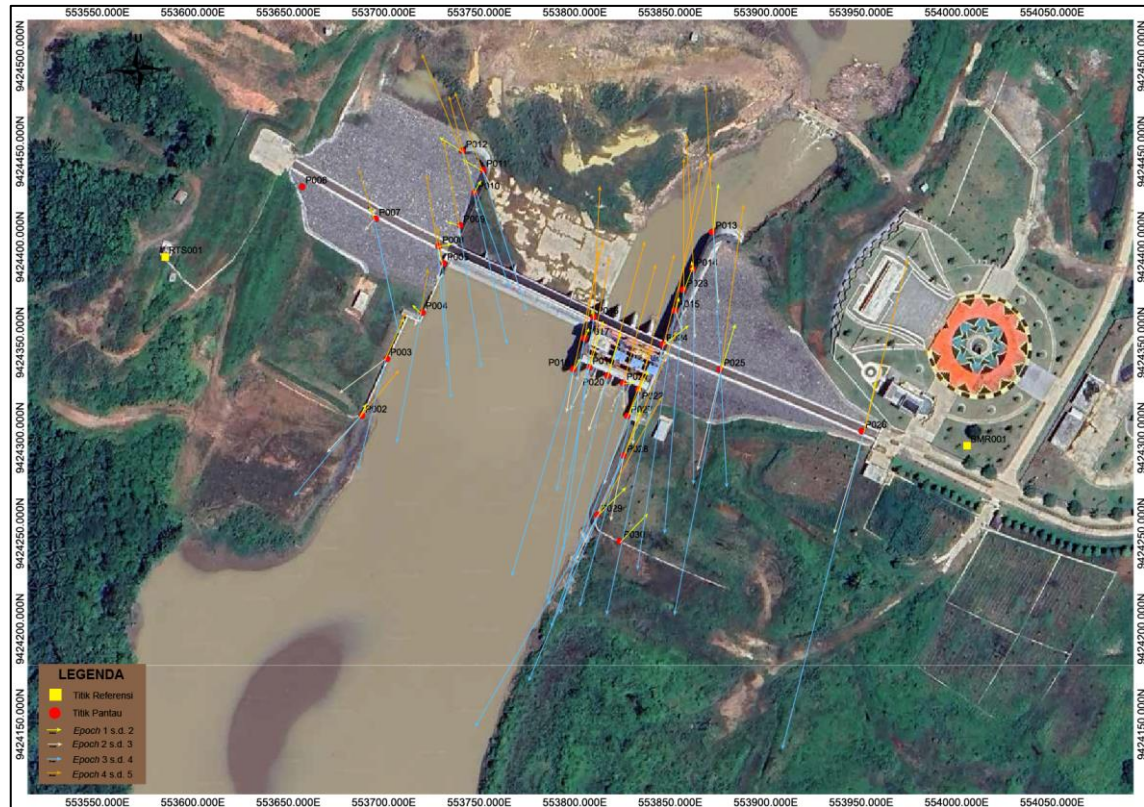
Titik	Pergeseran Horizontal (mm)		Pergeseran Vertikal (mm)	
	Epoch 1 s.d. 5	Akumulasi Pergeseran	Epoch 1 s.d. 5	Akumulasi Pergeseran
P007	4,275	13,551	0,007	0,007
P008	4,736	15,475	-1,281	-1,281
P009	4,541	17,454	0,645	0,645
P010	5,910	20,070	0,702	0,702
P011	6,035	20,252	0,481	0,481
P012	5,420	18,686	-0,475	-0,475
P013	9,328	36,327	-0,084	-0,084
P002	5,378	15,841	0,703	0,703
P003	4,781	18,300	2,223	2,223
P018	7,923	28,091	2,555	2,555
P019	8,321	30,960	2,381	2,381
P020	7,289	33,374	1,966	1,966
P021	9,356	27,477	4,333	4,333
P022	7,074	29,820	3,012	3,012
P026	14,116	46,159	0,423	0,440
P027	8,437	32,714	1,237	1,237
P028	9,958	33,375	2,497	2,497
P029	8,235	32,629	3,220	3,220
P004	4,165	16,613	0,080	0,994
P005	5,096	16,242	2,724	2,741
P014	9,938	29,774	1,265	1,265
P015	9,611	31,025	1,632	1,632
P016	8,697	28,196	2,174	2,174
P017	6,648	20,749	1,809	1,809
P023	9,740	31,872	0,738	0,737
P024	8,868	40,207	2,059	2,059
P025	9,566	39,568	-1,175	-1,175

Tabel IV.5 menunjukkan nilai pergerakan horizontal dalam satu bulan berbeda dengan akumulasi setiap minggunya. Perbedaan ini menandakan bahwa pergerakan bendungan tidak linear. Bendungan dirancang mengalami deformasi elastis di bawah tekanan air yang artinya ketika tekanan meningkat, bendungan dapat melentur tanpa mengalami kerusakan permanen. Bendungan dapat bergeser dan kembali ke posisi semula. Arah pergerakan setiap minggunya selalu berbeda-beda. Gambar IV.38 menunjukkan pada interval *epoch* 1 s.d. 2 bendungan cenderung bergerak ke arah utara sedangkan pada interval *epoch* 2 s.d. 3 bergerak ke arah sebaliknya. Pergerakan ini dipengaruhi oleh besarnya tekanan air yang ditahan oleh bendungan. Oleh karena itu, pergerakan dalam satu bulan tidak dapat dihitung berdasarkan akumulasi pergerakan dalam setiap minggunya.

Vektor pergerakan horizontal dalam satu bulan disajikan pada Gambar IV.36 dengan arah anak panah berwarna biru. Secara umum, panah-panah tersebut menunjukkan pergerakan ke arah luar bendungan, menjauhi struktur utama di tengah bendungan. Hal ini mungkin terjadi karena adanya peningkatan tekanan hidrostatik dari air yang tertahan dalam jumlah besar terutama ketika musim hujan dan pengoperasian pintur air sebagai pengontrol air. Tekanan air yang meningkat cenderung mendorong struktur bendungan keluar menjauhi inti bendungan.



Gambar IV.37 Vektor pergerakan horizontal titik pantau bulan Maret 2024



Gambar IV.38 Vektor pergerakan horizontal setiap minggu

### IV.3 Analisis Deformasi

Analisis deformasi dilakukan dengan uji kesebangunan jaring dan uji pergerakan titik. Hal ini dilakukan untuk mengetahui apakah terjadi perubahan pada bentuk jaring pengamatan dan pergerakan pada titik pantau secara signifikan. Hipotesis awal uji kesebangunan jaring ini yaitu bentuk jaring tidak mengalami perubahan. Uji ini dilakukan dengan membandingkan nilai varian aposteriori pergeseran dan varian apriori pergeseran.  $H_0$  diterima apabila  $\frac{\hat{\sigma}_{od}^2}{\sigma_{od}^2} < F_{1-\alpha, r, \infty}$ . Apabila  $H_0$  ditolak, menandakan bahwa bentuk jaring mengalami perubahan sehingga perlu dilakukan uji pergeseran titik untuk mengetahui titik yang bergeser. Perhitungan ini dilakukan dengan *script* yang terlampir pada Lampiran J dengan *software* Matlab 2022. Hasil perhitungan tersebut diperoleh nilai vektor pergerakan dan simpangan bakunya, hasil uji kesebangunan jaring, dan hasil uji pergerakan titik. Dua *epoch* yang berbeda digunakan dalam analisis deformasi yaitu sebagai berikut:

1. *Epoch* 1 dan *epoch* 2
2. *Epoch* 2 dan *epoch* 3
3. *Epoch* 3 dan *epoch* 4



4. *Epoch* 4 dan *epoch* 5
5. *Epoch* 1 dan *epoch* 5

#### IV.2.1 Hasil Uji Kesebangunan Jaring Berdasarkan Data Juli 2023

Uji kesebangunan jaring pada penelitian ini dilakukan dengan tabel *Fisher* dengan tingkat kepercayaan 95%. Nilai derajat kebebasannya yaitu 84 dan 81 untuk *epoch* 5 sesuai dengan jumlah parameter pada setiap *epoch*. Nilai tabel *Fisher* yang dihasilkan yaitu 1,274 dan 1,279 untuk *epoch* 5. Hasil uji kesebangunan jaring ditunjukkan pada Tabel IV.6.

Tabel IV.6 Hasil uji kesebangunan jaring berdasarkan data Bulan Juli 2023

Interval Pengamatan ( <i>epoch</i> )	Varian Aposteori	Varian Apriori	Nilai Uji	Nilai Tabel <i>Fisher</i> ( $\alpha = 0,05$ )	Hasil Uji
1 s.d. 2	0,011	0,049	0,229	1,274	Diterima
2 s.d. 3	0,014	0,049	0,286	1,274	Diterima
3 s.d. 4	0,010	0,054	0,183	1,274	Diterima
4 s.d. 5	0,016	0,050	0,323	1,279	Diterima
1 s.d. 5	0,045	0,050	0,901	1,279	Diterima

Berdasarkan tabel IV.6, nilai uji lebih kecil daripada nilai tabel *Fisher* yang digunakan sehingga hipotesis nol pada uji kesebangunan jaring ini dinyatakan diterima.

Hipotesis ( $H_0$ ) diterima ketika hasil  $\frac{\hat{\sigma}_{0d}^2}{\sigma_{0d}^2} < F_{1-\alpha, \infty, r}$ . Hal ini menunjukkan bahwa tidak terjadi perubahan pada interval *epoch* setiap minggunya terhadap bentuk jaring. Hasil uji terhadap interval *epoch* 1 s.d. 5 juga menyatakan  $H_0$  diterima yang artinya dalam satu bulan titik pantau tidak mengalami pergerakan yang signifikan. Jaring tersebut tidak mengalami perubahan bentuk. Uji pergeseran titik pada data bulan Juli ini tidak perlu dilakukan.

#### IV.2.2 Hasil Uji Kesebangunan Jaring Berdasarkan Data Maret 2024

Uji kesebangunan jaring pada penelitian ini dilakukan dengan tabel *Fisher* dengan tingkat kepercayaan 95%. Nilai derajat kebebasannya yaitu 84 untuk interval *epoch* 1 s.d 2 dan 81 untuk interval *epoch* 2 s.d 3, 3 s.d. 4, dan 4 s.d. 5. Nilai tabel *Fisher* yang dihasilkan yaitu 1,274 dan 1,279. Hasil uji kesebangunan jaring ditunjukkan pada Tabel IV.7.

