

**PENERAPAN *DIGITAL IMAGE CORRELATION* UNTUK  
MENGUKUR ARAH VEKTOR PERGESERAN DEFORMASI  
KUBAH GUNUNG MERAPI MENGGUNAKAN DATA  
*DIGITAL ELEVATION MODEL***



Disusun oleh :  
**MUHAMMAD AZKA HARTAMI**  
**123200051**

**PROGRAM STUDI INFORMATIKA  
JURUSAN INFORMATIKA  
FAKULTAS TEKNIK INDUSTRI  
UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL "VETERAN"  
YOGYAKARTA  
2025**

**PENERAPAN *DIGITAL IMAGE CORRELATION* UNTUK  
MENGUKUR ARAH VEKTOR PERGESERAN DEFORMASI  
KUBAH GUNUNG MERAPI MENGGUNAKAN DATA  
*DIGITAL ELEVATION MODEL***

**TUGAS AKHIR**

Tugas Akhir ini sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana S-1 di Program Studi Informatika, Jurusan Informatika, Fakultas Teknik Industri, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta



Disusun oleh :  
**MUHAMMAD AZKA HARTAMI**  
**123200051**

**PROGRAM STUDI INFORMATIKA  
JURUSAN INFORMATIKA  
FAKULTAS TEKNIK INDUSTRI  
UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL "VETERAN"  
YOGYAKARTA  
2025**

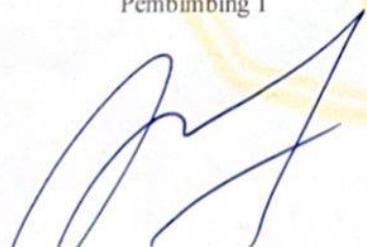
HALAMAN PENGESAHAN PEMBIMBING

PENERAPAN DIGITAL IMAGE CORRELATION UNTUK MENGUKUR ARAH  
VEKTOR PERGESERAN DEFORMASI KUBAH GUNUNG MERAPI  
MENGUNAKAN DATA DIGITAL ELEVATION MODEL

Disusun Oleh:  
Muhammad Azka Hartami  
123200051

Telah diuji dan dinyatakan lulus oleh pembimbing  
pada tanggal: 18 Maret 2025

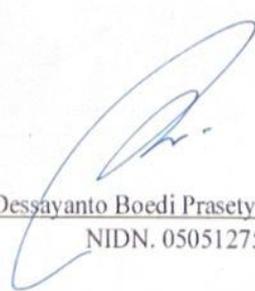
Menyetujui,  
Pembimbing 1

  
Dr. Awang Hendrianto Pratomo, S.T., M.T.  
NIDN. 0025077701

Menyetujui,  
Pembimbing 2

  
Dr. Agus Budi Santoso, S.Si. M.Sc  
NIP. 198008272005021001

Mengetahui,  
Koordinator Program Studi

  
Dessayanto Boedi Prasetyo, S.T., M.T.  
NIDN. 0505127501

## HALAMAN PENGESAHAN PENGUJI

### PENERAPAN DIGITAL IMAGE CORRELATION UNTUK MENGUKUR ARAH VEKTOR PERGESERAN DEFORMASI KUBAH GUNUNG MERAPI MENGUNAKAN DATA DIGITAL ELEVATION MODEL

Disusun Oleh:

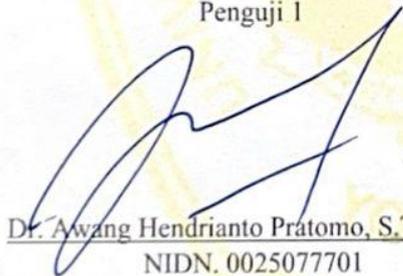
Muhammad Azka Hartami

123200051

Telah diuji dan dinyatakan lulus oleh penguji  
pada tanggal: 19 Maret 2025

Menyetujui,

Penguji 1



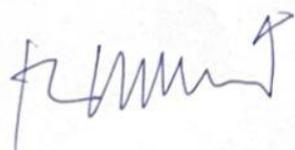
Dr. Awang Hendrianto Prátomo, S.T., M.T.  
NIDN. 0025077701

Penguji 2



Andiko Putro Suryotomo, S.Kom., M.Cs.  
NIDN. 0030098504

Penguji 3



Frans Richard K., S.T., M.Kom, Ph.D.  
NIDN. 0523026201

Penguji 4



Budi Santosa, S.Si., M.T.  
NIDN. 0510097001

## PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Muhammad Azka Hartami  
NIM : 123200051  
Fakultas/Prodi : Teknik Industri/Informatika

Dengan ini saya menyatakan bahwa judul Tugas Akhir:

### **PENERAPAN *DIGITAL IMAGE CORRELATION* UNTUK MENGUKUR ARAH VEKTOR PERGESERAN DEFORMASI KUBAH GUNUNG MERAPI MENGGUNAKAN DATA *DIGITAL ELEVATION MODEL***

adalah hasil kerja saya sendiri dan benar bebas dari plagiasi kecuali cuplikan sefia ringkasan yang terdapat di dalamnya telah saya jelaskan sumbernya (Sitasi) dengan jelas. Apabila pernyataan ini terbukti tidak benar maka saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan Mendiknas RI No 17 Tahun 2010 dan Peraturan Perundang-undangan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan penuh tanggung jawab.

Yogyakarta, 17 Maret 2025.....  
Yang membuat Pernyataan,



Muhammad Azka Hartami  
NIM. 123200051

## SURAT PERNYATAAN KARYA ASLI TUGAS AKHIR

Sebagai mahasiswa Program Studi Informatika Fakultas Teknik Industri Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta, yang bertanda tangan dibawah ini, saya:

Nama : Muhammad Azka Hartami  
NIM : 123200051

Menyatakan bahwa karya ilmiah saya yang berjudul:

### **PENERAPAN *DIGITAL IMAGE CORRELATION* UNTUK MENGUKUR ARAH VEKTOR PERGESERAN DEFORMASI KUBAH GUNUNG MERAPI MENGGUNAKAN DATA *DIGITAL ELEVATION MODEL***

merupakan karya asli saya dan belum pernah dipublikasikan dimanapun. Apabila di kemudian hari, karya saya disinyalir bukan merupakan karya asli saya, maka saya bersedia menerima konsekuensi apa pun yang diberikan Program Studi Teknik Informatika Fakultas Teknik Industri Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta kepada saya.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan penuh tanggung jawab.

Yogyakarta, 17 Maret 2025.....  
Yang membuat Pernyataan,



Muhammad Azka Hartami  
NIM. 123200051

## ABSTRAK

Gunung Merapi merupakan salah satu gunung api paling aktif di Indonesia yang mengalami deformasi kubah akibat aktivitas vulkaniknya. Pemantauan deformasi menjadi aspek penting dalam mitigasi bencana guna memahami pola pergerakan dan potensi erupsi. Salah satu metode yang digunakan dalam pemantauan deformasi adalah *Electronic Distance Measurement* (EDM), yang digunakan oleh Balai Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kebencanaan Geologi (BPPTKG). Meskipun memiliki akurasi tinggi, EDM hanya mampu melakukan pengukuran pada titik-titik tertentu, sehingga kurang optimal dalam memberikan gambaran menyeluruh terhadap perubahan morfologi kubah gunung.

Penelitian ini menerapkan metode *Digital Image Correlation* (DIC) untuk menganalisis vektor deformasi kubah Gunung Merapi menggunakan data *Digital Elevation Model* (DEM) dari periode 2020 hingga 2024. Data DEM diperoleh dari BPPTKG dan terdiri dari lima dataset dengan interval waktu tahunan. Pemrosesan data dilakukan melalui beberapa tahap, yaitu *preprocessing*, pembagian grid, *template matching*, serta perhitungan *Displacement* dan *Strain*. Proses analisis dilakukan dengan *Python Package Py2DIC* yang telah dimodifikasi oleh BPPTKG untuk meningkatkan ketepatan korelasi citra dalam perhitungan vektor perpindahan dan distribusi strain. Hasil analisis menunjukkan bahwa pergerakan terbesar terjadi pada periode 2020–2021 dengan arah dominan ke barat laut, sesuai dengan hasil pengukuran EDM oleh BPPTKG.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa metode DIC mampu mengidentifikasi pola deformasi dengan lebih rinci dibandingkan EDM, dengan resolusi spasial yang lebih tinggi dan cakupan area yang lebih luas. Visualisasi deformasi dalam bentuk vektor memberikan gambaran lebih jelas mengenai dinamika kubah Gunung Merapi. Namun, keakuratan hasil sangat bergantung pada kualitas data DEM serta parameter analisis yang digunakan, seperti ukuran grid, metode interpolasi subpiksel, dan akurasi *template matching*. Oleh karena itu, integrasi DIC dengan EDM dapat meningkatkan efektivitas pemantauan deformasi dengan menyediakan data kuantitatif dan visual yang lebih komprehensif, sehingga mendukung upaya mitigasi bencana yang lebih baik.

**Kata Kunci:** *Digital Image Correlation, Digital Elevation Model, deformasi kubah, Gunung Merapi.*

## ***ABSTRACT***

Mount Merapi is one of the most active volcanoes in Indonesia, experiencing dome deformation due to its volcanic activity. Monitoring deformation is a crucial aspect of disaster mitigation to understand movement patterns and potential eruptions. One of the methods used for deformation monitoring is Electronic Distance Measurement (EDM), which is utilized by the Center for Investigation and Development of Geological Disaster Technology (BPPTKG). Although highly accurate, EDM is limited to point-based measurements, making it less optimal for providing a comprehensive overview of morphological changes in the volcanic dome.

This study applies the Digital Image Correlation (DIC) method to analyze the deformation vectors of Mount Merapi's dome using Digital Elevation Model (DEM) data from 2020 to 2024. The DEM data were obtained from BPPTKG and consist of five datasets with different time intervals. Data processing was carried out through several stages, including preprocessing, grid division, *template matching*, and the calculation of *Displacement* and *Strain*. The analysis process was conducted using the Python Package Py2DIC, which has been modified by BPPTKG to enhance image correlation accuracy in calculating *displacement* vectors and strain distribution. The results indicate that the most significant movement occurred during the 2020–2021 period, with a dominant northwestward direction, aligning with EDM measurements conducted by BPPTKG.

The findings demonstrate that the DIC method can identify deformation patterns in greater detail compared to EDM, with higher spatial resolution and broader area coverage. The visualization of deformation vectors provides a clearer depiction of Mount Merapi's dome dynamics. However, the accuracy of the results highly depends on the quality of the DEM data and the analytical parameters used, such as grid size, subpixel interpolation methods, and *template matching* accuracy. Therefore, integrating DIC with EDM can enhance the effectiveness of deformation monitoring by providing more comprehensive quantitative and visual data, thereby supporting better disaster mitigation efforts.

**Keywords:** *Digital Image Correlation, Digital Elevation Model, dome deformation, Mount Merapi.*

## PRAKATA

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas berkat dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian Tugas Akhir yang berjudul “Penerapan Digital Image Correlation Untuk Mengukur Arah Vektor Pergeseran Deformasi Kubah Gunung Merapi Menggunakan Data Digital Elevation Model” ini. Sholawat serta salam semoga senantiasa dilimpahkan kepada Nabi Besar Muhammad SAW dan para keluarga serta sahabatnya hingga akhir zaman. Selama proses pengerjaan tugas akhir ini, penulis menyadari bahwa mendapatkan bantuan dari berbagai pihak sehingga pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu dan Ayah penulis yang selalu mendukung secara moril maupun materil selama perkuliahan di UPN “Veteran” Yogyakarta. Semoga selesainya tugas akhir ini dapat membuat Ibu kembali sehat.
2. Bapak Dr. Awang Hendrianto Pratomo, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan, dan dukungan selama penulisan Tugas Akhir penelitian ini.
3. Bapak Dr. Agus Budi Santoso, S.Si. M.Sc. selaku Kepala Balai Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kebencanaan Geologi (BPPTKG) dan juga pembimbing kedua yang telah memberikan arahan, bimbingan, serta dukungan selama penulisan Tugas Akhir penelitian ini.
4. Bapak Andiko Putro Suryotomo, S.Kom., M.Cs., Bapak Frans Richard K., S.T., M.Kom, Ph.D., Bapak Budi Santosa, S.Si., M.T. selaku dosen penguji yang telah memberikan arahan, bimbingan, dan dukungan dalam penulisan Tugas Akhir penelitian ini.
5. Inelia Putri Ananda yang selalu membantu dan menemani penulis dalam perkuliahan di Yogyakarta.
6. Rekan-rekan Prodi Informatika Angkatan 2020 terkhususnya yang telah memberikan bantuan dalam pelaksanaan Tugas Akhir penulis.
7. Teman-teman dari Tanjungpinang yaitu Afdhal, Reza, Tsuga, Ray yang telah menjadi keluarga di perantauan.
8. Fariz Rahmat Firdaus menemani penulis untuk bermain Dota 2 selama istirahat dalam pembuatan skripsi.

Semoga Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat kepada pembaca. Penulis menyadari hasil Tugas Akhir ini masih kurang dari kata sempurna, hal ini karena penulis memiliki keterbatasan dalam ilmu pengetahuan. Besar harapan penulis agar Tugas Akhir ini mendapat saran dan kritikan ataupun dikembangkan menjadi penelitian yang lebih baik lagi.

## DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN PEMBIMBING .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
HALAMAN PENGESAHAN PENGUJI .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
ABSTRAK.....	vii
<i>ABSTRACT</i> .....	viii
PRAKATA.....	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR .....	xiv
DAFTAR PSEUDOCODE .....	xvi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah .....	2
1.4 Tujuan Penelitian .....	2
1.5 Manfaat Penelitian .....	2
1.6 Metodologi Penelitian.....	2
1.7 Metode Pengembangan Sistem.....	4
1.8 Sistematika Penulisan .....	5
BAB II TINJAUAN LITERATUR.....	7
2.1 Gunung Merapi .....	7
2.2 Deformasi.....	8
2.3 Pengolahan Citra Digital.....	8
2.4. <i>Digital Elevation Model</i> .....	9
2.5 <i>Digital Image Correlation</i> .....	12
2.6 Penelitian Sebelumnya.....	21
BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....	26
3.1 Metodologi Penelitian.....	26
3.2 Pengumpulan Data .....	27
3.3 Penetapan Parameter Analisis.....	29
3.4 Pemrosesan Data.....	31
3.4.1 <i>Preprocessing</i> .....	31
3.4.2 Pembagian Grid .....	33
3.4.3 <i>Template matching</i> .....	34
3.4.4 Perhitungan <i>Displacement</i> .....	37
3.4.5 Perhitungan <i>Strain</i> .....	39
3.4.6 Plotting Vektor Deformasi.....	41

3.5 Pengembangan Sistem .....	42
3.5.1 <i>Planning</i> .....	43
3.5.2 <i>Design</i> .....	44
3.5.3 <i>Coding</i> .....	47
3.5.4 <i>Testing</i> .....	47
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....	49
4.1 Hasil .....	49
4.1.1 Pengumpulan Data .....	49
4.1.2 Penetapan Parameter Analisis .....	49
4.1.3 <i>Preprocessing</i> .....	51
4.1.4 Pembagian Grid .....	52
4.1.5 <i>Template matching</i> .....	54
4.1.6 Perhitungan <i>Displacement</i> .....	56
4.1.7 Perhitungan <i>Strain</i> .....	60
4.1.8 Pengembangan Sistem .....	63
4.1.9 Hasil Pengujian Sistem .....	65
4.1.10 Evaluasi Hasil .....	70
4.2 Pembahasan .....	77
BAB V PENUTUP .....	79
5.1 Kesimpulan .....	79
5.1 Saran .....	79
DAFTAR PUSTAKA .....	80
LAMPIRAN .....	82
LAMPIRAN A. Sample Hasil Korelasi ( <i>Template matching</i> ) 100 data pertama .....	83
LAMPIRAN B. Sample Hasil Arah Deformasi 100 Data Pertama .....	93

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 <i>State Of the Art</i> .....	24
Tabel 2.2 <i>State Of the Art</i> (lanjutan).....	25
Tabel 3.1 Numerator .....	36
Tabel 3.2 Denominator .....	36
Tabel 3.3 Denominator (lanjutan).....	37
Tabel 3.4 Data yang Digunakan.....	39
Tabel 3.5 Spesifikasi perangkat keras ( <i>hardware</i> ) .....	43
Tabel 3.6 Spesifikasi perangkat lunak ( <i>software</i> ).....	43
Tabel 3.7 Skenario test.....	48
Tabel 4.1 Hasil dari <i>Preprocessing</i> .....	51
Tabel 4.2 Ukuran Dimensi Data DEM .....	53
Tabel 4.3 Hasil dari pencocokan <i>Template</i> .....	55
Tabel 4.4 Hasil perhitungan <i>Displacement</i> .....	58
Tabel 4.5 Sample Data <i>Displacement</i> .....	59
Tabel 4.6 Hasil perhitungan <i>Strain</i> .....	61
Tabel 4.7 Sample Data <i>Strain</i> .....	62
Tabel 4.8 Hasil Scenario Test .....	70
Tabel 4.9 Jumlah Vektor Deformasi Per Arah Mata Angin .....	73
Tabel 4.10 Hasil EDM Perbulan.....	74
Tabel 4.11 Hasil EDM Perbulan (lanjutan) .....	75
Tabel 4.12 Hasil EDM Perbulan (lanjutan) .....	76
Tabel 4.13 Perbandingan Hasil Signifikansi.....	77
Tabel 1 Hasil korelasi 2020-2021 .....	83
Tabel 2 Hasil korelasi 2020-2021 (lanjutan) .....	84
Tabel 3 Hasil korelasi 2020-2021 (lanjutan) .....	85
Tabel 4 Hasil korelasi 2021-2022 .....	85
Tabel 5 Hasil korelasi 2021-2022 (lanjutan) .....	86
Tabel 6 Hasil korelasi 2021-2022 (lanjutan) .....	87
Tabel 7 Hasil korelasi 2022-2023 .....	87
Tabel 8 Hasil korelasi 2022-2023 (lanjutan) .....	88
Tabel 9 Hasil korelasi 2022-2023 (lanjutan) .....	89
Tabel 10 Hasil korelasi 2022-2023 (lanjutan) .....	90
Tabel 11 Hasil korelasi 2023-2024 .....	90
Tabel 12 Hasil korelasi 2023-2024 (lanjutan) .....	91
Tabel 13 Hasil korelasi 2023-2024 (lanjutan) .....	92
Tabel 14 Hasil Perhitungan Arah Deformasi 2020 - 2021 .....	93

Tabel 15 Hasil Perhitungan Arah Deformasi 2020 – 2021 (lanjutan) .....	94
Tabel 16 Hasil Perhitungan Arah Deformasi 2020 – 2021 (lanjutan) .....	95
Tabel 17 Hasil Perhitungan Arah Deformasi 2021 – 2022 .....	95
Tabel 18 Hasil Perhitungan Arah Deformasi 2021 – 2022 (lanjutan) .....	96
Tabel 19 Hasil Perhitungan Arah Deformasi 2021 – 2022 (lanjutan) .....	97
Tabel 20 Hasil Perhitungan Arah Deformasi 2022 – 2023 .....	97
Tabel 21 Hasil Perhitungan Arah Deformasi 2022 – 2023 (lanjutan) .....	98
Tabel 22 Hasil Perhitungan Arah Deformasi 2022 – 2023 (lanjutan) .....	99
Tabel 23 Hasil Perhitungan Arah Deformasi 2022 – 2023 (lanjutan) .....	100
Tabel 24 Hasil Perhitungan Arah Deformasi 2023 - 2024 .....	100
Tabel 25 Hasil Perhitungan Arah Deformasi 2023 – 2024 (lanjutan) .....	101
Tabel 26 Hasil Perhitungan Arah Deformasi 2023 – 2024 (lanjutan) .....	102

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Gambar Kubah Gunung Merapi.....	7
Gambar 2.2 Representasi dasar DEM.....	10
Gambar 2.3 Contoh Visualisasi DEM .....	10
Gambar 2.4 Perbedaan DTM dan DSM.....	11
Gambar 2.5 Perbedaan Dimensi Perpindahan antara DIC 2D dan 3D .....	13
Gambar 2.6 Algoritma <i>Digital Image Correlation</i> .....	14
Gambar 2.7 Data Referensi dan Data Deformasi.....	15
Gambar 2.8 Hubungan antara Ukuran Grid dan Step Size dalam DIC 2D.....	15
Gambar 2.9 Interpolasi Subpixel dalam <i>Digital Image Correlation</i> .....	18
Gambar 2.10 Contoh Proses Perhitungan Perpindahan ( <i>Displacement</i> ) .....	19
Gambar 2.11 Perhitungan <i>Strain</i> .....	20
Gambar 3.1 Metodologi Penelitian .....	26
Gambar 3.2 Tahapan pengumpulan data .....	27
Gambar 3.3 Data DEM berformat TIF .....	28
Gambar 3.4 Alur Penetapan Parameter Analisis.....	29
Gambar 3.5 <i>Preprocessing</i> Data .....	32
Gambar 3.6 Hasil <i>Resampling</i> .....	32
Gambar 3.7 Pembagian Grid.....	34
Gambar 3.8 <i>Template matching</i> .....	35
Gambar 3.9 Perhitungan <i>Displacement</i> .....	38
Gambar 3.10 Titik Koordinat pada grid referensi dan deformasi .....	39
Gambar 3.11 Perhitungan <i>Strain</i> .....	40
Gambar 3.12 Plotting Vektor Deformasi .....	41
Gambar 3.13 Tahapan Extreme Programming .....	42
Gambar 3.14 Arsitektur sistem diagram .....	44
Gambar 3.15 Use Case Diagram.....	45
Gambar 3.16 Activity diagram .....	45
Gambar 3.17 Class Diagram .....	46
Gambar 3.18 Rancangan Interface.....	47
Gambar 4.1 Data DEM yang digunakan.....	49
Gambar 4.2 Visualisasi dari pembagian Grid .....	53
Gambar 4.3 Histogram <i>Template matching</i> .....	56
Gambar 4.4 Time Series dari <i>Displacement</i> .....	59
Gambar 4.5 Visualisasi dari perhitungan <i>Displacement</i> .....	60
Gambar 4.6 Time Series dari <i>Strain</i> .....	61
Gambar 4.7 Visualisasi dari perhitungan <i>Strain</i> .....	63

Gambar 4.8 Tampilan Awal.....	65
Gambar 4.9 Memilih File.....	66
Gambar 4.10 Nama File yang diinput.....	66
Gambar 4.11 Konfigurasi.....	67
Gambar 4.12 Tab Results.....	67
Gambar 4.13 Tab Visual.....	69
Gambar 4.14 Tab Tabel.....	69
Gambar 4.15 Tab <i>Download</i> .....	70
Gambar 4.16 Visualisasi Plotting Vektor Deformasi.....	72
Gambar 4.17 Time Series dari Arah Vektor Deformasi.....	74
Gambar 4.18 Visualisasi Hasil Metode EDM.....	76

## DAFTAR PSEUDOCODE

Pseudo Code 4.1 : <i>Parameter Analisis</i> .....	50
Pseudo Code 4.2 : <i>Preprocessing</i> .....	51
Pseudo Code 4.3 : <i>Pembagian Grid</i> .....	52
Pseudo Code 4.4 : <i>Template matching</i> .....	54
Pseudo Code 4.5 : <i>Displacement</i> .....	56
Pseudo Code 4.6 : <i>Displacement (lanjutan)</i> .....	57
Pseudo Code 4.7 : <i>Displacement (lanjutan)</i> .....	58
Pseudo Code 4.8 : <i>Strain</i> .....	60
Pseudo Code 4.9 : <i>Antarmuka</i> .....	63
Pseudo Code 4.10 : <i>Antarmuka (lanjutan)</i> .....	64
Pseudo Code 4.11 : <i>Pemrosesan Data</i> .....	64
Pseudo Code 4.12 : <i>Alur Program</i> .....	71
Pseudo Code 4.13 : <i>plotting Vektor deformasi</i> .....	71

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Gunung Merapi merupakan salah satu gunung api paling aktif di dunia, dengan periode letusan yang terjadi secara berkala, yaitu setiap 2–7 tahun sekali (Wismaya et al., 2016). Aktivitas vulkanik yang intens menyebabkan perubahan signifikan pada morfologi permukaan, terutama pada kubah yang terbentuk setelah letusan. Kubah ini sering mengalami dua jenis perubahan: inflasi, yaitu pengembangan permukaan akibat akumulasi magma di bawahnya, dan deflasi, yaitu penurunan permukaan akibat pengurangan tekanan dari bawah permukaan (Nurtyawan & Utami, 2020). Kedua proses ini menjadi indikator penting dalam memprediksi letusan, sehingga pemantauan deformasi secara berkala sangat penting untuk mitigasi bencana demi melindungi masyarakat sekitar.

Salah satu metode yang digunakan dalam pemantauan deformasi Gunung Merapi adalah *Electronic Distance Measurement* (EDM). Metode ini memanfaatkan gelombang elektromagnetik untuk mengukur perubahan jarak antara instrumen pengukuran dengan titik reflektor yang ditempatkan di permukaan gunung. EDM telah digunakan oleh Balai Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kebencanaan Geologi (BPPTKG) dalam pemantauan deformasi Gunung Merapi karena memiliki akurasi tinggi dalam mengukur perubahan jarak. Namun, EDM hanya mampu melakukan pengukuran pada titik-titik tertentu, sehingga kurang optimal dalam memberikan gambaran menyeluruh tentang perubahan morfologi kubah gunung.

Selain EDM, metode lain seperti GPS (*Global Positioning System*) dan DInSAR (*Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar*) juga digunakan dalam pemantauan deformasi gunung api. GPS memberikan hasil yang sangat akurat hingga skala milimeter (Wismaya et al., 2016) tetapi memiliki keterbatasan dalam cakupan spasial karena hanya memantau titik-titik tertentu. Sementara itu, DInSAR mampu mencakup area luas menggunakan citra radar satelit seperti *Sentinel-1A*, tetapi dapat terpengaruh oleh kondisi atmosfer dan vegetasi yang menghasilkan *noise* serta menurunkan kualitas data (Nurtyawan & Utami, 2020). Meskipun GPS dan DInSAR banyak digunakan, keduanya memiliki keterbatasan yang dapat memengaruhi hasil pemantauan deformasi, sehingga diperlukan metode alternatif yang mampu mengatasi kekurangan tersebut.

Metode *Digital Image Correlation* (DIC) menawarkan pendekatan berbasis citra yang dapat digunakan untuk memantau deformasi secara lebih menyeluruh. DIC bekerja dengan membandingkan pola elevasi pada dua citra *Digital Elevation Model* (DEM) dari waktu yang berbeda untuk mengidentifikasi pergeseran permukaan. Keunggulan metode ini terletak pada kemampuannya untuk memproses data DEM yang memiliki resolusi spasial lebih tinggi dibandingkan EDM, memungkinkan analisis deformasi tanpa bergantung pada titik pengamatan tetap. Dengan resolusi temporal dan spasial yang tinggi, DIC dapat memberikan hasil yang lebih rinci dan akurat dalam mendeteksi perubahan morfologi kubah Gunung Merapi.

Penelitian ini mengusulkan penerapan metode DIC menggunakan data DEM untuk mengukur arah vektor pergeseran deformasi kubah Gunung Merapi dan membandingkan

hasilnya dengan metode EDM sebagai standar pemantauan yang digunakan BPPTKG. DIC diharapkan mampu mengatasi keterbatasan EDM dalam cakupan area dan memberikan data deformasi yang lebih komprehensif. Hasil penelitian ini juga diharapkan dapat memperkaya metode pemantauan deformasi gunung api di Indonesia serta memberikan wawasan baru dalam pemanfaatan teknik berbasis citra untuk mitigasi bencana vulkanik.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah yang telah dipaparkan, maka bagaimana keandalan dan ketepatan metode *Digital Image Correlation* (DIC) dalam menganalisis pergerakan deformasi kubah Gunung Merapi menggunakan data *Digital Elevation Model* (DEM), serta bagaimana metode ini dapat dibandingkan dengan *Electronic Distance Measurement* (EDM) dalam pemantauan deformasi?

## 1.3 Batasan Masalah

Agar pembahasan tetap terkait dengan inti penelitian dari permasalahan yang diangkat, peneliti menggunakan batasan masalah yaitu:

1. Fokus terhadap identifikasi pergeseran setelah deformasi pada kubah gunung merapi.
2. Dataset yang digunakan diperoleh dari lembaga Balai Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kebencanaan Geologi (BPPTKG) yaitu *Digital Elevation Model* (DEM).
3. Data yang digunakan telah di-*crop* pada area kubah Gunung Merapi.
4. Tipe data DEM yang digunakan berformat file TIF (Tagged Image File).
5. Data diambil dengan posisi yang sama untuk memastikan konsistensi pengamatan

## 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis keandalan dan ketepatan metode *Digital Image Correlation* (DIC) dalam mendeteksi perubahan posisi serta dinamika pergerakan deformasi kubah Gunung Merapi menggunakan data *Digital Elevation Model* (DEM).
2. Membandingkan hasil analisis metode DIC dengan metode *Electronic Distance Measurement* (EDM) untuk menilai kelebihan dan keterbatasan masing-masing dalam pemantauan deformasi kubah Gunung Merapi.

## 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian sebagai berikut:

1. Pengurangan Risiko Bencana : Dengan menyediakan data deformasi yang rinci dan tepat waktu, hasil penelitian ini dapat membantu mengurangi risiko bencana akibat aktivitas vulkanik. Informasi yang diperoleh dapat digunakan oleh pihak berwenang untuk memberikan peringatan dini yang lebih efektif dan mengambil tindakan mitigasi yang diperlukan untuk melindungi masyarakat di sekitar Gunung Merapi.
2. Kontribusi pada Penelitian Vulkanologi : Penelitian ini dapat menjadi referensi penting bagi penelitian-penelitian selanjutnya yang terkait dengan monitoring pergerakan dan penggunaan teknologi *Digital Image Correlation*. Hasil dan temuan dari penelitian ini dapat digunakan sebagai dasar untuk pengembangan lebih lanjut dalam bidang pemantauan aktivitas vulkanik dan mitigasi bencana.

## 1.6 Metodologi Penelitian

Metode penelitian adalah cara untuk mendapatkan data atau informasi yang sebenarnya secara ilmiah. Bagian ini akan memaparkan tentang metodologi penelitian yang akan digunakan. Metode-metode tersebut meliputi:

## 1. Identifikasi Masalah

Langkah awal dalam mengenali permasalahan yang akan dijadikan fokus penelitian. Pada tahap ini, akan diidentifikasi tujuan serta manfaat yang diharapkan dari penelitian ini, yaitu memantau pergerakan di Kubah Gunung Merapi menggunakan *Digital Image Correlation* dengan citra DEM. Identifikasi ini dilakukan dengan merujuk pada permasalahan vulkanologi dan kebutuhan akan pemantauan yang lebih akurat.

## 2. Studi Literatur

Studi literatur dilaksanakan untuk menggali informasi yang diperlukan sebagai dasar penyelesaian permasalahan penelitian. Sumber-sumber yang diakses mencakup jurnal, dan penelitian sebelumnya yang relevan dengan topik penelitian, seperti studi tentang pemantauan aktivitas gunung berapi, penggunaan DEM dalam vulkanologi, serta teknik *Digital Image Correlation*. Beberapa referensi utama termasuk studi dari (Wismaya et al. 2016).

## 3. Pengumpulan Data

Tahap ini melibatkan pengumpulan data yang dibutuhkan untuk penelitian. Data utama yang digunakan adalah citra DEM dari Gunung Merapi. Sumber data diperoleh dari Badan Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kebencanaan Geologi (BPPTKG) Yogyakarta. Data ini kemudian akan diproses untuk analisis lebih lanjut menggunakan teknik *Digital Image Correlation*.

## 4. Analisis Data dengan *Digital Image Correlation*

Tahap inti dari penelitian ini adalah penerapan metode *Digital Image Correlation* (DIC) untuk memantau pergerakan kubah Gunung Merapi. *Digital Image Correlation* digunakan untuk menganalisis perubahan posisi dari titik-titik pada citra DEM dari waktu ke waktu. Proses ini melibatkan perbandingan dua citra pada waktu yang berbeda untuk mendeteksi pergerakan dan deformasi. Dalam penelitian ini, analisis DIC dilakukan menggunakan *Python Package Py2DIC*, yang telah dimodifikasi oleh BPPTKG untuk meningkatkan akurasi korelasi citra dalam perhitungan vektor perpindahan dan distribusi strain. Penggunaan *Py2DIC* memungkinkan analisis yang lebih akurat dengan menerapkan metode interpolasi subpiksel dan *template matching* dalam mendeteksi perubahan elevasi secara lebih rinci.

## 5. Visualisasi dan Interpretasi Hasil

Hasil dari analisis *Digital Image Correlation* akan divisualisasikan untuk mempermudah interpretasi. Visualisasi ini melibatkan peta deformasi yang digambarkan dengan arah vektor yang menunjukkan arah pergerakan deformasi. Peta ini akan memberikan gambaran yang jelas tentang dinamika vulkanik yang terjadi.

## 6. Evaluasi dan Validasi Hasil

Tahap ini melibatkan evaluasi hasil analisis *Digital Image Correlation* untuk memastikan keakuratan dan keandalannya. Hasil analisis akan divalidasi dengan data lapangan atau data tambahan dari sumber terpercaya untuk memastikan bahwa metode yang digunakan dapat memberikan informasi yang valid dan berguna. Evaluasi ini juga mencakup analisis kesalahan dan ketidakpastian dalam hasil yang diperoleh.

## 7. Kesimpulan

Tahap terakhir dari metodologi ini adalah menyusun kesimpulan dari hasil penelitian dan memberikan rekomendasi untuk penelitian selanjutnya. Kesimpulan akan merangkum temuan utama tentang deformasi kubah Gunung Merapi dan efektivitas penggunaan *Digital Image Correlation* dengan citra DEM. Rekomendasi akan mencakup saran untuk perbaikan metodologi dan aplikasi lebih lanjut dari teknik ini dalam pemantauan gunung berapi lainnya.

Dengan mengikuti metodologi ini, diharapkan penelitian ini dapat memberikan kontribusi yang signifikan dalam bidang pemantauan vulkanik dan mitigasi bencana alam, khususnya dalam memahami dinamika pergerakan di Kubah Gunung Merapi.

### 1.7 Metode Pengembangan Sistem

Metode pengembangan sistem yang diterapkan dalam penelitian ini yaitu *Extreme Programming* (XP). Ada empat tahapan dalam proses pengembangan sistem menggunakan *Extreme Programming* (Widiastuti et al., 2023) :

#### 1. *Planinng*

Pada tahap perencanaan, dilakukan analisis kebutuhan dan perancangan konsep aplikasi. Analisis kebutuhan merupakan bagian penting dari pengembangan perangkat lunak yang bertujuan untuk memahami dan mendokumentasikan keperluan sistem yang akan dibangun. Proses ini memastikan bahwa fitur dan fungsi yang dibutuhkan dapat diidentifikasi dengan jelas, sehingga pengembangan aplikasi dapat berjalan sesuai dengan yang diharapkan. Analisis kebutuhan dibagi menjadi dua, yaitu kebutuhan fungsional dan kebutuhan non-fungsional.

##### a. Kebutuhan fungsional

Kebutuhan ini berhubungan dengan fungsi atau fitur spesifik yang harus dimiliki sistem agar dapat beroperasi sesuai dengan tujuan yang diinginkan.

##### b. Kebutuhan Non-Fungsional

Kebutuhan ini mencakup persyaratan yang lebih berfokus pada karakteristik perilaku sistem. Kebutuhan ini dibagi menjadi dua bagian, yaitu perangkat keras (hardware) dan perangkat lunak (software). Kebutuhan perangkat keras meliputi spesifikasi minimum yang harus dipenuhi, sedangkan kebutuhan perangkat lunak terkait dengan persyaratan perangkat lunak pendukung sistem.

#### 2. *Design*

Pada tahap *Design*, diperlukan perencanaan alur untuk memastikan bahwa *Design* yang dibuat sesuai dengan kebutuhan sistem. Tahap *Design* ini mencakup dua bagian, yaitu perancangan diagram dan perancangan antarmuka. Perancangan diagram berfokus pada pembuatan skema alur kerja sistem, sementara perancangan antarmuka berhubungan dengan pengembangan tampilan dan interaksi pengguna dengan sistem. Kedua langkah ini bertujuan memastikan bahwa *Design* akhir memenuhi spesifikasi yang ditetapkan dan mendukung fungsi sistem secara efektif.

##### a. Perancangan Diagram

Perancangan diagram melibatkan pembuatan diagram arsitektur sistem dan diagram aktivitas. Diagram ini digunakan untuk merancang alur data dan informasi dalam sistem serta menggambarkan bagaimana komponen saling berinteraksi. Dengan adanya diagram ini, struktur sistem dapat divisualisasikan secara menyeluruh untuk memastikan setiap fungsi berjalan dengan baik.

##### b. Perancangan Antarmuka

*Design* antarmuka (*UI Design*) berfokus pada pengembangan tampilan yang mudah digunakan dan menarik secara visual. Proses ini mencakup *Design* tata letak, elemen grafis, navigasi, serta interaksi pengguna, dengan tujuan meningkatkan pengalaman pengguna (*user experience/UX*).

### 3. *Coding*

Tahap pengkodean adalah proses di mana *Design* yang telah dibuat sebelumnya diubah menjadi kode program yang dapat dijalankan. Kode ditulis berdasarkan kebutuhan fungsional yang telah ditentukan, dengan tujuan agar semua fitur dan fungsi sistem berjalan sesuai harapan. Selama pengkodean, pengembang mengikuti spesifikasi yang telah dibuat dengan seksama untuk menghasilkan kode yang sesuai dengan *Design* dan tujuan proyek. Proses ini mencakup penerjemahan elemen *Design* teknis menjadi sintaksis kode yang dapat dijalankan oleh perangkat lunak.

### 4. *Testing*

Pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa aplikasi bekerja sesuai dengan spesifikasi dan untuk mendeteksi bug atau kesalahan. Dalam penelitian ini, digunakan metode *black box testing*, yang difokuskan pada pengujian fungsionalitas aplikasi tanpa melihat kode atau struktur internal. Proses pengujian dilakukan dengan memeriksa input dan output untuk memastikan aplikasi berjalan sesuai dengan yang diharapkan.

## 1.8 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan dalam Menyusun penelitian ini tersusun dalam lima bab sebagai berikut:

### **BAB I Pendahuluan**

Pada bagian ini membahas tentang latar belakang masalah, rumusan masalah, batasan permasalahan, tujuan penelitian, manfaat penelitian, tahapan penelitian, dan sistematika penulisan. Pada bagian ini, disusun dengan tujuan untuk memberikan kemudahan kepada pembaca dalam memahami makna dan maksud dari penelitian ini.

### **BAB II Tinjauan Literatur**

Menguraikan diskusi seputar penelitian terdahulu yang akan dijadikan sebagai rujukan dalam penelitian ini. Selain itu, bab ini membahas beberapa aspek dasar yang berkaitan dengan penelitian ini, termasuk karakteristik Gunung Merapi, aktivitas vulkanik, dan pentingnya pemantauan deformasi. Juga dibahas definisi *Digital Elevation Model* (DEM), metode akuisisi, pemrosesan, dan aplikasi dalam pemantauan deformasi gunung; serta prinsip dasar *Digital Image Correlation*, metode penerapan, keunggulan, dan keterbatasannya dalam pemantauan deformasi permukaan.

### **BAB III Metodologi Penelitian**

Bagian ini menjelaskan secara rinci metode yang digunakan dalam penelitian ini untuk menyelesaikan masalah yang telah diuraikan dalam latar belakang. Pembahasan mencakup desain penelitian, jenis data yang digunakan, termasuk citra *Digital Elevation Model* (DEM), teknik serta alat yang digunakan untuk pengumpulan data, langkah-langkah dalam pengolahan citra DEM, serta proses penerapan *Digital Image Correlation* (DIC) untuk memantau deformasi kubah Gunung Merapi.