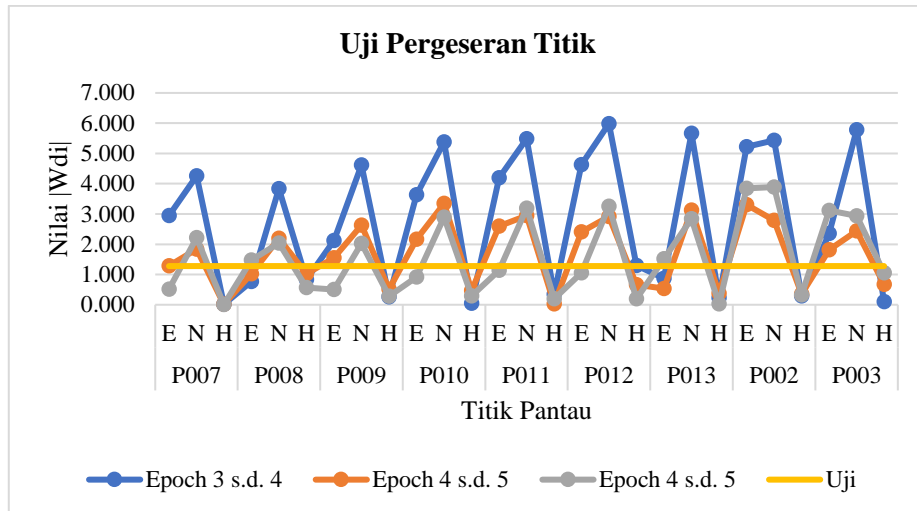
Tabel IV.7 Hasil uji kesebangunan jaring berdasarkan data Bulan Juli 2023

Interval Pengamatan ( <i>epoch</i> )	$(\hat{\sigma}_{0d}^2)$	$(\sigma_{0d}^2)$	$\frac{\hat{\sigma}_{0d}^2}{\sigma_{0d}^2}$	Nilai Tabel Fisher ( $\alpha = 0.05$ )	Hasil Uji
1 s.d. 2	0,023	0,049	0,469	1,274	Diterima
2 s.d. 3	0,034	0,046	0,727	1,279	Diterima
3 s.d. 4	0,412	0,046	8,979	1,279	Ditolak
4 s.d. 5	0,155	0,049	3,134	1,279	Ditolak
1 s.d. 5	0,135	0,050	2,712	1,279	Ditolak

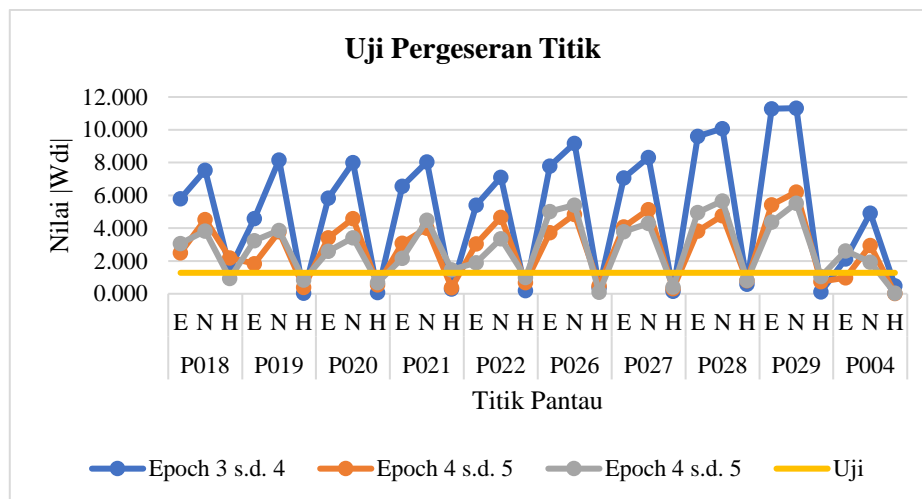
Tabel IV.7 dapat dilihat bahwa pada interval *epoch* 1 s.d. 2 dan *epoch* 2 s.d. 3, nilai uji lebih kecil daripada nilai tabel *Fisher* sehingga hipotesis nol pada interval *epoch* ini diterima. Nilai uji tersebut diperoleh dari hasil pembagian nilai aposteri dengan apriori  $\frac{\hat{\sigma}_{0d}^2}{\sigma_{0d}^2}$ . Hal ini menunjukkan bahwa tidak terjadi perubahan bentuk jaring pada dua minggu pertama Bulan Maret 2024. Pada interval *epoch* 3 s.d. 4 dan *epoch* 4 s.d. 5, terjadi penolakan hipotesis nolnya yang artinya terjadi perubahan bentuk jaring. Titik pantau mengalami pergerakan yang signifikan pada dua minggu terakhir bulan Maret. Hasil uji terhadap *epoch* 1 s.d. 5 yaitu  $H_0$  ditolak. Hal ini mengidentifikasikan adanya perubahan bentuk jaring dalam satu bulan yaitu di bulan Maret 2024. Uji pergerakan titik pada tahapan berikutnya perlu dilakukan untuk mengetahui titik mana saja yang mengalami pergerakan.

### IV.3.2 Hasil Uji Pergerakan Titik Berdasarkan Data Maret 2024

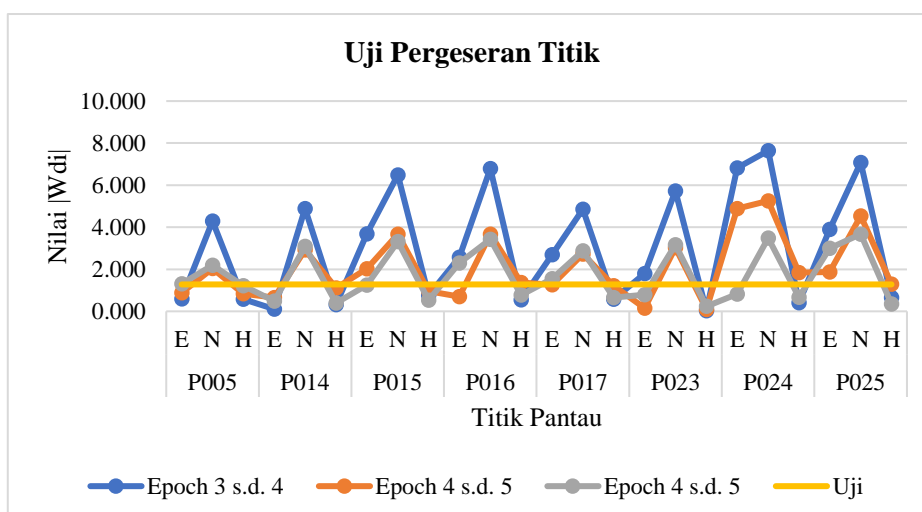
Uji pergerakan titik pantau dilakukan karena terjadi perubahan bentuk jaring pada interval *epoch* 3 s.d. 4 dan *epoch* 4 s.d. 5. Adanya perubahan bentuk jaring tersebut diketahui dengan ditolaknya  $H_0$  pada uji kesebangunan jaring. Hipotesis awal pada uji pergeseran titik ini yaitu titik pantau ke-I tidak mengalami pergeseran. Uji ini dilakukan dengan tabel *Fisher* dengan tingkat kepercayaan 95% dan derajat kebebasan yaitu 81 sehingga diperoleh nilai uji sebesar 1,279. Apabila  $H_0$  ditolak, titik ke-i mengalami pergeseran. Hasil perhitungan uji pergeseran dapat dilihat pada Lampiran (). Hasil tersebut ditampilkan dengan grafik pada setiap komponen *easting*, *northing*, dan *height* titik pantau untuk memudahkan visualisasi dan analisis. Nilai uji ditampilkan dalam garis berwarna kuning. Hasil uji pergerakan titik pantau bulan Maret 2024 ditunjukkan pada Gambar IV.37 s.d. IV.39.



Gambar IV.37 Hasil uji pergeseran titik



Gambar IV.38 Hasil uji pergeseran titik



Gambar IV.39 Hasil uji pergeseran titik

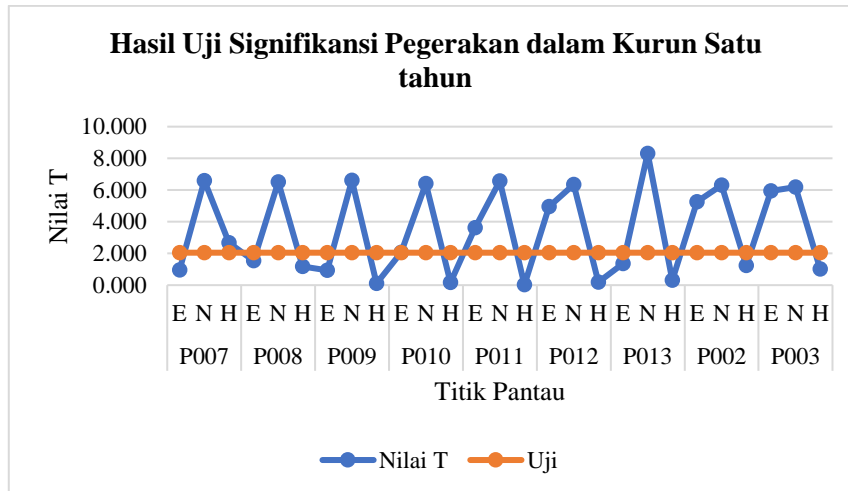
Hasil uji pergeseran titik yang disajikan pada Gambar IV.37 s.d. IV.39 menunjukkan terdapat sebagian besar titik berada di atas garis kuning yang artinya memiliki nilai  $W_{di}$  lebih besar dibandingkan nilai ujinya. Sebaliknya, titik yang berada di bawah garis kuning memiliki nilai  $W_{di}$  yang lebih kecil dari nilai ujinya. Hipotesis nol diterima ketika nilai  $|W_{di}|$  kurang dari nilai uji yaitu 1,279. Hasil uji menunjukkan sebagian besar komponen *easting* terjadi pergeseran sedangkan komponen *northing* seluruhnya mengalami pergeseran. Pada komponen *height* hanya terdapat beberapa titik yang mengalami pergeseran yaitu pada *epoch* 3 s.d. 4 di titik P012 dan P018, *epoch* 4 s.d. 5 di titik P018, P016, P024, dan P025, *epoch* 1 s.d. 5 hanya di titik P021. Hal ini dapat mengindikasikan secara keseluruhan titik pantau mengalami pergerakan horizontal secara signifikan tetapi tidak mengalami pergerakan vertikal.

#### IV. 5 Signifikansi Pergerakan dalam Satu Tahun

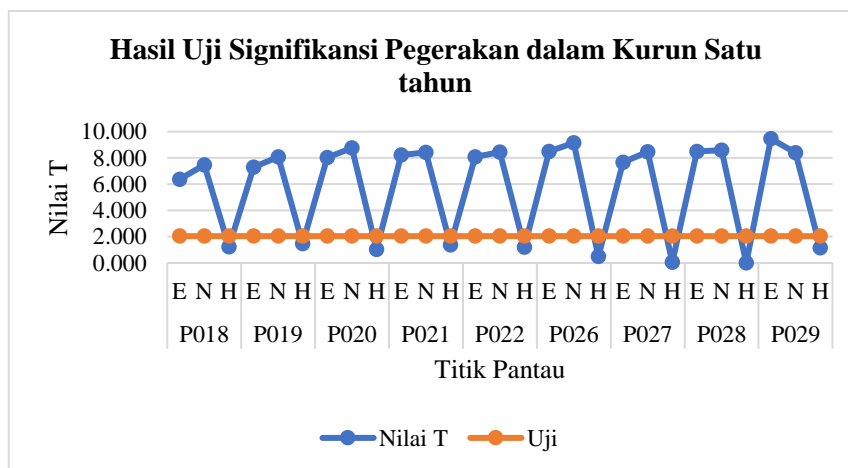
Uji signifikansi ini perlu dilakukan untuk mengetahui apakah terdapat pergerakan yang signifikan pada bendungan dalam kurun waktu satu tahun. Hal ini karena dalam satu bulan bendungan diasumsikan tidak mengalami pergerakan yang signifikan sehingga diperlukan data pembanding dalam satu tahun untuk mengetahui signifikansi pergerakan tersebut dan untuk melihat kemungkinan pengaruh perbedaan musim. Data pengamatan yang digunakan yaitu data pada bulan Juli *epoch* 1 (07 Juli 2023 dan 07 Maret 2024) dan *epoch* 5 (04 Agustus 2023 dan 04 April 2024).  $t$

Hipotesis awal uji signifikansi ini menyatakan tidak ada titik pantau yang mengalami pergerakan signifikan pada interval *epoch*. Uji signifikansi dilakukan dengan membandingkan nilai pergerakan terhadap resultan simpangan baku pada dua *epoch*.  $H_0$  diterima apabila nilai  $T$  lebih kecil daripada nilai uji. Uji ini dilakukan dengan tabel  $t$  pada tingkat kepercayaan 95%. Nilai derajat kebebasan didapatkan dengan cara mengurangi jumlah pengukuran ( $n$ ) yaitu 112 dengan jumlah parameter ( $u$ ) yaitu 84 sehingga diperoleh nilainya yaitu 28. Nilai uji yang didapatkan yaitu 2,048. Hasil uji divisualisasikan dalam bentuk grafik untuk mempermudah dalam melakukan analisis. Grafik visualisasi tersebut ditunjukkan pada Gambar IV.40 s.d. IV.43.

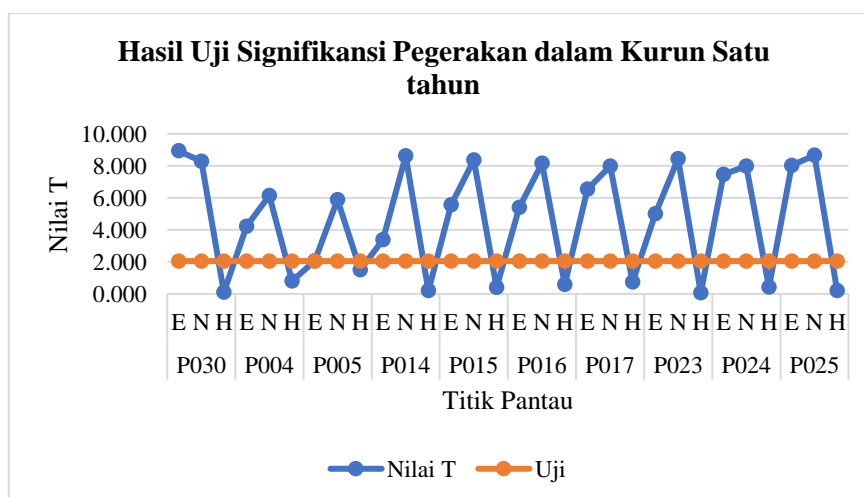




Gambar IV.40 Hasil uji signifikansi pergerakan dalam kurun satu tahun



Gambar IV.41 Hasil uji signifikansi pergerakan dalam kurun satu tahun



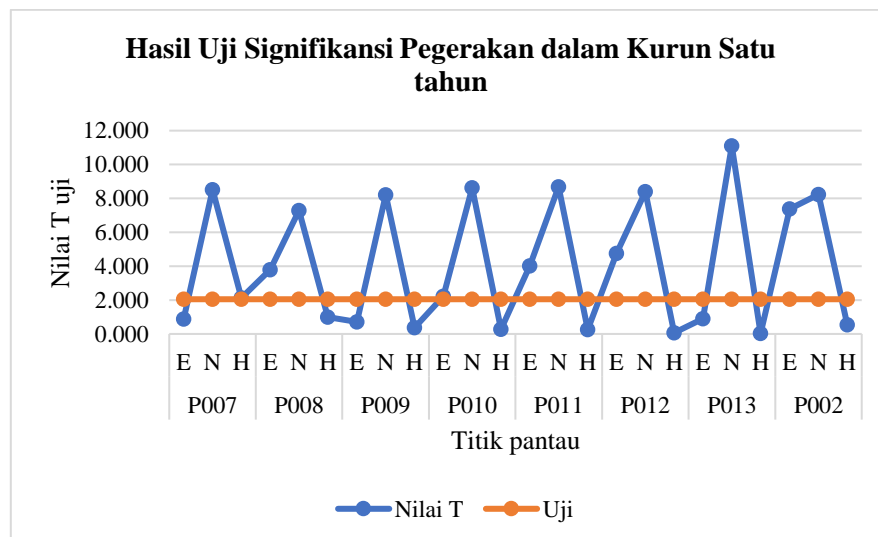
Gambar IV.42 Hasil uji signifikansi pergerakan dalam kurun satu tahun

Gambar IV.40 s.d. IV.42 menunjukkan hasil uji signfikansi pergerakan titik pantau dalam kurun satu tahun. Garis oranye pada gambar merupakan nilai uji yang diperoleh dari

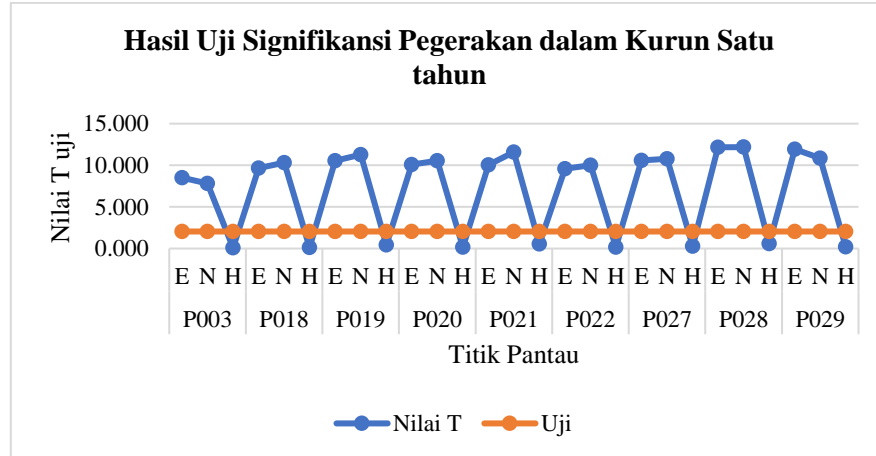
tabel t dengan tingkat kepercayaan 95% yaitu sebesar 2,048. Apabila nilai T pada komponen setiap titik berada di bawah garis, maka uji tersebut dinyatakan diterima. Sebaliknya, apabila titik berada di atas garis, maka uji tersebut dinyatakan ditolak. Berdasarkan grafik tersebut terdapat titik pantau yang dinyatakan ditolak dan diterima. Secara umum, sebagian besar komponen *easting* dan *northing* dinyatakan ditolak. Sedangkan hasil nilai uji pada komponen *height* diterima. Hal ini dapat mengidentifikasi terjadi pergerakan horizontal yang signifikan dalam kurun waktu satu tahun. Namun, tidak dengan pergerakan vertikalnya.

Pada *epoch* 1 Bulan Juli 2023 dengan *epoch* 1 Bulan Maret 2024 tersebut nilai pergeserannya hanya mencapai fraksi milimeter. Nilai simpangan baku kedua *epoch* tersebut sangat kecil sehingga ketika nilai pergeseran melebihi besarnya simpangan baku dapat diidentifikasi adanya pergerakan yang signifikan. Pada penelitian ini, besar nilai pergeseran dalam fraksi milimeter diidentifikasi adanya pergerakan secara signifikan. Hal tersebut menandakan bahwa pengamatan ini memiliki ketelitian pengukuran yang sangat tinggi.

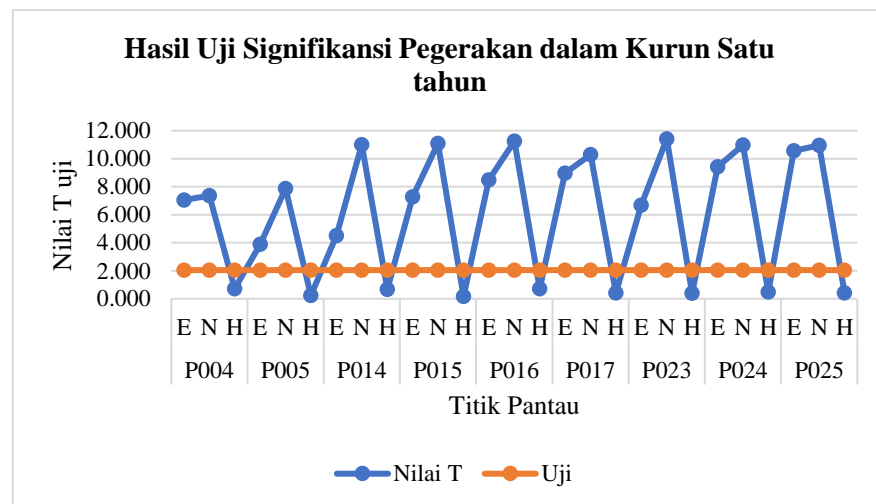
Uji signifikansi ini hanya menggunakan sampel data pada dua *epoch* yaitu *epoch* 1 dan *epoch* 5 saja untuk dapat dibandingkan hasilnya. Apabila digunakan *epoch* yang berbeda apakah memberikan hasil yang berbeda. Gambar IV.43 s.d. IV.45 menunjukkan hasil uji signifikansi titik pantau dengan data *epoch* 5 tersebut tidak berbeda dengan hasil uji dengan data *epoch* 1, sehingga dapat dibuktikan penggunaan data *epoch* yang berbeda akan memberikan hasil yang tidak berbeda.



Gambar IV.43 Hasil uji signifikansi pergerakan dalam kurun satu tahun



Gambar IV.44 Hasil uji signifikansi pergerakan dalam kurun satu tahun



Gambar IV.45 Hasil uji signifikansi pergerakan dalam kurun satu tahun

Gambar IV.43 s.d. IV.45 menunjukkan hasil uji signfikansi pergerakan titik pantau dalam kurun satu tahun. Grafik tersebut, dapat dilihat bahwa hampir seluruh komponen *easting* dan *northing* terjadi penolakan. Terjadi penerimaan pada komponen *height*. Hal ini mengindikasikan adanya pergerakan horizontal yang signifikan secara statistil dalam kurun waktu satu tahun tetapi tidak terjadi pergerakan vertikal yang signifikan. Dengan demikian, hipotesis dua penelitian ini diterima.

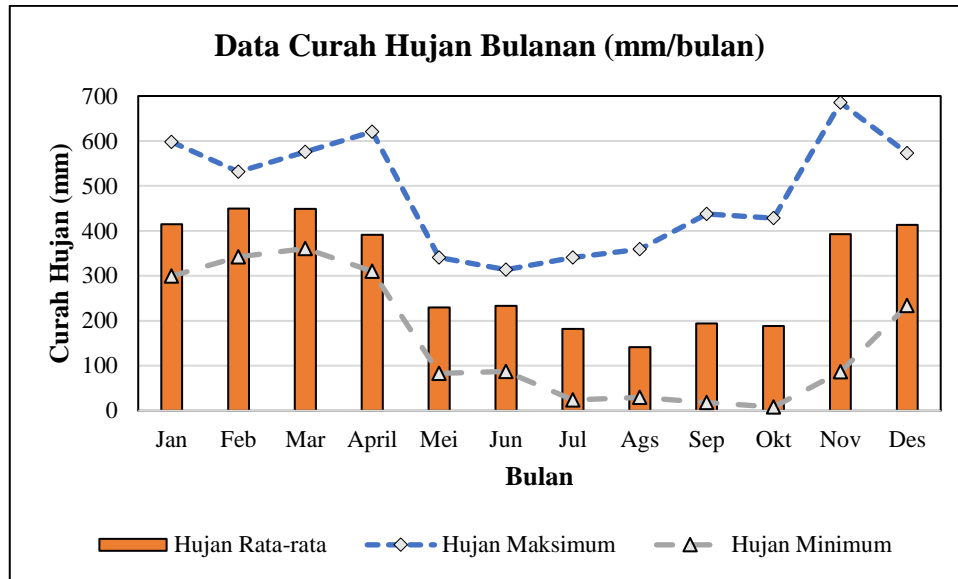
Nilai pergeseran pada kedua *epoch* tersebut berada dalam fraksi milimeter. Hanya saja, nilai simpangan bakunya juga sangat kecil sehingga titik tersebut tetap diindikasi adanya pergerakan yang signifikan karena nilai pergeseran melebihi besarnya simpangan baku. Pada penelitian ini, besar nilai pergeseran dalam fraksi milimeter diidentifikasi adanya

pergerakan secara signifikan. Hal tersebut menandakan bahwa pengamatan ini memiliki ketelitian pengukuran yang sangat tinggi dan pergerakan signifikan tersebut tidak berbahaya.