Pada tahap analisis, metode DIC diterapkan menggunakan *Python Package Py2DIC*, yang telah dimodifikasi oleh BPPTKG untuk meningkatkan akurasi dalam pengolahan citra DEM. Paket ini digunakan untuk melakukan *template matching* dan interpolasi *bicubic* yang dapat mendeteksi subpiksel guna mendeteksi *displacement* serta distribusi *strain*. Penggunaan

*Py2DIC* memungkinkan perhitungan *displacement* dan *strain* secara lebih akurat, serta membantu dalam visualisasi vektor deformasi yang menggambarkan pola perubahan morfologi kubah Merapi.

Selain itu, teknik analisis yang digunakan dalam penelitian ini meliputi evaluasi keandalan hasil DIC dengan membandingkannya terhadap data EDM yang diperoleh dari BPPTKG. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya menguji efektivitas metode DIC dalam analisis deformasi berbasis citra DEM, tetapi juga mengevaluasi potensi integrasi metode ini dengan EDM sebagai pendekatan pemantauan yang lebih komprehensif.

#### **BAB IV Hasil Pembahasan**

Menjelaskan mengenai analisis dan pembahasan dari hasil yang didapatkan pada sistem yang telah dibangun. Bagian ini mencakup hasil pemantauan deformasi yang diperoleh dari penerapan *Digital Image Correlation*, serta evaluasi hasil penerapan *Digital Image Correlation* dalam melihat pergerakan di Kubah Gunung Merapi, termasuk analisis statistik dari nilai akurasi, presisi, dan recall yang didapatkan.

#### **BAB V Kesimpulan dan Saran**

Menjelaskan kesimpulan yang ditarik dari hasil penelitian dan rekomendasi yang diberikan, yang dapat dijadikan sebagai bekal untuk penelitian selanjutnya.

## **BAB II**

### **TINJAUAN LITERATUR**

#### **2.1 Gunung Merapi**

Gunung Merapi merupakan salah satu gunung api paling aktif di dunia dan terletak di bagian tengah Pulau Jawa, Indonesia. Berdasarkan penelitian oleh (Wismaya et al. 2016), Gunung Merapi memiliki sejarah panjang letusan yang sangat mempengaruhi lingkungan sekitarnya. Letusan yang terjadi secara periodik ini tidak hanya mengancam keselamatan penduduk sekitar, tetapi juga berdampak signifikan terhadap ekonomi dan ekologi kawasan tersebut. Aktivitas vulkanik Gunung Merapi sering kali ditandai dengan munculnya kubah lava yang rentan runtuh dan menyebabkan aliran piroklastik yang berbahaya.

(Rian et al. 2020) mengemukakan bahwa pemantauan aktivitas Gunung Merapi sangat penting untuk mitigasi bencana. Teknologi pemantauan yang canggih, seperti penggunaan citra *Digital Elevation Model* (DEM), memungkinkan para peneliti untuk memetakan dan menganalisis perubahan topografi gunung berapi dengan lebih akurat. Studi ini menyoroti pentingnya penggunaan metode *Digital Image Correlation* untuk mengukur pergerakan, yang dapat memberikan informasi kritis dalam upaya mengurangi risiko bencana dan menyelamatkan nyawa serta harta benda penduduk di sekitar Gunung Merapi.

Secara keseluruhan, pemahaman yang mendalam tentang dinamika Gunung Merapi dan pengembangan teknologi pemantauan yang efisien sangatlah krusial. Pemanfaatan teknologi seperti *Digital Image Correlation* dengan citra DEM membuka peluang baru dalam bidang vulkanologi dan mitigasi bencana. Pendekatan ini tidak hanya memberikan data yang lebih akurat, tetapi juga memperkuat sistem peringatan dini yang dapat menyelamatkan banyak nyawa. Kombinasi antara penelitian ilmiah dan inovasi teknologi akan terus berperan penting dalam mengurangi dampak letusan Gunung Merapi di masa depan.



**Gambar 2.1 Gambar Kubah Gunung Merapi**  
(BPPTKG Yogyakarta, 2024)

## 2.2 Deformasi

Deformasi dalam konteks geologi adalah perubahan bentuk, posisi, atau ukuran materi pada permukaan bumi yang disebabkan oleh adanya gaya atau tekanan, terutama dari aktivitas tektonik dan vulkanik Kuang (1996). Pada gunung api, deformasi sering kali terkait dengan pergerakan magma di bawah permukaan yang mengakibatkan perubahan pada morfologi gunung api. Deformasi ini bisa berbentuk inflasi, yaitu peningkatan ketinggian permukaan akibat tekanan magma yang mendorong ke atas, atau deflasi, yang terjadi ketika permukaan turun setelah keluarnya magma pasca-erupsi.

Penelitian deformasi pada Gunung Sinabung dengan menggunakan metode Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar (DInSAR) menunjukkan adanya deflasi yang signifikan setelah erupsi pada 2 Maret 2021. Dalam studi ini, nilai deformasi pra-erupsi di Gunung Sinabung diukur menggunakan citra *Sentinel-1A*, yang kemudian dibandingkan dengan nilai pasca-erupsi. Hasilnya menunjukkan penurunan permukaan atau deflasi rata-rata sebesar 0,739 meter, yang disebabkan oleh keluarnya magma dari kantong magma setelah erupsi (Adidafa & Basyid, 2023). Fenomena ini menunjukkan penurunan tekanan di dalam kantong magma, yang merupakan salah satu indikator berakhirnya fase aktif vulkanik.

Pada Gunung Merapi, metode DInSAR juga digunakan untuk memantau deformasi. Penelitian yang dilakukan menggunakan citra *Sentinel-1A* pada periode sebelum dan sesudah erupsi menunjukkan hasil yang konsisten. Deflasi sebelum erupsi mencapai -0,12 meter dan -0,27 meter, sedangkan pasca-erupsi tercatat deflasi sebesar -0,194 meter (Nurtyawan & Utami, 2020). Deformasi yang terjadi di Gunung Merapi umumnya menunjukkan pola deflasi setelah erupsi, yang menunjukkan penurunan permukaan akibat keluarnya magma.

Selain menggunakan DInSAR, pengukuran deformasi pada Gunung Merapi juga dilakukan dengan menggunakan teknologi Global Positioning System (GPS). Pengamatan deformasi dari tahun 1995 hingga 1997 menunjukkan pola pergeseran yang tidak simetris di puncak Gunung Merapi. Pergeseran terbesar tercatat di sisi barat laut, dengan perpindahan sebesar 20,1 cm, dan di sisi selatan-tenggara sebesar 11,3 cm (Yudiantoro et al., 2023). Deformasi yang asimetris ini disebabkan oleh tekanan internal dari magma yang bergerak, yang memicu pergerakan blok-blok lava yang telah terbentuk dari erupsi sebelumnya.

## 2.3 Pengolahan Citra Digital

Citra adalah representasi visual dari objek atau pemandangan yang dihasilkan melalui berbagai teknik. Secara umum, citra dihasilkan menggunakan perangkat optik seperti kamera atau sensor lainnya yang mengumpulkan data visual dalam bentuk gambar dua dimensi (2D) atau tiga dimensi (3D). Citra 2D biasanya berisi informasi lebar dan tinggi, sementara citra 3D menambahkan dimensi kedalaman untuk memberikan informasi lebih lanjut tentang volume dan struktur objek. Salah satu contoh citra yang sering digunakan dalam pemetaan adalah *Digital Elevation Model* (DEM), yang merepresentasikan bentuk permukaan bumi secara digital (Hutahaeen et al., 2019).

Pengolahan citra digital adalah proses yang melibatkan manipulasi dan analisis gambar digital untuk mendapatkan informasi yang lebih bermakna atau meningkatkan

kualitas citra. Pengolahan ini melibatkan teknik-teknik seperti peningkatan kontras, pengurangan noise, dan segmentasi objek. Proses pengolahan citra digital bertujuan untuk memudahkan interpretasi baik oleh manusia maupun komputer. Salah satu aplikasi utama dari pengolahan citra adalah pengolahan citra DEM, yang digunakan untuk berbagai keperluan seperti pemetaan topografi, analisis geomorfologi, serta mitigasi bencana alam seperti banjir dan tanah longsor (Azhari et al., 2022; Haris et al., 2018).

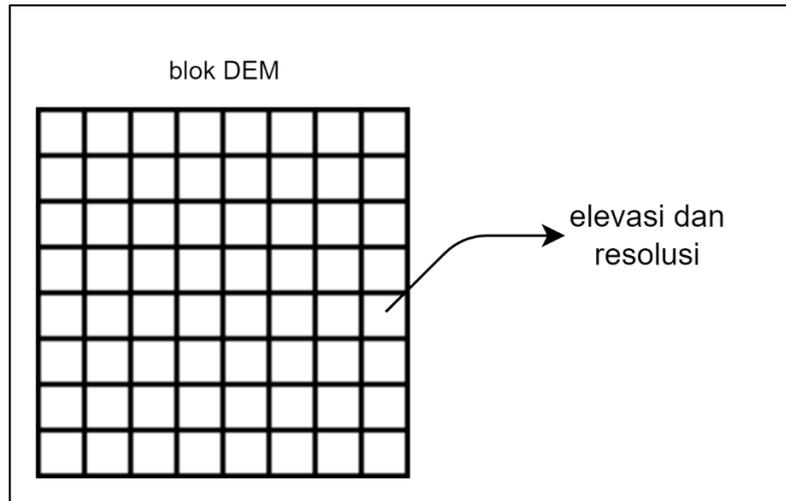
*Digital Elevation Model* (DEM) adalah citra yang merepresentasikan permukaan bumi dalam bentuk data digital yang memuat informasi ketinggian. DEM sangat penting dalam berbagai aplikasi geospasial seperti pembuatan peta dasar, analisis hidrologi, pemodelan aliran air, dan pemantauan pergerakan tanah (Hernanda et al., 2022). Pengolahan citra DEM dapat dilakukan melalui beberapa metode, di antaranya menggunakan citra satelit dan teknik Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR). Metode InSAR memungkinkan pemetaan topografi dengan mengukur fase dari sinyal radar yang dipantulkan dari permukaan bumi. Namun, teknik ini memiliki keterbatasan seperti distorsi pada area bayangan dan lapisan permukaan yang curam (Haris et al., 2018).

Selain InSAR, StereoSAR juga digunakan untuk memperoleh data elevasi dengan memanfaatkan amplitudo sinyal radar. Kombinasi antara InSAR dan StereoSAR memungkinkan peningkatan akurasi hasil pengolahan DEM, seperti yang ditunjukkan dalam penelitian Haris et al. (2018), yang berhasil mengurangi kesalahan absolut pada citra DEM hingga 3,33 meter setelah menggabungkan kedua metode tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa penggabungan berbagai teknik pengolahan citra dapat meningkatkan kualitas dan keakuratan data elevasi permukaan bumi.

Dalam konteks penelitian ini, pengolahan citra DEM digunakan untuk memantau deformasi kubah Gunung Merapi. Teknik ini memungkinkan analisis yang lebih akurat terhadap perubahan morfologi permukaan, terutama pada area yang berisiko tinggi mengalami perubahan akibat aktivitas vulkanik. Penggunaan DEM dalam kombinasi dengan metode *Digital Image Correlation* (DIC) akan memberikan informasi yang lebih rinci mengenai arah dan besaran pergeseran permukaan, yang penting untuk mitigasi risiko bencana vulkanik.

#### **2.4. Digital Elevation Model**

*Digital Elevation Model* (DEM) adalah model digital yang merepresentasikan permukaan topografi atau bentuk fisik bumi dalam bentuk data raster. DEM menyajikan informasi ketinggian tanah permukaan bumi dalam suatu grid dengan nilai elevasi dan resolusi yang tersimpan pada setiap piksel atau titik. Penggunaan DEM meliputi berbagai aplikasi, termasuk pemetaan topografi, analisis hidrologi, perencanaan wilayah, dan pemodelan aliran air (Hernanda et al., 2022). **Gambar 2.2** menggambarkan representasi dasar dari DEM.

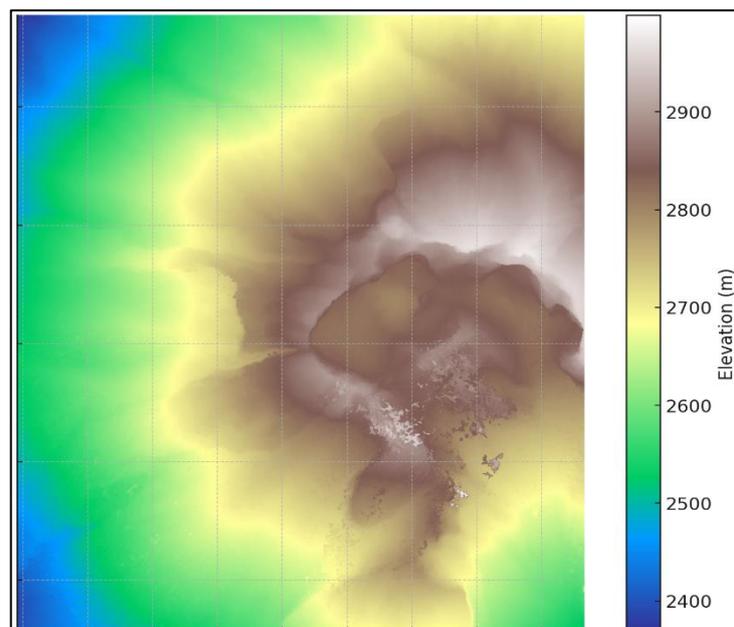


**Gambar 2.2 Representasi dasar DEM**

Nilai elevasi pada grid di atas dapat divisualisasikan dengan metode interpolasi warna atau kontur, di mana setiap kotak (piksel) mewakili nilai ketinggian tertentu. Dalam visualisasi DEM, nilai-nilai elevasi tersebut akan ditampilkan dalam bentuk peta topografi, di mana warna atau garis kontur digunakan untuk menggambarkan perbedaan ketinggian.

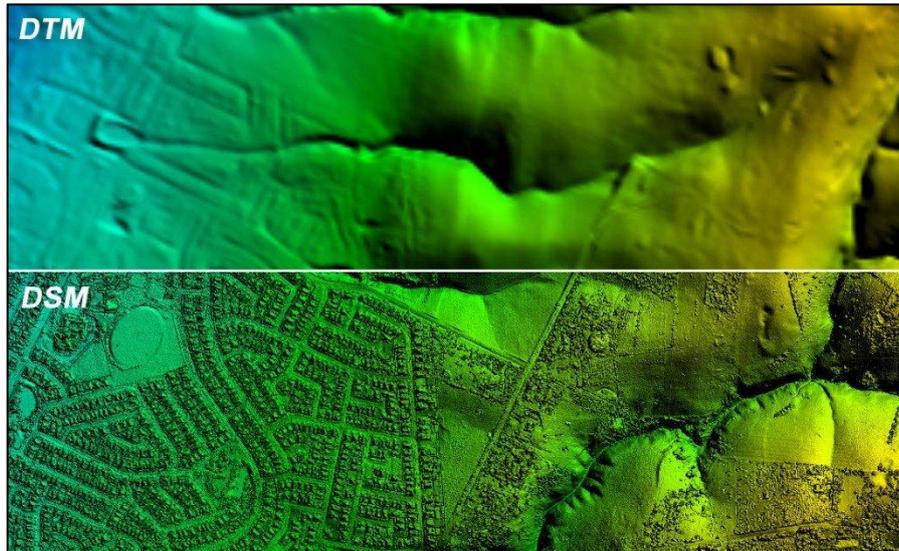
Sebagai contoh, pada peta topografi hasil dari DEM, area dengan elevasi lebih tinggi dapat diwakili oleh warna yang lebih terang (misalnya, warna merah atau kuning), sementara area dengan elevasi lebih rendah ditampilkan dalam warna yang lebih gelap (seperti biru atau hijau). Metode visualisasi ini memungkinkan pengamatan yang mudah terhadap fitur-fitur topografi seperti lembah, bukit, atau gunung.

**Gambar 2.3** adalah contoh visualisasi DEM, di mana variasi warna menunjukkan perubahan elevasi yang berbeda di suatu area. Gambar ini menunjukkan bagaimana grid DEM yang berisi nilai elevasi divisualisasikan.



**Gambar 2.3 Contoh Visualisasi DEM**  
(BPPTKG Yogyakarta, 2024)

DEM terbagi menjadi dua kategori utama, yaitu Digital Surface Model (DSM) dan Digital Terrain Model (DTM). DSM mencakup informasi ketinggian semua objek yang ada di permukaan bumi, seperti bangunan, vegetasi, dan struktur buatan lainnya. Sementara itu, DTM hanya mencakup informasi tentang ketinggian permukaan tanah tanpa memperhitungkan objek yang berada di atasnya (Hernanda et al., 2022).



**Gambar 2.4 Perbedaan DTM dan DSM**  
(<https://zonaspasial.com/>)

Dalam konteks vulkanologi, DEM banyak digunakan untuk memantau perubahan morfologi gunung api, termasuk deformasi kubah lava atau dampak erupsi terhadap topografi sekitarnya. Dengan data DEM, para peneliti dapat mengidentifikasi perubahan elevasi secara akurat dan menganalisis pola deformasi atau aliran material vulkanik, yang penting untuk memprediksi aktivitas vulkanik.

Teknologi DEM umumnya dihasilkan melalui berbagai metode, seperti survei langsung menggunakan alat seperti Total Station atau melalui penginderaan jauh dengan menggunakan sensor satelit, seperti SAR (Synthetic Aperture Radar) dan InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar). Penggunaan penginderaan jauh memungkinkan cakupan area yang lebih luas dengan akurasi yang tinggi, meskipun ada keterbatasan seperti efek distorsi atau bayangan pada area dengan topografi yang kompleks (Haris et al., 2018). Beberapa metode untuk membuat DEM;

1. Metode Penginderaan Jauh SAR

Metode penginderaan jauh Synthetic Aperture Radar (SAR) merupakan salah satu metode yang sering digunakan untuk membangun *Digital Elevation Model* (DEM). SAR menggunakan gelombang radar untuk memperoleh citra permukaan bumi. Dalam metode ini, radar memancarkan sinyal yang dipantulkan kembali dari permukaan bumi, menghasilkan data elevasi berdasarkan perbedaan waktu pantulan sinyal tersebut. Salah satu keunggulan SAR adalah kemampuannya untuk menembus awan dan bekerja pada siang maupun malam hari, sehingga cocok digunakan di area yang sering tertutup awan atau sulit dijangkau. Namun, salah satu tantangan dari metode ini adalah adanya distorsi geometri seperti layover, foreshortening, dan shadow pada area dengan topografi kompleks (Haris et al., 2018).

## 2. Metode Interferometri SAR (InSAR)

Metode Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) adalah salah satu teknik penginderaan jauh yang digunakan untuk menghasilkan *Digital Elevation Model* (DEM) dengan mengukur perubahan elevasi permukaan bumi. Teknik ini bekerja dengan membandingkan dua atau lebih citra radar yang diambil dari posisi atau waktu berbeda, sehingga memungkinkan perhitungan perubahan fase gelombang radar yang dipantulkan dari permukaan bumi. Perbedaan fase tersebut digunakan untuk menghitung jarak dan ketinggian dari permukaan bumi dengan akurasi yang tinggi (Raimadoya et al., 2004).

## 3. Metode StereoSAR

StereoSAR adalah teknik lain yang digunakan untuk membentuk DEM. Berbeda dengan InSAR yang memanfaatkan perbedaan fase, StereoSAR menggunakan nilai amplitudo dari dua citra radar yang diambil dari sudut yang berbeda. Dengan membandingkan kedua citra ini, dimungkinkan untuk menghasilkan DEM melalui proses korelasi spasial. StereoSAR sangat efektif di area yang memiliki korelasi yang baik antara dua citra, namun kesulitan dapat timbul ketika terdapat perbedaan sudut datang yang signifikan atau jika citra memiliki korelasi yang rendah (Haris et al., 2018).

## 4. Penggabungan InSAR dan StereoSAR

Penggabungan antara metode InSAR dan StereoSAR dilakukan untuk meningkatkan akurasi DEM. Setiap metode memiliki kelebihan dan kekurangannya sendiri, seperti distorsi pada InSAR yang dapat diatasi dengan data dari StereoSAR. Proses fusi atau penggabungan ini dilakukan dengan memberikan bobot tertentu pada hasil DEM dari kedua metode, sehingga didapatkan DEM yang lebih akurat. Dalam sebuah studi, fusi antara InSAR dan StereoSAR dengan menggunakan citra TerraSAR-X menghasilkan perbaikan akurasi dengan penurunan kesalahan absolut sebesar 3,33 meter dibandingkan penggunaan metode secara terpisah (Haris et al., 2018).

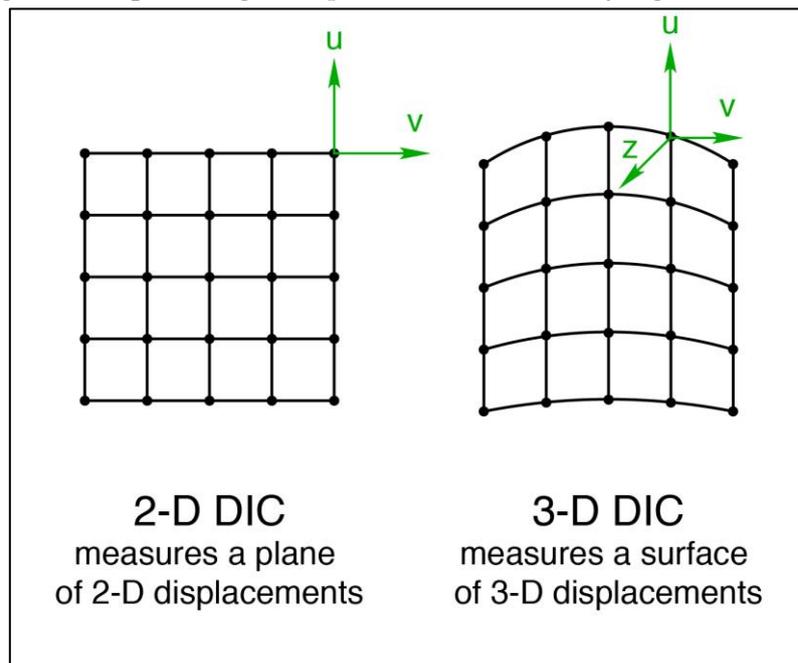
## 2.5 Digital Image Correlation

*Digital Image Correlation* (DIC) adalah teknik pengukuran non-kontak berbasis citra yang digunakan untuk mengukur perpindahan dan strain pada permukaan objek. DIC bekerja dengan membandingkan perubahan intensitas piksel pada gambar sebelum dan sesudah deformasi, serta menggunakan algoritma korelasi untuk melacak pergeseran grid pada permukaan objek (Lima et al., 2021). Teknik ini memungkinkan pengukuran yang akurat terhadap deformasi material yang mengalami beban eksternal dalam berbagai bidang, seperti teknik geoteknik, mekanik, dan material (Gedela et al., 2021).

Berdasarkan dimensi analisis, DIC terbagi menjadi dua jenis, yaitu DIC 2D dan DIC 3D. DIC 2D menggunakan satu kamera yang ditempatkan tegak lurus terhadap permukaan objek, menghasilkan pengukuran perpindahan dalam dua dimensi (sumbu  $X$  dan  $Y$ ). Metode ini lebih sederhana dalam pengaturan alat dan kalibrasi, sehingga cocok untuk analisis deformasi planar atau pengukuran yang hanya memerlukan satu bidang. Sebagai contoh, (Viswanathan et al., 2021) dan (Gedela et al., 2021) menggunakan DIC 2D untuk mengukur deformasi pada pemotongan material dan distribusi beban pada struktur geoteknik, menunjukkan efektivitasnya dalam mengukur deformasi tanpa pergerakan keluar bidang (*out-of-plane*).

Sebaliknya, DIC 3D menggunakan dua atau lebih kamera yang ditempatkan pada sudut berbeda untuk merekonstruksi perpindahan dalam tiga dimensi ( $X, Y$ , dan  $Z$ ). DIC 3D memungkinkan pengukuran deformasi kompleks yang melibatkan pergerakan keluar bidang (*out-of-plane displacement*). Meski lebih akurat untuk analisis tiga dimensi, metode ini membutuhkan pengaturan alat yang lebih kompleks dan kalibrasi yang lebih rumit (Khlifi et al., 2021).

Dalam penelitian ini, metode DIC 2D digunakan untuk menganalisis pergerakan kubah Gunung Merapi menggunakan data Digital Elevation Model (DEM). Proses analisis dilakukan dengan *Python Package Py2DIC*, yang telah dimodifikasi oleh BPPTKG untuk meningkatkan akurasi dalam mendeteksi pergeseran elevasi. *Py2DIC* memungkinkan implementasi algoritma korelasi citra dengan interpolasi subpiksel yang lebih presisi, sehingga menghasilkan perhitungan *displacement* dan *strain* yang lebih akurat.



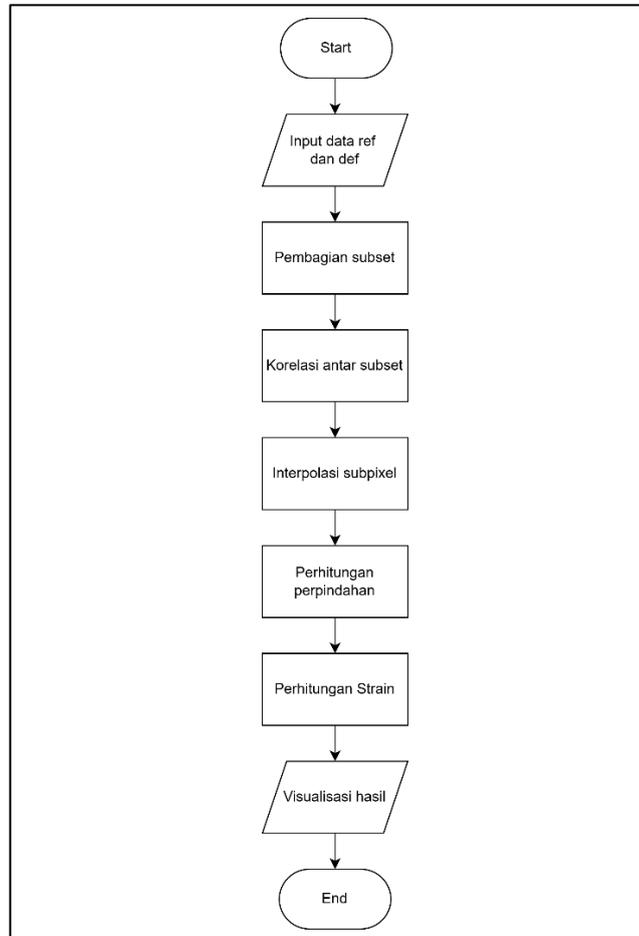
**Gambar 2.5 Perbedaan Dimensi Perpindahan antara DIC 2D dan 3D**  
(<https://digitalimagecorrelation.org/>)

Berdasarkan **Gambar 2.5**, dapat dilihat perbedaan pengukuran perpindahan antara DIC 2D dan DIC 3D. DIC 2D (gambar kiri) mengukur perpindahan dalam dua dimensi, yaitu pada bidang  $X$  dan  $Y$ , dengan komponen perpindahan  $u$  (*Displacement* horizontal) dan  $v$  (*Displacement* vertikal). Teknik ini melacak perubahan bentuk objek dalam dua sumbu tersebut, tanpa mendeteksi pergeseran pada sumbu  $z$ . Gambar menunjukkan grid datar di mana DIC 2D dapat menghitung perubahan posisi pada permukaan tanpa mempertimbangkan kedalaman atau deformasi di luar bidang.

Sebaliknya, DIC 3D (gambar kanan) mengukur perpindahan dalam tiga dimensi ( $X, Y$ , dan  $Z$ ). Selain komponen  $u$  dan  $v$ , DIC 3D juga mengukur perpindahan pada sumbu  $z$ , memungkinkan analisis pergeseran keluar bidang. Grid yang digambarkan melengkung pada DIC 3D menunjukkan bahwa teknik ini mampu mengukur deformasi objek yang lebih kompleks, mencakup dimensi kedalaman. DIC 3D sangat berguna dalam aplikasi yang memerlukan pemahaman mendalam tentang deformasi pada permukaan tiga dimensi atau

objek yang mengalami distorsi pada ketiga sumbu.

Dalam penelitian ini, DIC 2D dipilih karena analisis deformasi pada kubah Gunung Merapi menggunakan data *Digital Elevation Model* (DEM) yang hanya membutuhkan pengukuran perpindahan dalam dua dimensi, yaitu dalam bidang X dan Y. Seperti yang diungkapkan oleh (Kalteremidou et al. 2021), DIC 2D telah terbukti efektif untuk aplikasi yang melibatkan pengukuran *Strain* dan deformasi pada permukaan datar, sehingga cocok digunakan untuk mengukur perpindahan pada data DEM yang relatif tidak melibatkan deformasi keluar bidang.



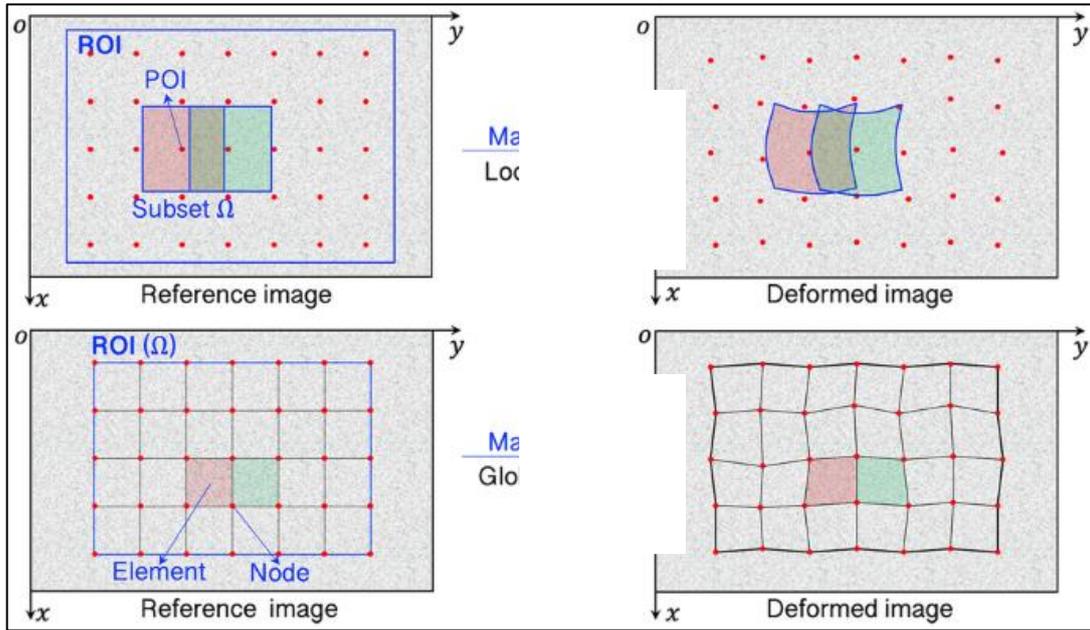
**Gambar 2.6** Algoritma *Digital Image Correlation*

Pada **gambar 2.6** menjelaskan bagaimana Algoritma sederhana dari DIC yang digambarkan menggunakan diagram flowchart. Diagram ini menunjukkan alur langkah-langkah yang diperlukan untuk mengimplementasikan algoritma DIC 2D, dimulai dari input data hingga visualisasi hasil (Gedela et al. 2021). Berikut ini adalah pemaparan singkat dari setiap proses:

#### A. Data Referensi dan Deformasi

Dalam DIC, Data Referensi dan Deformasi adalah komponen dasar yang digunakan untuk mengukur perubahan yang terjadi pada suatu objek yang mengalami deformasi. Data referensi diambil sebelum adanya deformasi, sementara data deformasi diambil setelah objek mengalami perubahan bentuk atau posisi. Dalam penelitian yang melibatkan deformasi struktural atau analisis mekanik, kedua data ini digunakan untuk menentukan perpindahan

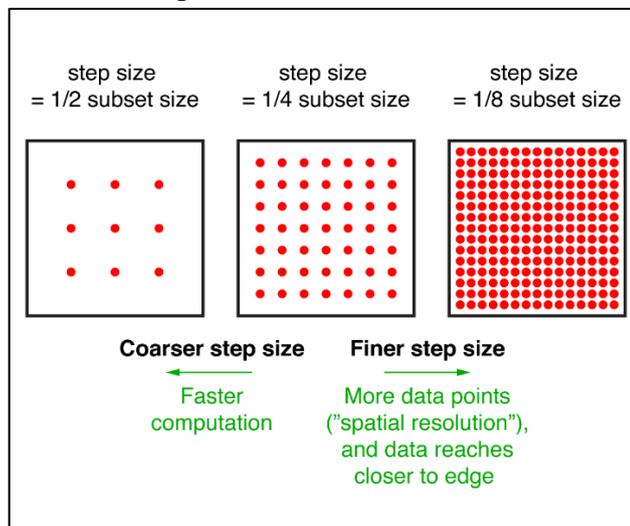
piksel pada gambar yang akan menunjukkan pola perpindahan dan distribusi *Strain* pada objek yang dianalisis. (Gedela et al. 2021) menggunakan data referensi dan deformasi untuk mengukur pergeseran dan distribusi *Strain* pada permukaan objek dengan resolusi tinggi, di mana citra referensi diambil sebagai basis awal untuk membandingkan perubahan yang terjadi pada citra deformasi. **Gambar 2.7** contoh data Referensi dan Deformasi.



**Gambar 2.7 Data Referensi dan Data Deformasi**  
[\(https://link.springer.com/\)](https://link.springer.com/)

### B. Pembagian Grid

Pembagian grid dalam analisis *Digital Image Correlation* (DIC) sangat penting untuk menentukan keseimbangan antara resolusi spasial dan kecepatan komputasi. Ukuran grid dan step size (jarak antar pusat grid) langsung memengaruhi keseimbangan ini; di mana grid yang lebih besar dengan step size yang lebih kasar akan mempercepat proses komputasi tetapi mengurangi detail resolusi spasial.



**Gambar 2.8 Hubungan antara Ukuran Grid dan Step Size dalam DIC 2D**  
[\(https://digitalimagecorrelation.org/\)](https://digitalimagecorrelation.org/)

Sebagai contoh, dalam penelitian yang dilakukan oleh (Lima et al. 2021) dan (Gedela et al. 2021), pemilihan ukuran grid dan step size disesuaikan dengan kebutuhan spesifik uji coba. (Lima et al. 2021) menggunakan ukuran grid 33 piksel dan step size 11 piksel, sementara (Gedela et al. 2021) menekankan pentingnya step size yang lebih kecil untuk menangkap data perpindahan yang lebih rinci, khususnya dalam aplikasi geoteknik.

penyesuaian step size (sebagai fraksi dari grid size) memungkinkan DIC untuk menyesuaikan resolusi spasial sesuai kebutuhan analisis, seperti yang dijelaskan pada **gambar 2.8**:

1. Step Size Kasar (1/2 ukuran grid): Mengurangi beban komputasi, cocok untuk aplikasi yang hanya mengukur perpindahan skala besar dengan detail lebih rendah.
2. Step Size Halus (1/8 ukuran grid): Memberikan resolusi spasial lebih tinggi, penting untuk menangkap deformasi kecil tetapi membutuhkan sumber daya komputasi yang lebih besar

### C. Korelasi antar grid

grid citra dari gambar referensi dibandingkan dengan grid citra dari gambar terdeformasi. Korelasi ini menghitung menggunakan *Template matching*. *Template matching* adalah metode yang digunakan dalam *computer vision* dan analisis citra untuk mencari dan mencocokkan bagian dari gambar (template) dalam gambar yang lebih besar. Rumus ini digunakan untuk menghitung kesamaan antara grid citra dari gambar referensi dan grid dari gambar terdeformasi. Dihitung dengan persamaan berikut

$$R(x, y) = \frac{\Sigma(T(x',y') - \bar{T})(I(x',y') - \bar{I})}{\sqrt{\Sigma(T(x',y') - \bar{T})^2 \Sigma(I(x',y') - \bar{I})^2}} \dots\dots\dots(2.1)$$

di mana  $R(x, y)$  adalah Koefisien korelasi pada posisi  $(x, y)$ . Metode ini memungkinkan pengukuran perpindahan pada tingkat sub-piksel, sehingga meningkatkan ketepatan analisis perpindahan dan deformasi pada permukaan uji (Lima et al. 2021).

### D. Interpolasi antar subpixel

Interpolasi subpixel adalah langkah penting dalam algoritma DIC yang digunakan untuk mencapai akurasi tinggi dalam pengukuran perpindahan. Pada teknik ini, interpolasi dilakukan untuk menentukan perpindahan di bawah skala piksel, memungkinkan DIC untuk mendeteksi perubahan posisi yang sangat kecil pada objek yang mengalami deformasi. Proses ini biasa menggunakan interpolasi spline *bicubic*, di mana piksel citra diinterpolasi menjadi nilai subpiksel untuk meningkatkan resolusi pengukuran hingga 0,01 piksel (Khelifi et al. 2021).

Berikut adalah beberapa rumus interpolasi yang digunakan dalam *Digital Image Correlation* (DIC) untuk mencapai resolusi subpixel:

1. Interpolasi Linear  
Interpolasi linear adalah metode dasar untuk menghitung nilai di antara dua piksel. Dalam DIC, interpolasi linear jarang digunakan karena kurang akurat dibandingkan metode lainnya, rumusnya adalah sebagai berikut:

$$f(x) = f(x_0) + (x - x_0) \cdot \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0} \dots\dots\dots(2.2)$$

di mana  $x$  adalah posisi subpixel yang ingin diinterpolasi, dan  $f(x_0), f(x_1)$  adalah intensitas pada piksel terdekat.

2. Interpolasi Bilinear

Interpolasi bilinear memperhitungkan nilai piksel di sekitar titik yang ingin dihitung dalam dua arah (X dan Y). Rumusnya adalah:

$$f(x, y) = f(x_0, y_0) \cdot (1 - a)(1 - b) + f(x_1, y_0) \cdot a(1 - b) + f(x_0, y_1) \cdot (1 - a)b + f(x_1, y_1) \cdot ab \dots\dots\dots(2.3)$$

Keterangan:

$a = x - x_0$  dan  $b = y - y_0$  : fraksi perpindahan dalam arah X dan Y

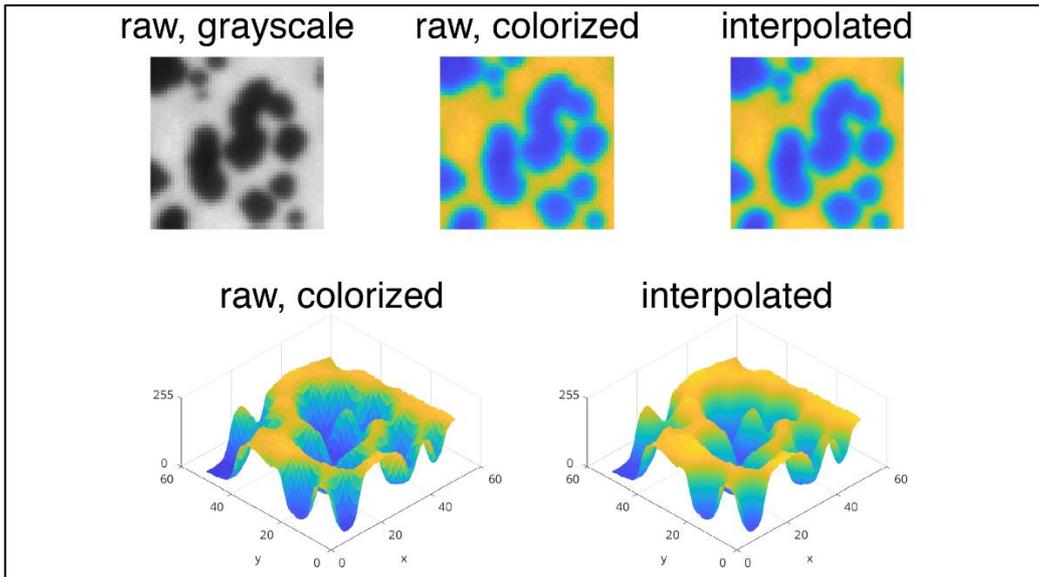
$f(x_0, y_0), f(x_1, y_0), f(x_0, y_1), f(x_1, y_1)$  : intensitas piksel di sekitar koordinat interpolasi.