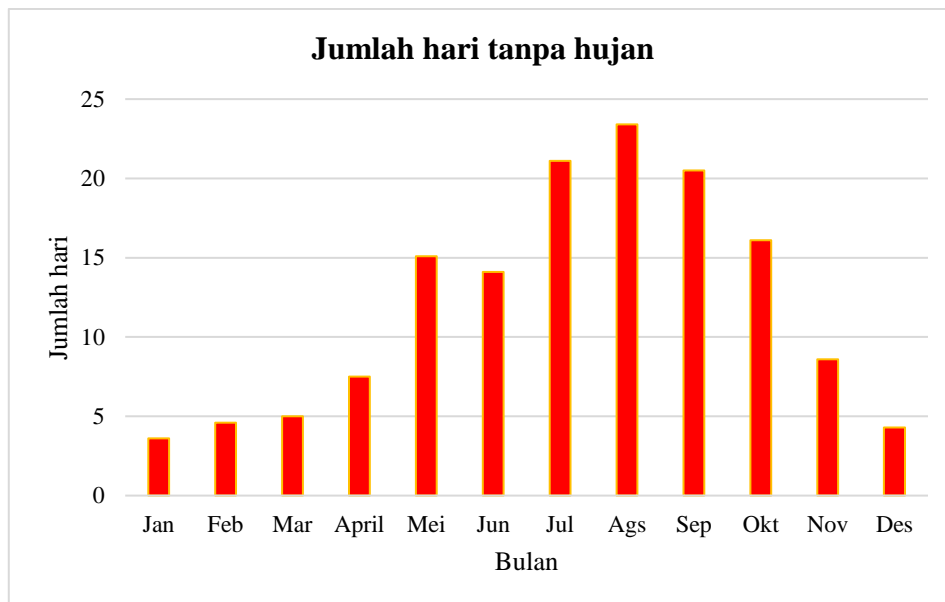
Uji signifikansi ini juga digunakan untuk mengetahui pengaruh musim terhadap signifikansi pergerakan bendungan. Berdasarkan analisis yang telah diuraikan, bendungan mengalami pergerakan yang signifikan dalam kurun waktu satu tahun. Hal ini mungkin terjadi karena adanya pengaruh tekanan air yang disebabkan bendungan menahan air dalam jumlah besar, terutama pada musim hujan. Pemilihan data pengamatan pada penelitian ini memperhatikan musim yang terjadi saat pengamatan. Musim diidentifikasi berdasarkan data curah hujan yang diperoleh dari satelit CHIRPS dengan GEE selama satu tahun dalam 10 tahun terakhir. *Script* perolehan data curah hujan dapat dilihat pada Lampiran N dan tabel curah hujan bulanan dapat dilihat pada Lampiran O. Grafik curah hujan bulanan di Bendungan Margatiga disajikan pada Gambar IV.46.

Grafik pada Gambar IV.46 dapat dilihat grafik curah hujan tersebut mulai meningkat dari bulan November s.d. April. Tingginya curah hujan ini dapat diidentifikasi sebagai musim hujan. Sementara itu, mulai dari bulan Mei s.d. Oktober grafik curah hujan cenderung terus menurun. Hal ini dapat diidentifikasi sebagai musim kemarau. Gambar IV.47 disajikan jumlah hari tanpa hujan di setiap bulan. Gambar tersebut menunjukkan jumlah hari dengan curah hujan di bawah 1 mm banyak terjadi pada Mei s.d. Oktober. Pada bulan November s.d. April, curah hujan hanya 3 s.d. 7 hari setiap bulannya. Hal ini memperkuat identifikasi musim kemarau dan musim hujan. Dengan demikian, bulan Juli 2023 diidentifikasi masuk musim kemarau dan bulan Maret 2024 diidentifikasi masuk musim hujan. Kedua data tersebut diasumsikan mewakili kondisi bendungan saat bulan basah atau musim hujan dan saat bulan kering atau musim kemarau.

Perbedaan musim pada kedua data ini jelas memberikan pengaruh terhadap signifikansi pergerakan bendungan. Volume air yang tertahan oleh bendungan saat musim kemarau lebih sedikit sehingga dapat mengurangi tekanan terhadap struktur bendungan. Hal ini mengakibatkan pergerakan karena tekanan beban air menjadi lebih minimal. Volume air yang tertahan saat musim hujan lebih besar sehingga meningkatkan tekanan hidrostatik pada dinding bendungan. Hal ini yang mengakibatkan bendungan selama satu tahun mengalami pergerakan yang signifikan.



Gambar IV.46 Grafik curah hujan bulanan



Gambar IV.47 Grafik jumlah hari tanpa hujan

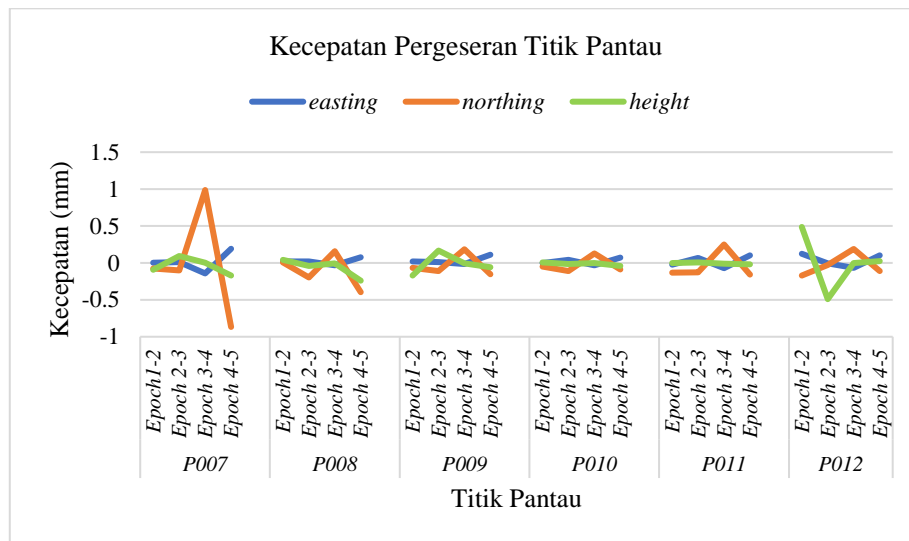
#### IV. 6 Kecepatan Pergeseran Titik Pantau

Kecepatan pergeseran (*velocity rate*) merupakan ukuran yang menggambarkan perubahan posisi titik pantau dalam periode waktu tertentu. Besaran ini digunakan sebagai indikator adanya deformasi pada area pengamatan. Perhitungan kecepatan pergeseran titik pantau dilakukan dengan *software* Matlab 2022. *Script* perhitungan pergerakan dapat ditemukan pada Lampiran K. Kecepatan pergeseran ini menunjukkan besarnya pergeseran per hari karena interval *epoch* y dalam penelitian ini yaitu satu minggu (tujuh hari). Hasil

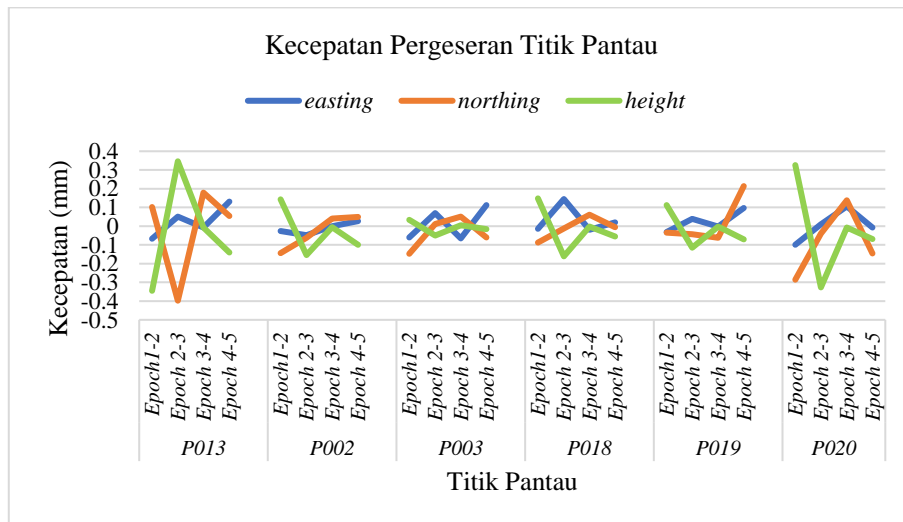
yang diperoleh lebih detail mengenai perubahan posisi titik pantau dalam waktu yang lebih singkat.

#### IV.6.1 Kecepatan Pergeseran Titik Pantau Berdasarkan Data Bulan Juli 2023

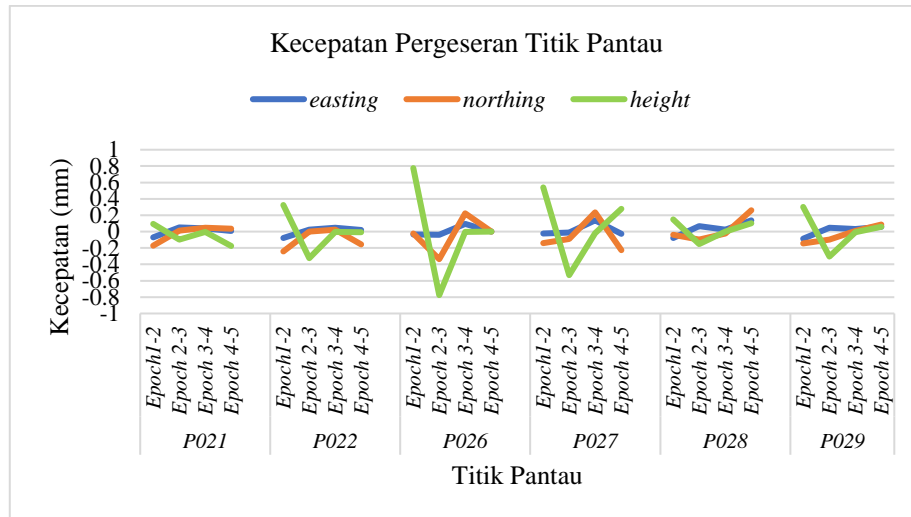
Kecepatan pergerakan titik pantau berdasarkan data bulan Juli ini disajikan dalam bentuk grafik. Grafik ini menggambarkan pola kecepatan pergeseran pada masing-masing titik pantau di setiap *epoch*nya, sehingga mempermudah dalam melakukan analisis. Visualisasi kecepatan pergeseran titik pantau ditunjukkan pada Gambar IV.47 s.d. IV.51.



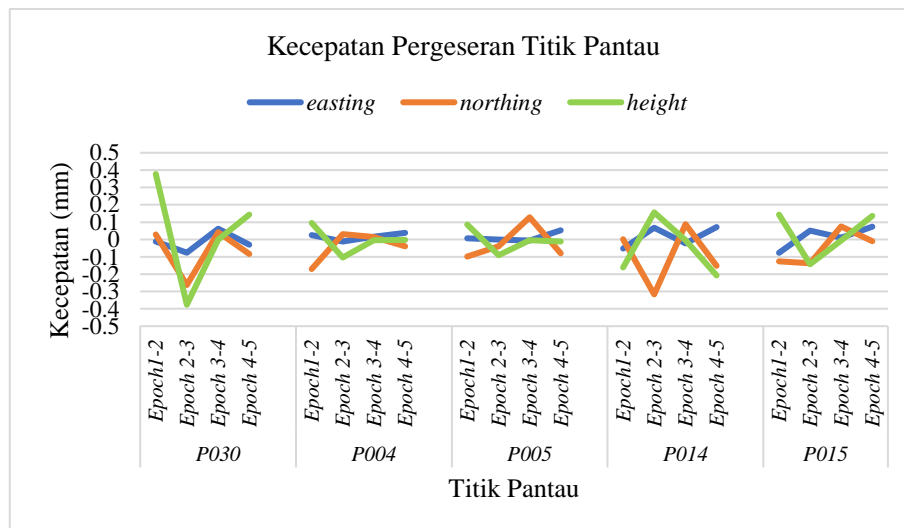
Gambar IV.48 Kecepatan pergerakan titik pantau Juli 2023



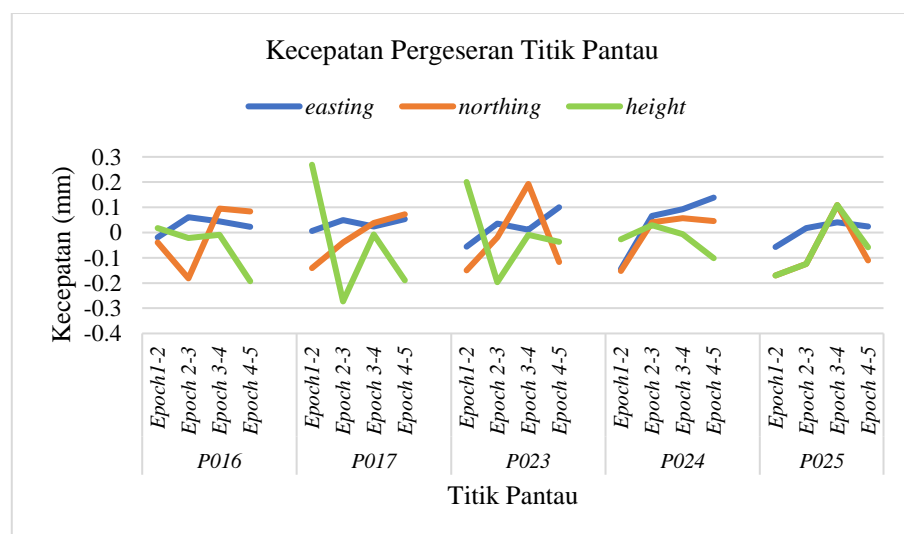
Gambar IV.49 Kecepatan pergerakan titik pantau Juli 2023



Gambar IV.50 Kecepatan pergerakan titik pantau Juli 2023



Gambar IV.51 Kecepatan pergerakan titik pantau Juli 2023



Gambar IV.52 Kecepatan pergerakan titik pantau Juli 2023



Gambar IV.48 s.d. IV.52 menunjukkan grafik pergerakan 28 titik pantau pada interval *epoch* yang telah ditentukan. Garis berwarna biru menggambarkan pola kecepatan pada komponen *easting* dari 28 titik pantau. Secara keseluruhan, nilai kecepatan pergerakan komponen *easting* lebih kecil dibandingkan dengan komponen *northing* dan *height*. Hal ini ditunjukkan dengan pola kecepatan pergerakan komponen *easting* cenderung konstan dan tanpa perubahan signifikan. Nilai kecepatan pergerakan komponen *easting* yang tertinggi hanya mencapai 0,2 mm /hari ke arah sumbu positif.

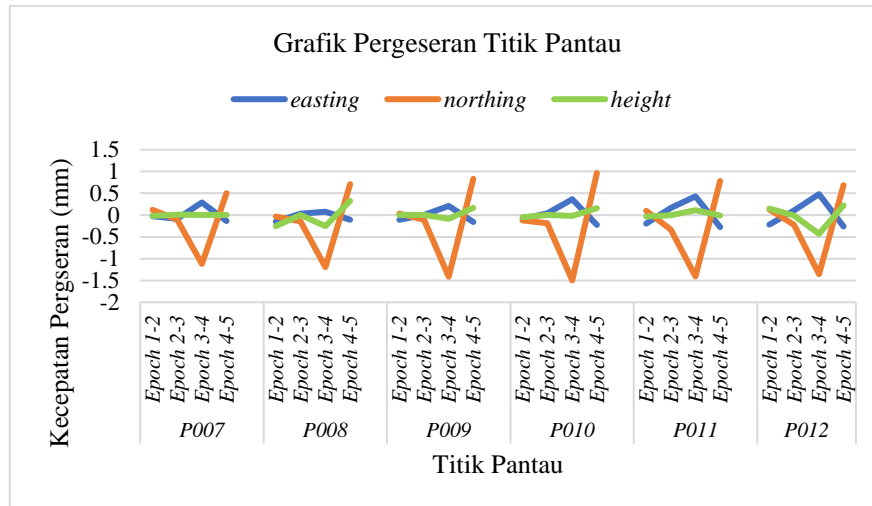
Garis berwarna oranye menunjukkan pola kecepatan pada komponen *northing*. Pola kecepatan pergeseran komponen *northing* cenderung lebih bervariasi dibandingkan dengan komponen *easting*, terlihat dari grafik yang bergerak ke arah sumbu positif dan negatif. Nilai kecepatan tertinggi pada komponen *northing* terjadi di titik P007 pada interval *epoch* 3 s.d. 4 dan *epoch* 4 s.d. 5, mencapai 1 mm/hari baik ke arah sumbu positif maupun negatif.

Garis berwarna hijau menggambarkan pola kecepatan pada komponen *height*. Pola komponen *height* menunjukkan kecenderungan pola paling bervariasi di antara ketiga komponen. Nilai kecepatan tertinggi pada komponen *height* berada di titik P026 untuk interval *epoch* 1 s.d. 2 dan 2 s.d. 3, mencapai 0,8 mm/hari ke arah sumbu positif dan negatif.

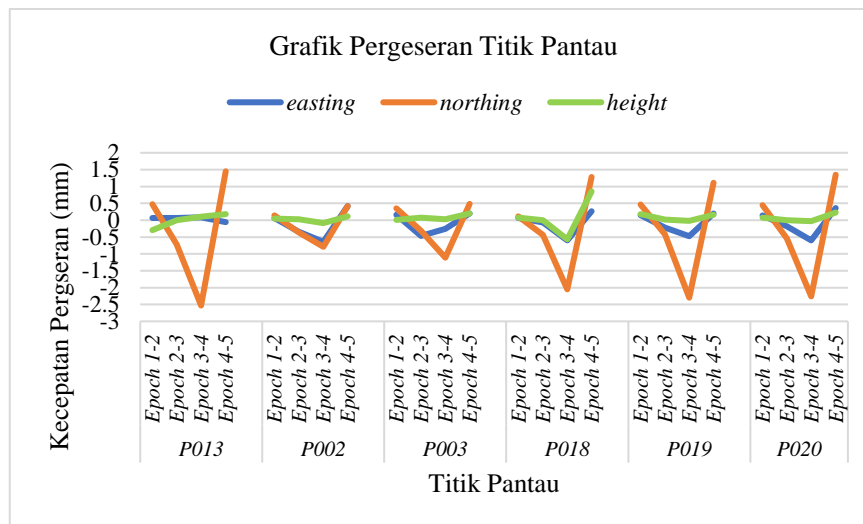
Dengan demikian, secara keseluruhan, nilai kecepatan pergeseran hanya berkisar dibawah 1 mm/hari ke arah sumbu positif dan negatif pada setiap interval *epoch*. Pola kecepatan yang terbentuk cenderung bervariasi pada masing-masing komponen. Hanya saja, terdapat satu titik yang menunjukkan pola berbeda, yaitu pada titik P026 di *epoch* 4 s.d.5 yang disebabkan oleh adanya kekosongan data pada *epoch* tersebut, sehingga pola menjadi mengerucut pada nilai 0.

#### IV.5.2 Kecepatan Pergerakan Titik Pantau Berdasarkan Data Bulan Maret 2024

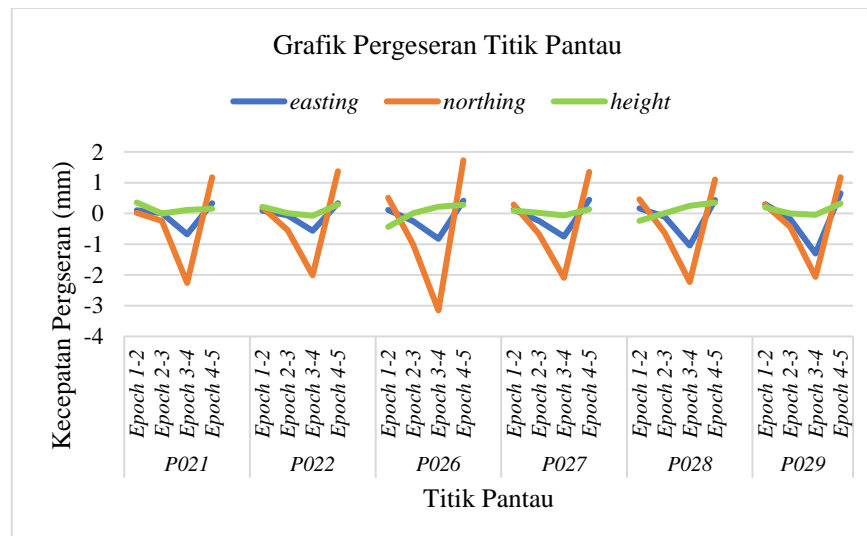
Grafik kecepatan pergerakan titik pantau berdasarkan data bulan Maret disajikan pada pembahasan. Seperti grafik untuk bulan Juli 2023, grafik ini menampilkan pola kecepatan pergerakan pada masing-masing titik pantau di setiap *epoch*. Tujuannya yaitu untuk mempermudah dalam melakukan analisis. Visualisasi kecepatan pergerakan titik pantau ditunjukkan pada Gambar IV.53 s.d. IV.57.



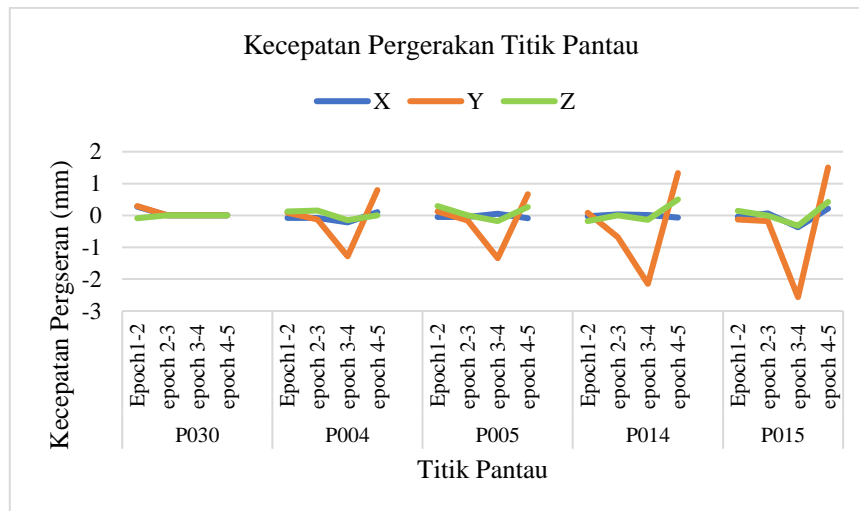
Gambar IV.53 Kecepatan pergerakan titik pantau Maret 2024



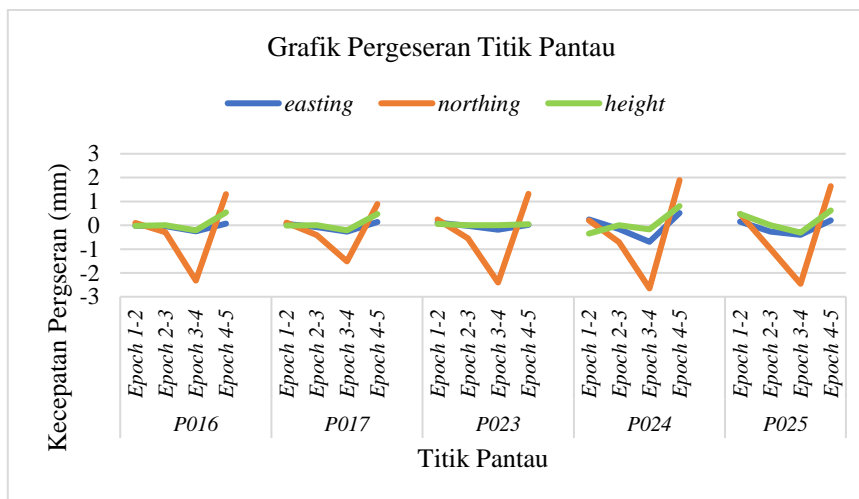
Gambar IV.54 Kecepatan pergerakan titik pantau Maret 2024



Gambar IV.55 Kecepatan pergerakan titik pantau Maret 2024



Gambar IV.56 Kecepatan pergerakan titik pantau Maret 2024



Gambar IV.57 Kecepatan pergerakan titik pantau Maret 2024

Gambar IV.53 s.d. IV.57 menampilkan grafik kecepatan pergeseran titik pantau pada interval *epoch* yang telah ditentukan. Pola komponen *easting* pada 28 titik pantau ditunjukkan oleh garis berwarna biru. Grafik pada titik P007, P008, P009, P010, P011, dan P012 menunjukkan kecenderungan naik ke arah sumbu positif. Titik P021, P022, P026, P027, P028, dan P029 cenderung menunjukkan pola turun ke arah sumbu negatif. Titik lainnya menunjukkan pola konstan. Nilai kecepatan pergerakan komponen *easting* yang terbesar hanya berkisar pada 1,305 mm/hari ke arah sumbu negatif.