3. Interpolasi *Bicubic*

Interpolasi *bicubic* adalah metode yang lebih kompleks dan akurat, sering digunakan dalam DIC untuk meningkatkan ketelitian pengukuran perpindahan subpixel. Rumusnya menggunakan 16 piksel di sekitar titik yang ingin dihitung, dan biasanya diformulasikan sebagai berikut:

$$f(x, y) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 a_{ij} x^i y^j \dots\dots\dots(2.4)$$

Koefisien  $a_{ij}$  dihitung berdasarkan intensitas piksel di sekitar titik interpolasi, biasanya dengan mengatur matriks piksel dalam bentuk matriks sistem persamaan linear. Interpolasi *bicubic* menghasilkan penghalusan data yang lebih akurat karena mempertimbangkan turunan hingga orde ketiga.



**Gambar 2.9** Interpolasi Subpixel dalam *Digital Image Correlation*  
(<https://digitalimagecorrelation.org/>)

**Gambar 2.9** ini menunjukkan contoh interpolasi pada data gambar dari eksperimen DIC. Gambar mentah ditampilkan dalam grayscale dan berwarna, diikuti dengan gambar hasil interpolasi. Bagian bawah menampilkan model 3D dari data sebelum dan sesudah interpolasi. Interpolasi subpixel menghasilkan data yang lebih halus, yang memungkinkan deteksi perpindahan kecil secara lebih akurat.

E. Perhitungan perpindahan (*Displacement*)

Perhitungan perpindahan (*Displacement*) dilakukan dengan mengukur perubahan posisi titik pusat grid dari gambar referensi ke gambar deformed. Rumus dasar perpindahan dalam DIC adalah:

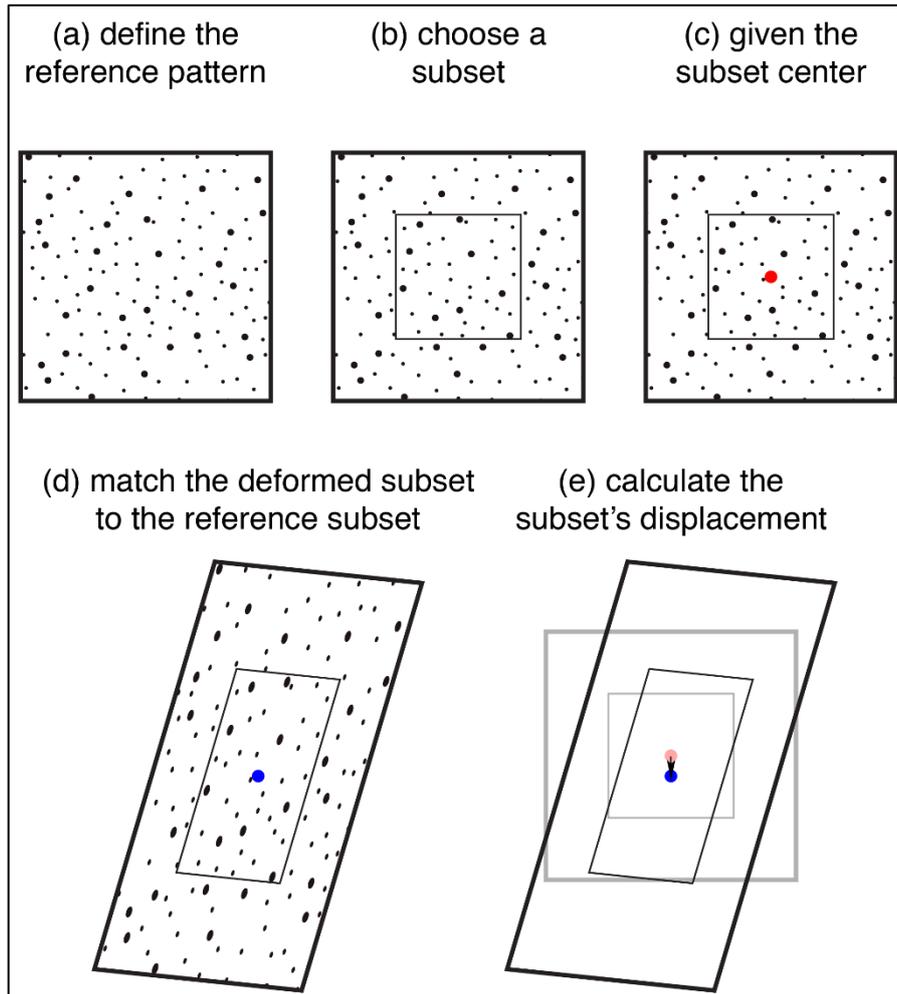
$$u = x_{def} - x_{ref} \dots \dots \dots (2.5)$$

$$v = y_{def} - y_{ref} \dots \dots \dots (2.6)$$

Keterangan:

- $u$ : Perpindahan horizontal
- $v$  : Perpindahan Vertikal
- $x_{def}$  dan  $y_{def}$  : Koordinat pusat grid pada data deformasi
- $x_{ref}$  dan  $y_{ref}$  : Koordinat pusat grid pada data referensi

Metode ini memungkinkan pengukuran perpindahan pada tingkat subpixel dengan bantuan interpolasi subpixel, seperti interpolasi bilinear atau *bicubic*, untuk mendapatkan akurasi yang lebih tinggi.



**Gambar 2.10** Contoh Proses Perhitungan Perpindahan (*Displacement*) (<https://digitalimagecorrelation.org/>)

**Gambar 2.10** menunjukkan langkah-langkah dasar dalam perhitungan perpindahan (*Displacement*) menggunakan *Digital Image Correlation* (DIC) dengan satu grid. Pertama, pola referensi didefinisikan pada gambar awal sebelum deformasi. Selanjutnya, satu grid dipilih dari gambar ini sebagai area acuan. Pusat grid tersebut ditentukan, kemudian dicocokkan dengan grid yang sesuai pada gambar yang sudah mengalami deformasi. Setelah mencocokkan posisi, perpindahan dihitung sebagai selisih antara posisi pusat grid di gambar referensi dan di gambar setelah deformasi.

Dengan langkah ini, DIC memungkinkan untuk mendeteksi pergeseran posisi grid yang terjadi akibat deformasi, dan informasi ini digunakan untuk mengukur perpindahan objek secara keseluruhan.

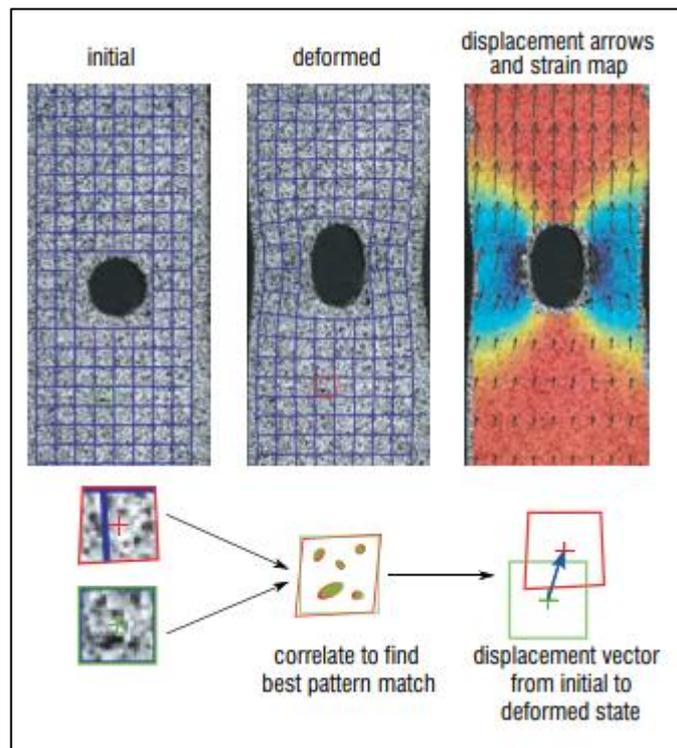
#### F. Perhitungan *Strain*

Perhitungan *Strain* dilakukan dengan menganalisis perubahan posisi grid antar gambar sebelum dan setelah deformasi. *Strain* mengukur perubahan relatif bentuk atau ukuran suatu material akibat beban atau tekanan yang diterapkan, dan dalam DIC, ini dihitung berdasarkan gradien dari perpindahan (*Displacement gradient*). Komponen *Strain* sering dihitung menggunakan turunan komponen perpindahan terhadap sumbu koordinat, seperti:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \dots \dots \dots (2.7)$$

Keterangan:

- $\varepsilon_x$ : *Strain* dalam arah X
- $\varepsilon_y$  : *Strain* dalam arah Y
- $\gamma_{xy}$  : Shear *Strain* atau deformasi sudut
- $v$  dan  $u$  : Perpindahan vertikal dan horizontal



**Gambar 2.11 Perhitungan *Strain***  
[\(https://analytical-online.com/\)](https://analytical-online.com/)

**Gambar 2.11** menunjukkan bahwa gambar awal (*initial*) dipetakan dengan grid sebelum objek mengalami deformasi. Setelah objek terdeformasi, gambar baru (*deformed*) menunjukkan perubahan posisi grid. Perpindahan antar grid dihitung sebagai vektor perpindahan, dan gradien dari vektor ini digunakan untuk menghitung distribusi *Strain*. Hasilnya, pada gambar ketiga terlihat peta *Strain* yang divisualisasikan dengan panah-panah dan warna, di mana arah dan panjang panah menunjukkan arah dan besar *Strain* yang dialami objek. Warna pada peta *Strain* menunjukkan intensitas atau besar deformasi, membantu mengidentifikasi area dengan *Strain* tertinggi dan memberikan wawasan mengenai distribusi deformasi dalam material.

## 2.6 Penelitian Sebelumnya

Penelitian yang dilakukan oleh Yuandhika Galih Wismaya et al., bertujuan untuk mengamati deformasi Gunung Merapi dengan menggunakan teknologi GPS guna mendukung mitigasi bencana letusan gunung api. Dalam penelitian ini, data GPS dari stasiun DELS, GRWH, dan KLAT dikumpulkan dan dianalisis menggunakan perangkat lunak scientific GAMIT/GLOBK selama periode Februari hingga Juli 2015. Hasil penelitian menunjukkan bahwa stasiun DELS mengalami pergeseran horizontal sebesar 0,01822 meter ke arah barat laut dan vertikal sebesar -0,06924 meter (deflasi), stasiun GRWH bergeser horizontal sebesar 0,030508 meter ke arah barat daya dan vertikal sebesar -0,00875 meter (deflasi), serta stasiun KLAT mengalami inflasi dengan pergeseran horizontal sebesar 0,025822 meter ke arah tenggara dan vertikal sebesar 0,07725 meter. Penelitian ini menyoroti pentingnya integrasi data deformasi untuk memetakan pergerakan permukaan yang dapat berfungsi sebagai prediksi aktivitas vulkanik dan membantu dalam mitigasi bencana (Wismaya, et al., 2016).

Penelitian yang dilakukan oleh ZhenZhu Guo et al., bertujuan untuk menerapkan teknologi *Digital Image Correlation* (DIC) dalam pengukuran struktur geoteknik. Dalam penelitian ini, teknologi DIC digunakan untuk memantau deformasi pada struktur jembatan dan bahan-bahan geoteknik lainnya guna meningkatkan ketepatan dan efisiensi dalam pengujian teknik sipil. Data diperoleh menggunakan kamera CCD atau COMS yang merekam gambar, kemudian diolah secara digital untuk menganalisis deformasi pada titik-titik penting struktur. Hasil penelitian menunjukkan bahwa teknologi DIC mampu mendeteksi pergeseran dan perubahan *Strain* dengan akurasi tinggi, yang memiliki potensi besar untuk diterapkan pada pemantauan struktur jembatan dan komponen geoteknik lainnya. Penelitian ini menyoroti pentingnya teknologi DIC sebagai alat prediktif dalam mendeteksi keretakan dan kelelahan material, yang bermanfaat dalam mitigasi risiko dan peningkatan keamanan infrastruktur

Penelitian oleh Tania Sari Rahmawati et al., menganalisis deformasi Gunung Sinabung menggunakan data GPS periode 2017–2018, dengan tujuan mengidentifikasi besar pergeseran titik pantau sebagai indikator aktivitas vulkanik. Data GPS yang diperoleh dari Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi diolah menggunakan GAMIT/GLOBK, menghasilkan pengamatan pada dua periode. Pada periode 1 (April–Agustus 2017), stasiun MRDG mengalami inflasi dengan pergeseran vertikal 224,74 mm/tahun, sementara pada periode 2 (Agustus 2017–April 2018), terjadi deflasi dengan pergeseran -54,55 mm/tahun. Secara keseluruhan, titik pantau Gunung Sinabung menunjukkan pergeseran arah yang bervariasi dengan adanya inflasi dan deflasi di beberapa stasiun, memberikan data penting untuk mendukung mitigasi bencana vulkanik dan pemahaman terhadap pola deformasi di Sinabung (Rahmawati, et al., 2021).

Penelitian yang dilakukan oleh Dwi Fitri Yudiantoro et al., berfokus pada analisis deformasi Gunung Merapi dengan mengaplikasikan metode kombinasi block movement dan deformasi elastis menggunakan data GPS untuk periode 1995–1997. Penelitian ini menggunakan data vektor perpindahan dari titik-titik GPS di sekitar puncak Merapi, menunjukkan pola deformasi yang tidak simetris dengan perpindahan yang signifikan ke arah barat laut dan selatan, terutama pada blok-blok yang bergerak di sekitar aliran lava.

Pada periode 1995–1996, tercatat adanya inflasi yang menunjukkan pola radial menjauhi puncak, sementara pada periode 1996–1997, terjadi deflasi akibat pengurangan tekanan dari sumber magma. Kedalaman sumber tekanan diperkirakan berada pada 500–700 meter di bawah puncak, dengan volume suplai magma sebesar  $62 \times 10^3 \text{ m}^3$  untuk periode sebelum erupsi efusif pada 17 Januari 1997 (Yudiantoro et al., 2023).

Penelitian yang dilakukan oleh Muhammad Ikhsan Adidafa dan Mohammad Abdul Basyid mengamati deformasi Gunung Api Sinabung sebelum dan sesudah erupsi pada 2 Maret 2021 menggunakan metode Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar (DInSAR). Dengan menggunakan citra *Sentinel-1A* pada pasangan 4 Februari 2021 – 28 Februari 2021 dan 28 Februari 2021 – 24 Maret 2021, data diolah menggunakan perangkat lunak SNAP 9.0. Hasil penelitian menunjukkan penurunan deformasi rata-rata sebesar 0,739 meter dari empat titik sampel di kawasan Sinabung, menunjukkan pola deflasi signifikan yang diakibatkan oleh pengurangan tekanan dalam kantung magma pasca-erupsi. Metode DInSAR dalam penelitian ini memungkinkan identifikasi perubahan elevasi secara rinci, memberikan kontribusi penting bagi mitigasi bencana vulkanik di kawasan tersebut (Adidafa & Basyid, 2023).

Penelitian oleh Rian Nurtyawan dan Lady Suci Utami menggunakan metode Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar (DInSAR) untuk memantau deformasi Gunung Merapi sebelum dan sesudah erupsi freatik pada 11 Mei 2018. Dengan memanfaatkan data citra *Sentinel-1A* pada pasangan 10 Januari 2018–27 Februari 2018, 27 Februari 2018–10 Mei 2018, dan 10 Mei 2018–22 Januari 2019, serta data DEM SRTM, penelitian ini mengidentifikasi pola deflasi di Gunung Merapi dengan hasil deflasi sebesar -0,12 meter untuk periode pra-erupsi 1, -0,27 meter untuk pra-erupsi 2, dan -0,194 meter pada pasca-erupsi. Pengolahan data menunjukkan adanya deflasi yang konsisten, dengan korelasi signifikan antara aktivitas vulkanik dan perubahan tekanan dalam kantung magma yang mengakibatkan pergeseran permukaan. Hasil penelitian ini menyoroti pentingnya metode DInSAR dalam pemantauan geohazard untuk mitigasi bencana (Nurtyawan & Utami, 2020)

Penelitian oleh Ramesh Gedela et al., berfokus pada penggunaan metode *Digital Image Correlation* (DIC) untuk menganalisis mekanisme distribusi beban pada pondasi yang diperkuat geocell. Teknik DIC digunakan sebagai metode non-kontak untuk mengukur deformasi pada permukaan dengan memanfaatkan korelasi intensitas gambar yang diambil selama pengujian beban. Pengujian dilakukan pada pondasi yang diperkuat dengan geocell, menunjukkan bahwa teknik ini mampu mengukur pergeseran distribusi beban dengan akurat, mencakup peningkatan luas distribusi beban di bawah lapisan geocell yang lebih tinggi dibandingkan dengan pondasi yang tidak diperkuat. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa tinggi dan kekasaran permukaan geocell mempengaruhi sudut distribusi beban, memberikan informasi penting untuk perancangan dan penerapan geosintetik pada proyek infrastruktur (Gedela et al., 2021)

Penelitian oleh R.A.A. Lima et al., Bernasconi membahas analisis eksperimental propagasi retakan pada sambungan adhesif menggunakan *Digital Image Correlation* (DIC) dan Optical Backscatter Reflectometry (OBR). Studi ini difokuskan pada pengamatan propagasi retak mode I pada sambungan adhesif berbahan logam dengan metode OBR, yang mampu mendeteksi posisi retakan dan zona deformasi awal yang disebabkan oleh retak.

Hasil menunjukkan bahwa OBR efektif dalam mengidentifikasi titik deformasi pada lapisan adhesif yang menandakan awal zona plastisitas, yang berbeda dari posisi ujung retakan yang teridentifikasi secara visual. Kombinasi OBR dan DIC menawarkan potensi untuk memantau integritas struktural sambungan adhesif secara in-situ, yang berkontribusi pada pengembangan teknik pemantauan untuk keselamatan struktural di bidang industri, seperti aeronautika dan otomotif (Lima et al., 2021).

Penelitian oleh Imad Khlifi et al., mengkaji mekanisme fraktur pada material refraktori Magnesia-Hercynite dengan mengombinasikan metode *Digital Image Correlation* (DIC) yang disempurnakan dengan uji Wedge Splitting Test (WST). Studi ini bertujuan untuk memahami pengembangan Fracture Process Zone (FPZ) dan ketahanan terhadap propagasi retak melalui pengukuran energi fraktur. Hasil menunjukkan bahwa jaringan mikroretak akibat ketidakcocokan koefisien ekspansi termal antara matriks magnesia dan agregat hercynite mampu meningkatkan ketahanan material terhadap propagasi retak. Pendekatan ini memberikan pemahaman yang lebih dalam tentang proses energi yang terjadi selama perkembangan FPZ, dengan implikasi penting bagi pengembangan material tahankejut termal di industri refraktori (Khlifi et al., 2021).

Penelitian yang dilakukan oleh Kalliopi-Artemi Kalteremidou et al., menganalisis kegagalan komponen balok berongga berbahan CF/epoxy menggunakan metode *Digital Image Correlation* (DIC) dan analisis Emisi Akustik (AE). Penelitian ini mencakup pengujian statis dan kelelahan untuk mengkarakterisasi mekanisme kerusakan di bawah beban tekan. Teknik DIC digunakan untuk menentukan deformasi medan penuh dan regangan pada permukaan balok, sementara AE membantu mengidentifikasi lokasi kerusakan yang tidak terlihat secara visual. Hasilnya menunjukkan bahwa kombinasi DIC dan AE memberikan pandangan yang lebih lengkap terhadap kerusakan material komposit, yang relevan bagi aplikasi struktural di industri otomotif dan dirgantara (Kalteremidou et al., 2021).

Penelitian yang dilakukan oleh Deepika et al., menggunakan metode *Digital Image Correlation* (DIC) berbasis grid acak untuk menganalisis metrik performa dalam proses pemotongan non-homogen. Studi ini fokus pada evaluasi deformasi medan penuh dan regangan pada proses pembentukan chip selama pemotongan logam, terutama di area permukaan bebas dan antarmuka. Hasil menunjukkan bahwa metode ini mampu mengukur medan regangan dan perpindahan dengan akurasi tinggi selama proses pemotongan tidak stabil. Teknik ini berpotensi memberikan estimasi metrik penting, seperti *Strain* residu pada permukaan yang dipotong dan konsumsi energi relatif selama pemotongan, sehingga mendukung peningkatan kualitas dan efisiensi dalam proses manufaktur (Gupta et al., 2021)

**Tabel 2.1 State Of the Art**

No	Judul dan Penulis	Metode	Dataset	Hasil
1	Kalliopi-Artemi Kalteremidou et al. - Analisis Kegagalan Balok Berongga CF/epoxy dengan DIC dan AE	<i>Digital Image Correlation</i> (DIC) dan Acoustic Emission (AE)	Pengujian statis pada balok berongga	Mengidentifikasi deformasi material komposit di bawah beban tekan; memberikan pandangan lengkap untuk industri
2	ZhenZhu Guo - Application of <i>Digital Image Correlation</i> Technology in Geotechnical Structure Measurement	<i>Digital Image Correlation</i>	struktur geoteknik dan jembatan	Teknologi DIC mampu mendeteksi perubahan <i>Strain</i> dan deformasi dengan akurasi tinggi, efektif untuk deteksi kerusakan dan penurunan kualitas material dalam struktur infrastruktur geoteknik dan jembatan
3	Yuandhika Galih Wismaya et al. - Analisis Deformasi Gunung Merapi Menggunakan Teknologi GPS	Teknologi GPS	Data GPS dari stasiun DELS, GRWH, KLAT (Februari - Juli 2015)	Pergeseran horizontal dan vertikal menunjukkan inflasi dan deflasi
4	Tania Sari Rahmawati et al. - Analisis Deformasi Gunung Sinabung Menggunakan Data GPS	GPS dengan GAMIT/GLOBK	Data GPS dari Pusat Vulkanologi (2017– 2018)	Inflasi dan deflasi signifikan di titik pengamatan
5	Dwi Fitri Yudiantoro et al. - Kombinasi Block Movement dan Deformasi Elastis untuk Pemantauan Merapi	Kombinasi Block Movement dan Deformasi Elastis	Data GPS sekitar puncak Merapi (1995– 1997)	Perubahan radial inflasi dan deflasi sesuai tekanan magma
6	Muhammad Ikhsan Adidafa et al. - Pemantauan Deformasi Gunung Api Sinabung dengan DInSAR	DInSAR	Citra <i>Sentinel-1A</i> sebelum dan sesudah erupsi (2021)	Penurunan deformasi rata-rata 0,739 m pasca- erupsi
7	Rian Nurtyawan et al. - Pemantauan Deformasi Gunung Merapi Sebelum dan Sesudah Erupsi dengan DInSAR	DInSAR dengan <i>Sentinel-1A</i> dan DEM SRTM	Citra <i>Sentinel-1A</i> dan DEM SRTM (2018– 2019)	Deflasi 0,12 m hingga 0,27 m sebelum dan sesudah erupsi

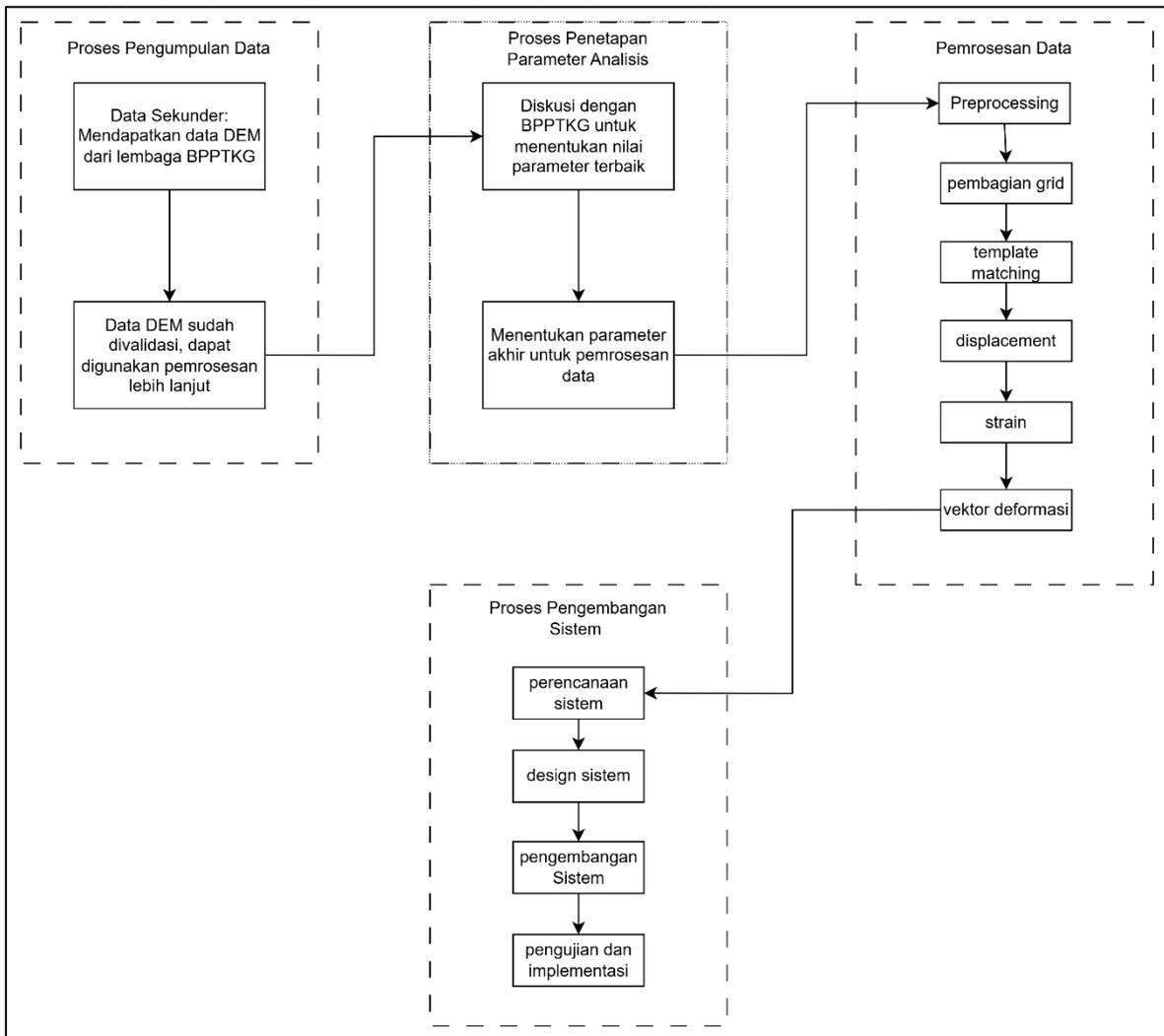
**Tabel 2.2 State Of the Art (lanjutan)**

<b>No</b>	<b>Judul dan Penulis</b>	<b>Metode</b>	<b>Dataset</b>	<b>Hasil</b>
8	Ramesh Gedela et al. - Analisis Distribusi Beban pada Pondasi yang Diperkuat Geocell Menggunakan DIC	<i>Digital Image Correlation</i> (DIC)	Pengujian pondasi dengan geocell	Distribusi beban yang lebih luas di bawah geocell
9	R.A.A. Lima et al. - Pengamatan Retakan pada Sambungan Adhesif Menggunakan DIC dan OBR	DIC dan Optical Backscatter Reflectometry (OBR)	Observasi retakan pada sambungan adhesif	Identifikasi zona plastisitas di sambungan adhesif
10	Imad Khelifi et al. - Analisis Fraktur Material Refraktori dengan WST dan DIC	Wedge Splitting Test (WST) dan DIC	Material Magnesia-Hercynite dengan ketahanan fraktur	Peningkatan ketahanan terhadap propagasi retak
11	Deepika Gupta et al. - Evaluasi Metrik Performa dalam Proses Pemotongan Non-Homogen Menggunakan DIC	Random-grid Based <i>Digital Image Correlation</i> (DIC)	Proses pembentukan chip logam pada material Cu	Estimasi <i>Strain</i> permukaan residu dan konsumsi energi relatif

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Metodologi Penelitian

Pada bagian ini akan menjelaskan langkah-langkah metodologi penelitian yang akan dilakukan dalam perancangan sistem yang dilakukan dengan metode kuantitatif. Penjelasan ini akan memberikan sebuah gambaran tentang penelitian yang dilakukan. Langkah-langkah metodologi penelitian juga menjelaskan alur perancangan sistem mulai dari pengumpulan data hingga pengembangan sistem seperti yang terlihat pada **Gambar 3.1** di bawah ini.



**Gambar 3.1 Metodologi Penelitian**

Pada tahap pengumpulan data, data DEM diperoleh dari lembaga Balai Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kebencanaan Geologi (BPPTKG). Data DEM ini akan digunakan sebagai dasar dalam analisis deformasi untuk memahami perubahan morfologi permukaan terkait dengan aktivitas vulkanik.

Tahap pemrosesan data dimulai dengan proses persiapan data yang meliputi pengecekan data agar sesuai dengan kebutuhan analisis. Setelah data siap, langkah selanjutnya adalah *preprocessing* data DEM yang digunakan dalam pemrosesan data.

Setelah data DEM yang sudah di *preprocessing* data akan digunakan untuk pemrosesan selanjutnya dari pembagian grid sampai *plotting* vektor deformasi yaitu proses utama dari *Digital Image Correlation*.

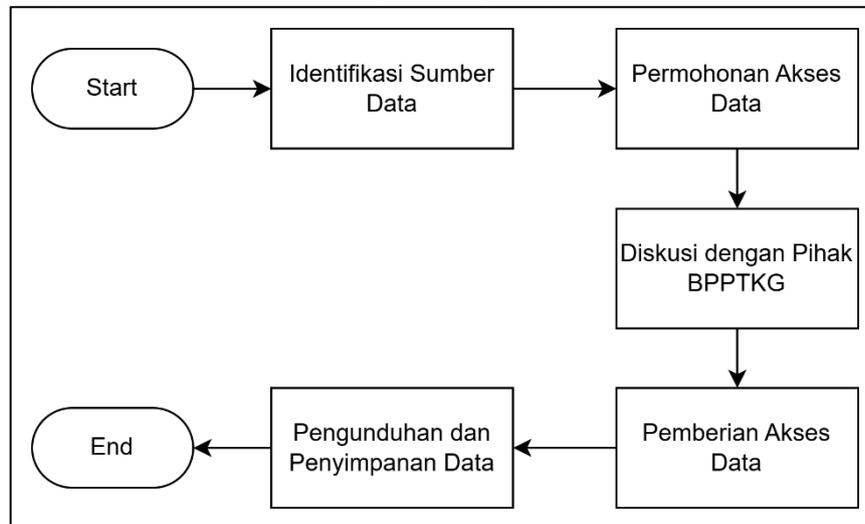
Tahap terakhir adalah pengembangan sistem yang dilakukan dengan menggunakan metode *Extreme Programming* (XP). Metode ini dipilih karena memungkinkan iterasi cepat, respon terhadap perubahan kebutuhan.

### 3.2 Pengumpulan Data

Pengumpulan data merupakan tahap awal yang krusial dalam penelitian ini, karena data yang diperoleh akan menjadi dasar untuk analisis lebih lanjut. Pada penelitian ini, dataset yang digunakan adalah *Digital Elevation Model* (DEM), yang berisi representasi digital dari ketinggian permukaan bumi dan berfungsi sebagai peta topografi digital.

Dataset DEM dalam penelitian ini diperoleh dari Balai Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kebencanaan Geologi (BPPTKG), yang merupakan lembaga resmi dalam pemantauan aktivitas vulkanik Gunung Merapi. Data DEM yang diberikan oleh BPPTKG telah melalui proses validasi, sehingga dapat langsung digunakan dalam pemrosesan lebih lanjut tanpa perlu dilakukan *preprocessing* tambahan di luar sistem.

Proses pengumpulan data dilakukan dengan tahapan **gambar 3.2** berikut:



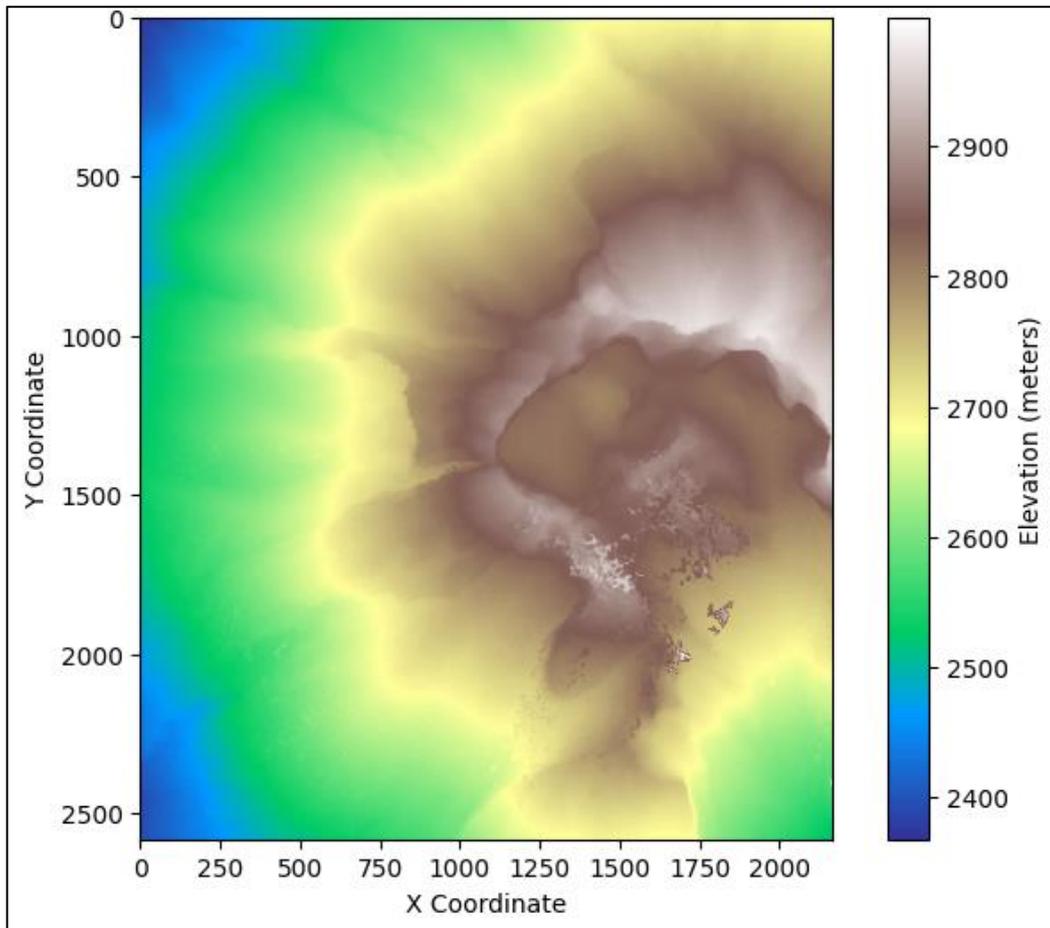
**Gambar 3.2 Tahapan pengumpulan data**

1. Identifikasi Sumber Data : BPPTKG dipilih sebagai penyedia data karena memiliki dataset DEM yang telah divalidasi dan sesuai dengan kebutuhan penelitian.
2. Permohonan Akses Data : Peneliti mengajukan permohonan resmi kepada BPPTKG untuk mendapatkan akses dataset DEM sesuai dengan prosedur yang berlaku.
3. Diskusi dengan Pihak BPPTKG : Pengumpulan data dilakukan secara langsung dengan mengunjungi BPPTKG pada Agustus 2024, di mana peneliti berdiskusi dengan pihak terkait untuk memastikan dataset yang diperoleh sesuai dengan kebutuhan penelitian.
4. Pemberian Akses Data : Setelah permohonan disetujui, peneliti memperoleh akses untuk mengunduh dataset DEM dari platform yang disediakan oleh BPPTKG.
5. Pengunduhan dan Penyimpanan Data : Data yang diberikan oleh BPPTKG diunduh dan disimpan dalam format *Tagged Image Format* (.TIF) untuk digunakan dalam analisis lebih lanjut.

Dataset DEM yang diperoleh terdiri dari 5 periode waktu yang berbeda, yaitu:

1. 26 Juli 2020
2. 8 Desember 2021
3. 8 Agustus 2022
4. 10 Agustus 2023
5. 30 Maret 2024

Masing-masing dataset ini merepresentasikan kondisi topografi Gunung Merapi pada periode waktu tertentu dan memiliki nilai elevasi yang berbeda sesuai dengan perubahan morfologi yang terjadi. Dataset DEM yang digunakan dalam penelitian ini memiliki karakteristik seperti Format File: *.TIF (Tagged Image Format)*, isi dari data DEM adalah representasi digital dari permukaan bumi dalam bentuk matriks nilai ketinggian (elevasi), dan Setiap piksel dalam file DEM merepresentasikan nilai elevasi suatu lokasi dengan resolusi spasial tertentu. **Gambar 3.3** berikut ini menunjukkan contoh tampilan dataset DEM yang digunakan dalam penelitian ini.

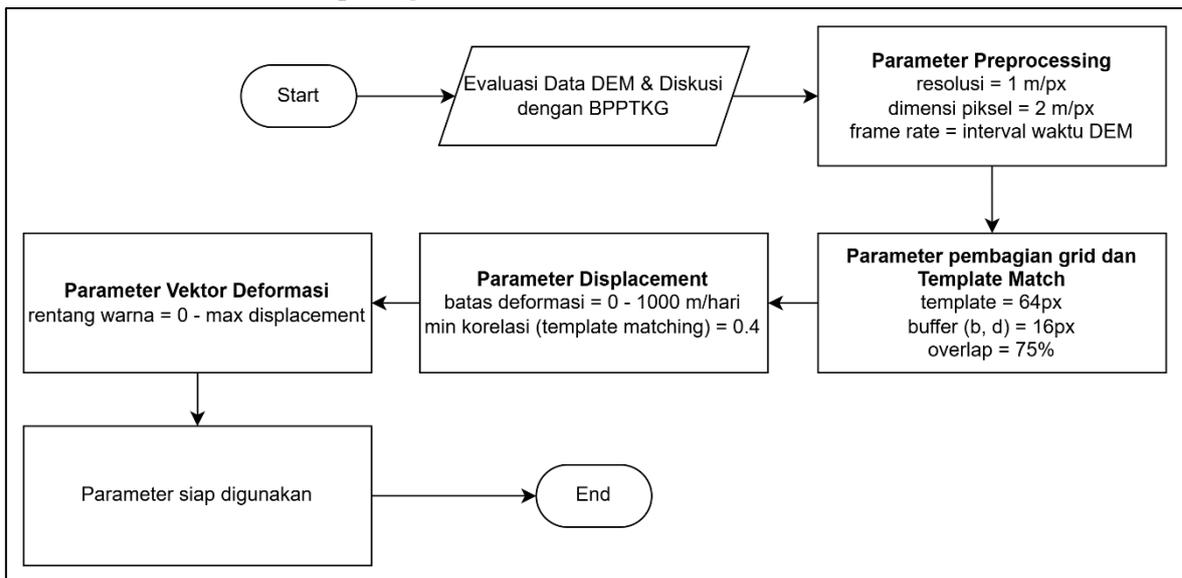


**Gambar 3.3 Data DEM berformat TIF**  
(BPPTKG Yogyakarta, 2024)

Gambar di atas merupakan salah satu data yang disimpan dalam *file* TIF dari data DEM yang telah dikumpulkan.