Komponen *northing* ditunjukkan dengan garis berwarna oranye. Garis tersebut menunjukkan pola variasi yang signifikan dan memiliki nilai kecepatan pergeseran yang lebih besar dibandingkan komponen *easting* dan *height*. Hal ini ditunjukkan dengan grafik komponen *northing* yang cenderung bergerak naik turun signifikan. Nilai kecepatan terbesar

berada pada titik P026 di interval *epoch* 3 s.d. 4, mencapai lebih dari 3,151 mm ke arah sumbu negatif.

Garis berwarna hijau menggambarkan pola kecepatan pada komponen *height*. Komponen *height* menunjukkan pola konstan dengan sedikit penurunan pada interval *epoch* 4 s.d. 5, dibandingkan dengan komponen *easting* dan *northing*. Secara keseluruhan, nilai kecepatan pergerakan komponen *height* pada setiap interval *epoch* lebih kecil dibandingkan dengan nilai kecepatan pergeseran pada komponen *easting* dan *northing*. Hal ini ditunjukkan dengan pola kecepatan pergeseran yang tidak mengalami fluktuasi signifikan.

Dengan demikian, pola grafik pergerakan 28 titik pantau yang terbentuk cenderung bervariasi. Terdapat satu titik, yaitu titik P030, yang menunjukkan pola berbeda pada interval *epoch* 1 s.d. 2, *epoch* 2 s.d. 3, dan *epoch* 4 s.d.5. Kekosongan data pada ketiga interval *epoch* tersebut menyebabkan pola yang terbentuk berada pada nilai 0. Berbeda dengan data bulan Juli, secara keseluruhan, nilai kecepatan cenderung lebih besar, berkisar kurang dari 5 mm/hari ke arah sumbu positif dan ke arah sumbu negatif.

#### IV. 6. Evaluasi Kestabilan Lereng Bendungan

Setelah analisis deformasi pada titik pantau yang terdapat di lereng bendungan, evaluasi kestabilan lereng dilakukan untuk mengetahui kondisi lereng tersebut dan mengidentifikasi adanya potensi deformasi pada area pengamatan. Kriteria pergerakan mengacu pada nilai kecepatan pergerakan bendungan per hari. Bendungan saat ini belum operasional. BBWS Mesuji Sekampung masih menggunakan ambang batas pergerakan *default* dari *software* GeoMos. Tabel IV.7 merupakan kriteria pergerakan oleh *software* GeoMos.

Tabel IV.7 Klasifikasi pergerakan GeoMos

Kecepatan Pergerakan	Status
<20 mm/hari	Stabil
20 s.d. 40 mm/hari	Hati-hati
40 s.d. 100 mm/hari	Waspada
>100 mm/hari	Evakuasi

Sumber: *software* GeoMos

Nilai pergerakan titik pantau pada bulan Juli 2023 berkisar antara 0,133 s.d. 6,070 mm ke arah sumbu positif dan negatif dalam seminggu, dengan nilai akumulasi satu bulan

berkisar antara 1,715 s.d. 14,421 mm. Hasil hitungan kecepatan pergerakan titik pantau tersebut kurang dari 1 mm/hari dengan pergerakan mengarah keluar bendungan. Sementara itu, nilai pergerakan pada bulan Maret 2024 meningkat dengan rentang 0,071 s.d. 22,810 mm ke arah sumbu positif dan negatif dalam seminggu dan akumulasi satu bulan mencapai 1,281 s.d. 46,159 mm ke arah sumbu positif dan negatif. Kecepatan pergerakan titik pantau bulan Maret 2024 ini kurang dari 5 mm/hari dengan pergerakan mengarah ke luar bendungan.

Berdasarkan analisis data pergerakan pada bulan Juli 2023 dan Maret 2024, bendungan menunjukkan bahwa meskipun terdapat pergerakan pada beberapa titik pantau, nilai kecepatan pergeseran per harinya masih berada dalam batas yang sangat kecil yaitu di bawah 5 mm/hari. Berdasarkan pada Tabel IV.7 klasifikasi pergerakan *software* GeoMos, nilai kecepatan pergeseran tersebut menunjukkan status bendungan yaitu stabil. Hal ini mengindikasikan bahwa, secara keseluruhan, bendungan masih berada dalam kondisi stabil.

Tabel klasifikasi pergerakan GeoMos masih belum merepresentasikan pergerakan bendungan karena kecepatan pergerakan bendungan dalam sehari tidak mencapai lebih dari 10 mm/hari, sehingga perlu digunakan acuan yang lain dalam menentukan klasifikasi status kestabilan bendungan. Mengacu pada penelitian Prasetya & Hendarto 2023, terdapat tabel kriteria kecepatan pergerakan untuk terowongan yang ditunjukkan pada Tabel IV.8. Kriteria ini merupakan generalisasi dari data empiris yang diperoleh berdasarkan hasil pengamatan di beberapa tambang. Penelitian Ryan tahun 2023 menggunakan ambang batas pergerakan *underpass* berdasarkan kriteria pada struktur beton. Bendungan dan terowongan termasuk dalam kriteria struktur beton. Oleh karena itu, tabel kriteria pada terowongan ini cukup relevan digunakan pada bendungan dibandingkan dengan tabel pergerakan pada lereng tambang yang memiliki aktivitas tambang setiap harinya. Berdasarkan Tabel IV.8 tersebut kecepatan pergerakan bendungan juga masuk dalam kategori tidak ada kegagalan dalam 24 jam.

Tabel IV.8 Kriteria pergerakan

Kecepatan Pergerakan	Deskripsi
0,1 mm/hari (0,004 mm/jam)	Respon Awal
< 17 mm/ hari (0,71 mm/jam)	Tidak ada kegagalan dalam 24 jam
< 15 mm/hari (0,61 mm/jam)	Tidak ada kegagalan dalam 48 jam
>50 mm/hari (2,1mm/jam)	Menunjukkan kegagalan progresif (keruntuhan total dalam 48 hari)

Lanjutan Tabel IV.8

Kecepatan Pergerakan	Deskripsi
>100 mm/hari (4,2 mm/jam)	<i>Clear mining area</i>
150 mm/day (5.25 mm/jam)	<i>Clear mining area</i>

Sumber: Prasetya, R., B., dan Hendarto, H. (2023).

Nilai pergerakan titik pantau dalam satu tahun berkisar antara 0,001 hingga 0,046 m. Kecepatan pergerakan tersebut mencapai 23 mm/tahun. Besar pergerakan tersebut masih berada dalam batas yang diizinkan menurut standar US Army Corps Engineer (2018), yang mengindikasikan bahwa penurunan timbunan tanah dan batu secara alami akan berkurang seiring waktu. Angka acuan untuk penurunan vertikal adalah 50-140 mm/tahun dan pergerakan horizontal maksimal 90-100 mm/tahun.

Faktor lingkungan seperti cuaca, perubahan suhu, dan kondisi akuisisi data berpotensi memberikan pengaruh terhadap besarnya pergerakan yang dihasilkan. USBR (2011) menyatakan faktor pengontrol besar dan arah deformasi pada bendungan diantaranya:

1. Properties material yaitu meliputi gradasi, mineral, ukuran material, kadar air dan kepadatan. Sedangkan faktor pengontrol fondasi yaitu kondisi geologi bendungan.
2. Faktor geometri, meliputi bentuk lembarh, diskontinuitas abutmen, zonasi bendungan dan letak struktur pelengkap.
3. Faktor konstruksi meliputi kontrol kadar air dan kepadatan, jenis alat, dan urutan serta siklus konstruksi.
4. Kondisi pembebanan waduk yaitu kondisi awal pengisian, kondisi normal yang berulang-ulang, dan *rapid dropdown*.

Kondisi pembebanan waduk tersebut dipengaruhi salah satunya yaitu beban air. Tekanan air yang bekerja pada inti diuraikan pada gaya arah vertikal dan horizontal. Tekanan air ini dipengaruhi oleh jumlah volume air yang ditahan oleh bendungan. Jumlah volume air ini dipengaruhi secara signifikan oleh curah hujan. Curah hujan tersebut dapat digunakan untuk mengidentifikasi musim yang terjadi pada waktu pengamatan, sehingga akan mempermudah dalam melakukan analisis.

Pada musim hujan, curah hujan cenderung tinggi yaitu lebih dari 150mm/bulan menunjukkan musim hujan. Sedangkan curah hujan kurang dari 60mm/bulan menunjukkan musim kemarau. Volume air yang tertahan lebih besar ketika musim hujan sehingga memberikan tekanan hidrostatik yang besar pula yang mengakibatkan terjadinya pergerakan yang signifikan. Dengan demikian, meskipun terdapat pergerakan yang signifikan pada titik

pantau dalam satu tahun, bendungan tidak menunjukkan adanya ketidakstabilan yang signifikan dan masih dalam kondisi aman. Signifikansi pada hasil uji statistik untuk pergeseran membuktikan bahwa tingkat ketelitian metode pengamatan yang dilakukan sudah memenuhi sensitivitas untuk pemantauan bendungan. Hal ini menandakan hipotesis bendungan dalam kondisi aman atau stabil dinyatakan diterima.



## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### IV.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengolahan data dan analisis yang telah dilakukan, dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Besar nilai pergerakan titik pantau ke arah sumbu positif dan negatif selama satu bulan pada bulan Juli 2023 berdasarkan akumulasi interval *epoch*, berkisar antara 1,715 s.d. 14,421 mm. Sementara itu, pergeseran berdasarkan interval *epoch* 1 s.d. 5 berada pada rentang 0,559 mm hingga 3,038 mm, dengan sebagian besar pergerakan kurang dari 5 mm. Sebaliknya, pada bulan Maret 2024, terjadi peningkatan pergeseran ke arah sumbu positif dan negatif berdasarkan akumulasi interval *epoch* dengan nilai antara 1,281 s.d. 46,159 mm. Sedangkan pergeseran berdasarkan interval *epoch* 1 s.d. 5 sebesar 1,281 mm hingga 14,116 mm, menunjukkan sebagian besar pergerakan lebih dari 5 mm. Perbedaan besar nilai pergerakan tersebut disebabkan karena pergerakan bendungan yang tidak linier. Bendungan dapat bergerak dan kembali ke posisi semula. Hal ini disebabkan oleh besar tekanan yang diterima saat menahan air. Pola pergerakan bendungan mengarah ke luar bendungan karena adanya pengaruh pintu air yang digunakan untuk pengontrol air. Bendungan menahan air tersebut sehingga memberikan tekanan ke arah luar bendungan menjauhi struktur bendungan inti.
2. Hasil analisis dengan tingkat kepercayaan 95% menunjukkan terdapat pergerakan yang signifikan pada komponen horizontal dalam kurun waktu 2023-2024. Sebaliknya, pada komponen vertikal, tidak ditemukan adanya pergerakan signifikan pada periode tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa pergerakan signifikan hanya terjadi pada arah horizontal, sementara arah vertikal cenderung stabil.
3. Nilai kecepatan pergerakan titik pantau yaitu lebih kecil dari 5 mm/hari. Berdasarkan tabel kriteria pergerakan yang digunakan, nilai ini termasuk dalam kategori tidak ada kegagalan dalam 48 jam. Selain itu, berdasarkan standar US Army Corps Engineer (2018), pergerakan tahunan sebesar 23 mm/tahun masih dalam batas aman, karena nilai acuan untuk penurunan vertikal adalah 50 s.d. 140 mm/tahun dan untuk pergerakan horizontal adalah 90 s.d. 100 mm/tahun. Dengan demikian, kondisi kestabilan tubuh Bendungan Margatiga dinyatakan stabil atau aman.

## IV.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran yang dapat dijadikan acuan untuk penelitian berikutnya, yaitu:

1. Perlu memperhatikan adanya kekosongan data ketika menentukan *epoch* yang akan digunakan, yang menyebabkan perbedaan jumlah titik pantau dalam melakukan analisis.
2. Perlu evaluasi pemantauan stabilitas bendungan menggunakan data ketika kondisi bendungan sudah digunakan dan terdapat faktor tekanan air pada saat hujan.
3. Perlu dilakukan analisis deformasi yang lain terkait rotasi dan regangan deformasi.

## Daftar Pustaka

- Aldrian, E., & Susanto, R. (2003). Identification of Three Dominant Rainfall Regions within Indonesia and Their Relationship to Sea Surface Temperature. *International Journal of Climatology*, 23(12). doi: 10.1002/joc.950
- Ayuningtyas, N. H. (2020). Analisis Deformasi pada Titik Pantau Lereng Tambang (Studi Kasus: Lereng Tambang PT. Adaro Indonesia). Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta
- Basuki, S. (2011). Ilmu Ukur Tanah (Edisi Revisi). Gadjah Mada University Press. Yogyakarta
- Szostak-Chrzanowski, A. dan Massiéra, M. (2004). Modelling of Deformations during Construction of a Large Earth Dam in the La Grande Complex. Canada. Technical Sciences, 7, 109-122
- Erol, S., Erol, B. dan Ayan, T. (2005). Analyzing the Deformations of a Bridge using GPS and Levelling Data. IAG Symposium Geodetic Deformation Monitoring: from Geophysical to Engineering Roles, 131, 244- 253.
- Fathani, T. F. (2011). Geotechnical Analysis of Earth Dam Failure. PIT XIV HATTI, 485.
- Ghilani, C.D. (2010). Adjustment Computations Spatial Data Analysis. Fifth Edition. John Wiley dan Sons, Inc. Hoboken. New Jersey
- Giarno, Hadi, M. P., Suprayogi, S., & Murti, S. H. (2020). Bias Correction of Radar and Satellite Rainfall Estimates and Increasing Its Accuracy Using Modified Merging. *MAUSAM*, 71(3), 377-390.
- Giarno, Dupe, Z. L., & Mustofa, M. A. (2012). Kajian Awal Musim Hujan Dan Awal Musim Kemarau di Indonesia. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 13(1), 1-8.
- Kahar, S. (2006). Pengukuran untuk Mendeteksi Deformasi. Media Komunikasi Teknik Sipil, 14 (1), 78-84.
- Kuang, S. (1996). Geodetic Network Analysis and Optimal Design: Concepts and Applications. Ann Arbor Press Inc. U.S.A.
- Laudza'i, L. (2018) Analisis Deformasi Bendungan Gajah Mungkur, Wonogiri dengan Pendekatan Geometrik. Tesis. Program Studi Magister Teknik Geomatika. Pascasarjana Fakultas Teknik. Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.

- Lienhart, Werner, Matthias Ehrhart, dan Magdalena Grick. (2017). "High Frequent Total Station Measurements for the Monitoring of Bridge Vibrations." *Journal of Applied Geodesy*, 11 (1), 1–8.
- Li, B., & Chen, Z. (2015). Analysis about the influence of clay core wall structure towards the slope stability of high embankment dam. *MATEC Web of Conferences*, 25.
- Mikhail, E.M. dan Gracie, G. (1981). *Analysis and Adjustment of Survey Measurements*. Fun Nostrand Reinhold Company. New York.
- Nathania, C. (2013). *Kajian Pengaruh Penggunaan Metode Survei GPS Jaringan Tertutup dan Radial terhadap Ketelitian Posisi*. Tesis. Institut Teknologi Bandung. Bandung.
- Prasetya, R., B., dan Hendarto, H. (2023). Real Time Monitoring Using Robotic Total Station on the Outlet Slope of the Cisumdawu Tunnel, West Java. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. doi:10.1088/1755-1315/1233/1/012025
- Prasetyo, B., Irwandi, H., & Pusparini, N. (2018). Karakteristik Curah Hujan Berdasarkan Ragam Topografi di Sumatera Utara. *Jurnal Sains dan Teknologi Modifikasi Cuaca*, 19(1), 11-20.
- PUPR. (2023). *Kementrian PUPR Targetkan Penyelesaian Bendungan Margatiga di Lampung Pada 2024*.
- Putra, W. P. (2013). *Penentuan Pergerakan Lereng Menggunakan Hitungan Kuadrat Terkecil Metode Parameter dan Hitungan Software GeoMoS*. Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.
- Sari, L. A. (2016). *Pengaruh Temperatur dan Tekanan Udara Terhadap Ukuran Sudut Horizontal dan Sudut Vertikal*. Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.
- Shrestha, N. K., Qamer, F. M., Pedreros, D., Murthy, M. S. R., Wahid, S. M., & Shrestha, M. (2017). Evaluating the Accuracy of Climate Hazard Group (CHG) Satellite Rainfall Estimates for Precipitation-based Drought Monitoring in Koshi Basin, Nepal. *J. Hydrol. Reg. Stud.*, 13. doi: 10.1016/j.ejrh.2017.08.004.
- Sucahyono, D. and Ribudiyanto, K., 2013, "Cuaca dan iklim ekstrim", STMKG, Tangerang Selatan.
- Sumanth, H. C., & Govindaraju, L. (2020). A Comprehensive Seismic Slope Stability Assessment of Earth Dams. *Advances in Geotechnical Engineering*, 3(3), 1–14
- Uotila, U.A. (1988). *Adjustment Computation, Part II*. Department of Geodetic Science and Surveying the Ohio State University. Columbus Ohio.
- US Army Corps of Engineers. (2018). *Structural Deformation Surveying*.

- USB, 2011. Design Standard No.13 Embankment Dams Chapter 9: Static Deformation Analysis Phase 4 (Final). Washinngton: USB.
- Yusuf M.A., Yuwono B.D., Prasetyo Y. (2015). Pengamatan GPS Untuk Monitoring Deformasi Bendungan Undip. Jurnal Geodesi Undip. 4(4).
- Widjajanti, N. (1997). Deformasi Vertikal (dengan Pendekatan Geodetik). Jurusan Teknik Geodesi. Fakultas Teknik. Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Widjajanti, N. (2001). Deformasi Dasar, Jurusan Teknik Geodesi. Fakultas Teknik. Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.
- Widjajanti, N., Muryamto, R., Heliani, L.S., dan Yulaikhah. (2017). Hitung Perataan. Diklat. Departemen Teknik Geodesi. Fakultas Teknik. Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.
- Widyaningsih, L. (2019). Penentuan Koordinat 3D pada Titik Pantau Deformasi Badan Candi Prambanan dengan Hitung Perataan. Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.
- Wijaya, C., Salsabila, R., Mubarak, R., dan Setiyawan, J. (2022). Analisis Pergerakan Titik Pantau Dinding Candi Borobudur Menggunakan *Robotic Total Station* (RTS). Borobudur, 16(1), 79-97.

## Lampiran

1. LAMPIRAN A (Data pengamatan bulan Juli 2023 dan bulan Maret 2024)
2. LAMPIRAN B (Koordinat pendekatan)
3. LAMPIRAN C (Koordinat dan simpangan baku hasil HKT bulan Juli 2023)
4. LAMPIRAN D (Koordinat dan simpangan baku hasil HKT bulan Maret 2024)
5. LAMPIRAN E (Hasil perhitungan besar dan arah pergerakan bulan Juli 2023)
6. LAMPIRAN F (Hasil Perhitungan besar dan arah pergerakan bulan Maret 2024)
7. LAMPIRAN G (Hasil Perhitungan kecepatan pergerakan dan simpangan baku bulan Juli 2023)
8. LAMPIRAN H (Hasil perhitungan kecepatan pergerakan dan simpangan baku bulan Maret 2024)
9. LAMPIRAN I (*Script* HKT metode parameter)
10. LAMPIRAN J (*Script* uji deformasi)
11. LAMPIRAN K (*Script* perhitungan kecepatan)
12. LAMPIRAN L (Tabel *Fisher*)
13. LAMPIRAN M (Tabel *t*)
14. LAMPIRAN N (*Link Google Earth Engine* perolehan data curah hujan)
15. LAMPIRAN O (Tabel curah hujan bulanan)
16. LAMPIRAN P (Tabel jumlah hari dengan curah hujan dibawah 1 mm)

## LAMPIRAN A

(Data pengamatan bulan Juli 2023 dan bulan Maret 2024)

Link:

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1wIIwoEA7pk90orCJNUH1iSk4IXFT0HVX/edit?usp=sharing&ouid=116916612993447905487&rtpof=true&sd=true>

Link:

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1kcXA9vebz56NTwc90PineRprOsBKQz1W/edit?usp=sharing&ouid=116916612993447905487&rtpof=true&sd=true>

## LAMPIRAN B

(Koordinat pendekatan)

Link :

[https://docs.google.com/spreadsheets/d/1vzeV9N6XYoY5XGo6V6jIAIi\\_jW\\_NGAYZ/edit?usp=sharing&ouid=116916612993447905487&rtpof=true&sd=true](https://docs.google.com/spreadsheets/d/1vzeV9N6XYoY5XGo6V6jIAIi_jW_NGAYZ/edit?usp=sharing&ouid=116916612993447905487&rtpof=true&sd=true)

## LAMPIRAN C

(Koordinat dan simpangan baku hasil HKT bulan Juli 2023)

link :

[https://docs.google.com/spreadsheets/d/1vzeV9N6XYoY5XGo6V6jIAIi\\_jW\\_NGAYZ/edit?usp=sharing&ouid=116916612993447905487&rtpof=true&sd=true](https://docs.google.com/spreadsheets/d/1vzeV9N6XYoY5XGo6V6jIAIi_jW_NGAYZ/edit?usp=sharing&ouid=116916612993447905487&rtpof=true&sd=true)

## LAMPIRAN D

(Koordinat dan simpangan baku hasil HKT bulan Maret 2024)

Link:

[https://docs.google.com/spreadsheets/d/1ATK\\_GUQgSsSvFh\\_m\\_ULMnj5cShuNTEvC/edit?usp=sharing&ouid=116916612993447905487&rtpof=true&sd=true](https://docs.google.com/spreadsheets/d/1ATK_GUQgSsSvFh_m_ULMnj5cShuNTEvC/edit?usp=sharing&ouid=116916612993447905487&rtpof=true&sd=true)