### 3.3 Penetapan Parameter Analisis

Penetapan parameter analisis merupakan langkah penting dalam penelitian ini untuk memastikan metode *Digital Image Correlation* (DIC) dapat berjalan dengan optimal. Parameter yang ditetapkan berperan dalam berbagai tahapan pemrosesan data, mulai dari *preprocessing*, pembagian grid, *template matching*, perhitungan pergeseran (*Displacement*), hingga visualisasi hasil vektor deformasi. Nilai parameter dalam penelitian ini ditentukan berdasarkan karakteristik DEM Gunung Merapi serta pertimbangan keseimbangan antara akurasi hasil dan efisiensi komputasi yang didapatkan hasilnya dari diskusi dengan lembaga BPPTKG. Meskipun parameter ini dikembangkan untuk analisis deformasi Gunung Merapi, metode yang digunakan tetap fleksibel dan dapat disesuaikan untuk gunung api lainnya dengan penyesuaian terhadap resolusi DEM dan karakteristik deformasi wilayah tersebut. Penetapan parameter dimulai dengan evaluasi data DEM sampai menyiapkan parameter untuk vektor deformasi seperti **gambar 3.4** berikut:



**Gambar 3.4 Alur Penetapan Parameter Analisis**

#### 1. Parameter Preprocessing

Pada tahap *preprocessing*, resolusi akhir DEM setelah proses *resampling* ditetapkan sebesar 1 meter per piksel. Resolusi ini dipilih untuk memastikan bahwa deformasi yang terjadi masih dapat terdeteksi dengan baik tanpa kehilangan detail penting. Resolusi yang terlalu tinggi (misalnya 0,5 meter per piksel) memang dapat meningkatkan detail deformasi, tetapi akan memperbesar ukuran data dan memperpanjang waktu pemrosesan. Sebaliknya, jika resolusi diturunkan (misalnya menjadi 5 meter per piksel), proses analisis menjadi lebih cepat, tetapi detail deformasi kecil dapat terabaikan.

Selain itu, penelitian ini menggunakan dimensi piksel DEM dalam meter sebesar 2 meter per piksel. Nilai ini digunakan untuk mengonversi pergeseran piksel menjadi satuan meter dalam perhitungan *Displacement*. Nilai ini dipilih berdasarkan resolusi asli DEM yang diberikan oleh BPPTKG, sehingga hasil analisis tetap sesuai dengan data yang tersedia.

Untuk memastikan perhitungan kecepatan deformasi dilakukan dalam satuan yang benar, *frame rate* dihitung berdasarkan selisih waktu antara dua DEM dengan satuan default dalam meter per hari. *Frame rate* ini dapat disesuaikan jika interval pengambilan data berubah, sehingga perhitungan tetap sesuai dengan data yang digunakan dalam penelitian.

## 2. Parameter Grid dan *Template matching*

Dalam metode DIC, pembagian grid dan *template matching* berperan penting dalam menentukan akurasi perhitungan pergeseran antar DEM. Ukuran grid dalam penelitian ini ditentukan secara otomatis berdasarkan ukuran DEM setelah *preprocessing*. Grid ini menjadi dasar untuk proses *template matching*, di mana setiap grid digunakan sebagai pusat untuk membandingkan pola antar DEM.

Ukuran *template* dalam *template matching* ditetapkan sebesar 64 piksel. Ukuran ini dipilih sebagai kompromi antara stabilitas dan akurasi. Jika *template* terlalu kecil (misalnya 32 piksel), maka lebih sensitif terhadap pergeseran kecil, tetapi lebih rentan terhadap noise. Sebaliknya, jika *template* terlalu besar (misalnya 128 piksel), maka proses pencocokan akan lebih stabil, tetapi kehilangan detail deformasi kecil yang mungkin terjadi.

Agar *template matching* tidak mengalami error di tepi DEM, buffer dengan ukuran 16 piksel diterapkan pada kedua sumbu koordinat (*X dan Y*). Buffer ini berfungsi untuk memastikan bahwa *template* yang digunakan memiliki cukup ruang untuk dibandingkan dengan DEM lainnya. Jika buffer terlalu kecil (misalnya 8 piksel), ada kemungkinan *template matching* dilakukan di area dengan informasi yang tidak cukup stabil. Jika buffer terlalu besar (misalnya 32 piksel), maka akan mengurangi area analisis yang dapat digunakan.

*Overlap* antar grid dalam penelitian ini ditetapkan sebesar 75%. *Overlap* ini digunakan untuk memastikan bahwa deformasi dapat dihitung dengan lebih akurat dengan mempertahankan kelancaran antar grid. Jika *overlap* terlalu kecil (misalnya 50%), maka grid akan terlalu terpisah, sehingga mengurangi ketelitian dalam mendeteksi deformasi. Sebaliknya, jika *overlap* terlalu besar (misalnya 90%), redundansi data meningkat, yang menyebabkan proses komputasi menjadi lebih lambat tanpa peningkatan akurasi yang signifikan.

## 3. Parameter *Displacement*

Pada tahap perhitungan pergeseran, parameter yang digunakan berfungsi untuk mengonversi hasil *template matching* menjadi nilai *Displacement* dalam satuan meter per hari. Nilai batas minimum dan maksimum deformasi ditetapkan sebesar 0 hingga 1000 meter per hari. Rentang ini berdasarkan data pengukuran *Electronic Distance Measurement* (EDM) dari BPPTKG, yang menunjukkan nilai maksimum deformasi kubah Gunung Merapi.

Batas minimum deformasi (*mindef*) ditetapkan sebesar 0 meter per hari, yang berarti semua nilai *Displacement* akan diperhitungkan. Jika batas ini lebih besar dari 0, beberapa pergeseran kecil yang valid mungkin terabaikan. Sementara itu, batas maksimum deformasi (*maxdef*) ditetapkan sebesar 1000 meter per hari untuk menyaring data yang tidak masuk akal akibat kesalahan pencocokan dalam *template matching*. Jika batas ini diturunkan terlalu rendah (misalnya 500 meter per hari), maka ada kemungkinan beberapa data valid ikut terbuang.

Selain itu, parameter minimum korelasi dalam *template matching* (*mincor*) ditetapkan sebesar 0,4. Nilai ini berarti hanya hasil pencocokan dengan korelasi minimal 40% yang akan diterima dalam perhitungan *Displacement*. Jika nilai ini terlalu kecil (misalnya 0,2), maka beberapa hasil pencocokan yang kurang akurat masih bisa diterima, yang dapat menyebabkan *error* dalam hasil *Displacement*. Sebaliknya, jika nilai ini terlalu tinggi (misalnya 0,8), maka beberapa data valid bisa ikut terbuang.

#### 4. Parameter Visualisasi Hasil Plotting Vektor Deformasi

Rentang warna (*colormap range*) ditetapkan dengan nilai awal 0 meter per hari untuk batas minimum dan maksimum sesuai dengan *Displacement* terbesar dalam dataset.

Selain itu, batas minimum dan maksimum skala warna (*mincol & maxcol*) dapat diatur ulang. Pengaturan ini memberikan fleksibilitas dalam analisis, terutama jika ingin memperjelas distribusi deformasi yang terjadi pada kubah Gunung Merapi.

Penetapan parameter dalam penelitian ini dilakukan dengan mempertimbangkan keseimbangan antara akurasi hasil dan efisiensi komputasi. Nilai parameter yang digunakan telah disesuaikan dengan karakteristik DEM Gunung Merapi berdasarkan data yang diberikan oleh BPPTKG. Parameter seperti resolusi DEM, ukuran *template matching*, *overlap grid*, serta batas deformasi dipilih untuk memastikan hasil analisis dapat merepresentasikan deformasi dengan baik tanpa mengorbankan performa sistem.

Meskipun nilai parameter ini telah dikalibrasi untuk analisis deformasi Gunung Merapi, metode yang digunakan bersifat fleksibel dan dapat disesuaikan jika diterapkan pada gunung api lainnya. Faktor-faktor seperti resolusi DEM, tingkat deformasi wilayah, serta kebutuhan spesifik analisis di daerah lain dapat mempengaruhi penyesuaian nilai parameter yang digunakan dalam metode DIC.

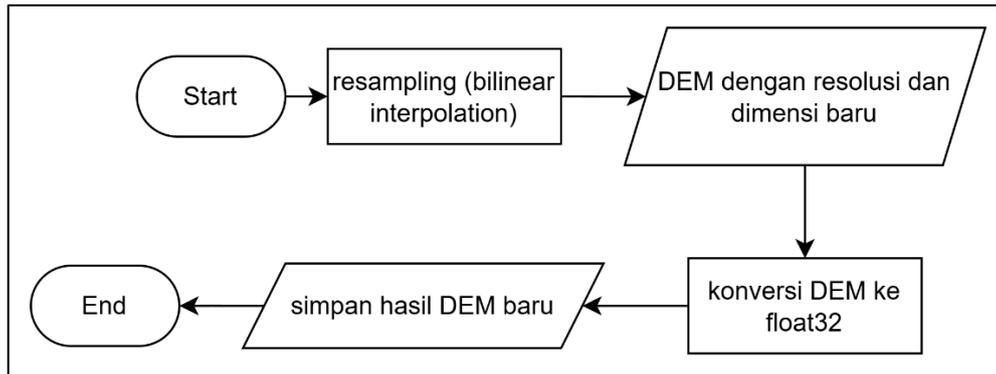
### 3.4 Pemrosesan Data

Pemrosesan data adalah langkah penting dalam penelitian ini, di mana citra *Digital Elevation Model* (DEM) yang diperoleh dari BPPTKG Yogyakarta akan dipersiapkan dan dianalisis menggunakan algoritma *Digital Image Correlation* (DIC). Proses analisis dilakukan dengan *Python Package Py2DIC*, yang telah dimodifikasi oleh BPPTKG untuk meningkatkan akurasi dalam pendeteksian perubahan elevasi. *Py2DIC* digunakan dalam berbagai tahap pemrosesan, termasuk *template matching*, interpolasi *bicubic*, serta perhitungan *displacement* dan *strain* guna menghasilkan analisis deformasi yang lebih presisi.

#### 3.4.1 Preprocessing

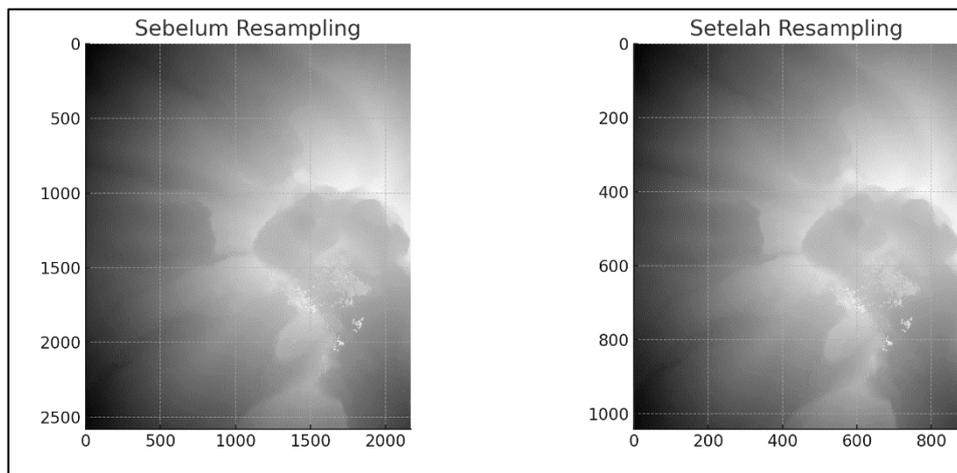
Preprocessing merupakan tahap awal dalam pemrosesan data yang bertujuan untuk menyiapkan data DEM agar siap digunakan dalam analisis DIC. Pada tahap ini, DEM yang diunggah oleh pengguna akan mengalami proses penyesuaian resolusi spasial melalui metode resampling dengan *interpolasi bilinear*. Hal ini dilakukan untuk memastikan bahwa kedua DEM memiliki resolusi yang seragam sehingga perbandingan antar data dapat dilakukan secara akurat.

Resampling merupakan proses mengubah resolusi spasial DEM agar sesuai dengan parameter analisis yang telah ditentukan. Pada penelitian ini, metode *bilinear interpolation* digunakan untuk melakukan resampling karena metode ini menghasilkan interpolasi nilai elevasi yang lebih halus dengan mempertimbangkan rata-rata bobot dari empat piksel terdekat. Alur dari proses *preprocessing* dari resampling menggunakan *bilinear interpolation* sampai konversi ke *float32* seperti alur dari **gambar 3.5** berikut:



**Gambar 3.5 Preprocessing Data**

Pada penelitian ini, nilai resolusi yang digunakan adalah 1 (satu) untuk menjaga konsistensi skala spasial antar DEM sebelum dilakukan analisis lebih lanjut. Dengan menggunakan resolusi yang seragam, proses perbandingan antar DEM dapat dilakukan tanpa adanya distorsi akibat perbedaan skala piksel. Resampling sangat penting dalam analisis DIC karena perbedaan resolusi antar DEM dapat menyebabkan ketidakakuratan dalam pencocokan citra pada tahap *template matching*. Dengan menggunakan *interpolasi bilinear*, nilai elevasi pada piksel baru dihitung berdasarkan nilai dari piksel-piksel tetangga sehingga perubahan resolusi tidak menyebabkan diskontinuitas yang signifikan dalam data. **Gambar 3.6** berikut adalah hasil dari *resample* yang menggunakan salah satu data DEM pada periode 2020:



**Gambar 3.6 Hasil Resampling**

Setelah *resampling* dilakukan, data awal yang memiliki dimensi sebesar 2166 x 2583 piksel dan resolusi sebesar 0,4037 meter/piksel menjadi 1043 x 874 piksel dan resolusi sebesar 1 meter/piksel. Data DEM akan dikonversi menjadi format data yang sesuai untuk digunakan dalam algoritma DIC. Dalam hal ini, data DEM akan disimpan dalam format matriks numerik dengan tipe data *float32*, yang kompatibel dengan operasi pemrosesan citra yang dilakukan pada tahap selanjutnya. Pemilihan format *float32* dilakukan karena memiliki presisi tinggi hingga 7 angka signifikan, cukup untuk menangkap perubahan kecil dalam *Displacement* dan *Strain*, tetapi tetap efisien dalam penggunaan memori dibandingkan dengan *float64*. Dengan format ini, data DEM dapat diproses lebih cepat tanpa kehilangan ketelitian yang signifikan.

Dengan preprocessing yang telah dilakukan, DEM yang telah disesuaikan dapat digunakan dalam tahap selanjutnya, yaitu pembagian grid untuk tahap selanjutnya. Tahap preprocessing ini memastikan bahwa data DEM berada dalam kondisi optimal sebelum digunakan dalam proses DIC.

### 3.4.2 Pembagian Grid

Pembagian grid merupakan langkah pertama dalam proses Digital Image Correlation (DIC) yang bertujuan untuk membagi citra DEM menjadi area-area kecil atau grid yang akan dianalisis secara lokal. Proses ini penting karena DIC bekerja dengan membandingkan bagian kecil dari DEM awal terhadap DEM akhir untuk mendeteksi pergeseran atau deformasi yang terjadi.

Pada tahap ini, citra DEM yang telah melalui preprocessing akan dibagi menjadi grid dengan ukuran yang telah ditentukan berdasarkan parameter *template width* dan *overlap*. Pembagian grid dilakukan secara sistematis dengan mempertimbangkan area pencarian dan *template* yang digunakan dalam *template matching*.

Karena sebelumnya telah dilakukan *resampling* pada *preprocessing*, maka hasil pembagian grid akan sama antara kedua DEM. Ini memastikan bahwa setiap grid dalam DEM awal memiliki pasangan yang identik dalam DEM akhir, sehingga proses *template matching* dapat berjalan dengan lebih akurat. Dengan demikian, tidak ada distorsi akibat perbedaan dimensi atau resolusi antara kedua DEM. Pembagian grid dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$h = \frac{Dim_y - (temp\_dim + 2b)}{olap_y} \dots\dots\dots(3.1)$$

$$w = \frac{Dim_x - (temp\_dim + 2d)}{olap_x} \dots\dots\dots(3.2)$$

Dengan nilai  $olap_y$  dan  $olap_x$  didapatkan dengan persamaan berikut:

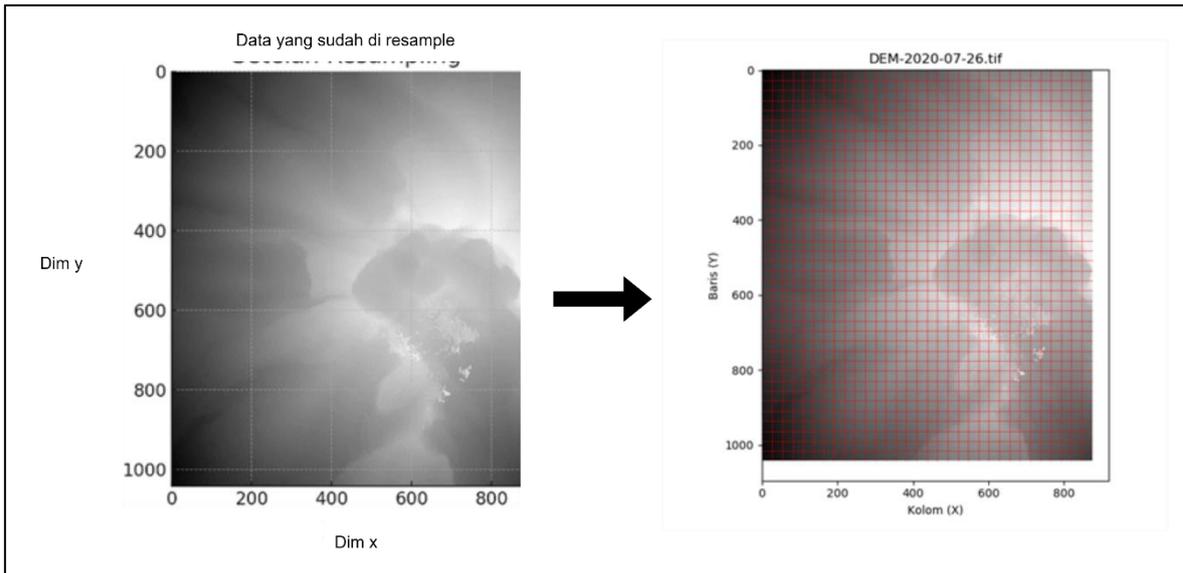
$$olap_y = (1 - olap)x(temp\_dim + 2d) \dots\dots\dots(3.3)$$

$$olap_x = (1 - olap)x(temp\_dim + 2b) \dots\dots\dots(3.4)$$

Keterangan:

- $h$  = jumlah baris dalam grid
- $w$  = jumlah kolom dalam grid
- $Dim_y$  dan  $Dim_x$  = dimensi citra dalam piksel
- $temp\_dim$  = dimensi template dengan nilai 64px
- $b$  dan  $d$  = batasan area pencarian dengan nilai 16px
- $olap$  = nilai overlap 75%
- $olap_y$  dan  $olap_x$  = nilai tumpang tindih

Dengan persamaan-persamaan diatas dapat digambarkan proses dari pembagian grid menggunakan salah satu data seperti **gambar 3.7** berikut:



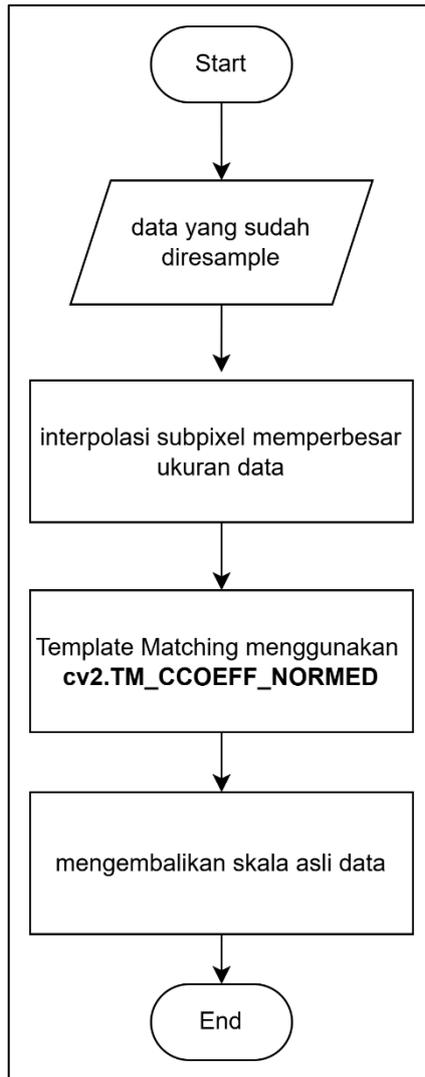
**Gambar 3.7 Pembagian Grid**

Dari gambar di atas, data yang sudah di *resample* dilakukan pemrosesan untuk membagi grid menggunakan persamaan di atas yang menghasilkan total 39 grid baris dan 32 grid kolom dengan total sel gridnya 1.248. Tahap pembagian grid ini menjadi dasar bagi langkah berikutnya dalam proses DIC, yaitu *template matching*, yang bertujuan untuk mencari pergeseran antara grid pada dua DEM dalam rentang waktu yang berbeda.

### 3.4.3 *Template matching*

*Template matching* adalah metode pencocokan pola dalam citra digital yang digunakan untuk menemukan posisi suatu grid gambar dalam gambar referensi. Dalam penelitian ini, *template matching* digunakan untuk mencari pergeseran atau *Displacement* antara citra referensi dan citra yang telah mengalami deformasi. Prinsip dasar dari metode ini adalah mencocokkan setiap grid dari citra deformasi dengan grid yang sesuai dalam citra referensi berdasarkan metode korelasi.

**Gambar 3.8** menunjukkan diagram alur dari proses *Template matching* yang digunakan dalam penelitian ini. Diagram tersebut menggambarkan alur kerja utama, dimulai dari pembagian data DEM ke dalam grid, kemudian pencocokan pola menggunakan metode korelasi *cv2.TM\_CCOEFF\_NORMED*, hingga interpolasi subpiksel untuk meningkatkan akurasi perhitungan pergeseran. Diagram ini membantu dalam memahami bagaimana setiap tahap dalam metode *Template matching* dilakukan untuk mendeteksi *displacement* antara citra referensi dan citra yang telah mengalami deformasi.



**Gambar 3.8** *Template matching*

Berdasarkan **Gambar 3.8**, langkah pertama dalam proses ini adalah menggunakan data DEM yang telah dibagi menjadi beberapa grid sesuai dengan resolusi yang digunakan. Data ini kemudian diperbesar menggunakan interpolasi *bicubic* untuk meningkatkan resolusi spasial, memungkinkan analisis subpiksel dalam pencocokan citra.

Setelah data diperbesar, algoritma *template matching* diterapkan untuk mencari kecocokan terbaik antara grid referensi dan grid deformasi. Dalam penelitian ini, digunakan metode korelasi berbasis koefisien korelasi yang dinormalisasi, yaitu *cv2.TM\_CCOEFF\_NORMED* dari *OpenCV*. Metode ini menghitung nilai kesesuaian berdasarkan perbedaan intensitas piksel dari rata-rata intensitas grid, yang dirumuskan sebagai:

$$R(x, y) = \frac{\sum_{x',y'}(T(x',y')-\bar{T})(I(x+x',y+y')-\bar{I})}{\sqrt{\sum_{x',y'}(T(x',y')-\bar{T})^2 \sum_{x',y'}(I(x+x',y+y')-\bar{I})^2}} \dots\dots\dots(3.5)$$

Keterangan:

- $R(x, y)$  = nilai korelasi yang dihitung di posisi  $(x, y)$
- $T(x', y')$  = intensitas piksel dalam template
- $I(x + x', y + y')$  = intensitas piksel dalam citra referensi

$\bar{T}$  = rata-rata intensitas dalam template  
 $\bar{I}$  = rata-rata intensitas dalam wilayah gambar referensi yang dicocokkan dengan template.

Contohnya yaitu menggunakan nilai dari DEM 2020 grid baris ke – 0 dan grid kolom ke – 0 yang memiliki nilai intensitas piksel dalam citra referensi ( $I$ ) dan *template* ( $T$ ) dengan langkah sebagai berikut:

$$I = \begin{bmatrix} 4.1 & 5.1 & 5.9 \\ 3.1 & 4.0 & 4.9 \\ 2.0 & 3.1 & 3.9 \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} 3 & 4 & 5 \\ 2 & 3 & 4 \\ 1 & 2 & 3 \end{bmatrix}$$

Dari nilai intensitas tersebut dicari nilai rata-rata seperti berikut:

$$\bar{T} = \frac{3 + 4 + 5 + 2 + 3 + 4 + 1 + 2 + 3}{9} = \frac{27}{9} = 3$$

$$\bar{I} = \frac{4.1 + 5.1 + 5.9 + 3.1 + 4.0 + 4.9 + 2.0 + 3.1 + 3.9}{9} = \frac{36.1}{9} = 4,01111$$

Dari nilai rata-rata dapat dicari *numerator* dengan **tabel 3.1** berikut:

**Tabel 3.1 Numerator**

$(T - \bar{T})$	$(I - \bar{I})$	Perkalian
$3 - 3 = 0$	$4.1 - 4.0111 = 0.0889$	$0 \times 0.0889 = 0$
$4 - 3 = 1$	$5.1 - 4.0111 = 1.0889$	$1 \times 1.0889 = 1.0889$
$5 - 3 = 2$	$5.9 - 4.0111 = 1.8889$	$2 \times 1.8889 = 3.7778$
$2 - 3 = -1$	$3.1 - 4.0111 = -0.9111$	$-1 \times -0.9111 = 0.9111$
$3 - 3 = 0$	$4.0 - 4.0111 = -0.0111$	$0 \times -0.0111 = 0$
$4 - 3 = 1$	$4.9 - 4.0111 = 0.8889$	$1 \times 0.8889 = 0.8889$
$1 - 3 = -2$	$2.0 - 4.0111 = -2.0111$	$-2 \times -2.0111 = 4.0222$
$2 - 3 = -1$	$3.1 - 4.0111 = -0.9111$	$-1 \times -0.9111 = 0.9111$
$3 - 3 = 0$	$3.9 - 4.0111 = -0.1111$	$0 \times -0.1111 = 0$
Total pembilang = $1.0889 + 3.7778 + 0.9111 + 0.8889 + 4.0222 + 0.9111 = 11.6$		

Dari hasil *Numerator* dapat mencari nilai *Denominator* sebagai **tabel 3.2** berikut:

**Tabel 3.2 Denominator**

Menghitung $\sum(T - \bar{T})^2$	Menghitung $\sum(I - \bar{I})^2$
$(0)^2 + (1)^2 + (2)^2 + (-1)^2 + (0)^2 + (1)^2 + (-2)^2 + (-1)^2 + (0)^2 = 0 + 1 + 4 + 1 + 0 + 1 + 4 + 1 + 0 = 12$	$(0.0889)^2 + (1.0889)^2 + (1.8889)^2 + (-0.9111)^2 + (-0.0111)^2 + (0.8889)^2 + (-2.0111)^2 = 0.0079 + 1.1857 + 3.5676 + 0.8301 + 0.0001 + 0.7901 + 4.0444 + 0.8301 + 0.0123 = 11.26$
akar penyebut = $\sqrt{12 \times 11.26} = \sqrt{135.12} = 11.63$	

**Tabel 3.3 Denominator (lanjutan)**

<i>Menghitung</i> $\sum(T - \bar{T})^2$	<i>Menghitung</i> $\sum(I - \bar{I})^2$
$R = \frac{11.6}{11.63} = 0.9969$	

Dengan hasil 0.9969 dari proses *Template matching*, hasil tersebut dapat untuk pemrosesan selanjutnya karena sudah diatas nilai *mincor* (0.4) yang sudah ditetapkan dalam parameter.

Dengan menggunakan metode ini, pencocokan grid menjadi lebih akurat karena mempertimbangkan distribusi nilai piksel dalam grid dan citra referensi. Selain itu, metode ini lebih tahan terhadap perubahan kecerahan dan kontras dibandingkan metode korelasi sederhana.

**3.4.4 Perhitungan *Displacement***

Perhitungan *Displacement* dalam penelitian ini dilakukan dengan membandingkan dua citra DEM yang diambil pada dua periode waktu yang berbeda. Proses ini bertujuan untuk mengidentifikasi perubahan posisi titik-titik di permukaan kubah Gunung Merapi akibat deformasi. Perhitungan *Displacement* didasarkan pada metode DIC, dengan teknik *template matching* yang menggunakan korelasi normalisasi koefisien ('*cv2.TM\_CCOEFF\_NORMED*'). Hasil dari *template matching* kemudian ditingkatkan ketelitiannya melalui interpolasi subpiksel untuk memperoleh *Displacement* dengan resolusi yang lebih halus.

*Displacement* dihitung menggunakan perbedaan koordinat pusat *template* pada citra awal dan citra deformasi. Persamaan yang digunakan adalah:

$$\Delta x = x' - x_0 \dots \dots \dots (3.6)$$

$$\Delta y = y' - y_0 \dots \dots \dots (3.7)$$

Keterangan:

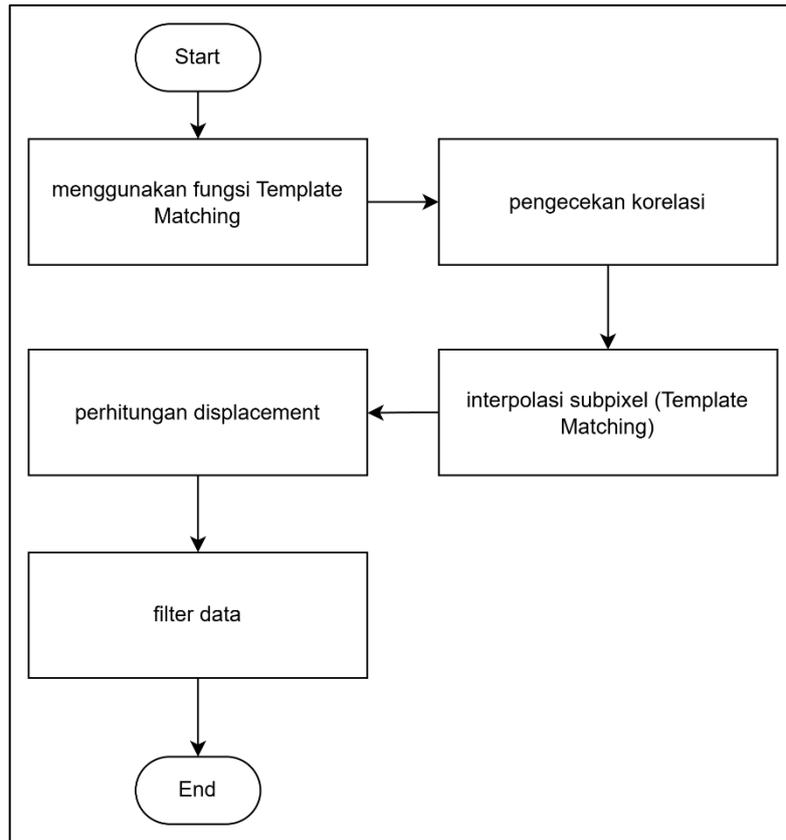
$\Delta x$  = pergeseran pada arah x (horizontal).

$\Delta y$  = pergeseran pada arah y (vertikal).

$x'$  dan  $y'$  = koordinat pusat hasil interpolasi subpixel pada citra deformasi.

$x_0$  dan  $y_0$  = koordinat pusat pada citra awal.

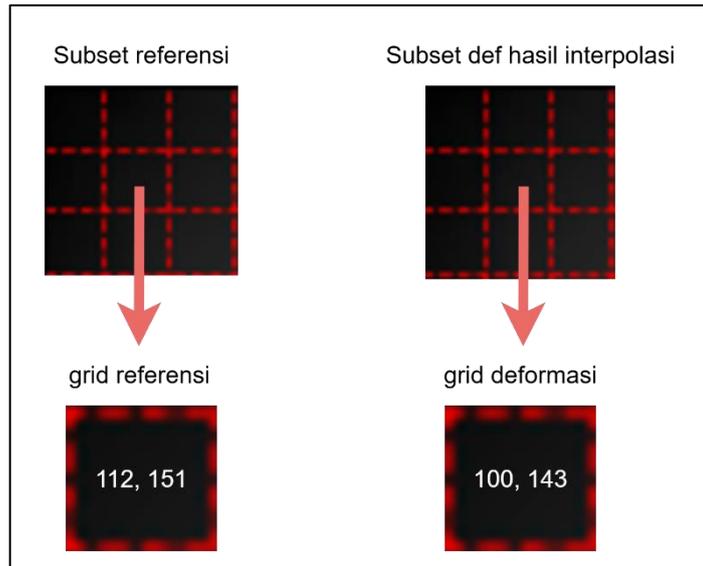
Untuk meningkatkan akurasi, interpolasi subpiksel digunakan agar koordinat pusat hasil *template matching* tidak hanya terbatas pada nilai *integer*, tetapi bisa memiliki nilai pecahan yang lebih presisi.



**Gambar 3.9** Perhitungan *Displacement*

Pada **gambar 3.9**, proses dari *Displacement* mulai dari menggunakan fungsi *Template matching* yang sudah dijelaskan sebelumnya, setelah mendapatkan nilai korelasi masing-masing grid dilakukan pengecekan korelasi dengan nilai *mincor* (minimal correlation) yang sudah ditetapkan dengan nilai 0.4. Nilai korelasi yang  $\geq 0.4$  akan diambil dan ditingkatkan ketelitiannya dengan interpolasi subpiksel, setelah mendapatkan nilai korelasi yang sempurna dapat dihitung nilai *Displacement* dengan persamaan (3.6) dan (3.7). Setelah mendapatkan semua nilai *Displacement*, nilai-nilai tersebut di filter untuk menghapus nilai *Displacement* yang melebihi *maxdef* atau lebih kecil dari *mindef* yang sudah ditetapkan.

Dengan menggunakan salah satu grid dari perhitungan *Displacement* pada periode pertama (2020–2021), yang memiliki nilai koordinat seperti **gambar 3.10** berikut:



**Gambar 3.10 Titik Koordinat pada grid referensi dan deformasi**

Nilai dapat koordinat dapat ditulis dengan **tabel 3.4** berikut:

**Tabel 3.4 Data yang Digunakan**

No	Parameter	jumlah
1	$x'$	100
2	$y'$	143
3	$x_0$	112
4	$y_0$	151

Dengan mendapatkan nilai titik koordinat dari grid referensi dan deformasi maka dapat dihitung arah *Displacement* menggunakan persamaan (3.6) dan (3.7) sebagai berikut:

$$\Delta x = x' - x_0$$

$$\Delta x = 100 - 112 = -12$$

$$\Delta y = y' - y_0$$

$$\Delta y = 143 - 151 = -8$$

Yang menghasilkan arah *Displacement* horizontal adalah -12 dan *Displacement* vertikal -8 dengan satuan meter. Nilai-nilai *Displacement* ini digunakan untuk pemrosesan *Strain* dan plotting arah vektor deformasi.

### 3.4.5 Perhitungan *Strain*

Perhitungan *Strain* dilakukan untuk menganalisis perubahan bentuk dan deformasi kubah Gunung Merapi berdasarkan *Displacement* yang telah dihitung sebelumnya. *Strain* mengukur perubahan relatif suatu panjang atau bentuk terhadap ukuran awalnya, sehingga dapat memberikan informasi mengenai pola regangan yang terjadi akibat pergerakan magma atau tekanan internal gunung.

*Strain* dihitung berdasarkan perubahan *Displacement* antara titik-titik dalam *grid* DEM. Komponen *Strain* utama yang dianalisis adalah *Strain* normal, yang masing-masing dihitung dengan persamaan:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \dots \dots \dots (3.8)$$

Keterangan:

$\varepsilon_x$  = *Strain* dalam arah x, yang menunjukkan tingkat perubahan dalam arah horizontal.

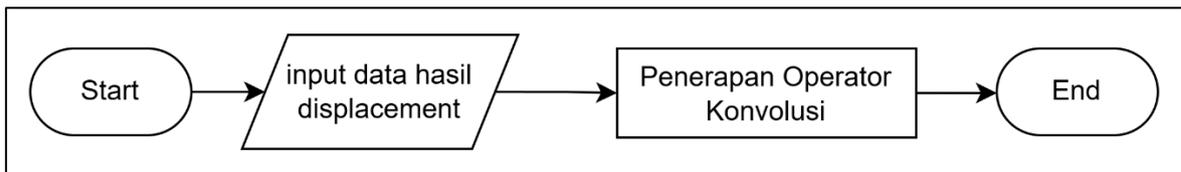
$\varepsilon_y$  = *Strain* dalam arah y, yang menunjukkan tingkat perubahan dalam arah vertikal.

$u$  = *Displacement* pada arah x (horizontal).

$v$  = *Displacement* pada arah y (vertikal).

$\partial x$  = jarak antar grid arah x

$\partial y$  = jarak antar grid arah y



**Gambar 3.11 Perhitungan *Strain***

Berdasarkan **gambar 3.11**, data hasil dari perhitungan *Displacement* diambil dan digunakan untuk menghitung *Strain* menggunakan penerapan operator konvolusi yang menghitung turunan numerik seperti persamaan (3.8).

Dengan menggunakan hasil dari *Displacement X* dan *Displacement Y* yang didapatkan sebelumnya maka dapat dicari nilai dari *Strain X* dan *Strain Y*. Pertama dengan mencari nilai dari denominator dari nilai X dan Y dengan menggunakan parameter yang memiliki nilai masing-masing seperti berikut:

$$\text{Denominator}_x = 2(2 \times d + \text{temp\_dim}) \times \text{dim\_pixel}$$

$$\text{Denominator}_y = 2(2 \times b + \text{temp\_dim}) \times \text{dim\_pixel}$$

$$\text{Denominator}_x = (2 \times 16 \times 65) \times 2$$

$$\text{Denominator}_y = (2 \times 16 \times 65) \times 2$$

$$\text{Denominator}_x = 388$$

$$\text{Denominator}_y = 388$$

Dengan menggunakan nilai *operate* untuk konvolusi yang memiliki nilai  $[-1 \ 0 \ 1]$  dapat dihitung nilai konvolusi seperti berikut:

$$\text{Hasil konvolusi } dx = 12 - (-12) = 24$$

$$\text{Hasil konvolusi } dy = 8 - (-8) = 16$$

Nilai dari *denominator* dan kovolusi dapat digunakan untuk mencari nilai *Strain* menggunakan persamaan 3.8 sebagai berikut:

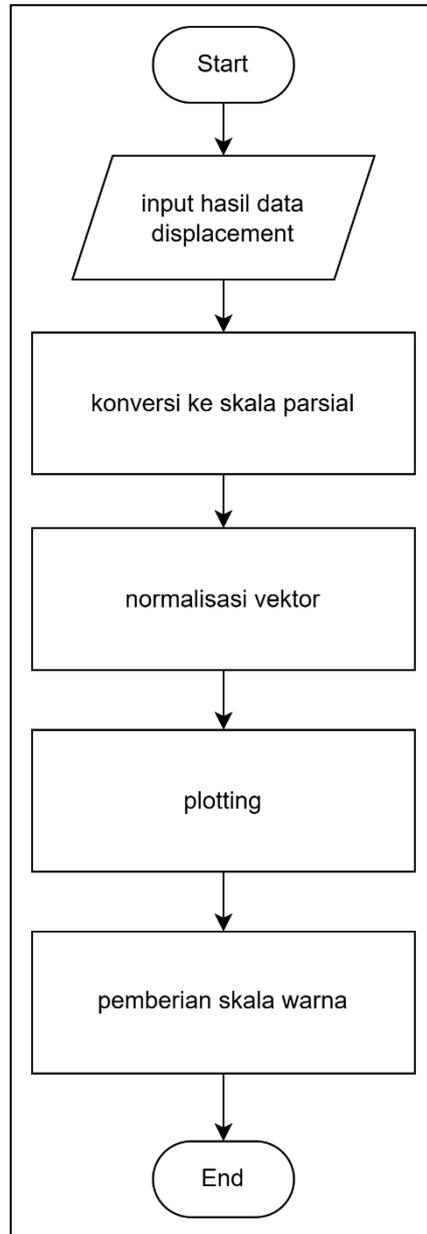
$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = 0.03125$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = 0.0265625$$

Dari perhitungan tersebut didapatkan hasil dari *Strain* sebesar 0.03125 atau 3.1% dan 0.0265625 atau 2.6% yang dapat dikonversikan ke *mikroStrain* ( $\mu\varepsilon$ ) yang dikalikan  $10^6$  menjadi 31,250  $\mu\varepsilon$  yaitu *Strain X* dan 26,562.5  $\mu\varepsilon$  yaitu *Strain Y*.

### 3.4.6 Plotting Vektor Deformasi

Plotting vektor deformasi merupakan tahap akhir dalam analisis deformasi menggunakan metode DIC. Pada tahap ini, hasil *Displacement* yang telah dihitung sebelumnya divisualisasikan dalam bentuk vektor untuk menunjukkan arah dan besar perpindahan yang terjadi pada permukaan kubah Gunung Merapi. Alur pada **gambar 3.12** menjelaskan proses dari plotting vektor deformasi seperti berikut:



**Gambar 3.12 Plotting Vektor Deformasi**

Pada **gambar 3.12** menjelaskan bagaimana proses plotting vektor deformasi, dimulai dengan menggunakan hasil dari perhitungan *Displacement*, lalu nilai *Displacement* diubah dari piksel menjadi satuan panjang. Setelah mendapatkan nilai-nilai vektornya, maka ukuran vektor akan dinormalisasi agar panjang vektornya sama, setelah itu diplotting arah vektor berdasarkan nilai *Displacement* dan memberikan warna untuk memperjelas pergerakan masing-masing vektor.

Dengan menggunakan hasil dari *Displacement* yang sudah didapatkan, hasil tersebut digunakan untuk plotting vektor deformasi dengan mencari nilai total perpindahan seperti perhitungan berikut:

$$|d| = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}$$

$$|d| = \sqrt{(-12)^2 + (-8)^2}$$

$$|d| = 14.42 \text{ m}$$

Dari perhitungan tersebut total perpindahan didapatkan 14.42 m dari hasil *Displacement* grid (0,0). Selanjutnya mencari arah perpindahan dalam sistem koordinat geografis yang dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta x}{\Delta y}\right)$$

$$\theta = 56.31^\circ$$

$$360^\circ - 56.31^\circ = 303.03^\circ$$

Dengan hasil 303.03° menunjukkan bahwa pergerakan kubah gunung merapi menuju barat laut. Terakhir setelah mendapatkan semua nilai tersebut, dapat dicari kecepatan perpindahan berdasarkan waktu dari waktu periode dari data yang digunakan (2020-2021) yang memiliki total 500 hari, dapat dicari dengan persamaan berikut:

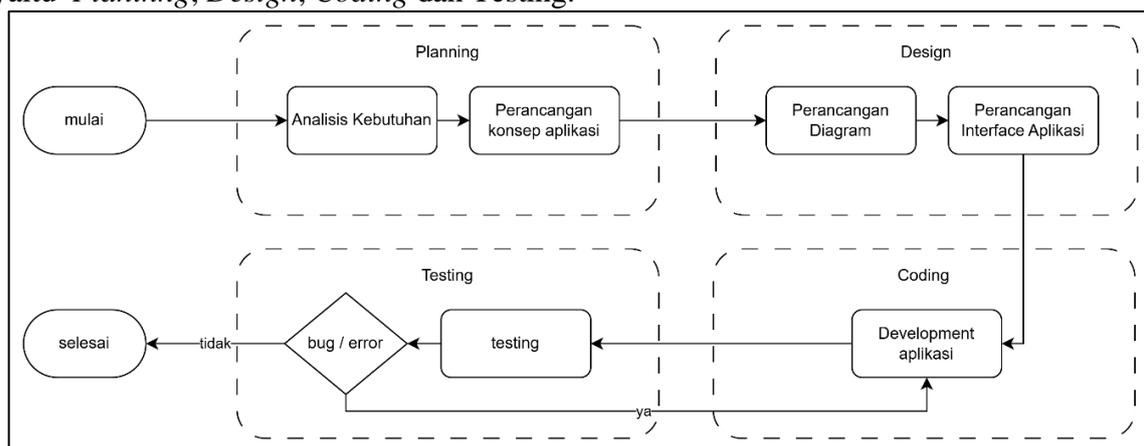
$$v = \frac{|d|}{\text{total hari}}$$

$$v = \frac{14.42}{500} = 0.0288 \text{ m/hari}$$

Dengan mendapatkan semua hasil tersebut, didapatkan bahwa dari nilai perhitungan *Displacement*  $\Delta x$  dan  $\Delta y$  yang memiliki nilai (-12, -8) mendapatkan nilai total perpindahan sebesar 14.42 m dan arah perpindahan 303.03° yaitu menuju arah barat laut. Terakhir didapatkan nilai kecepatan perpindahan ( $v$ ) sebesar 0.0288 m/hari.

### 3.5 Pengembangan Sistem

Metode pengembangan sistem yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan metode *Extreme Programming* (XP) yang memiliki 4 tahapan seperti pada **Gambar 3.13**, yaitu *Planingng*, *Design*, *Coding* dan *Testing*.



**Gambar 3.13 Tahapan Extreme Programming**

### 3.5.1 Planning

Pada tahap *Planinng* dilakukan analisis kebutuhan dan perancangan konsep aplikasi. Analisis kebutuhan dibagi menjadi 2 analisis, yaitu kebutuhan fungsional dan kebutuhan non-fungsional.

a. Kebutuhan Fungsional

Kebutuhan ini berkaitan dengan fungsi atau fitur spesifik yang harus dimiliki oleh sistem agar dapat beroperasi dengan baik dan memenuhi tujuan yang diinginkan. Berikut merupakan kebutuhan fungsional untuk sistem yang akan dibangun pada penelitian ini :

1. Sistem dapat menerima inputan gambar dengan tipe TIF.
2. Sistem dapat menampilkan hasil *Displacement*, *Strain*, dan plotting arah vektor dari *Displacement*.

b. Kebutuhan Non-Fungsional

Kebutuhan ini berkaitan dengan persyaratan yang berfokus pada karakteristik perilaku sistem yang perlu dipenuhi untuk implementasi. Kebutuhan non-fungsional ini terbagi menjadi 2 yaitu Perangkat keras (Hardware) dan perangkat lunak (Software). Kebutuhan perangkat keras mencakup spesifikasi atau persyaratan minimum yang harus dipenuhi oleh perangkat keras yang digunakan, sedangkan kebutuhan perangkat lunak mencakup persyaratan untuk perangkat lunak yang mendukung sistem. Berikut merupakan analisis kebutuhan non-fungsional pada penelitian ini:

1. Perangkat Keras (Hardware)

Penelitian ini menggunakan spesifikasi perangkat keras(hardware) dengan spesifikasi seperti pada **Tabel 3.5**

**Tabel 3.5 Spesifikasi perangkat keras (*hardware*)**

No	Perangkat Keras	Keterangan
1	Processor	AMD Ryzen 4600
2	Ram	8GB
3	Storage	512 GB SSD
4	Grapichs Card	NVIDIA GeForce GTX 1650
5	Monitor	15,6 Inch Full HD

2. Perangkat Lunak (Software)

Penelitian ini menggunakan spesifikasi perangkat lunak (software) dengan spesifikasi seperti pada **Tabel 3.6**

**Tabel 3.6 Spesifikasi perangkat lunak (*software*)**

No	Perangkat Lunak	Keterangan
1	Windows 10 64bit	Sistem Operasi
2	Draw.io	<i>Design flowchart</i>
3	Figma	<i>Design interface</i>
4	Visual studio code	<i>Code editor</i>
5	Python	Bahasa Pemrograman
6	Miniconda	<i>Package Library</i>
7	Py2DIC	<i>Package modified by BPPTKG</i>

### 3.5.2 Design

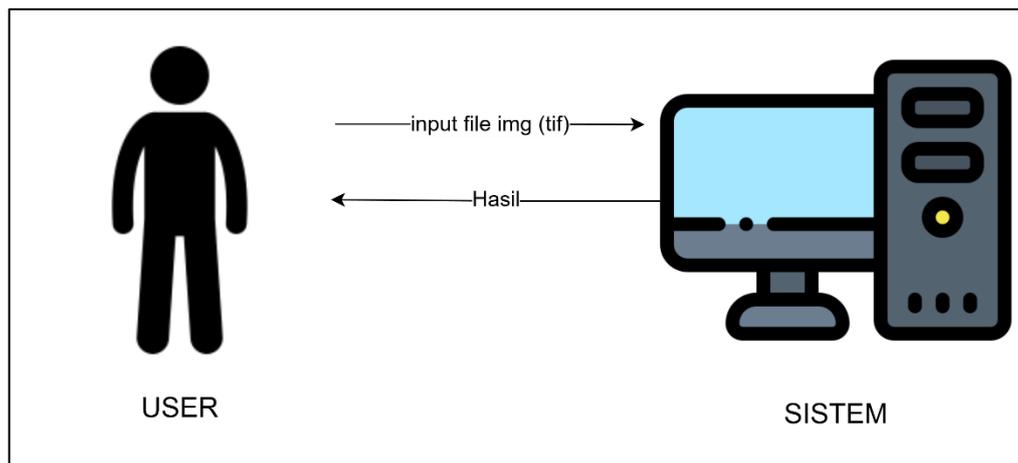
Pada tahap *Design* diperlukan rancangan alur agar *Design* yang dibuat sesuai dengan kebutuhan sistem. Tahapan *Design* dalam penelitian ini terdiri dari dua tahapan yaitu perancangan diagram dan perancangan *interface*. Perancangan diagram berfokus pada penyusunan skema dan alur kerja sistem, sedangkan perancangan antarmuka berkaitan dengan pembuatan tampilan dan interaksi pengguna dengan sistem. Kedua langkah ini memastikan bahwa *Design* akhir dapat memenuhi spesifikasi yang ditetapkan dan mendukung fungsi sistem secara efektif.

#### a. Perancangan Diagram

Perancangan diagram mencakup pembuatan diagram arsitektur sistem, use case, activity diagram, dan class diagram. Diagram-diagram ini berfungsi untuk merancang alur data dan informasi dalam sistem serta menggambarkan bagaimana berbagai komponen saling berinteraksi. Dengan menyusun diagram ini dapat divisualisasi struktur sistem secara menyeluruh, memastikan bahwa setiap fungsi atau fitur dapat berfungsi dengan tugasnya.

##### 1. Perancangan Arsitektur Sistem

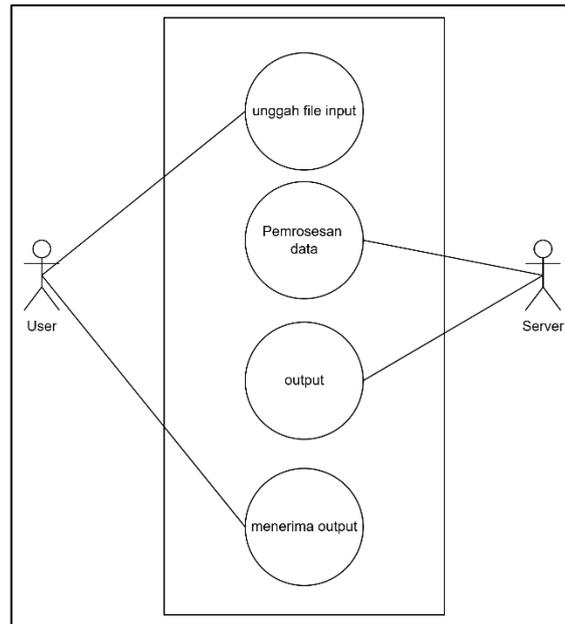
Arsitektur sistem dirancang untuk memberikan gambaran menyeluruh terhadap bagaimana sistem berjalan seperti proses input data, proses yang dilakukan oleh sistem serta output data yang dihasilkan. *Design* ini membantu dalam memahami struktur keseluruhan sistem. **Gambar 3.14** merupakan arsitektur sistem yang digunakan.



**Gambar 3.14** Arsitektur sistem diagram

##### 2. Use Case Diagram

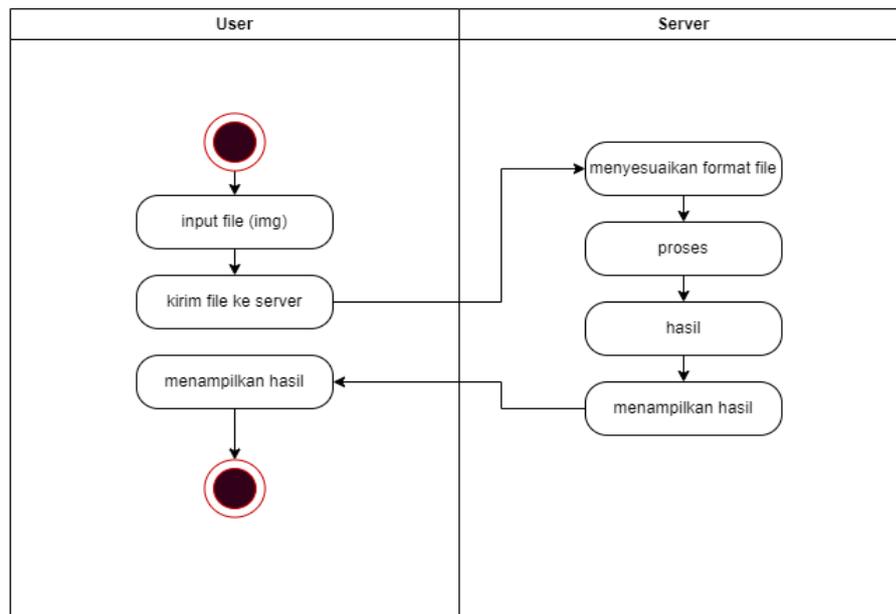
Desain ini membantu pengguna dan pengembang dalam memahami struktur serta bagaimana sistem berfungsi secara keseluruhan. Diagram tersebut berfungsi sebagai panduan visual yang menjelaskan proses dari input, pengolahan, hingga output yang dihasilkan oleh sistem.



**Gambar 3.15 Use Case Diagram**

### 3. Activity Diagram

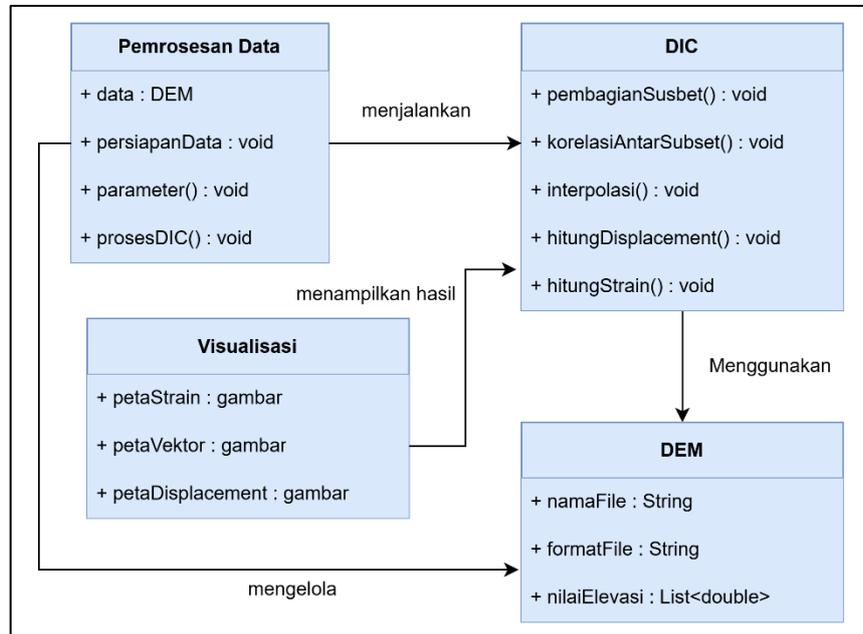
Activity diagram merupakan gambaran aliran aktivitas atau alur kerja dalam sistem yang dijalankan. Diagram ini digunakan untuk mendefinisikan dan mengelompokkan urutan tampilan atau proses dalam sistem. Activity Diagram terdiri dari komponen-komponen berbentuk tertentu yang saling terhubung dengan tanda panah. Tanda panah ini menunjukkan urutan aktivitas yang terjadi dari awal hingga akhir, memberikan visualisasi jelas tentang bagaimana proses berlangsung dalam sistem. Gambar 3.16 merupakan alur dari activity diagram yang digunakan.



**Gambar 3.16 Activity diagram**

#### 4. Class Diagram

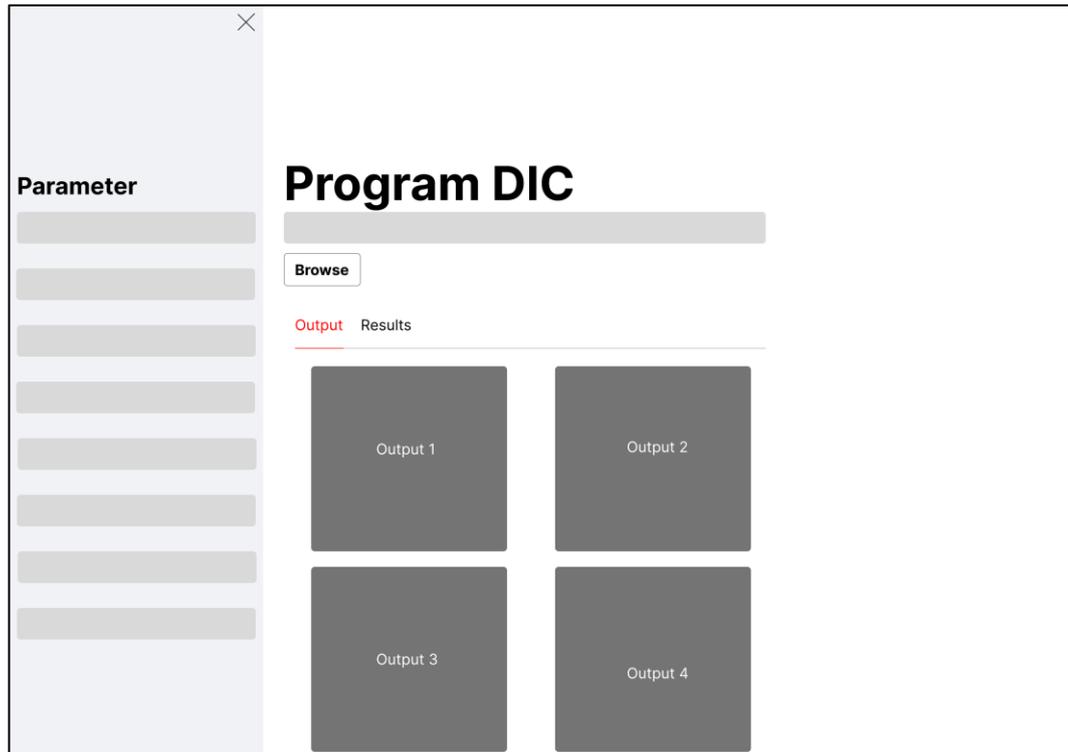
*Class* diagram atau diagram kelas adalah jenis diagram struktur yang menggambarkan dengan jelas struktur serta deskripsi class, atribut, metode, dan hubungan dari setiap objek. Ia bersifat statis, dalam artian diagram kelas bukan menjelaskan apa yang terjadi jika kelas-kelasnya berhubungan, melainkan menjelaskan hubungan apa yang terjadi. **Gambar 3.17** merupakan alur dari *class* diagram ini.



**Gambar 3.17 Class Diagram**

#### b. Perancangan Interface

Perancangan antarmuka (*UI Design*) berfokus pada pengembangan antarmuka yang mudah dan menarik secara visual bagi pengguna. Proses ini melibatkan pembuatan *Design* tata letak, elemen grafis, navigasi, dan interaksi pengguna, dengan tujuan untuk memaksimalkan pengalaman pengguna (user experience/UX). Pada **Gambar 3.18** terdapat box pemilihan proses yang nantinya akan isinya input file dan tabel data, visualisasi DEM, nilai deformasi (perpindahan). Pada box Input File berfungsi untuk mencari lokasi file yang akan di deteksi. Box Hasil deteksi berfungsi untuk menampilkan hasil deteksi dari file inputan.



**Gambar 3.18 Rancangan Interface**

### **3.5.3 Coding**

Tahap *Coding* adalah proses di mana *Design* yang telah dirancang sebelumnya diubah menjadi kode program yang dapat dijalankan. Pada tahap ini, kode ditulis berdasarkan kebutuhan fungsional yang telah ditetapkan untuk memastikan bahwa semua fungsi dan fitur sistem bekerja sesuai dengan yang diharapkan. Selama *Coding*, peneliti akan mengikuti spesifikasi yang telah dibuat dengan teliti untuk mencapai hasil yang sesuai dengan *Design* dan tujuan proyek. Proses ini mencakup penerjemahan semua elemen dari *Design* teknis ke dalam sintaks kode yang dapat dieksekusi oleh perangkat lunak.

### **3.5.4 Testing**

Tahap testing merupakan tahap akhir Pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa aplikasi berfungsi sesuai dengan spesifikasi yang telah ditetapkan dan untuk mendeteksi adanya bug atau kesalahan yang mungkin masih ada. Dalam penelitian ini, tahap testing menggunakan metode black box testing. Metode ini dipilih karena fokus utamanya adalah pada pengujian fungsionalitas aplikasi tanpa memerlukan pemahaman tentang kode internal atau struktur sistem. Proses pengujian dilakukan dengan memeriksa input yang diberikan ke aplikasi dan output yang dihasilkan untuk memastikan bahwa aplikasi beroperasi sesuai dengan spesifikasi yang dirancang. **Tabel 3.7** Merupakan skenario pengujian sistem yang dilakukan.

**Tabel 3.7 Skenario test**

<b>No</b>	<b>Test Case</b>	<b>Hasil yang diharapkan</b>	<b>Hasil</b>
1	Pengguna dapat mengakses perangkat lunak	Pengguna berhasil mengakses perangkat lunak	
2	Pengguna dapat menginput file gambar berformat TIF	Pengguna berhasil menginputkan file	
3	Sistem dapat menampilkan hasil deteksi dari file input	Sistem berhasil menampilkan hasil deteksi dari input file	

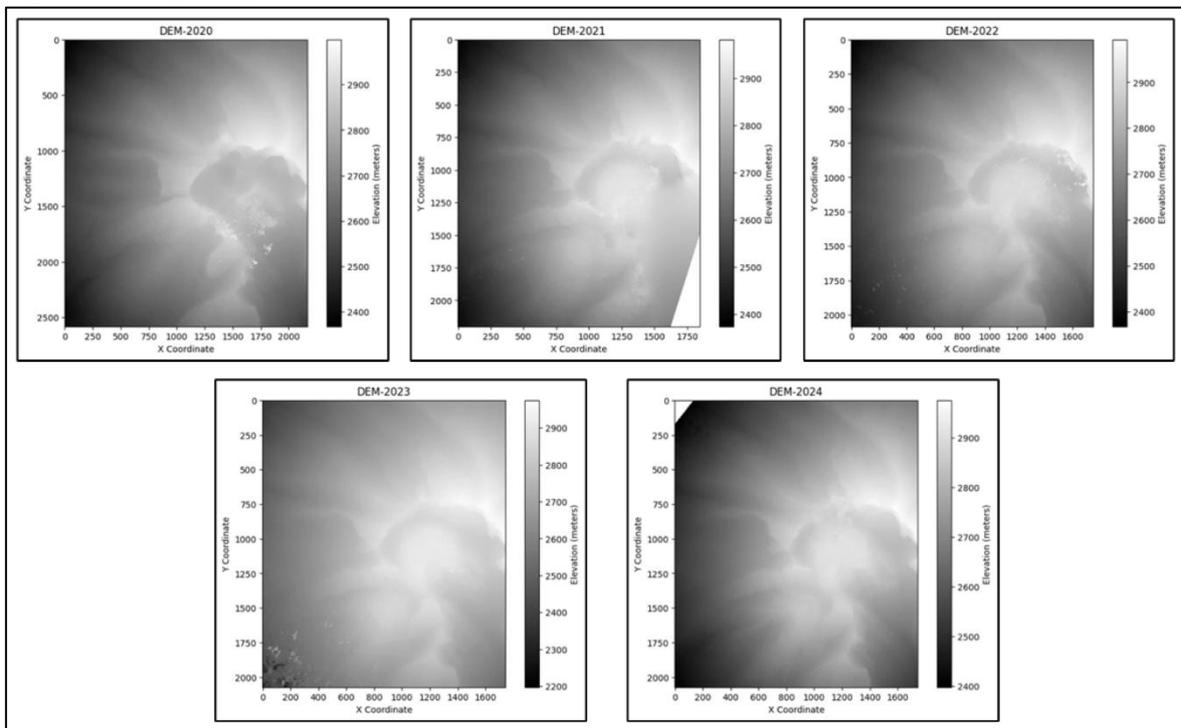
## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Hasil

Pada bagian ini akan memberikan penjelasan dan pemaparan terkait hasil dari implementasi sistem kejadian geofisika yang sudah dirancang menggunakan data *Digital Elevation Model* dan metode *Digital Image Correlation*. Penjelasan hasil dari implementasi ini akan dibagi menjadi implementasi pengumpulan data dan pemrosesan data. Sistem yang dibangun dalam penelitian ini menggunakan Python dalam *Visual Studio Code*, *Google Colabs*, dan *miniconda*.

#### 4.1.1 Pengumpulan Data

Data yang digunakan pada penelitian ini merupakan data DEM dengan format TIF yaitu *Tagged Image Format* yang diperoleh dari Balai Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kebencanaan Geologi (BPPTKG) yang berjumlah total 5 data. Data DEM yang digunakan adalah data yang menyimpan informasi nilai elevasi dari kubah gunung merapi yang diawasi oleh BPPTKG pada tahun 2020 hingga 2024. Berikut adalah data DEM yang digunakan seperti **gambar 4.1**



**Gambar 4.1** Data DEM yang digunakan

Sumber : BPPTKG Yogyakarta

#### 4.1.2 Penetapan Parameter Analisis

Tahap ini merupakan langkah krusial yang dilakukan sebelum analisis menggunakan metode *Digital Image Correlation*. Parameter-parameter yang digunakan dalam analisis telah ditentukan berdasarkan kebutuhan deteksi pergeseran deformasi kubah Gunung Merapi. Setiap parameter diberikan nilai awal yang optimal untuk menjaga keseimbangan antara akurasi dan efisiensi pemrosesan.

Salah satu parameter utama adalah Pixel Dimension, yang ditetapkan sebesar 2 meter per piksel untuk memastikan keseimbangan antara representasi spasial dan efisiensi pemrosesan. Resolusi citra dipertahankan pada 1 meter, sehingga mampu menangkap detail penting dalam analisis DIC tanpa membebani sistem komputasi. Parameter Camera Acquisition Time diatur pada 24 jam, memastikan bahwa perubahan harian yang signifikan dapat terdeteksi tanpa menghasilkan data berlebihan.

Selain itu, Template Width ditetapkan pada 64 piksel, dengan Edge X dan Edge Y masing-masing sebesar 16 piksel, memberikan ruang pencarian yang cukup untuk mendeteksi pergeseran tanpa meningkatkan risiko kesalahan.

Persentase tumpang tindih antar-template (Overlap %) ditetapkan pada 75%, yang membantu memastikan transisi halus antar-template dan mengurangi kehilangan informasi di area batas. Untuk menjaga keakuratan pencocokan, nilai Min Correlation diatur pada 0.4, sehingga hanya hasil dengan tingkat kecocokan yang cukup kuat akan diterima. Batas maksimum deformasi (Max Def) ditetapkan pada 1000 meter per hari, cukup tinggi untuk mencakup kemungkinan deformasi besar tanpa memasukkan kesalahan ekstrem. Parameter Min Def, Max Colbar, dan Min Colbar dipertahankan pada 0.0, memberikan fleksibilitas dalam analisis tanpa batasan tambahan pada skala deformasi atau pewarnaan.

Dengan penyesuaian parameter ini, sistem dapat memberikan hasil yang akurat dan sesuai untuk analisis deformasi kubah Gunung Merapi. Nilai-nilai parameter ini memastikan bahwa metode DIC dapat bekerja secara optimal dengan mempertahankan keseimbangan antara ketelitian dan efisiensi pemrosesan. Penetapan parameter analisis dapat digambarkan dengan **Pseudocode 4.1** dibawah.

---



---

**Pseudo Code 4.1 : Parameter Analisis**

---



---

```

1 BEGIN
2 // Step 1: Inisialisasi Parameter
3 pixel_dimension ← 2 // dalam meter
4 resolution ← 1 // dalam meter
5 camera_acquisition_time ← 24 // dalam jam
6 template_width ← 64 // dalam piksel
7 edge_x ← 16 // dalam piksel
8 edge_y ← 16 // dalam piksel
9 overlap ← 0.75 // dalam persen
10 min_correlation ← 0.4
11 max_def ← 1000.0 // dalam meter per hari
12 min_def ← 0.0
13 max_colbar ← 0.0
14 min_colbar ← 0.0
15
16 // Step 2: Pastikan Parameter Valid
17 IF min_correlation < 0 OR min_correlation > 1 THEN
18 Display "Min Correlation harus dalam rentang 0 - 1."
19 STOP
20 ENDIF
21
22 IF max_def <= 0 THEN
23 Display "Max Def harus lebih besar dari 0."
24 STOP
25 ENDIF
26
27 // Step 3: Simpan dan Terapkan Parameter
28 Apply parameters TO DIC_analysis
29 END

```

---

### 4.1.3 Preprocessing

Pada tahap *preprocessing*, dilakukan penyesuaian resolusi dan dimensi data *Digital Elevation Model* untuk memastikan keseragaman dalam analisis *Displacement* dan *Strain*. Proses ini penting karena setiap DEM yang digunakan memiliki resolusi spasial yang berbeda, sehingga perlu dilakukan *resampling* agar resolusinya seragam. Dalam penelitian ini, *resampling* dilakukan menggunakan metode *bilinear interpolation* dengan resolusi akhir ditetapkan sebesar 1 meter/piksel. Selain itu, data yang telah di-*resample* dikonversi ke format *float32* untuk menjaga presisi numerik dalam analisis selanjutnya.

**Pseudo Code 4.2 : Preprocessing**

```

1 BEGIN
2 // Step 1: Inisialisasi Parameter
3 input_files ← ["dem1.TIF", "dem2.TIF"]
4 target_resolution ← 1 // dalam meter per piksel
5 resampling_method ← "bilinear"
6 output_datatype ← "float32"
7
8 // Step 2: Proses Resampling
9 FOR each file IN input_files DO
10 dem ← read(file)
11 original_resolution ← get_resolution(dem)
12 original_dimensions ← get_dimensions(dem)
13 resampled_dem ← resample(dem, target_resolution,
    resampling_method)
14 converted_dem ← convert_dtype(resampled_dem, output_datatype)
15 new_dimensions ← get_dimensions(resampled_dem)
16 save(resampled_dem)
17 ENDFOR
18 END

```

Pada **Pseudo Code 4.2** ada 2 proses utama inisialisasi parameter dan proses *resampling*, pada proses pertama daftar file DEM yang akan diproses dimasukkan ke dalam variabel *input\_files*, dengan parameter target resolusi, metode *resampling* yaitu *bilinear interpolation*, dan tipe data output (*float32*). Selanjutnya proses kedua Setiap DEM dibaca, resolusinya diperiksa, lalu dilakukan *resampling* menggunakan metode *bilinear interpolation* agar semua DEM memiliki resolusi 1 meter per piksel. Setelah itu, data dikonversi ke format *float32* untuk memastikan nilai ketinggian memiliki presisi tinggi dalam perhitungan *Displacement* dan *Strain*.

Tabel berikut menunjukkan dimensi dan resolusi dari masing-masing DEM sebelum dan sesudah proses *resampling*:

**Tabel 4.1 Hasil dari Preprocessing**

DATA DEM	Dimensi Sebelum (X, Y)	Resolusi Sebelum (m/piksel)	Dimensi Sesudah (X, Y)	Resolusi Sesudah (m/piksel)
2020-07-26	2166 x 2583	(0.4037, 0.4037)	1043 x 874	1
2021-12-08	1846 x 2202	(0.4736, 0.4736)	1043 x 874	1
2022-08-08	1749 x 2085	(0.5, 0.5)	1043 x 875	1
2023-08-10	1744 x 2073	(0.5, 0.5)	1037 x 872	1
2024-03-30	1744 x 2073	(0.5, 0.5)	1037 x 872	1

Dari tabel tersebut, terlihat bahwa sebelum *resampling*, resolusi DEM bervariasi antara 0.4037 hingga 0.5 meter/piksel. Perbedaan ini dapat menyebabkan

ketidakkonsistenan dalam analisis, karena skala antar DEM tidak sama. Oleh karena itu, dilakukan resampling agar semua DEM memiliki resolusi 1 meter/piksel, memastikan bahwa perhitungan *Displacement* dapat dilakukan secara akurat tanpa bias akibat perbedaan skala spasial.

Selain resolusi, dimensi citra juga berubah setelah *resampling*. Hal ini terjadi karena perubahan resolusi menyebabkan perubahan jumlah piksel dalam DEM. Namun, perubahan ini tidak mempengaruhi akurasi data karena setiap piksel tetap merepresentasikan area yang sama dalam satuan meter setelah *resampling*.

Langkah terakhir dalam *preprocessing* adalah konversi ke format *float32*. Data ketinggian dalam DEM perlu dikonversi ke tipe *float32* karena format ini memungkinkan representasi angka desimal dengan akurasi tinggi tanpa meningkatkan penggunaan memori secara signifikan. Konversi ini memastikan bahwa nilai elevasi dapat dihitung dengan presisi yang lebih baik, terutama dalam proses perhitungan *Displacement* dan *Strain*.

Dengan *preprocessing* ini, data DEM telah disiapkan dalam format yang seragam dan siap digunakan dalam proses *template matching* untuk perhitungan *Displacement* pada tahap selanjutnya.

#### 4.1.4 Pembagian Grid

Pembagian grid dilakukan untuk membagi data DEM menjadi bagian-bagian kecil yang berukuran seragam. Grid ini digunakan sebagai referensi dalam analisis pergeseran deformasi menggunakan metode *Digital Image Correlation*. Setiap grid akan menjadi area tempat perhitungan *Displacement* dilakukan, sehingga proses *template matching* dapat diterapkan secara sistematis. Data DEM yang sudah di *preprocessing* dari tabel 4.1 dapat digunakan untuk pembagian grid.

---



---

#### Pseudo Code 4.3 : Pembagian Grid

---



---

```

1 BEGIN
2 // Step 1: baca data DEM hasil preprocessing
3 dem1 ← read_dem(dem1_file, resolution)
4 dem2 ← read_dem(dem2_file, resolution)
5
6 // Step 2: mengambil dimensi dem1
7 Dim_y ← jumlah_baris(dem1)
8 Dim_x ← jumlah_kolom(dem1)
9
10 // Step 3: menghitung ukuran overlap
11 olap_x ← (1 - olap) * (temp_dim + 2 * d)
12 olap_y ← (1 - olap) * (temp_dim + 2 * b)
13
14 // Step 3: menghitung jumlah baris dan kolom
15 h ← (Dim_y - (temp_dim + 2 * d)) / olap_y
16 w ← (Dim_x - (temp_dim + 2 * b)) / olap_x
17
18 // Step 4: simpan hasil kolom dan baris
19 Save h and w
20 END

```

---

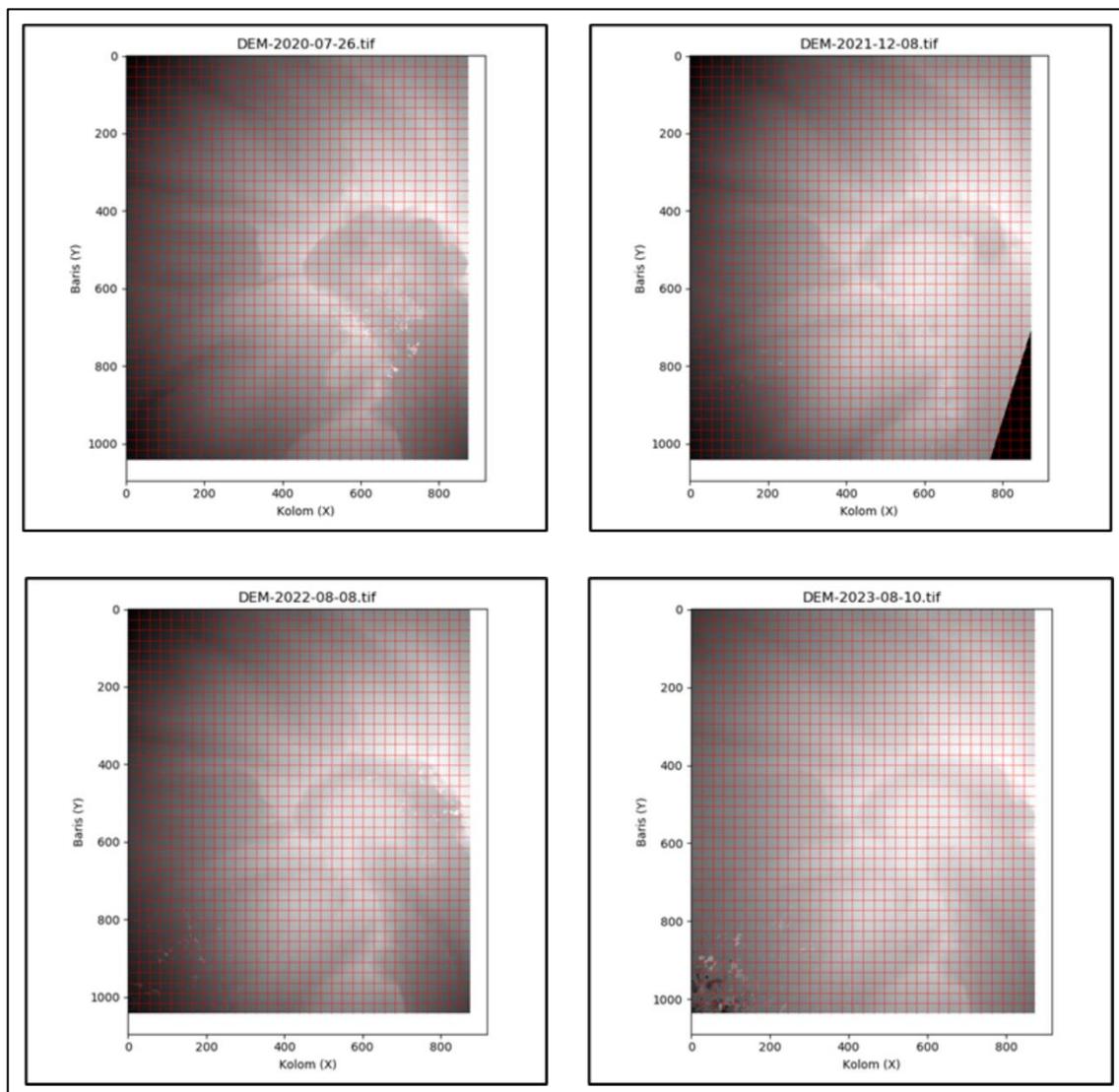
Dari **Pseudo Code 4.3** diatas terdapat proses dalam pembagian grid dari data DEM. Dimulai dengan membaca data DEM hasil dari *preprocessing*, setelah data dibaca, dimensi baris dan kolom dari data DEM pertama diambil yang akan digunakan untuk mencari total grid baris dan kolom. Dari hasil **tabel 4.2** dapat dilihat bahwa dimensi dari semua data DEM

yang menjadi data DEM pertama dalam 4 rentang waktu adalah 2020 – 2023 memiliki nilai yang hampir sama, berikut **tabel 4.2**:

**Tabel 4.2 Ukuran Dimensi Data DEM**

No	Data DEM	Dimensi
1	2020-07-26	1043 x 874
2	2021-12-08	1043 x 874
3	2022-08-08	1043 x 875
4	2023-08-10	1037 x 872

Dengan ukuran dimensi yang sudah didapatkan, dapat digunakan untuk mencari nilai  $h$  dan  $w$  grid atau jumlah baris dan kolom dari grid setiap dataset. Dari hasil perhitungan pembagian grid, semua data mendapatkan total 39 grid baris dan 32 grid kolom dengan total sel gridnya 1.248. Jumlah grid tersebut digunakan juga untuk data DEM kedua atau data deformasinya, sehingga jumlah gridnya akan sama yang akan digunakan dalam proses *template matching*. **Gambar 4.2** merupakan visualisasi dari pembagian grid dengan data pertama dari 2020-2021, 2021-2022, 2022-2023, 2023-2024.