## LAMPIRAN E

(Hasil perhitungan besar dan arah pergerakan bulan Juli 2023)

Link:

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1ZjruVMGpqVB-VOAuPGqAeHcMBtW3V9k3/edit?usp=sharing&ouid=116916612993447905487&rtpof=true&sd=true>



## LAMPIRAN F

(Hasil perhitungan besar dan arah pergerakan bulan Maret 2024)

Link :

[https://docs.google.com/spreadsheets/d/1oZUuXustbfGp6h4LMqUOAt\\_DH5tZ0uWdrGvzXT-V3jo/edit?usp=sharing](https://docs.google.com/spreadsheets/d/1oZUuXustbfGp6h4LMqUOAt_DH5tZ0uWdrGvzXT-V3jo/edit?usp=sharing)

## LAMPIRAN G

(Hasil perhitungan kecepatan pergerakan dan simpangan baku bulan Juli 2023)

Link :

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/17XWwzdVEVuw3rwd5N0I5wa45bsu0Gpqu/edit?usp=sharing&ouid=116916612993447905487&rtpof=true&sd=true>

## LAMPIRAN H

(Hasil perhitungan kecepatan pergerakan dan simpangan baku bulan Maret 2024)

Link :

[https://docs.google.com/spreadsheets/d/1iDG5bo\\_06xUgWZVuHiX4Yo72UjtadHrXXZXy\\_F3Fxo8/edit?usp=sharing](https://docs.google.com/spreadsheets/d/1iDG5bo_06xUgWZVuHiX4Yo72UjtadHrXXZXy_F3Fxo8/edit?usp=sharing)

## LAMPIRAN I

(Script HKT metode parameter)

Link :

[https://drive.google.com/file/d/1vDMcs8v378c2ExaOAVko8Ijt7w01uAup/view?usp=drive\\_link](https://drive.google.com/file/d/1vDMcs8v378c2ExaOAVko8Ijt7w01uAup/view?usp=drive_link)

## LAMPIRAN J

(Script uji deformasi)

Link :

[https://drive.google.com/file/d/13PdSQLq3GEltKWAXIfn4M8N1h4oSHqeC/view?usp=drive\\_link](https://drive.google.com/file/d/13PdSQLq3GEltKWAXIfn4M8N1h4oSHqeC/view?usp=drive_link)

## LAMPIRAN K

(Script perhitungan kecepatan)

Link :

[https://drive.google.com/file/d/1zXPavTQYLDyQHCIrfGOgJrox6dKq5il\\_/view?usp=drive\\_link](https://drive.google.com/file/d/1zXPavTQYLDyQHCIrfGOgJrox6dKq5il_/view?usp=drive_link)

## LAMPIRAN L

(Tabel *Fisher*)

	Numerator degrees of freedom																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5	241.9	243.9	245.9	248.0	249.1	250.1	251.1	252.2	253.3	254.3
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.41	19.43	19.45	19.45	19.46	19.47	19.48	19.49	19.50
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.70	8.66	8.64	8.62	8.59	8.57	8.55	8.53
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.66	5.63
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62	4.56	4.53	4.50	4.46	4.43	4.40	4.36
6	6.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.94	3.87	3.84	3.81	3.77	3.74	3.70	3.67
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.44	3.41	3.38	3.34	3.30	3.27	3.23
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.15	3.12	3.08	3.04	3.01	2.97	2.93
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.94	2.90	2.86	2.83	2.79	2.75	2.71
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85	2.77	2.74	2.70	2.66	2.62	2.58	2.54
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.72	2.65	2.61	2.57	2.53	2.49	2.45	2.40
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.62	2.54	2.51	2.47	2.43	2.38	2.34	2.30
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53	2.46	2.42	2.38	2.34	2.30	2.25	2.21
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.46	2.39	2.35	2.31	2.27	2.22	2.18	2.13
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.40	2.33	2.29	2.25	2.20	2.16	2.11	2.07
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.35	2.28	2.24	2.19	2.15	2.11	2.06	2.01
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31	2.23	2.19	2.15	2.10	2.06	2.01	1.96
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27	2.19	2.15	2.11	2.06	2.02	1.97	1.92
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98	1.93	1.88
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.20	2.12	2.08	2.04	1.99	1.95	1.90	1.84
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92	1.87	1.81
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.15	2.07	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.78
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.20	2.13	2.05	2.01	1.96	1.91	1.86	1.81	1.76
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.18	2.11	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.79	1.73
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.77	1.71
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.15	2.07	1.99	1.95	1.90	1.85	1.80	1.75	1.69
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.13	2.06	1.97	1.93	1.88	1.84	1.79	1.73	1.67
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.12	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.77	1.71	1.65
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.10	2.03	1.94	1.90	1.85	1.81	1.75	1.70	1.64
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.01	1.93	1.89	1.84	1.79	1.74	1.68	1.62
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.00	1.92	1.84	1.79	1.74	1.69	1.64	1.58	1.51
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.92	1.84	1.75	1.70	1.65	1.59	1.53	1.47	1.39
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.17	2.09	2.02	1.96	1.91	1.83	1.75	1.66	1.61	1.55	1.50	1.43	1.35	1.25
∞	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.83	1.75	1.67	1.57	1.52	1.46	1.39	1.32	1.22	1.00

Sumber : <http://faculty.washington.edu/heagerty/Books/Biostatistics/TABLES/F-Tables/>

## LAMPIRAN M

(Tabel *t student*)

<b>t Table</b>											
cum. prob	$t_{.50}$	$t_{.75}$	$t_{.80}$	$t_{.85}$	$t_{.90}$	$t_{.95}$	$t_{.975}$	$t_{.99}$	$t_{.995}$	$t_{.999}$	$t_{.9995}$
one-tail	0.50	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05	0.025	0.01	0.005	0.001	0.0005
two-tails	1.00	0.50	0.40	0.30	0.20	0.10	0.05	0.02	0.01	0.002	0.001
df											
1	0.000	1.000	1.376	1.963	3.078	6.314	12.71	31.82	63.66	318.31	636.62
2	0.000	0.816	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	22.327	31.599
3	0.000	0.765	0.978	1.250	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	10.215	12.924
4	0.000	0.741	0.941	1.190	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	7.173	8.610
5	0.000	0.727	0.920	1.156	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	5.893	6.869
6	0.000	0.718	0.906	1.134	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.208	5.959
7	0.000	0.711	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.785	5.408
8	0.000	0.706	0.889	1.108	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	4.501	5.041
9	0.000	0.703	0.883	1.100	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.297	4.781
10	0.000	0.700	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.144	4.587
11	0.000	0.697	0.876	1.088	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.025	4.437
12	0.000	0.695	0.873	1.083	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.930	4.318
13	0.000	0.694	0.870	1.079	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.852	4.221
14	0.000	0.692	0.868	1.076	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.787	4.140
15	0.000	0.691	0.866	1.074	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.733	4.073
16	0.000	0.690	0.865	1.071	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.686	4.015
17	0.000	0.689	0.863	1.069	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.646	3.965
18	0.000	0.688	0.862	1.067	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.610	3.922
19	0.000	0.688	0.861	1.066	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.579	3.883
20	0.000	0.687	0.860	1.064	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.552	3.850
21	0.000	0.686	0.859	1.063	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.527	3.819
22	0.000	0.686	0.858	1.061	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.505	3.792
23	0.000	0.685	0.858	1.060	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.485	3.768
24	0.000	0.685	0.857	1.059	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.467	3.745
25	0.000	0.684	0.856	1.058	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.450	3.725
26	0.000	0.684	0.856	1.058	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.435	3.707
27	0.000	0.684	0.855	1.057	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.421	3.690
28	0.000	0.683	0.855	1.056	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.408	3.674
29	0.000	0.683	0.854	1.055	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.396	3.659
30	0.000	0.683	0.854	1.055	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.385	3.646
40	0.000	0.681	0.851	1.050	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.307	3.551
60	0.000	0.679	0.848	1.045	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	3.232	3.460
80	0.000	0.678	0.846	1.043	1.292	1.664	1.990	2.374	2.639	3.195	3.416
100	0.000	0.677	0.845	1.042	1.290	1.660	1.984	2.364	2.626	3.174	3.390
1000	0.000	0.675	0.842	1.037	1.282	1.646	1.962	2.330	2.581	3.098	3.300
<b>Z</b>	0.000	0.674	0.842	1.036	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	3.090	3.291
	0%	50%	60%	70%	80%	90%	95%	98%	99%	99.8%	99.9%
Confidence Level											

(Sumber : Hendrawan, 2011, Analisis Pergeseran Horisontal Bendungan Waduk Sermo, Skripsi Jurusan Teknik Geodesi, Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada.)

## LAMPIRAN N

(Script GEE untuk memperoleh curah hujan)

Script: <https://code.earthengine.google.com/723da58578e522c181eb7a881efa1afa>

## LAMPIRAN O

(Tabel curah hujan bulanan)

Tahun	Bulan												Total (mm/tahun)
	Jan	Feb	Mar	April	Mei	Jun	Jul	Ags	Sep	Okt	Nov	Des	
2014						288,334	287,061	84,838	41,491	50,807	342,869	535,826	1631,226
2015	453,509	501,048	422,935	346,077	83,264	87,613	45,033	56,043	29,183	11,732	154,275	435,581	2626,293
2016	299,657	436,678	405,918	396,081	308,726	269,931	341,035	239,811	456,577	325,337	685,295	387,872	4552,918
2017	517,682	531,753	373,245	336,003	340,935	313,767	289,414	97,053	161,536	207,333	529,897	544,934	4243,552
2018	310,332	514,559	436,452	338,453	197,832	205,115	24,367	68,848	98,454	127,937	449,131	300,692	3072,172
2019	426,749	372,047	575,849	322,925	171,277	92,008	48,526	29,776	31,669	35,012	86,615	431,883	2624,336
2020	597,486	441,424	491,137	396,552	306,485	277,839	190,608	130,77	346,307	343,505	319,244	572,74	4414,097
2021	416,784	460,741	360,949	424,016	196,625	285,183	144,739	246,715	342,079	350,191	527,583	396,835	4152,44
2022	386,958	399,034	398,396	397,666	291,925	255,281	254,762	359,584	437,566	428,503	503,538	292,508	4405,721
2023	344,814	497,356	521,061	309,929	200,022	261,145	195,5	102,651	18,285	8,478	327,733	234,375	3021,349
2024	396,643	342,349	506,784	630,629	204,577								2080,982
MAX	597,486	531,753	575,849	630,629	340,935	313,767	341,035	359,584	456,577	428,503	685,295	572,74	
AVERAGE	415,0614	449,6989	449,2726	389,8331	230,1668	233,6216	182,1045	141,6089	196,3147	188,8835	392,618	413,3246	
MIN	299,657	342,349	360,949	309,929	83,264	87,613	24,367	29,776	18,285	8,478	86,615	234,375	

## LAMPIRAN P

(Tabel jumlah hari dengan curah hujan dibawah 1 mm)

Tahun	Bulan											
	Jan	Feb	Mar	April	Mei	Jun	Jul	Ags	Sep	Okt	Nov	Des
2014						13	21	25	26	22	11	3
2015	3	9	6	5	22	22	28	29	25	28	15	1
2016	8	7	4	4	12	12	12	18	12	4	3	2
2017	1	3	5	8	17	15	16	24	25	9	1	3
2018	3	5	5	9	18	18	27	25	24	18	8	5
2019	4	5	5	11	20	21	27	29	25	24	22	6
2020	3	6	4	6	8	10	17	24	18	10	9	3
2021	3	1	3	10	13	9	24	17	16	14	1	3
2022	4	3	4	11	12	6	19	16	7	4	4	6
2023	2	3	8	10	14	15	20	27	27	28	12	11
2024	5	4	6	1	15							
AVERAGE	4	5	5	8	15	14	21	23	21	16	9	4