**Gambar 4.2 Visualisasi dari pembagian Grid**

#### 4.1.5 *Template matching*

*Template matching* adalah metode pencocokan citra yang digunakan untuk mendeteksi pergeseran antar dua citra DEM pada periode yang berbeda. Dalam penelitian ini, *template matching* digunakan untuk membandingkan grid dari DEM pertama dengan DEM kedua untuk menemukan lokasi pergeseran terbaik. Proses ini dilakukan dengan menggunakan metode *cv2.TM\_CCOEFF\_NORMED*, yang mengukur tingkat kesamaan antara *template* dan area pencocokan. Metode ini dapat mengidentifikasi perubahan morfologi yang terjadi pada permukaan kubah Gunung Merapi secara lebih akurat.

Setiap grid dari DEM pertama dibandingkan dengan area pencocokan dalam DEM kedua, dan nilai korelasi dihitung untuk menentukan tingkat kecocokan. Jika nilai korelasi lebih tinggi dari ambang batas (0.4), maka pencocokan dianggap valid, sedangkan jika nilai korelasi lebih rendah, maka hasil pencocokan dianggap buruk. Nilai korelasi ini sangat penting karena menentukan sejauh mana keakuratan *template matching* dalam mendeteksi pergeseran permukaan. Proses ini dilakukan pada setiap grid yang telah ditentukan sebelumnya sehingga dapat memberikan hasil yang lebih detail pada berbagai area studi.

---

---

#### Pseudo Code 4.4 : *Template matching*

---

---

```
1 1 BEGIN
2 2 // Step 1: Baca data DEM hasil pembagian grid
3 3 dem1 ← read_dem(dem1_file, resolution)
4 4 dem2 ← read_dem(dem2_file, resolution)
5 5
6 6 // Step 2: Iterasi melalui setiap grid
7 7 FOR i ← 0 TO h - 1 DO
8 8     FOR j ← 0 TO w - 1 DO
9 9
10 10 // Step 3: Ambil template dari DEM pertama dan area
11 11 // pencarian dari DEM kedua
12 11 template ← extract_subset(dem1, i, j, temp_dim)
13 12 search_area ← extract_subset(dem2, i, j, temp_dim)
14 13
15 14 // Step 4: Ubah ukuran dengan interpolasi bicubic
16 15 template ← resize(template, scale_x=mlx, scale_y=mly,
17 16 method=BICUBIC)
18 16 search_area ← resize(search_area, scale_x=mlx,
19 17 scale_y=mly, method=BICUBIC)
20 17
21 18 // Step 5: Hitung korelasi dengan metode
22 18 TM_CCOEFF_NORMED
23 19 px, py, max_val ← template_match(template,
24 20 search_area)
25 20
26 21 // Step 6: Konversi koordinat kembali ke skala asli
27 22 px ← px / mlx
28 23 py ← py / mly
29 24
30 25 // Step 7: Simpan hasil korelasi dan posisi terbaik
31 26 Save(i, j, px, py, max_val)
32 28 ENDFOR
33 29 ENDFOR
34 30 END
```

---

**Pseudo code 4.4** di atas menjelaskan langkah-langkah dalam melakukan *template matching* pada data DEM untuk mendeteksi pergeseran antar periode. Langkah pertama dimulai dengan membaca data DEM hasil *preprocessing* sebagai input utama dalam proses pencocokan. Data ini kemudian digunakan dalam iterasi untuk setiap grid yang telah dibagi

sebelumnya. Pada setiap iterasi, subset dari DEM pertama diambil sebagai *template*, sementara area pencocokan dari DEM kedua diidentifikasi sebagai referensi untuk menemukan kecocokan terbaik.

Setelah *template* dan area pencocokan diekstrak, perhitungan korelasi dilakukan menggunakan metode *cv2.TM\_CCOEFF\_NORMED*. Metode ini akan menghasilkan nilai korelasi yang menunjukkan seberapa baik *template* sesuai dengan area pencocokan di DEM kedua. Jika nilai korelasi tinggi, maka pencocokan dianggap valid, sedangkan jika nilai korelasi rendah, maka pencocokan tidak dapat digunakan untuk analisis lebih lanjut. Proses ini dilakukan secara sistematis pada seluruh grid yang tersedia, sehingga setiap perubahan morfologi yang terjadi pada permukaan kubah Gunung Merapi dapat terdeteksi secara rinci.

Setelah perhitungan korelasi selesai, hasil pencocokan yang mencakup koordinat terbaik dan nilai korelasi akan disimpan untuk dianalisis lebih lanjut. Data ini menjadi dasar dalam tahap berikutnya, yaitu perhitungan *Displacement* dan analisis *Strain* guna memahami dinamika deformasi yang terjadi di area studi. Dengan cara ini, *template matching* memungkinkan deteksi perubahan yang akurat dan dapat diandalkan sebagai bagian dari analisis deformasi berbasis citra DEM.

Hasil *template matching* dikategorikan menjadi tiga kelompok berdasarkan nilai korelasi:

1. **Sempurna (1.0)** → *Template* sangat cocok dengan area yang ditemukan, menunjukkan bahwa tidak ada pergeseran atau deformasi yang signifikan.
2. **Baik ( $0.4 \leq x < 1.0$ )** → *Template* memiliki kecocokan yang valid, menunjukkan bahwa terdapat perubahan morfologi namun dalam batas yang masih terdeteksi secara akurat.
3. **Buruk ( $x < 0.4$ )** → *Template* memiliki kecocokan yang rendah dan dianggap tidak valid, yang dapat disebabkan oleh noise dalam data atau perubahan yang sangat besar di permukaan kubah gunung.

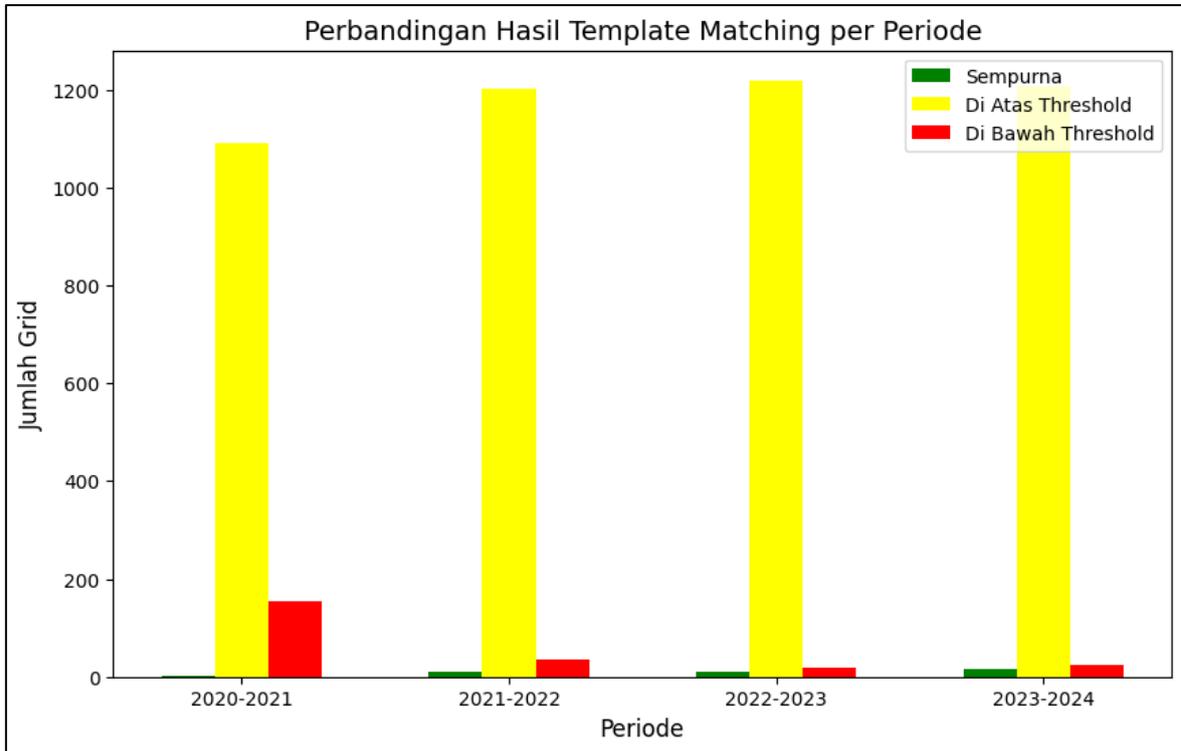
Dengan mengkategorikan hasil *template matching* ini, dapat memahami sejauh mana metode ini berhasil dalam mendeteksi pergeseran permukaan Gunung Merapi dalam berbagai periode.

**Tabel 4.3 Hasil dari pencocokan *Template***

Periode	Sempurna (=1)	Baik ( $0.4 \leq x < 1$ )	Buruk ( $x < 0.4$ )
2020-2021	3	1091	154
2021-2022	11	1201	36
2022-2023	9	1219	20
2023-2024	17	1207	24

Dari **Tabel 4.3**, terlihat bahwa sebagian besar *template* memiliki korelasi yang valid atau dapat dilihat dari **LAMPIRAN A**, dengan hanya sedikit yang memiliki korelasi buruk. Hal ini menunjukkan bahwa metode *template matching* berhasil mendeteksi pergeseran dengan baik di sebagian besar area analisis. Selain itu, peningkatan jumlah pencocokan sempurna pada tahun 2023-2024 menunjukkan bahwa ada kemungkinan stabilisasi pada beberapa bagian kubah Gunung Merapi selama periode ini. Dengan memahami pola ini, kita dapat lebih jauh menganalisis bagaimana deformasi terjadi di berbagai bagian kubah

gunung, serta memvalidasi metode yang digunakan dalam penelitian ini. **Gambar 4.3** menyajikan histogram yang menggambarkan distribusi hasil *template matching* dalam setiap periode, sehingga pola perubahan korelasi dari tahun ke tahun dapat diamati dengan lebih jelas.



**Gambar 4.3** Histogram *Template matching*

#### 4.1.6 Perhitungan *Displacement*

Perhitungan *Displacement* dilakukan untuk menentukan pergeseran permukaan kubah Gunung Merapi dari waktu ke waktu berdasarkan hasil *template matching*. Setelah koordinat hasil pencocokan diperoleh, *Displacement* dihitung dengan mencari selisih antara posisi awal dan posisi akhir dari setiap subset dalam grid. Perhitungan ini dilakukan untuk arah X dan Y, yang kemudian digunakan untuk mendapatkan total nilai *Displacement*. Dengan metode ini, distribusi pergeseran dapat dianalisis secara lebih akurat untuk memahami pola deformasi yang terjadi di area studi.

---



---

#### Pseudo Code 4.5 : *Displacement*

---



---

```

1 BEGIN
2 // Step 1: Inisialisasi variabel dan membaca DEM
3 ml_x ← 10
4 ml_y ← 10
5 IF temp_dim MOD 2 = THEN
6 temp_dim ← temp_dim + 1
7 ENDIF
8 results_mm ← array (h * w, 6)
9 k ← 0
10 img1r ← copy(dem1)
11 img2r ← copy(dem2)
12 END

```

---

**Pseudo Code 4.5** adalah awal dari proses *Displacement*, perhitungan *Displacement* diawali dengan inisialisasi parameter dan penyalinan data DEM untuk memastikan bahwa nilai asli tidak mengalami perubahan selama proses perhitungan. Parameter seperti skala *template* dan ukuran grid juga disesuaikan agar sesuai dengan perhitungan. Setelah itu, iterasi dilakukan pada setiap grid dalam DEM untuk mengambil subset sebagai *template* dari DEM pertama dan area pencocokan dari DEM kedua.

---



---

**Pseudo Code 4.6 : *Displacement* (lanjutan)**

---



---

```

1   FOR j ← 0 TO h - 1 DO
2     FOR i ← 0 TO w - 1 DO
3       // Step 2: Tentukan posisi grid dan subset
4       Delta_X ← i * olap_x
5       Delta_Y ← j * olap_y
6       TP_temp_x ← Delta_X + d + (temp_dim - 1) / 2
7       TP_temp_y ← Delta_Y + b + (temp_dim - 1) / 2
8
9       // Step 3: Tentukan batas template dan area pencocokan
10      start_x_template ← d + Delta_X
11      stop_x_template ← start_x_template + temp_dim
12      start_y_template ← b + Delta_Y
13      stop_y_template ← start_y_template + temp_dim
14
15      start_x_search ← Delta_X
16      stop_x_search ← Delta_X + 2*d + temp_dim
17      start_y_search ← Delta_Y
18      stop_y_search ← Delta_Y + 2*b + temp_dim
19
20      // Step 4: Ambil template dan area pencocokan
21      template ← subset(img1r, start_y_template,
22 stop_y_template, start_x_template, stop_x_template)
23      search_area ← subset(img2r, start_y_search,
24 stop_y_search, start_x_search, stop_x_search)
25
26      // Step 5: Lakukan Template matching
27      indx, indy, maxcc ← template_match(template, search_area,
28 ml_x, ml_y)
29
30      // Step 6: Hitung Displacement
31      TP_search_x ← Delta_X + indx - 0.5
32      TP_search_y ← Delta_Y + indy - 0.5
33      k2 ← (TP_search_x - TP_temp_x) * dim_pixel
34      k3 ← (TP_search_y - TP_temp_y) * dim_pixel
35
36      // Step 7: Filter berdasarkan ambang batas korelasi
37      IF maxcc ≥ mincor AND sqrt(k32 + k22) * frame_rate >
38 mindef AND sqrt(k32 + k22) * frame_rate < maxdef THEN
39        results_mm[k,2] ← k2
40        results_mm[k,3] ← k3
41        results_mm[k,4] ← sqrt(k22 + k32)
42        results_mm[k,5] ← maxcc
43      ELSE
44        results_mm[k,2] ← 0
45        results_mm[k,3] ← 0
46        results_mm[k,4] ← 0
47        results_mm[k,5] ← maxcc
48      ENDIF
49
50      k ← k + 1
51    ENDFOR
52  ENDFOR

```

---

**Pseudo Code 4.6** menjelaskan Pada setiap iterasi, perhitungan dimulai dengan menentukan batas koordinat *template* dan area pencocokan, lalu data dipotong sesuai dengan

koordinat tersebut. *Template matching* dilakukan untuk mencari pergeseran terbaik dengan metode *cv2.TM\_CCOEFF\_NORMED*, yang menghasilkan koordinat (*indx, indy*) serta nilai korelasi maksimum yang sudah ditetapkan (*maxcc*). Dari hasil *template matching*, nilai *dx* dan *dy* dihitung sebagai selisih antara koordinat pencocokan dan posisi awal dalam DEM pertama.

---



---

**Pseudo Code 4.7 : Displacement (lanjutan)**

---



---

```

1 // Step 8: Bentuk array Displacement
2 dx ← reshape(results_mm[:, 2], h, w)
3 dy ← reshape(results_mm[:, 3], h, w)
4
5 // Step 9: Buat peta Displacement untuk X
6 fig_dx ← create_figure()
7 title(fig_dx, "Displacement X")
8 display_image(fig_dx, dx, color_map=jet)
9 add_colorbar(fig_dx, "Displacement (m)")
10 save_image(fig_dx, "Displacement_x.png")
11
12 // Step 10: Buat peta Displacement untuk Y
13 fig_dy ← create_figure()
14 title(fig_dy, "Displacement Y")
15 display_image(fig_dy, dy, color_map=jet)
16 add_colorbar(fig_dy, "Displacement (m)")
17 save_image(fig_dy, "Displacement_y.png")
18
19 RETURN dx, dy, Displacement_x_img, Displacement_y_img, results_mm
20 END

```

---

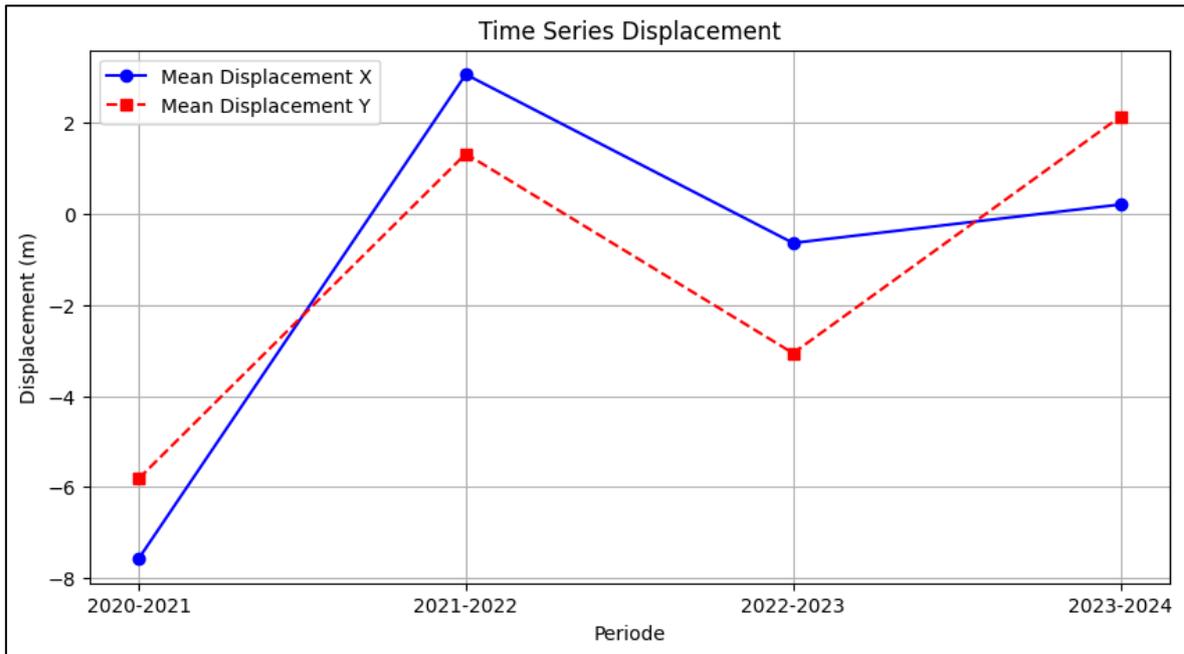
Setelah *Displacement* dihitung, hasilnya disaring menggunakan ambang batas korelasi untuk memastikan bahwa hanya *Displacement* yang valid yang digunakan dalam analisis lebih lanjut. Jika nilai korelasi berada di bawah batas minimum atau melebihi nilai pergeseran maksimum, *Displacement* dianggap tidak valid dan diatur menjadi nol. Setelah iterasi selesai, *Displacement* yang telah dihitung dikonversi menjadi *array dx* dan *dy*, yang kemudian divisualisasikan dalam bentuk peta *Displacement* menggunakan skala warna *jet colormap*.

**Tabel 4.4 Hasil perhitungan *Displacement***

Periode	Mean <i>Displacement</i> X (m)	Max <i>Displacement</i> X (m)	Min <i>Displacement</i> X (m)	Mean <i>Displacement</i> Y (m)	Max <i>Displacement</i> Y (m)	Min <i>Displacement</i> Y (m)
2020-2021	-7.5787	32.0000	-32.0000	-5.8194	32.0000	-32.0000
2021-2022	3.0654	32.0000	-32.0000	1.3226	32.0000	-32.0000
2022-2023	-0.6388	32.0000	-32.0000	-3.0606	32.0000	-32.0000
2023-2024	0.2069	32.0000	-32.0000	2.1372	32.0000	-32.0000

*Displacement* yang dihasilkan menunjukkan pola pergerakan kubah Gunung Merapi selama periode yang dianalisis. Nilai *mean Displacement* yang lebih besar menunjukkan adanya perubahan morfologi yang signifikan, sementara nilai yang lebih kecil mengindikasikan kestabilan pada area tertentu. Dari **tabel 4.4** dapat dilihat pada periode

2020 – 2021 terjadi pergerakan paling besar diantara periode – periode lainnya. **Gambar 4.4** menunjukkan perubahan dari besarnya *displacement* dalam periode 2020 – 2024.



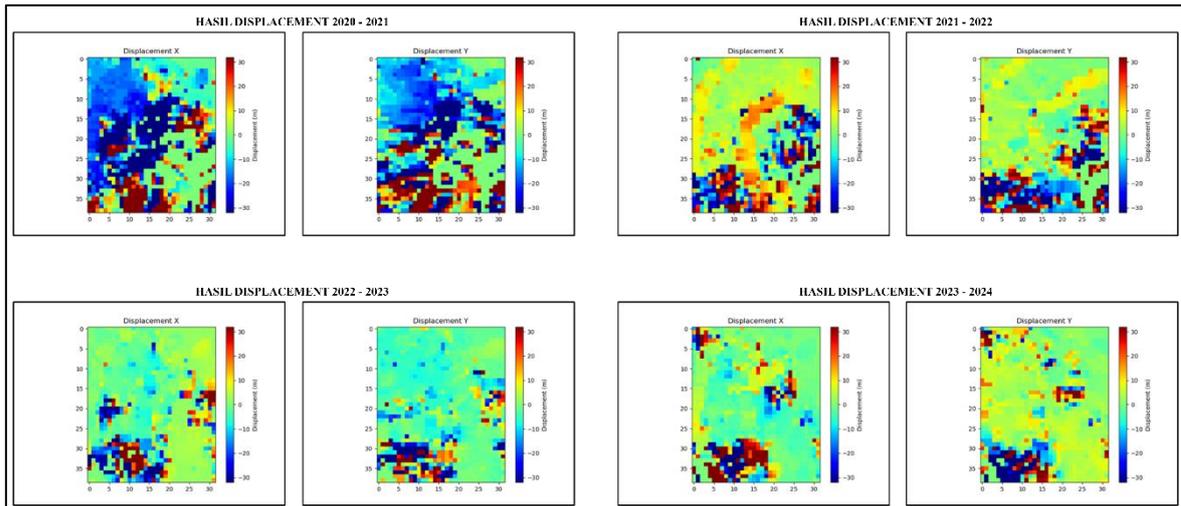
**Gambar 4.4 Time Series dari Displacement**

**Tabel 4.5** merupakan *sample* hasil dari perhitungan *displacement* yang diambil dari baris dan kolom (0,0) sampai baris dan kolom (0,9). Dari hasil tabel ini dapat dilihat hasilnya dengan hasil visualisasi sesuai dengan bagian grid baris dan kolomnya.

**Tabel 4.5 Sample Data Displacement**

Periode	Displacement Horizontal (X)									
	(0,0)	(0,1)	(0,2)	(0,3)	(0,4)	(0,5)	(0,6)	(0,7)	(0,8)	(0,9)
2020-2021	-12	-12	-12.2	-14	-1.8	-13.8	-1.8	-3.8	-21	-20.2
2021-2022	-2.2	32	-2	-2.4	0.2	0.2	0.2	0	10.2	9.4
2022-2023	0	0	-2.2	-2	0	2	0	0	2.8	1.4
2023-2024	-13.2	32	10.4	7.4	4	-2.2	-2.2	-2	1.2	1.4
Periode	Displacement Vertikal (Y)									
	(0,0)	(0,1)	(0,2)	(0,3)	(0,4)	(0,5)	(0,6)	(0,7)	(0,8)	(0,9)
2020-2021	-8	-10	-9.8	-9.8	-4	-12.2	-8.4	-10	-12.6	-13.6
2021-2022	2.2	14	2	0.4	1.6	1.8	1.8	2.2	9.2	9.4
2022-2023	0	-4	-5.8	-5.8	-4	-4	-6	-6.4	0.6	1.4
2023-2024	-17	-4.2	3.6	8.2	6	4.4	3.8	4.2	12.2	11.8

Dapat dilihat dari **gambar 4.5** bahwa pemetaan *Displacement* berdasarkan grid dapat dilihat dari indikator warna. Indikator warna hijau menunjukkan tidak adanya perubahan *Displacement* yang terjadi. Jika indikator warna menunjukkan warna yang hangat (kuning - merah) maka terjadi perubahan *Displacement* secara horizontal ke arah kanan maupun vertikal ke arah kiri, sedangkan indikator warna yang menunjukkan warna yang dingin (biru muda – biru tua) maka terjadi perubahan *displacement* secara horizontal ke arah kanan maupun vertikal ke arah kiri. Dengan satuan yang digunakan adalah meter.



**Gambar 4.5** Visualisasi dari perhitungan *Displacement*

#### 4.1.7 Perhitungan *Strain*

Perhitungan *Strain* dilakukan untuk mengukur perubahan bentuk atau deformasi yang terjadi pada kubah Gunung Merapi berdasarkan *Displacement* yang telah dihitung sebelumnya. *Strain* menggambarkan perubahan relatif posisi antar titik akibat pergerakan tanah, yang dapat menunjukkan area yang mengalami tekanan atau regangan. Dalam penelitian ini, perhitungan *Strain* dilakukan untuk dua arah, yaitu *Strain* dalam arah *X* (*strain\_x*) dan *Strain* dalam arah *Y* (*strain\_y*). Perhitungan ini menggunakan metode *konvolusi 2D* untuk menghitung turunan pertama dari *Displacement* terhadap masing-masing sumbu koordinat, yang kemudian dinormalisasi dengan faktor skala berdasarkan ukuran grid dan dimensi piksel DEM.

---



---

**Pseudo Code 4.8 : *Strain***

---



---

```

1 BEGIN
2 // Step 1: Inisialisasi operator diferensiasi dan parameter
  konvolusi
3   operatore ← array([[ -1., 0, 1.]])
4
5 // Step 2: Hitung Strain dalam arah X dengan konvolusi
6 gx ← convolve2d(dx, operatore / ((2 * (2 * d + temp_dim)) *
  dim_pixel), mode='same')
7
8 // Step 3: Hitung Strain dalam arah Y dengan konvolusi
9 gy ← convolve2d(dy, operatore.T / ((2 * (2 * b + temp_dim)) *
  dim_pixel), mode='same')
10
11 // Step 4: Simpan hasil perhitungan Strain
12 Save gx, gy
13 END

```

---

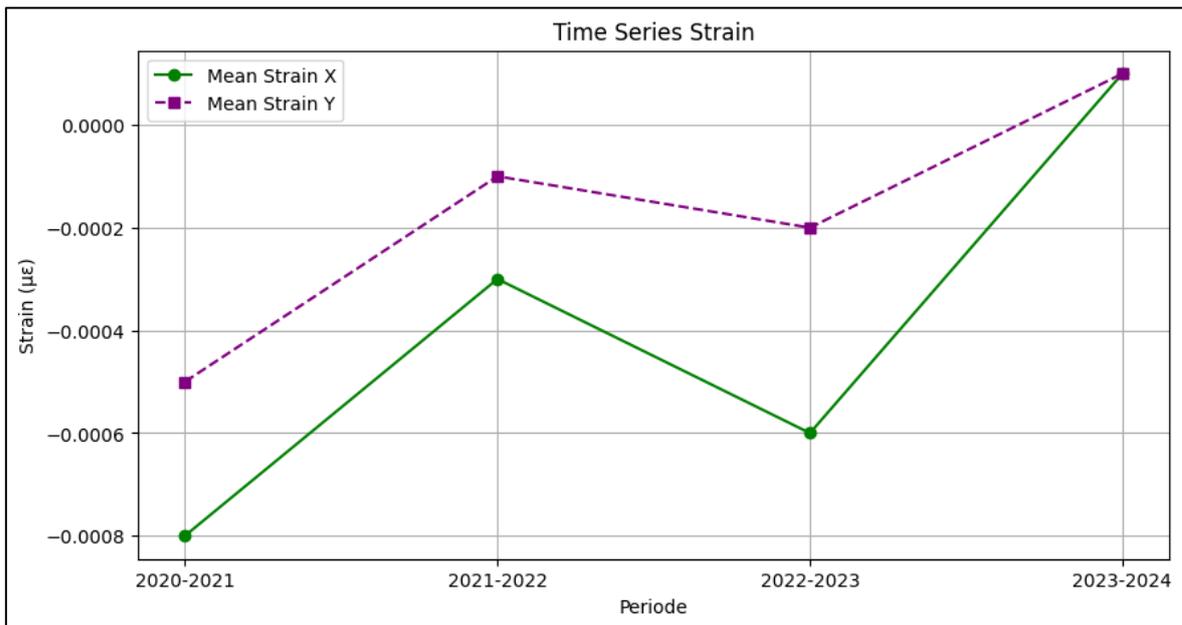
Perhitungan *Strain* dimulai dengan inisialisasi operator diferensiasi, yaitu *array*  $[[ -1, 0, 1 ]]$ , yang digunakan untuk menghitung perubahan nilai *Displacement* antar grid. Setelah itu, *Strain* dalam arah *X* dihitung dengan *konvolusi 2D* antara *Displacement X* (*dx*) dan operator diferensiasi. Hasil konvolusi ini kemudian dinormalisasi dengan faktor skala yang bergantung pada ukuran *template* dan dimensi piksel DEM untuk memastikan hasil yang akurat. Selanjutnya, *Strain* dalam arah *Y* dihitung dengan cara yang sama, tetapi operator diferensiasi ditransposisikan untuk menangkap perubahan dalam arah vertikal. Setelah kedua nilai *Strain* dihitung, hasilnya disimpan untuk dianalisis lebih lanjut. Dengan cara ini,

*Strain* dapat menggambarkan pola deformasi yang terjadi di kubah Gunung Merapi.

**Tabel 4.6 Hasil perhitungan *Strain***

Periode	Mean Strain X ( $\mu\epsilon$ )	Max Strain X ( $\mu\epsilon$ )	Min Strain X ( $\mu\epsilon$ )	Mean Strain Y ( $\mu\epsilon$ )	Max Strain Y ( $\mu\epsilon$ )	Min Strain Y ( $\mu\epsilon$ )
2020-2021	-0.0008	0.1667	-0.1667	-0.0005	0.1667	-0.1667
2021-2022	-0.0003	0.1667	-0.1667	-0.0001	0.1667	-0.1667
2022-2023	-0.0006	0.1667	-0.1667	-0.0002	0.1667	-0.1667
2023-2024	0.0001	0.1667	-0.1667	0.0001	0.1667	-0.1667

Perhitungan *Strain* ini memberikan gambaran mengenai area yang mengalami regangan atau tekanan akibat pergerakan kubah Gunung Merapi. Nilai *mean Strain* yang lebih besar menunjukkan area dengan deformasi signifikan, yang dapat menjadi indikasi peningkatan aktivitas vulkanik atau ketidakstabilan struktur kubah. Visualisasi hasil perhitungan *Strain* akan ditampilkan dalam bentuk peta *Strain X* dan *Y*, yang memperlihatkan distribusi deformasi di seluruh area studi. **Gambar 4.6** menunjukkan perubahan dari besarnya *strain* dalam periode 2020 – 2024.



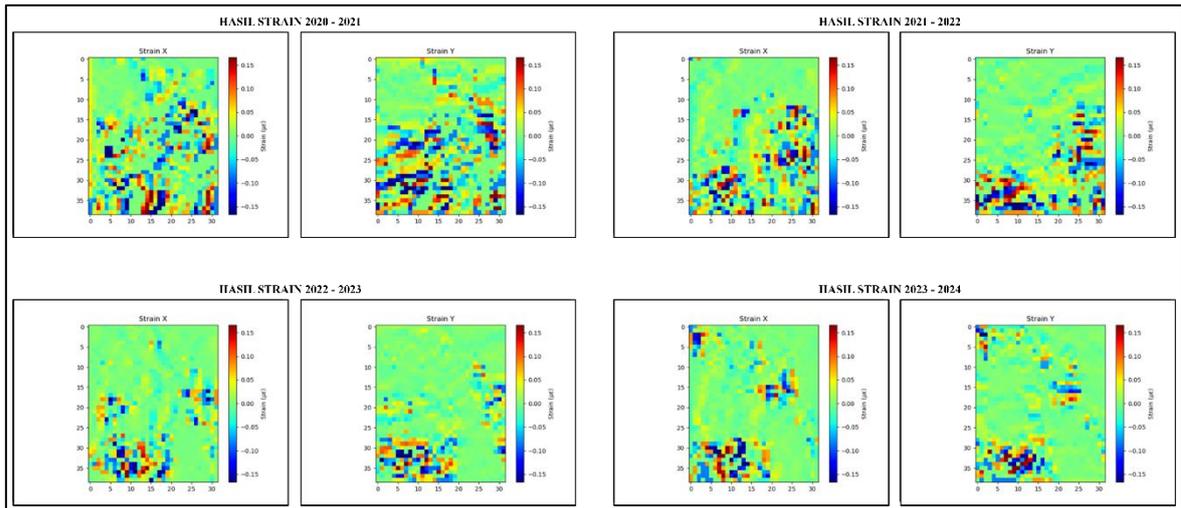
**Gambar 4.6 Time Series dari *Strain***

**Tabel 4.7** merupakan sample hasil dari perhitungan *displacement* yang diambil dari baris dan kolom (0,0) sampai baris dan kolom (0,9). Dari hasil tabel ini dapat dilihat hasilnya dengan hasil visualisasi sesuai dengan bagian grid baris dan kolomnya.

**Tabel 4.7 Sample Data Strain**

Periode	Strain Horizontal (X)									
	(0,0)	(0,1)	(0,2)	(0,3)	(0,4)	(0,5)	(0,6)	(0,7)	(0,8)	(0,9)
2020-2021	0.03 125	0.0005 21	0.0052 08	- 0.0270 8	- 0.0005 2	0	- 0.0260 4	0.05	0.0427 08	- 0.0072 9
2021-2022	- 0.08 333	- 0.0005 2	0.0895 83	- 0.0057 3	- 0.0067 7	0	0.0005 21	- 0.0260 4	- 0.0244 8	0.0026 04
2022-2023	0	0.0057 29	0.0052 08	- 0.0057 3	- 0.0104 2	0	0.0052 08	- 0.0072 9	- 0.0036 5	0.0036 46
2023-2024	- 0.08 333	- 0.0614 6	0.0640 63	0.0166 67	0.025	0.0161 46	- 0.0005 2	- 0.0088 5	- 0.0088 5	0.0005 21
Periode	Strain Vertikal (Y)									
	(0,0)	(0,1)	(0,2)	(0,3)	(0,4)	(0,5)	(0,6)	(0,7)	(0,8)	(0,9)
2020-2021	0.02 6563	0.0260 42	0.0307 29	0.0265 63	0.0255 21	0.0307 29	0.0296 88	0.0312 5	0.0505 21	0.0432 29
2021-2022	- 0.01 042	- 0.0057 3	- 0.0052 1	0	- 0.0026	- 0.0046 9	- 0.0052 1	- 0.0104 2	- 0.0224	- 0.0218 8
2022-2023	0.01 1458	0.0104 17	0.0161 46	0.0161 46	0.0151 04	0.0156 25	0.0156 25	0.0151 04	0.0062 5	0.0072 92
2023-2024	- 0.08 333	0.0833 33	0.0833 33	- 0.0411 5	- 0.0099	- 0.0203 1	- 0.0218 8	- 0.0145 8	- 0.0328 1	- 0.0317 7

Dapat dilihat dari **gambar 4.7** bahwa pemetaan *Strain* berdasarkan grid dapat dilihat dari indikator warna. Indikator warna hijau menunjukkan tidak adanya *Strain* yang terjadi. Jika indikator warna menunjukkan warna yang hangat (kuning - merah) maka terjadi perubahan *Strain* secara horizontal maupun vertikal keluar, sedangkan indikator warna yang menunjukkan warna yang dingin (biru muda – biru tua) maka terjadi perubahan *Strain* secara horizontal maupun vertikal kedalam. Dengan satuan yang digunakan adalah *microStrain* ( $\mu\epsilon$ ).



**Gambar 4.7** Visualisasi dari perhitungan *Strain*

#### 4.1.8 Pengembangan Sistem

Pengembangan sistem dalam penelitian ini dilakukan dengan membangun suatu perangkat lunak berbasis *Python* yang mengintegrasikan berbagai metode pemrosesan citra untuk menganalisis deformasi permukaan kubah Gunung Merapi menggunakan data *Digital Elevation Model* (DEM). Sistem ini terdiri dari dua bagian utama, yaitu antarmuka pengguna (UI) yang dikembangkan menggunakan *Streamlit* dalam *file app.py*, dan logika pemrosesan data dalam *file dic.py*.

Sistem dikembangkan untuk menerima dua dataset DEM dari periode yang berbeda, melakukan *preprocessing* untuk menyeragamkan resolusi, membagi citra menjadi grid, menerapkan metode *template matching*, menghitung *Displacement* serta *Strain*, dan akhirnya menampilkan hasil dalam bentuk visualisasi serta tabel. Hasil analisis dapat diunduh dalam berbagai format untuk keperluan evaluasi lebih lanjut.

---



---

#### Pseudo Code 4.9 : Antarmuka

---



---

```

1 BEGIN
2 // Step 1: Tampilkan antarmuka pengguna dan parameter konfigurasi
3 Display upload options for DEM1 and DEM2
4 Display sidebar parameters: resolution, template size, overlap,
  min correlation, etc.
5 IF user clicks "Run" THEN
6 // Step 2: Validasi input
7 IF DEM files not uploaded THEN
8 Display error message
9 STOP
10 ENDIF
11
12 // Step 3: Baca dan proses DEM
13 dem1, dem2, h, w ← process_dem_files(dem1, dem2, resolution,
  templateWidth, b, d, olap)
14
15 // Step 4: Hitung Displacement dan Strain
16 dx, dy, Displacement_x_img, Displacement_y_img, results_mm ←
  Displacement(dem1, dem2, h, w, olap_x, olap_y, templateWidth, b, d,
  dim_pixel, frame_rate, mincor, mindef, maxdef)
17 gx, gy, Strain_x_img, Strain_y_img ← Strain(dx, dy, b, d,
  templateWidth, dim_pixel)
18
19 // Step 5: Visualisasi hasil
20 vector_img ← vektor(dem1, results_mm, frame_rate, maxcol, mincol,

```

---

---

---

**Pseudo Code 4.10 : Antarmuka (lanjutan)**

---

---

```
1 filename1, filename2)
2   Display results (Displacement, Strain, vectors)
3   Enable download options
4   ENDF
5   END
```

---

**Pseudo Code 4.9 dan 4.10** menjelaskan sistem dikembangkan dengan dua bagian utama. Bagian pertama adalah antarmuka pengguna (app.py), yang memungkinkan pengguna untuk mengunggah data DEM dan mengatur parameter analisis. Setelah tombol *Run* diklik, sistem akan melakukan validasi terhadap data yang diunggah sebelum melanjutkan ke tahap pemrosesan.

---

---

**Pseudo Code 4.11 : Pemrosesan Data**

---

---

```
1 BEGIN
2   // Step 1: Baca data DEM dan lakukan preprocessing
3   dem1 ← read_dem(dem1_file, resolution)
4   dem2 ← read_dem(dem2_file, resolution)
5   h, w ← calculate_grid(dem1, dem2, temp_dim, b, d, olap)
6
7   // Step 2: Hitung Displacement dengan template matching
8   dx, dy, Displacement_x_img, Displacement_y_img, results_mm ←
  Displacement(dem1, dem2, h, w, olap_x, olap_y, templateWidth, b, d,
  dim_pixel, frame_rate, mincor, mindef, maxdef)
9
10  // Step 3: Hitung Strain dari Displacement
11  gx, gy, Strain_x_img, Strain_y_img ← Strain(dx, dy, b, d,
  templateWidth, dim_pixel)
12  // Step 4: Buat visualisasi vektor deformasi
13  vector_img ← vektor(dem1, results_mm, frame_rate, maxcol, mincol,
  filename1, filename2)
14  RETURN results_mm, Displacement_x_img, Displacement_y_img,
  Strain_x_img, Strain_y_img, vector_img
15 END
```

---

**Pseudo Code 4.11** adalah bagian kedua yaitu logika pemrosesan data (dic.py), yang terdiri dari beberapa tahapan penting. Pertama, *preprocessing* dilakukan untuk menyesuaikan resolusi DEM menggunakan *interpolasi bilinear*. Setelah itu, pembagian grid dilakukan untuk memastikan ukuran subset yang seragam. Tahap berikutnya adalah *template matching*, di mana *Displacement* dihitung berdasarkan perbedaan koordinat antara DEM awal dan DEM setelah perubahan. Dari *Displacement* yang telah diperoleh, perhitungan *Strain* dilakukan dengan metode *konvolusi 2D* untuk mendeteksi area yang mengalami regangan atau tekanan. Hasil akhirnya divisualisasikan dalam bentuk peta *Displacement*, peta *Strain*, dan vektor deformasi.

Hasil dari pengembangan sistem ini adalah perangkat lunak berbasis *Streamlit* yang mampu melakukan analisis deformasi permukaan dengan metode *Digital Image Correlation* (DIC). Sistem ini memungkinkan pengguna untuk mengunggah dua dataset DEM dalam format .TIF, kemudian melakukan *preprocessing* secara otomatis untuk menyeragamkan resolusi dan membagi citra menjadi grid yang sesuai. Pengguna dapat menyesuaikan parameter konfigurasi, seperti resolusi DEM, ukuran *template*, nilai *overlap*, dan batas korelasi minimum melalui sidebar antarmuka pengguna.

Setelah parameter dikonfigurasi, sistem akan menjalankan pemrosesan data yang mencakup *template matching* untuk menghitung *Displacement*, serta analisis *Strain*

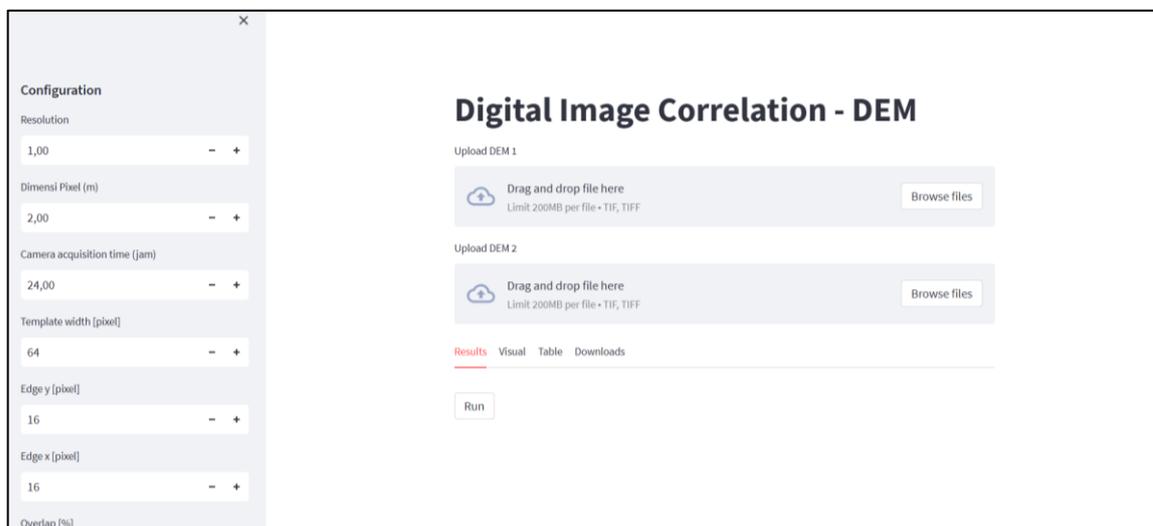
menggunakan metode *konvolusi 2D*. Hasil analisis ini divisualisasikan dalam bentuk peta *Displacement* dan *Strain* berwarna, yang memberikan gambaran mengenai pola deformasi di area studi. Selain itu, sistem juga menyediakan fitur unduhan dalam format *ZIP* yang mencakup seluruh hasil analisis, seperti *Displacement*, *Strain*, dan vektor deformasi.

Dengan sistem ini, analisis deformasi permukaan Gunung Merapi dapat dilakukan secara lebih efisien dan otomatis. Pengguna dapat memperoleh hasil yang lebih cepat dan akurat dalam mengidentifikasi perubahan morfologi akibat aktivitas vulkanik, sehingga sistem ini dapat menjadi alat yang bermanfaat dalam studi deformasi permukaan berbasis DEM. Hasil dari pengembangan sistem ini adalah perangkat lunak berbasis *Streamlit* yang mampu melakukan analisis deformasi permukaan dengan metode *Digital Image Correlation* (DIC).

#### 4.1.9 Hasil Pengujian Sistem

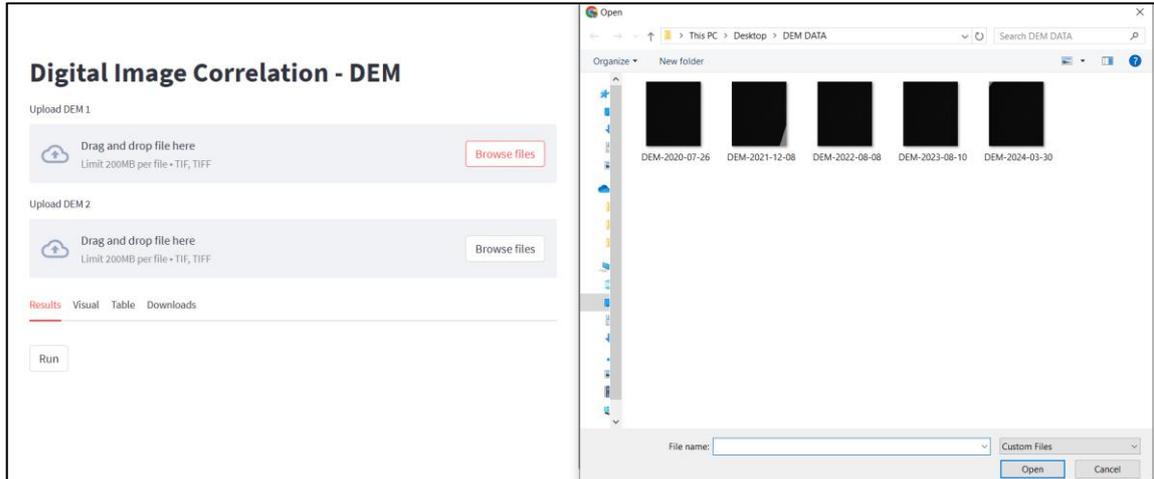
Pada bagian ini akan menampilkan hasil dari pengembangan sistem yang sudah dijelaskan sebelumnya dari tampilan awal program sampai hasil.

**Gambar 4.8** merupakan tampilan awal perangkat lunak yang menjadi menu utama dalam program ini, terdapat 2 fitur utama yaitu konfigurasi data dan input file DEM dengan format .TIF.

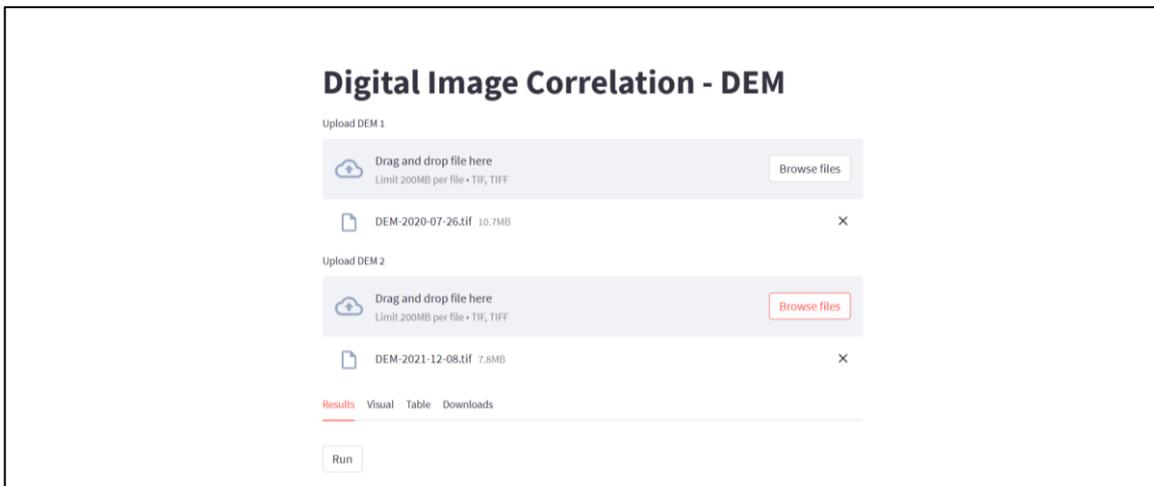


**Gambar 4.8 Tampilan Awal**

Selanjutnya, saat ingin memilih file yang akan diinput, file yang dapat dipilih hanya yang memiliki format .TIF saja seperti **gambar 4.9**. Dan setelah menginput filenya maka nama file akan muncul dibawah tempat menginput filenya seperti **gambar 4.10**.



**Gambar 4.9 Memilih File**



**Gambar 4.10 Nama File yang diinput**

Selanjutnya ke konfigurasi, disini peneliti dapat mengatur konfigurasi dari nilai *resolution*, *dimensi pixel*, *camera acquisition time*, *template width*, *edge y*, *edge x*, *overlap*, *min correlation*, *max def perhari*, *min def perhari*, *max colbar*, dan *min colbar* yang sudah ditetapkan dengan nilai yang sudah didapatkan paling sesuai untuk mengukur vektor deformasi. Pada **gambar 4.11** peneliti dapat mengubah konfigurasi sesuai kebutuhan dalam penelitian ini.

The image shows a configuration interface divided into two main sections. The left section, titled 'Configuration', contains several input fields with increment/decrement buttons:

- Resolution: 1,00
- Dimensi Pixel (m): 2,00
- Camera acquisition time (jam): 24,00
- Template width [pixel]: 64
- Edge y [pixel]: 16
- Edge x [pixel]: 16

The right section contains sliders and input fields for processing parameters:

- Overlap [%]: Slider set to 0.75 (range 0.00 to 1.00)
- Min Corr [0-0.99]: Slider set to 0.40 (range 0.00 to 0.99)
- Max Def in m/day: Input field 1000,00
- Min Def in m/day: Input field 0,00
- Max colbar in m/day: Input field 0,00
- Min colbar in m/day: Input field 0,00

**Gambar 4.11 Konfigurasi**

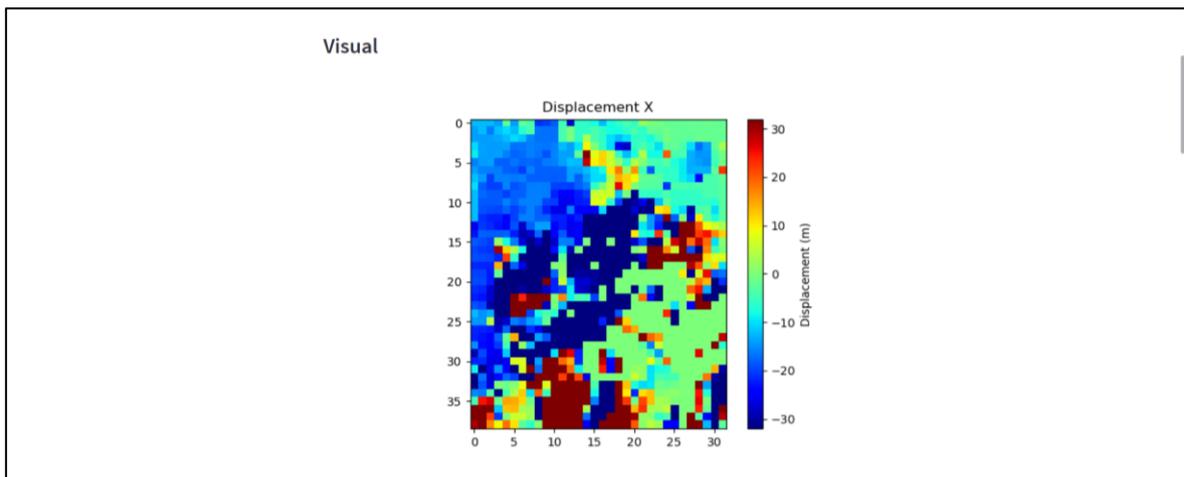
Setelah sudah menginput kedua file DEM .TIF dan mengatur nilai konfigurasi, program dapat memproses data dan menghasilkan 4 output utama yaitu *Results*, *Visual*, *Table*, dan *Downloads*. **Gambar 4.12** menunjukkan hasil dari *Results* yang menjelaskan nama file dari kedua data DEM, ukuran data DEM setelah di *preprocessing*, jumlah grid, dan total hari kedua data.

The screenshot shows the 'Results' tab selected in a navigation menu. The main content area displays the following information:

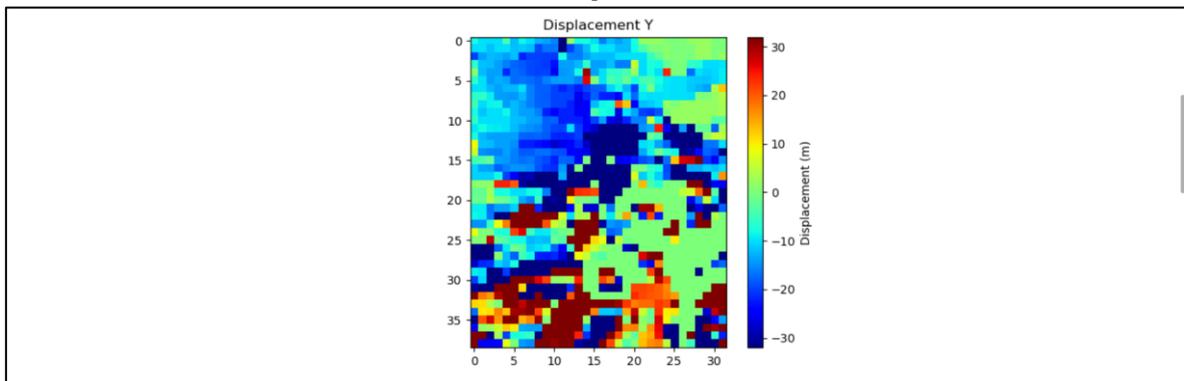
- Results**
- Informasi**
- DEM 1: DEM-2020-07-26.tif, Ukuran: (1043, 874)
- DEM 2: DEM-2021-12-08.tif, Ukuran: (1043, 874)
- Jumlah Grid: 39 Baris x 32 Kolom
- Total Hari: 500.00 hari
- Run button
- Success message: Data Berhasil terupload

**Gambar 4.12 Tab Results**

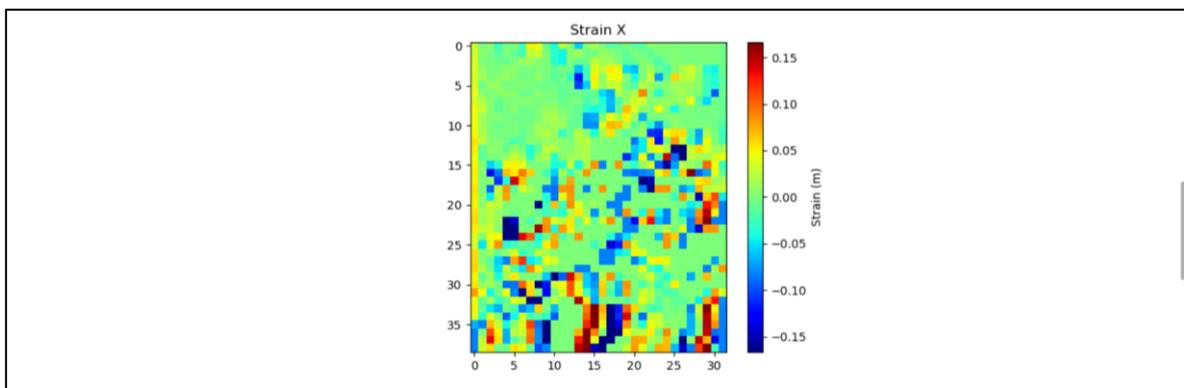
Pada **gambar 4.13** menampilkan visualisasi dari hasil *Displacement x* dan *y*, *Strain x* dan *y*, dan hasil plotting vektor deformasi.



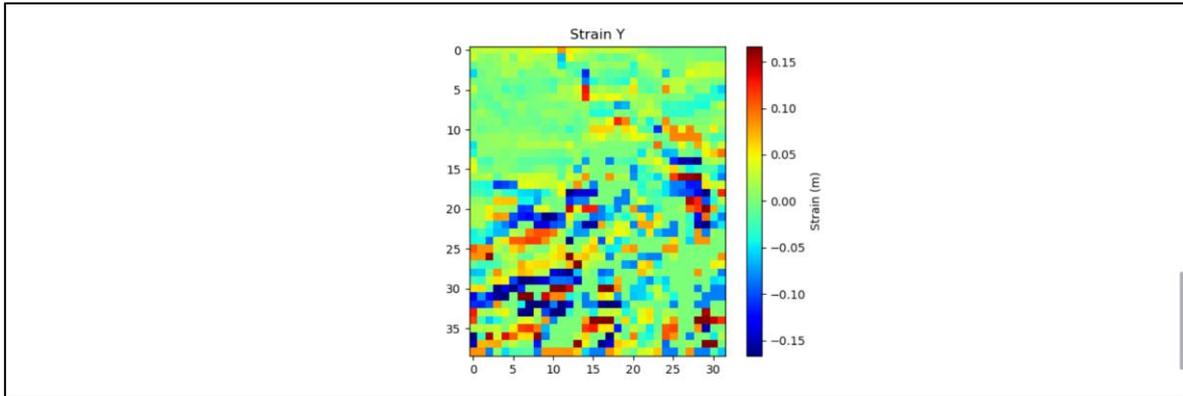
(a) Hasil *Displacement X*



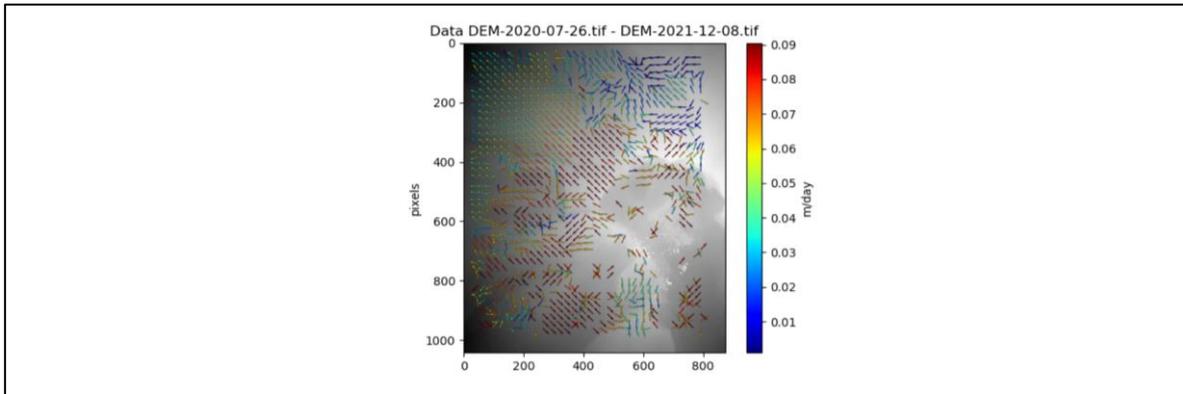
(b) Hasil *Displacement Y*



(c) Hasil *Strain X*



(d) Hasil *Strain Y*



(e) Hasil Plotting Vektor Deformasi

**Gambar 4.13 Tab Visual**

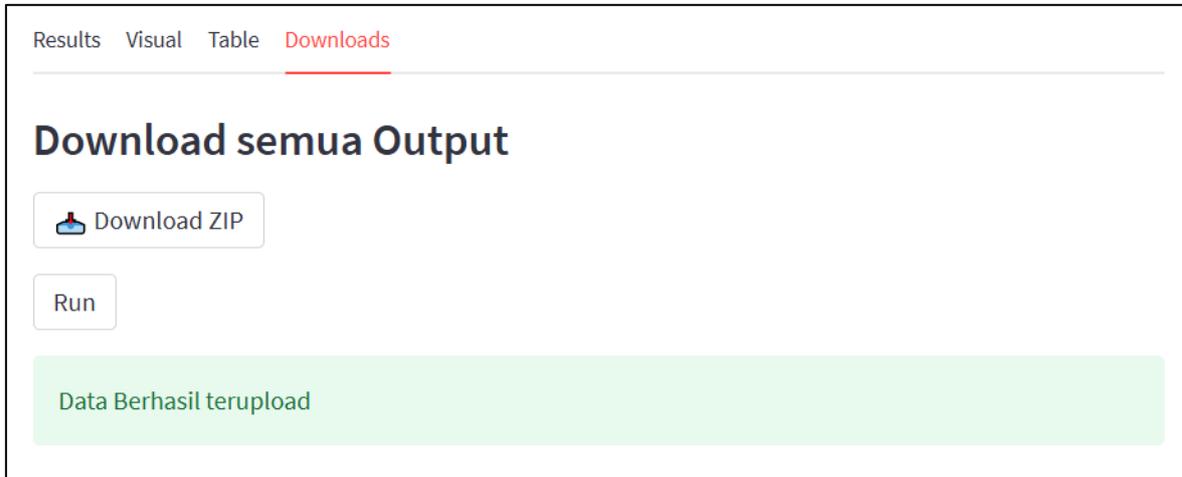
Pada **gambar 4.14** menampilkan tabel dari hasil perhitungan *mean*, *max*, *min* *Displacement x* dan *y*, *Strain x* dan *y*.

**Table**

	Metric	Value (m or strain)
1	Mean Displacement X	-7.5787
2	Max Displacement X	32.0000
3	Min Displacement X	-32.0000
4	Mean Displacement Y	-5.8194
5	Max Displacement Y	32.0000
6	Min Displacement Y	-32.0000
7	Mean Strain x	-0.0008
8	Max Strain x	0.1667
9	Min Strain x	-0.1667
10	Mean Strain Y	-0.0005
11	Max Strain Y	0.1667
12	Min Strain Y	-0.1667

**Gambar 4.14 Tab Tabel**

Terakhir pada **gambar 4.15** adalah tab untuk mendownload hasil dari gambar maupun perhitungannya yang dimasukkan kedalam zip yang berisikan .png dari gambar – gambar hasil dan .xlsx hasil dari perhitungan.



**Gambar 4.15 Tab Download**

Dari hasil pengujian sistem, sesuai dengan skenario pengujian pada **Tabel 3.3** maka dapat dihasilkan pada **Tabel 4.8** sebagai kesimpulan dari hasil pengujian sistem.

**Tabel 4.8 Hasil Scenario Test**

No	Test Case	Hasil yang diharapkan	Hasil
1	Pengguna dapat mengakses perangkat lunak	Pengguna berhasil mengakses perangkat lunak	berhasil
2	Pengguna dapat menginput file gambar berformat TIF	Pengguna berhasil menginputkan file	berhasil
3	Sistem dapat menampilkan hasil deteksi dari file input	Sistem berhasil menampilkan hasil deteksi dari input file	berhasil

Pada **tabel 4.8** Uji coba dilakukan oleh tiga orang pengguna, dan hasilnya menunjukkan bahwa semua skenario berhasil dijalankan sesuai ekspektasi.

#### 4.1.10 Evaluasi Hasil

Evaluasi hasil penelitian ini dilakukan dengan membandingkan hasil analisis deformasi menggunakan metode *Digital Image Correlation* (DIC) dengan metode *Electronic Distance Measurement* (EDM) yang digunakan oleh BPPTKG. Perbandingan ini bertujuan untuk menilai validitas hasil penelitian.

Pengolahan data deformasi menggunakan metode DIC dilakukan dengan beberapa langkah utama, mulai dari preprocessing citra DEM hingga ekstraksi vektor deformasi. **Pseudo code 4.12** Berikut yang digunakan untuk mengambil dan menampilkan vektor deformasi:

---

---

**Pseudo Code 4.12 : Alur Program**

---

---

```
1 BEGIN
2 // Step 1: Baca data DEM dan lakukan preprocessing
3 // step 2: Pembagian Grid
4 // step 3: template Match pada setiap grid
5 // step 4: menggunakan hasil template matching untuk perhitungan
  Displacement
6 // step 5: menggunakan hasil Displacement untuk menghitung Strain
7 // step 6: plotting vector deformasi menggunakan hasil
  Displacement
8 END
```

Plotting vektor deformasi didapatkan dari hasil perhitungan *Displacement* yang menghitung jarak antara data DEM pertama dan kedua yang nantinya akan dijadikan skala besaran perpindahan m/hari. Plotting vektor deformasi ini dapat dijadikan pseudocode dengan alur seperti **pseudo code 4.13** berikut:

---

---

**Pseudo Code 4.13 : plotting Vektor deformasi**

---

---

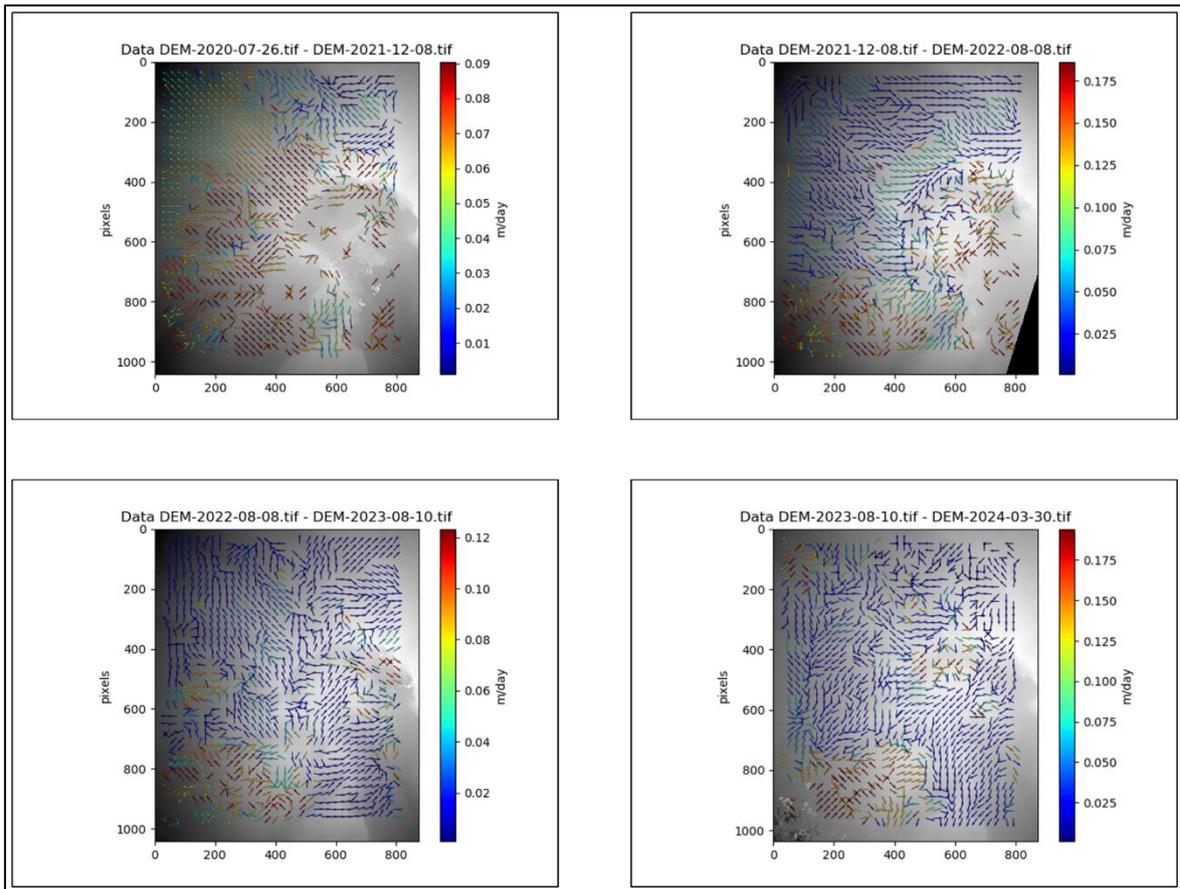
```
1 BEGIN
2 // Step 1: Normalisasi data deformasi
3 nz ← Normalisasi nilai results_mm[:,4]
4
5 // Step 2: Inisialisasi figure untuk plotting
6 fig_vector ← Buat figure baru
7 ax ← Tambahkan subplot utama pada fig_vector
8 Atur judul plot sebagai "Data filename1 - filename2"
9
10 // Step 3: Plot citra DEM sebagai latar belakang
11 minv ← Hitung nilai minimum dari dem1 (tanpa -32767)
12 maxv ← Hitung nilai maksimum dari dem1
13 norm ← Normalisasi nilai DEM menggunakan minv dan maxv
14 Plot dem1 dengan colormap grayscale dan normalisasi norm
15 // Step 4: Atur properti skala vektor deformasi
16 Jika maxcol ≤ 0, maka maxcol ← max(results_mm[:,4]) * frame_rate
17 Jika mincol ≤ 0, maka mincol ← min(results_mm[:,4]) * frame_rate
18 soglia_sup_prova_mm ← maxcol
19 soglia_inf_prova_mm ← mincol + 0.001
20 rcolbar ← (max(results_mm[:,4]) - min(results_mm[:,4])) *
  frame_rate / (maxcol - mincol)
21
22 // Step 5: Plot vektor deformasi
23 Plot vektor dengan koordinat (results_mm[:,0], results_mm[:,1])
24 Gunakan arah (results_mm[:,2]/results_mm[:,4],
  results_mm[:,3]/results_mm[:,4])
25 Atur skala quiver = 30
26 Atur warna vektor menggunakan colormap jet dengan normalisasi nz
27 Atur edgcolor menjadi hitam dan linewidth = 0.2
28
29 // Step 6: Tambahkan colorbar untuk menunjukkan kecepatan deformasi
30 cax, _ ← Buat area colorbar
31 cb ← Buat colorbar dengan colormap jet dan normalisasi
  (soglia_inf_prova_mm, soglia_sup_prova_mm)
32 Atur label colorbar sebagai 'm/day'
33
34 // Step 7: Simpan hasil plotting
35 vector_img ← Simpan hasil plot dalam format image byte array
36
37 // Step 8: Return hasil gambar vektor deformasi
38 RETURN vector_img
39 END
```

Pada tahap ini, dilakukan visualisasi vektor deformasi menggunakan citra DEM sebagai latar belakang. Data *Displacement* yang telah dihitung dinormalisasi untuk

memastikan skala warna mewakili variasi perpindahan dengan baik.

Setelah itu, citra DEM diplot dalam skala *grayscale*, dengan nilai maksimum dan minimum dihitung untuk normalisasi. Vektor deformasi ditampilkan menggunakan fungsi *quiver*, dengan arah berdasarkan komponen perpindahan  $X$  dan  $Y$  yang telah dinormalisasi. Warna vektor mengikuti skala *colormap jet* untuk menunjukkan perbedaan besar perpindahan.

Untuk meningkatkan keterbacaan, vektor memiliki tepi berwarna hitam dengan ketebalan tertentu. Skala perpindahan ditampilkan dalam colorbar, dengan satuan meter per hari. Hasil visualisasi dari plotting vektor deformasi pada setiap periode dapat dilihat pada **gambar 4.16** berikut:



**Gambar 4.16** Visualisasi Plotting Vektor Deformasi

Pada **gambar 4.16** dapat dilihat visualisasi hasil analisis DIC ditampilkan dalam bentuk plotting vektor deformasi. Setiap vektor pada gambar menunjukkan arah dan besarnya perpindahan permukaan kubah Gunung Merapi dalam periode tertentu. Warna vektor merepresentasikan kecepatan deformasi, dengan skala warna dari biru (pergerakan lambat) hingga merah (pergerakan cepat). Berdasarkan hasil analisis, terlihat bahwa pergerakan dominan terjadi ke arah barat laut, dengan intensitas terbesar pada periode 2020-2021. Selain itu, terdapat pola pergerakan dinamis di arah barat daya, yang disebabkan oleh aktivitas magma di daerah tersebut.

**Tabel 4.9 Jumlah Vektor Deformasi Per Arah Mata Angin**

Periode	Barat Laut	Timur	Barat	Tenggara	Barat Daya	Utara	Timur Laut	Selatan
2020-2021	495	191	129	107	98	94	77	57
2021-2022	70	340	65	378	93	56	150	96
2022-2023	242	172	105	71	57	285	272	44
2023-2024	68	156	123	140	360	49	74	278

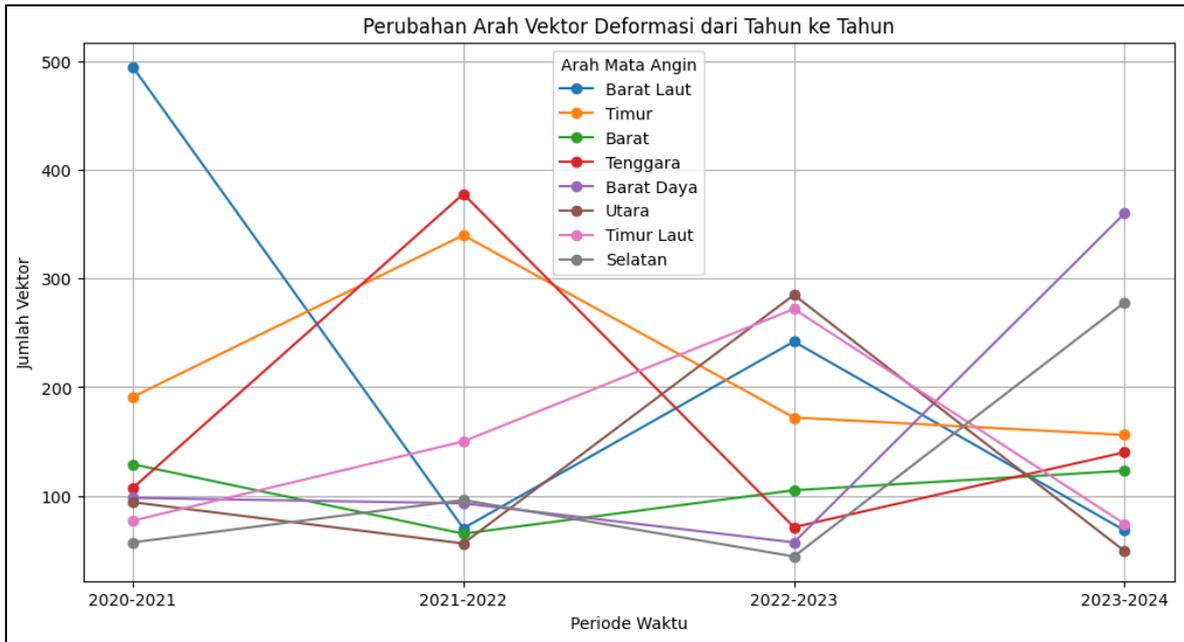
Pada **Tabel 4.9** dapat dilihat bahwa pada periode 2020-2021, arah vektor deformasi dominan mengarah ke Barat Laut dengan jumlah vektor tertinggi dibandingkan periode lainnya, yaitu sebanyak 495 vektor. Hal ini menunjukkan bahwa pergerakan deformasi pada periode ini lebih signifikan dibandingkan tahun-tahun berikutnya.

Namun, pada periode 2021-2022, arah dominan bergeser ke Tenggara dan Timur, masing-masing dengan 378 vektor dan 340 vektor, sementara jumlah vektor ke Barat Laut mengalami penurunan drastis menjadi 70 vektor. Perubahan ini mengindikasikan adanya dinamika baru dalam pola deformasi, yang kemungkinan besar dipengaruhi oleh pertumbuhan atau perubahan struktur kubah Gunung Merapi.

Pada periode 2022-2023, arah dominan kembali mengalami perubahan dengan vektor deformasi terbesar mengarah ke Utara (285 vektor) dan Timur Laut (272 vektor). Meskipun arah Barat Laut kembali meningkat menjadi 242 vektor, pergerakan ini tidak sebesar periode 2020-2021, menunjukkan bahwa deformasi tidak terjadi secepat sebelumnya.

Sementara itu, periode 2023-2024 menunjukkan pola yang berbeda, di mana arah dominan beralih ke Barat Daya (360 vektor) dan Selatan (278 vektor). Arah Barat Laut yang sebelumnya dominan kini hanya mencatat 68 vektor, menandakan bahwa pergeseran kubah lebih banyak terjadi ke arah yang berlawanan dibandingkan dengan periode awal. Untuk melihat data lebih lengkap dapat dilihat di **LAMPIRAN B**.

Secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa periode 2020-2021 merupakan periode dengan pergerakan deformasi yang paling signifikan, sesuai dengan hasil EDM yang menunjukkan dominasi ke Barat Laut. Meskipun arah deformasi pada periode-periode berikutnya bervariasi, laju pergeseran yang terjadi tidak seintensif periode 2020-2021. Visualisasi lebih lanjut mengenai perubahan arah vektor deformasi dari tahun ke tahun dapat dilihat pada **Gambar 4.17** berikut:



**Gambar 4.17 Time Series dari Arah Vektor Deformasi**

Untuk mevalidasi hasil dari metode DIC ini, digunakan metode *Electronic Distance Measurement* (EDM). EDM merupakan metode pengukuran deformasi yang menggunakan gelombang elektromagnetik untuk mengukur perubahan jarak antara dua titik. Dalam konteks pemantauan Gunung Merapi, EDM digunakan untuk mengukur *slope distance*, yaitu jarak miring antara titik pengukuran dan reflektor yang dipasang pada kubah lava. Prinsip kerja EDM didasarkan pada pengukuran waktu tempuh gelombang yang dipantulkan kembali ke instrumen, sehingga perubahan jarak dapat dihitung dengan presisi tinggi.

Pada penelitian ini, data EDM dari BPPTKG digunakan sebagai pembandingan dengan metode Digital Image Correlation (DIC). Alat EDM diletakkan di arah barat laut kubah Gunung Merapi, posisi yang strategis untuk mengamati perubahan jarak akibat deformasi kubah. Dari hasil pengukuran EDM selama periode 2020 hingga 2024, diketahui bahwa pergerakan terbesar terjadi pada periode 2020-2021, selaras dengan hasil yang diperoleh dari metode DIC. Setelah periode tersebut, laju deformasi cenderung stabil, yang menunjukkan bahwa tekanan internal magma berkurang setelah aktivitas vulkanik yang signifikan pada awal periode pengamatan. Data EDM yang didapatkan berupa data berformat .csv yang dirangkum berdasarkan bulan seperti **tabel 4.10** dan divisualisasikan seperti **gambar 4.18** berikut:

**Tabel 4.10 Hasil EDM Perbulan**

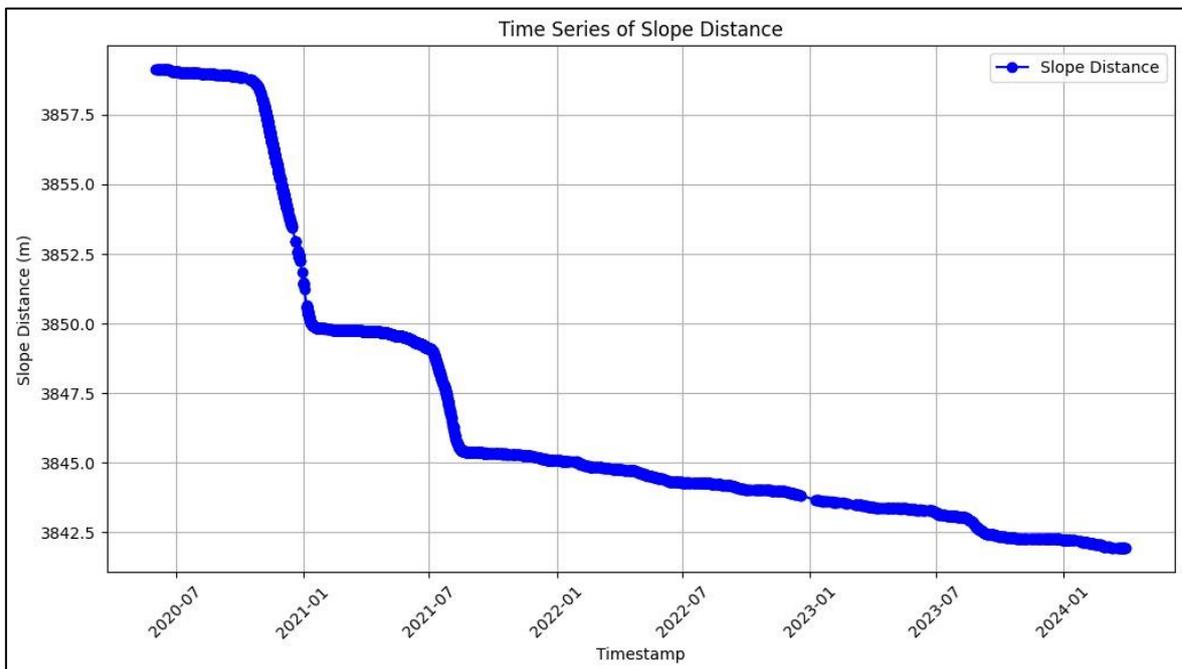
No	Periode	Rata-rata Slope Distance
1	2020-06	3859.0761463414633
2	2020-07	3859.006274509804
3	2020-08	3858.9575897435893
4	2020-09	3858.894170731707

**Tabel 4.11 Hasil EDM Perbulan (lanjutan)**

<b>No</b>	<b>Periode</b>	<b>Rata-rata Slope Distance</b>
5	2020-10	3858.616064516129
6	2020-11	3856.57787732342
7	2020-12	3853.76107751938
8	2021-01	3850.0828174603175
9	2021-02	3849.7567721518985
10	2021-03	3849.736174496644
11	2021-04	3849.6893090909093
12	2021-05	3849.551589147287
13	2021-06	3849.2730869565216
14	2021-07	3848.2059357142857
15	2021-08	3845.6530641025643
16	2021-09	3845.343779661017
17	2021-10	3845.3005142857146
18	2021-11	3845.2436756756756
19	2021-12	3845.103377777778
20	2022-01	3845.0419393939396
21	2022-02	3844.887829268293
22	2022-03	3844.7767647058827
23	2022-04	3844.6940999999997
24	2022-05	3844.5
25	2022-06	3844.305342105263
26	2022-07	3844.2607499999995
27	2022-08	3844.221292682927
28	2022-09	3844.1094736842106
29	2022-10	3844.00504
30	2022-11	3843.967242424242
31	2022-12	3843.8712727272728
32	2023-01	3843.6204
33	2023-02	3843.5622857142857
34	2023-03	3843.4383793103448
35	2023-04	3843.3610416666666
36	2023-05	3843.3331875

**Tabel 4.12 Hasil EDM Perbulan (lanjutan)**

No	Periode	Rata-rata Slope Distance
37	2023-06	3843.265407407407
38	2023-07	3843.09015
39	2023-08	3842.9057234042552
40	2023-09	3842.4430857142856
41	2023-10	3842.2937179487176
42	2023-11	3842.250851851852
43	2023-12	3842.23535
44	2024-01	3842.1986764705885
45	2024-02	3842.0582045454544
46	2024-03	3841.9343703703703



**Gambar 4.18 Visualisasi Hasil Metode EDM (BPPTKG, 2025)**

Dari hasil kedua metode tersebut dapat ditampilkan dengan tabel yang menunjukkan pergerakan signifikansi dari deformasi kubah gunung merapi:

**Tabel 4.13 Perbandingan Hasil Signifikansi**

No	Periode	Metode	
		DIC	EDM
1	2020 - 2021	Hasil deformasi terjadi sangat signifikan yang dapat dilihat dari besaran pergeseran paling besar dibandingkan dengan periode-periode lainnya. Dan arah vektor deformasi dominan ke arah barat laut kubah gunung merapi	Hasil deformasi juga terjadi sangat signifikan yang dapat dilihat dari penurunan nilai <i>slope distance</i> yang menunjukkan arah deformasi semakin mendekati ke alat EDM yang dibagian barat laut kubah gunung merapi
2	2021 - 2022	Deformasi yang terjadi stabil ditunjukkan dengan nilai pergerakan yang rendah	Deformasi yang terjadi stabil ditunjukkan dengan nilai pergerakan yang rendah
3	2022 - 2023	Deformasi yang terjadi stabil ditunjukkan dengan nilai pergerakan yang rendah	Deformasi yang terjadi stabil ditunjukkan dengan nilai pergerakan yang rendah
4	2023 - 2024	Deformasi yang terjadi stabil ditunjukkan dengan nilai pergerakan yang rendah	Deformasi yang terjadi stabil ditunjukkan dengan nilai pergerakan yang rendah

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa metode DIC dan EDM memberikan hasil yang konsisten dalam mengidentifikasi periode deformasi terbesar, yaitu pada 2020-2021. Setelah periode tersebut, pergerakan yang terdeteksi cenderung stabil dengan pola yang lebih merata. Dengan menggunakan DIC, diperoleh gambaran deformasi yang lebih detail dalam bentuk vektor, sementara EDM memberikan informasi kuantitatif dalam bentuk perubahan slope distance.

#### 4.2 Pembahasan

Hasil perhitungan vektor deformasi dengan metode Digital Image Correlation (DIC) menunjukkan pola pergerakan kubah Gunung Merapi yang bervariasi dalam periode pengamatan. Pergerakan ini dianalisis berdasarkan data Digital Elevation Model (DEM) yang telah diproses untuk menghasilkan *Displacement* dan arah vektor deformasi. Dari hasil yang diperoleh, terdeteksi adanya pola dominan pergerakan material ke arah tertentu, yang mencerminkan dinamika pertumbuhan dan runtuhnya kubah akibat aktivitas vulkanik.

Perbandingan dengan data Electronic Distance Measurement (EDM) yang dipasang di barat laut kubah menunjukkan kesesuaian tren deformasi, meskipun terdapat perbedaan dalam metode akuisisi dan representasi data. EDM mengukur perubahan jarak secara langsung dengan akurasi tinggi dalam satu garis pengukuran, sedangkan DIC memberikan gambaran lebih luas dengan resolusi spasial yang lebih tinggi. Meskipun begitu, kedua metode menunjukkan pola deformasi yang selaras, terutama dalam fase peningkatan aktivitas vulkanik.

Periode 2020–2021 menunjukkan deformasi yang paling signifikan dibandingkan dengan periode-periode lainnya, baik berdasarkan hasil DIC maupun EDM. Dari analisis DIC, terdeteksi bahwa pergeseran terbesar terjadi pada periode ini, dengan arah vektor deformasi yang dominan ke barat laut. Hal ini sejalan dengan hasil EDM yang menunjukkan penurunan nilai slope distance secara signifikan, mengindikasikan bahwa material kubah mengalami pergerakan yang semakin mendekati instrumen EDM di sisi barat laut. Keselarasan hasil dari kedua metode ini menunjukkan bahwa pada periode tersebut, terjadi perubahan struktur kubah yang cukup besar, yang kemungkinan disebabkan oleh

peningkatan aktivitas magma atau pelemahan material kubah akibat proses akumulasi dan pelepasan tekanan gas vulkanik.

Pada periode 2021–2024, hasil dari kedua metode menunjukkan deformasi yang lebih stabil, dengan nilai pergerakan yang lebih rendah. Tidak terdapat perubahan signifikan dalam pola deformasi, menunjukkan bahwa dalam fase ini, kubah cenderung berada dalam kondisi yang lebih seimbang antara pertumbuhan dan runtuh material. Konsistensi tren yang terdeteksi baik oleh DIC maupun EDM mengindikasikan bahwa metode DIC dapat diandalkan sebagai alat pemantauan deformasi, terutama dalam mendeteksi perubahan besar seperti yang terjadi pada periode 2020–2021.

Dengan demikian, perbandingan antara DIC dan EDM menunjukkan bahwa arah dominan deformasi yang signifikan ke barat laut pada periode 2020–2021 dapat terkonfirmasi dari kedua metode ini. Ini menegaskan bahwa metode DIC tidak hanya memberikan visualisasi yang lebih luas, tetapi juga memiliki tingkat akurasi yang dapat divalidasi dengan metode pengukuran langsung seperti EDM. Integrasi kedua metode ini dapat meningkatkan efektivitas pemantauan deformasi kubah Gunung Merapi, yang pada akhirnya mendukung upaya mitigasi bencana dengan memberikan data yang lebih komprehensif dan akurat mengenai dinamika aktivitas vulkanik.

## **BAB V**

### **PENUTUP**

Pada bab ini akan dibahas kesimpulan dan saran dari hasil penelitian yang telah dilakukan sebelumnya.

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil penelitian ini, metode *Digital Image Correlation* (DIC) telah berhasil diterapkan untuk menganalisis vektor deformasi kubah Gunung Merapi menggunakan data *Digital Elevation Model* (DEM). Hasil perhitungan *displacement* dan *strain* menunjukkan bahwa pergerakan terbesar terjadi pada periode 2020–2021, dengan arah dominan menuju barat laut. Hasil ini sejalan dengan data *Electronic Distance Measurement* (EDM) yang dipasang oleh BPPTKG, di mana deformasi terbesar juga terdeteksi pada periode yang sama. Setelah periode tersebut, pergerakan kubah cenderung stabil dengan pola deformasi yang lebih merata.

Proses analisis dalam penelitian ini dilakukan menggunakan *Python Package Py2DIC*, yang telah dimodifikasi oleh BPPTKG untuk meningkatkan akurasi dalam pendeteksian pergerakan permukaan kubah. Penggunaan *Py2DIC* memungkinkan perhitungan *displacement* dan *strain* dengan interpolasi *bicubic* yang dapat untuk menghitung subpiksel, serta penerapan *template matching* yang lebih akurat dalam mendeteksi pola pergeseran elevasi.

Metode DIC memberikan keunggulan dalam visualisasi vektor deformasi yang lebih detail dibandingkan EDM, yang hanya memberikan data dalam bentuk *time-series slope distance*. Metode DIC juga memiliki hasil yang signifikan dengan EDM signifikan ke barat laut pada periode 2020–2021. Namun, keakuratan DIC sangat bergantung pada kualitas data DEM dan parameter analisis yang digunakan. Oleh karena itu, metode ini dapat digunakan sebagai pelengkap dalam pemantauan deformasi kubah Gunung Merapi untuk mendukung mitigasi bencana dan pemahaman lebih lanjut terhadap aktivitas vulkanik.

#### **5.1 Saran**

Untuk meningkatkan keakuratan metode DIC dalam pemantauan deformasi, diperlukan penggunaan data DEM dengan resolusi lebih tinggi agar detail pergerakan dapat terdeteksi dengan lebih baik. Selain itu, pengoptimalan parameter analisis, seperti ukuran *template* dan tingkat *overlap*, dapat meningkatkan akurasi hasil perhitungan *Displacement* dan *Strain*.

Penggunaan kombinasi metode DIC dengan EDM direkomendasikan agar analisis deformasi lebih komprehensif. EDM dapat memberikan data numerik yang presisi, sementara DIC memberikan gambaran visual yang lebih luas. Dengan demikian, sistem pemantauan deformasi dapat menjadi lebih efektif dalam mengidentifikasi perubahan morfologi kubah secara *real-time*, yang pada akhirnya dapat membantu dalam upaya mitigasi bencana Gunung Merapi.

## DAFTAR PUSTAKA

- Adidafa, M. I., & Basyid, M. A. (2023). ANALISIS DEFORMASI GUNUNG API SINABUNG PRA DAN PASCA ERUPSI MENGGUNAKAN METODE DIFFERENTIAL INTERFEROMETRY SYNTHETIC APERTURE RADAR (Dinsar) FTSP Series. In *FTSP Series*.
- Biondi, R., Steiner, A. K., Kirchengast, G., Brenot, H., & Rieckh, T. (2017). Supporting The Detection And Monitoring Of Volcanic Clouds: A Promising New Application Of Global Navigation Satellite System Radio Occultation. *Advances In Space Research*, 60(12), 2707–2722. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.06.039>
- Crystiana, I., Muji Susantoro, T., Nurus Firdaus, Dan, Pertama, P., Muda, P., & Bumi Muda Pusat Penelitian Dan Pengembangan Teknologi Minyak Dan Gas Bumi, P. (2015). *Pengolahan Data Citra Satelit Untuk Mengidentifikasi Kasi Potensi Jebakan Dalam Kegiatan Eksplorasi Migas Satellite Image Data Processing To Identify Potential Of Trapping Area In Oil And Gas Exploration* (Vol. 109). <http://www.journal.lemigas.esdm.go.id>
- Dyatmika, H. S., Arief, R., Sudiana, D., Ali, S., Maulana, R., Marendra, D., & Budiono, E. (2018). MODIFIKASI *DIGITAL ELEVATION MODEL* (DEM) CITRA RESOLUSI TINGGI MENGGUNAKAN FUSI INTERFEROMETRI SAR DAN STEREOSAR BERBASIS FAKTOR PEMBOBOTAN (DEM MODIFICATION USING FUSION OF SAR INTERFEROMETRI AND STEREOSAR BASED ON WEIGHTING FACTOR). *Jurnal Penginderaan Jauh Dan Pengolahan Data Citra Digital*, 15(2). <https://doi.org/10.30536/j.pjpdcd.2018.v15.a3063>
- Galaś, A., Lewińska, P., Aguilar, R., & Nowak, Ł. (2023). Remote Sensing Data Applied To The Reconstruction Of Volcanic Activity In The Valley Of The Volcanoes, Central Volcanic Zone, Peru. In *Journal Of Geodynamics* (Vol. 156). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2023.101972>
- Gedela, R., Kalla, S., Sudarsanan, N., & Karpurapu, R. (2021). Assessment Of Load Distribution Mechanism In Geocell Reinforced Foundation Beds Using Digital Imaging Correlation Techniques. *Transportation Geotechnics*, 31. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100664>
- Gupta, D., Udupa, A., & Viswanathan, K. (2021). Evaluating Performance Metrics In Non-Homogeneous Cutting Processes Using A Random-Grid Based *Digital Image Correlation* (DIC) Method. *Manufacturing Letters*, 30, 44–48. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2021.10.004>
- Hernanda, A., Yuliantini, E, P., Azwar. (2022). ANALISIS *DIGITAL ELEVATION MODEL* (DEM) MENGGUNAKAN Arcgis 10.4.1 PADA KAWASAN BATURAJA PERMAI 1(1), 30–36. <https://doi.org/10.4.1>
- Kalteremidou, K. A., Murray, B. R., Carrella-Payan, D., Cernescu, A., Van Hemelrijck, D., & Pyl, L. (2021). Failure Analysis Of CF/Epoxy Hollow Beam Components Using *Digital Image Correlation* And Acoustic Emission Analyses. *Composite Structures*, 275. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114481>
- Kang, J., Chen, H., Zhang, X., Zhang, J., Guo, Z., & Wang, W. (2022). Valley-Positioning-Assisted Discrete *Digital Image Correlation* Algorithm For Fast Cavity Length Interrogation Of Fiber-Optic Fabry–Perot Sensors. *Measurement: Journal Of The International Measurement Confederation*, 198. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111411>

- Khelifi, I., Pop, O., Dupré, J. C., Doumalin, P., & Huger, M. (2021). Fracture Process Analysis In Magnesia-Hercynite Refractory Materials By Combining An Enhanced *Digital Image Correlation* Method With Wedge Splitting Test. *Theoretical And Applied Fracture Mechanics*, 116. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2021.103134>
- Lima, R. A. A., Perrone, R., Carboni, M., & Bernasconi, A. (2021). Experimental Analysis Of Mode I Crack Propagation In Adhesively Bonded Joints By Optical Backscatter Reflectometry And Comparison With *Digital Image Correlation*. *Theoretical And Applied Fracture Mechanics*, 116. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2021.103117>
- Nurtyawan, R., & Utami, L. S. (2020). Monitoring Deformasi Gunung Merapi Menggunakan Citra *Sentinel-1A* Dengan Menggunakan Metode Dinsar (Studi Kasus: Gunung Merapi, Jawa Tengah). *Jurnal Rekayasa Hijau*, 4(1), 14–23. <https://doi.org/10.26760/Jrh.V4i1.14-23>
- Pavlov, A. N., Pavlova, O. N., Koronovskii, A. A., & Guyo, G. A. (2022). Extended Detrended *Digital Image Correlation* Analysis Of Nonstationary Processes. *Chaos, Solitons And Fractals*, 157. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2022.111972>
- Rahmawati, T. S., Fadly, R., & Rahmadi, E. (2021). ANALISIS DEFORMASI GUNUNG SINABUNG BERDASARKAN DATA PENGAMATAN GPS PERIODE 2017-2018. *Journal Of Geodesy And Geomatics*.
- Salgueiro, V., Guerrero-Rascado, J. L., Costa, M. J., Román, R., Cazorla, A., Serrano, A., Molero, F., Sicard, M., Córdoba-Jabonero, C., Bortoli, D., Comerón, A., Couto, F. T., López-Cayuela, M., Pérez-Ramírez, D., Potes, M., Muñiz-Rosado, J. A., Obregón, M. A., Barragán, R., Oliveira, D. C. F. S., ... Alados-Arboledas, L. (2023). Characterization Of Tajogaite Volcanic Plumes Detected Over The Iberian Peninsula From A Set Of Satellite And Ground-Based Remote Sensing Instrumentation. *Remote Sensing Of Environment*, 295. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113684>
- Widiastuti, S., Hendrastuty, N., Penulis Korespondensi, N., & Widiastuti Submitted, S. (2023). RANCANG BANGUN SISTEM INFORMASI KEPEGAWAIAN BERBASIS WEBSITE DENGAN MENGGUNAKAN METODE EXTREME PROGRAMMING PADA KANTOR KELURAHAN KOMERING AGUNG KECAMATAN GUNUNG SUGIH. X, 291–301. <https://doi.org/10.33365/Jtsi>
- Wismaya, Y. G., Ira, M. A., & Sulistiyani. (2016) Analisis Deformasi Gunung Merapi Berdasarkan Data Pengamatan GPS Februari-Juli 2015 <https://www.neliti.com/id/publications/192182/Analisis-Deformasi-Gunung-Merapi-Berdasarkan-Data-Pengamatan-Gps-Februari-Juli-2>
- Yang, B., Wang, W., Ping, L., Pei, C., Chen, X., & Wang, Y. (2023). Measurement Of Bubble/Slug Velocity And Size In Vertical Pipe Based On Optical *Digital Image Correlation* Method. *Optik*, 272. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.170172>
- Yudiantoro, D. F., Calfrin Koly, J., Haty, I. P., & Aisyah, N. (2023). ANALISIS DEFORMASI GUNUNG API MERAPI, MELALUI PENERAPAN METODE KOMBINASI BLOCK MOVEMENT DAN DEFORMASI ELASTIS, PADA PERIODE TAHUN 1995-1997 BERDASARKAN DATA GPS (GLOBAL POSITIONING SYSTEM). *Jurnal Ilmiah Geologi Pangea*, 10(1).
- Zhang, Y., Li, Q., Tu, W., Mai, K., Yao, Y., & Chen, Y. (2019). Functional Urban Land Use Recognition Integrating Multi-Source Geospatial Data And *Digital Image Correlations*. *Computers, Environment And Urban Systems*, 78. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2019.101374>

# LAMPIRAN

**LAMPIRAN A. Sample Hasil Korelasi (*Template matching*) 100 data pertama**

**Tabel 1 Hasil korelasi 2020-2021**

<b>Grid Baris</b>	<b>Grid Kolom</b>	<b>X Match</b>	<b>Y Match</b>	<b>Nilai Korelasi</b>	<b>Kategori</b>
0	0	32	32	0.992503	Di Atas
0	1	32	32	0.993783	Di Atas
0	2	32	32	0.994482	Di Atas
0	3	32	32	0.996613	Di Atas
0	4	32	32	0.995371	Di Atas
0	5	32	32	0.994384	Di Atas
0	6	32	32	0.994229	Di Atas
0	7	32	32	0.998014	Di Atas
0	8	32	32	0.998244	Di Atas
0	9	32	32	0.997764	Di Atas
0	10	32	32	0.997179	Di Atas
0	11	32	32	0.997555	Di Atas
0	12	32	32	0.999043	Di Atas
0	13	32	32	0.998519	Di Atas
0	14	32	32	0.999817	Di Atas
0	15	32	32	0.997742	Di Atas
0	16	32	32	0.999429	Di Atas
0	17	32	32	0.997069	Di Atas
0	18	32	32	0.997992	Di Atas
0	19	32	32	0.996346	Di Atas
0	20	32	32	0.996543	Di Atas
0	21	32	32	0.999006	Di Atas
0	22	32	32	0.998424	Di Atas
0	23	32	32	0.99634	Di Atas
0	24	32	32	0.998342	Di Atas
0	25	32	32	0.998058	Di Atas
0	26	32	32	0.999114	Di Atas
0	27	32	32	0.99957	Di Atas
0	28	32	32	0.998725	Di Atas
0	29	32	32	0.998785	Di Atas
0	30	32	32	0.999309	Di Atas
0	31	32	32	0.999749	Di Atas
1	0	32	32	0.993179	Di Atas
1	1	32	32	0.990931	Di Atas
1	2	32	32	0.998288	Di Atas
1	3	32	32	0.996867	Di Atas
1	4	32	32	0.995972	Di Atas
1	5	32	32	0.99484	Di Atas
1	6	32	32	0.992275	Di Atas
1	7	32	32	0.990675	Di Atas
1	8	32	32	0.996055	Di Atas
1	9	32	32	0.996729	Di Atas

**Tabel 2 Hasil korelasi 2020-2021 (lanjutan)**

<b>Grid Baris</b>	<b>Grid Kolom</b>	<b>X Match</b>	<b>Y Match</b>	<b>Nilai Korelasi</b>	<b>Kategori</b>
1	10	32	32	0.998025	Di Atas
1	11	32	32	0.993413	Di Atas
1	12	32	32	0.993917	Di Atas
1	13	32	32	0.993465	Di Atas
1	14	32	32	0.997191	Di Atas
1	15	32	32	0.998942	Di Atas
1	16	32	32	0.998915	Di Atas
1	17	32	32	0.996802	Di Atas
1	18	32	32	0.997867	Di Atas
1	19	32	32	0.995635	Di Atas
1	20	32	32	0.995243	Di Atas
1	21	32	32	0.996481	Di Atas
1	22	32	32	0.996633	Di Atas
1	23	32	32	0.997244	Di Atas
1	24	32	32	0.99683	Di Atas
1	25	32	32	0.997326	Di Atas
1	26	32	32	0.999912	Di Atas
1	27	32	32	0.999502	Di Atas
1	28	32	32	1	Sempurna
1	29	32	32	0.998931	Di Atas
1	30	32	32	1	Sempurna
1	31	32	32	0.998363	Di Atas
2	0	32	32	0.992824	Di Atas
2	1	32	32	0.992588	Di Atas
2	2	32	32	0.999165	Di Atas
2	3	32	32	0.998533	Di Atas
2	4	32	32	0.997312	Di Atas
2	5	32	32	0.997355	Di Atas
2	6	32	32	0.994361	Di Atas
2	7	32	32	0.990013	Di Atas
2	8	32	32	0.988339	Di Atas
2	9	32	32	0.992158	Di Atas
2	10	32	32	0.995509	Di Atas
2	11	32	32	0.991052	Di Atas
2	12	32	32	0.987706	Di Atas
2	13	32	32	0.986939	Di Atas
2	14	32	32	0.993827	Di Atas
2	15	32	32	0.994362	Di Atas
2	16	32	32	0.995393	Di Atas
2	17	32	32	0.996092	Di Atas
2	18	32	32	0.997612	Di Atas
2	19	32	32	0.997278	Di Atas
2	20	32	32	0.996199	Di Atas

**Tabel 3 Hasil korelasi 2020-2021 (lanjutan)**

Grid Baris	Grid Kolom	X Match	Y Match	Nilai Korelasi	Kategori
2	21	32	32	0.998125	Di Atas
2	22	32	32	0.997804	Di Atas
2	23	32	32	0.997191	Di Atas
2	24	32	32	0.995349	Di Atas
2	25	32	32	0.995138	Di Atas
2	26	32	32	0.997542	Di Atas
2	27	32	32	0.998324	Di Atas
2	28	32	32	0.998758	Di Atas
2	29	32	32	0.999287	Di Atas
2	30	32	32	0.99978	Di Atas
2	31	32	32	1	Sempurna
3	0	32	32	0.99164	Di Atas
3	1	32	32	0.992847	Di Atas
3	2	32	32	0.994459	Di Atas
3	3	32	32	0.998054	Di Atas

**Tabel 4 Hasil korelasi 2021-2022**

Grid Baris	Grid Kolom	X Match	Y Match	Nilai Korelasi	Kategori
0	0	32	32	0.992465	Di Atas
0	1	32	32	0.993416	Di Atas
0	2	32	32	0.995786	Di Atas
0	3	32	32	0.996256	Di Atas
0	4	32	32	0.995939	Di Atas
0	5	32	32	0.997452	Di Atas
0	6	32	32	0.996585	Di Atas
0	7	32	32	0.997868	Di Atas
0	8	32	32	1	Sempurna
0	9	32	32	0.999398	Di Atas
0	10	32	32	1	Sempurna
0	11	32	32	0.99818	Di Atas
0	12	32	32	0.997295	Di Atas
0	13	32	32	0.99938	Di Atas
0	14	32	32	1	Sempurna
0	15	32	32	1	Sempurna
0	16	32	32	0.998439	Di Atas
0	17	32	32	1	Sempurna
0	18	32	32	0.998524	Di Atas
0	19	32	32	0.998316	Di Atas
0	20	32	32	0.998495	Di Atas
0	21	32	32	0.998535	Di Atas
0	22	32	32	0.999173	Di Atas

**Tabel 5 Hasil korelasi 2021-2022 (lanjutan)**

<b>Grid Baris</b>	<b>Grid Kolom</b>	<b>X Match</b>	<b>Y Match</b>	<b>Nilai Korelasi</b>	<b>Kategori</b>
0	23	32	32	0.997455	Di Atas
0	24	32	32	0.995981	Di Atas
0	25	32	32	0.999794	Di Atas
0	26	32	32	0.998178	Di Atas
0	27	32	32	0.998901	Di Atas
0	28	32	32	0.99858	Di Atas
0	29	32	32	0.998853	Di Atas
0	30	32	32	0.998759	Di Atas
0	31	32	32	0.999082	Di Atas
1	0	32	32	0.994339	Di Atas
1	1	32	32	0.994126	Di Atas
1	2	32	32	0.996438	Di Atas
1	3	32	32	0.998639	Di Atas
1	4	32	32	0.997121	Di Atas
1	5	32	32	0.99712	Di Atas
1	6	32	32	0.996673	Di Atas
1	7	32	32	0.996454	Di Atas
1	8	32	32	0.999646	Di Atas
1	9	32	32	0.999217	Di Atas
1	10	32	32	0.997838	Di Atas
1	11	32	32	0.995952	Di Atas
1	12	32	32	0.998672	Di Atas
1	13	32	32	0.996739	Di Atas
1	14	32	32	0.997837	Di Atas
1	15	32	32	0.997684	Di Atas
1	16	32	32	0.99989	Di Atas
1	17	32	32	0.999453	Di Atas
1	18	32	32	1	Sempurna
1	19	32	32	0.999032	Di Atas
1	20	32	32	1	Sempurna
1	21	32	32	0.997406	Di Atas
1	22	32	32	0.998238	Di Atas
1	23	32	32	0.995825	Di Atas
1	24	32	32	0.995356	Di Atas
1	25	32	32	0.998191	Di Atas
1	26	32	32	0.999538	Di Atas
1	27	32	32	0.998257	Di Atas
1	28	32	32	0.998631	Di Atas
1	29	32	32	0.999003	Di Atas
1	30	32	32	0.999356	Di Atas
1	31	32	32	0.998851	Di Atas
2	0	32	32	0.998647	Di Atas
2	1	32	32	0.997315	Di Atas

**Tabel 6 Hasil korelasi 2021-2022 (lanjutan)**

Grid Baris	Grid Kolom	X Match	Y Match	Nilai Korelasi	Kategori
2	2	32	32	0.999551	Di Atas
2	3	32	32	0.999322	Di Atas
2	4	32	32	0.998552	Di Atas
2	6	32	32	0.998789	Di Atas
2	7	32	32	0.998961	Di Atas
2	8	32	32	0.998486	Di Atas
2	9	32	32	0.997459	Di Atas
2	10	32	32	0.999329	Di Atas
2	11	32	32	0.992338	Di Atas
2	12	32	32	0.992741	Di Atas
2	13	32	32	0.994082	Di Atas
2	14	32	32	0.997677	Di Atas
2	15	32	32	0.999941	Di Atas
2	16	32	32	0.998723	Di Atas
2	17	32	32	0.99828	Di Atas
2	18	32	32	0.999891	Di Atas
2	19	32	32	0.998145	Di Atas
2	20	32	32	0.999438	Di Atas
2	21	32	32	0.99961	Di Atas
2	22	32	32	0.999113	Di Atas
2	23	32	32	0.996513	Di Atas
2	24	32	32	0.996177	Di Atas
2	25	32	32	0.995027	Di Atas
2	26	32	32	0.996754	Di Atas
2	27	32	32	0.998564	Di Atas
2	28	32	32	0.999276	Di Atas
2	29	32	32	0.999478	Di Atas
2	30	32	32	0.999806	Di Atas
2	31	32	32	0.999464	Di Atas
3	0	32	32	0.997263	Di Atas
3	1	32	32	0.998756	Di Atas
3	2	32	32	0.998007	Di Atas
3	3	32	32	0.99955	Di Atas

**Tabel 7 Hasil korelasi 2022-2023**

Grid Baris	Grid Kolom	X Match	Y Match	Nilai Korelasi	Kategori
0	0	32	32	0.992221	Di Atas
0	1	32	32	0.994667	Di Atas
0	2	32	32	0.995351	Di Atas
0	3	32	32	0.997981	Di Atas
0	4	32	32	0.996511	Di Atas

**Tabel 8 Hasil korelasi 2022-2023 (lanjutan)**

<b>Grid Baris</b>	<b>Grid Kolom</b>	<b>X Match</b>	<b>Y Match</b>	<b>Nilai Korelasi</b>	<b>Kategori</b>
0	5	32	32	0.997959	Di Atas
0	6	32	32	0.996414	Di Atas
0	7	32	32	0.998007	Di Atas
0	8	32	32	0.998702	Di Atas
0	9	32	32	1	Sempurna
0	10	32	32	0.99917	Di Atas
0	11	32	32	0.995194	Di Atas
0	12	32	32	0.995884	Di Atas
0	13	32	32	0.996482	Di Atas
0	14	32	32	0.996238	Di Atas
0	15	32	32	0.996953	Di Atas
0	16	32	32	0.998095	Di Atas
0	17	32	32	0.975966	Di Atas
0	18	32	32	0.973521	Di Atas
0	19	32	32	0.972518	Di Atas
0	20	32	32	0.99607	Di Atas
0	21	32	32	0.996224	Di Atas
0	22	32	32	0.996065	Di Atas
0	23	32	32	0.998174	Di Atas
0	24	32	32	0.998667	Di Atas
0	25	32	32	1	Sempurna
0	26	32	32	1	Sempurna
0	27	32	32	0.998563	Di Atas
0	28	32	32	0.998909	Di Atas
0	29	32	32	0.998989	Di Atas
0	30	32	32	0.99877	Di Atas
0	31	32	32	0.998791	Di Atas
1	0	32	32	0.993564	Di Atas
1	1	32	32	0.993747	Di Atas
1	2	32	32	0.996117	Di Atas
1	3	32	32	0.998711	Di Atas
1	4	32	32	0.997741	Di Atas
1	5	32	32	0.996964	Di Atas
1	6	32	32	0.994621	Di Atas
1	7	32	32	0.996051	Di Atas
1	8	32	32	0.997112	Di Atas
1	9	32	32	0.997921	Di Atas
1	10	32	32	0.996817	Di Atas
1	11	32	32	0.999316	Di Atas
1	12	32	32	0.994692	Di Atas
1	13	32	32	0.996778	Di Atas
1	14	32	32	0.996095	Di Atas
1	15	32	32	0.997285	Di Atas
1	16	32	32	0.995169	Di Atas

**Tabel 9 Hasil korelasi 2022-2023 (lanjutan)**

<b>Grid Baris</b>	<b>Grid Kolom</b>	<b>X Match</b>	<b>Y Match</b>	<b>Nilai Korelasi</b>	<b>Kategori</b>
1	17	32	32	0.997413	Di Atas
1	18	32	32	0.99913	Di Atas
1	19	32	32	0.997753	Di Atas
1	20	32	32	0.997578	Di Atas
1	21	32	32	0.99842	Di Atas
1	22	32	32	0.996273	Di Atas
1	23	32	32	0.994884	Di Atas
1	24	32	32	0.995421	Di Atas
1	25	32	32	0.996395	Di Atas
1	26	32	32	0.997655	Di Atas
1	27	32	32	0.99895	Di Atas
1	28	32	32	0.998749	Di Atas
1	29	32	32	0.998888	Di Atas
1	30	32	32	0.998584	Di Atas
1	31	32	32	0.998503	Di Atas
2	0	32	32	0.998745	Di Atas
2	1	32	32	0.998355	Di Atas
2	2	32	32	0.99864	Di Atas
2	3	32	32	0.998547	Di Atas
2	4	32	32	0.998592	Di Atas
2	5	32	32	0.997721	Di Atas
2	6	32	32	0.996938	Di Atas
2	7	32	32	0.996355	Di Atas
2	8	32	32	0.994997	Di Atas
2	9	32	32	0.995553	Di Atas
2	10	32	32	0.99705	Di Atas
2	11	32	32	0.999253	Di Atas
2	12	32	32	0.996198	Di Atas
2	13	32	32	0.997677	Di Atas
2	14	32	32	0.995245	Di Atas
2	15	32	32	0.996074	Di Atas
2	16	32	32	0.995779	Di Atas
2	17	32	32	0.995008	Di Atas
2	18	32	32	0.997344	Di Atas
2	19	32	32	0.999044	Di Atas
2	20	32	32	0.999814	Di Atas
2	21	32	32	0.999958	Di Atas
2	22	32	32	0.999178	Di Atas
2	23	32	32	0.997285	Di Atas
2	24	32	32	0.994981	Di Atas
2	25	32	32	0.995924	Di Atas
2	26	32	32	0.997034	Di Atas
2	27	32	32	0.998709	Di Atas
2	28	32	32	0.998574	Di Atas

**Tabel 10 Hasil korelasi 2022-2023 (lanjutan)**

Grid Baris	Grid Kolom	X Match	Y Match	Nilai Korelasi	Kategori
3	2	32	32	0.998907	Di Atas
3	3	32	32	0.99874	Di Atas
2	29	32	32	0.999878	Di Atas
2	30	32	32	1	Sempurna
2	31	32	32	0.998775	Di Atas
3	0	32	32	0.997334	Di Atas
3	1	32	32	0.996859	Di Atas

**Tabel 11 Hasil korelasi 2023-2024**

Grid Baris	Grid Kolom	X Match	Y Match	Nilai Korelasi	Kategori
0	0	32	32	0.825614	Di Atas
0	1	32	32	0.788605	Di Atas
0	2	32	32	0.479239	Di Atas
0	3	32	32	0.995361	Di Atas
0	4	32	32	0.995546	Di Atas
0	5	32	32	0.994542	Di Atas
0	6	32	32	0.995764	Di Atas
0	7	32	32	0.999037	Di Atas
0	8	32	32	0.998159	Di Atas
0	9	32	32	0.998318	Di Atas
0	10	32	32	0.997022	Di Atas
0	11	32	32	0.997871	Di Atas
0	12	32	32	0.995228	Di Atas
0	13	32	32	0.996149	Di Atas
0	14	32	32	0.995577	Di Atas
0	15	32	32	0.996447	Di Atas
0	16	32	32	0.996833	Di Atas
0	17	32	32	0.972998	Di Atas
0	18	32	32	0.973074	Di Atas
0	19	32	32	0.972305	Di Atas
0	20	32	32	0.997162	Di Atas
0	21	32	32	0.998052	Di Atas
0	22	32	32	0.999432	Di Atas
0	23	32	32	0.998492	Di Atas
0	24	32	32	0.998857	Di Atas
0	25	32	32	0.99996	Di Atas
0	26	32	32	0.999925	Di Atas
0	27	32	32	0.998942	Di Atas
0	28	32	32	0.999134	Di Atas
0	29	32	32	0.999257	Di Atas
0	30	32	32	0.999247	Di Atas

**Tabel 12 Hasil korelasi 2023-2024 (lanjutan)**

<b>Grid Baris</b>	<b>Grid Kolom</b>	<b>X Match</b>	<b>Y Match</b>	<b>Nilai Korelasi</b>	<b>Kategori</b>
0	31	32	32	0.99846	Di Atas
1	0	32	32	0.789924	Di Atas
1	1	32	32	0.586107	Di Atas
1	2	32	32	0.958357	Di Atas
1	3	32	32	0.992597	Di Atas
1	4	32	32	0.991296	Di Atas
1	5	32	32	0.991741	Di Atas
1	6	32	32	0.98892	Di Atas
1	7	32	32	0.991997	Di Atas
1	8	32	32	0.998306	Di Atas
1	9	32	32	0.997074	Di Atas
1	10	32	32	0.996202	Di Atas
1	11	32	32	0.994879	Di Atas
1	12	32	32	0.994851	Di Atas
1	13	32	32	0.997359	Di Atas
1	14	32	32	0.994695	Di Atas
1	15	32	32	0.996508	Di Atas
1	16	32	32	0.995042	Di Atas
1	17	32	32	0.997206	Di Atas
1	18	32	32	0.998532	Di Atas
1	19	32	32	0.997727	Di Atas
1	20	32	32	0.997234	Di Atas
1	21	32	32	0.998999	Di Atas
1	22	32	32	0.9975	Di Atas
1	23	32	32	0.995886	Di Atas
1	24	32	32	0.994673	Di Atas
1	25	32	32	0.99578	Di Atas
1	26	32	32	1	Sempurna
1	27	32	32	0.999656	Di Atas
1	28	32	32	0.999552	Di Atas
1	29	32	32	0.999121	Di Atas
1	30	32	32	1	Sempurna
1	31	32	32	0.999662	Di Atas
2	0	32	32	0.632526	Di Atas
2	1	32	32	0.181677	Di Bawah
2	2	32	32	0.913422	Di Atas
2	3	32	32	0.955553	Di Atas
2	4	32	32	0.987018	Di Atas
2	5	32	32	0.98844	Di Atas
2	6	32	32	0.987547	Di Atas
2	7	32	32	0.986698	Di Atas
2	8	32	32	0.991347	Di Atas
2	9	32	32	0.994373	Di Atas
2	10	32	32	0.995537	Di Atas

**Tabel 13 Hasil korelasi 2023-2024 (lanjutan)**

<b>Grid Baris</b>	<b>Grid Kolom</b>	<b>X Match</b>	<b>Y Match</b>	<b>Nilai Korelasi</b>	<b>Kategori</b>
2	11	32	32	0.995134	Di Atas
2	12	32	32	0.994757	Di Atas
2	13	32	32	0.995335	Di Atas
2	14	32	32	0.996967	Di Atas
2	15	32	32	0.99495	Di Atas
2	16	32	32	0.993612	Di Atas
2	17	32	32	0.994515	Di Atas
2	18	32	32	0.997648	Di Atas
2	19	32	32	0.999494	Di Atas
2	20	32	32	0.999511	Di Atas
2	21	32	32	1	Sempurna
2	22	32	32	0.998545	Di Atas
2	23	32	32	0.995903	Di Atas
2	24	32	32	0.992787	Di Atas
2	25	32	32	0.993011	Di Atas
2	26	32	32	0.998549	Di Atas
2	27	32	32	0.998114	Di Atas
2	28	32	32	1	Sempurna
2	29	32	32	1	Sempurna
2	30	32	32	0.999341	Di Atas
2	31	32	32	1	Sempurna
3	0	32	32	0.291525	Di Bawah
3	1	32	32	0.927425	Di Atas
3	2	32	32	0.927194	Di Atas
3	3	32	32	0.953844	Di Atas

**LAMPIRAN B. Sample Hasil Arah Deformasi 100 Data Pertama**  
**Tabel 14 Hasil Perhitungan Arah Deformasi 2020 - 2021**

<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Sudut (°)</b>	<b>Arah Deformasi</b>
48	48	146.3099	Barat Laut
72	48	140.1944	Barat Laut
96	48	141.2258	Barat Laut
120	48	145.008	Barat Laut
144	48	114.2277	Barat Laut
168	48	138.5215	Barat Laut
192	48	102.0948	Utara
216	48	110.8068	Utara
240	48	149.0362	Barat Laut
264	48	146.0489	Barat Laut
288	48	139.3987	Barat Laut
312	48	98.88066	Utara
336	48	184.4926	Barat
360	48	126.8699	Barat Laut
384	48	128.4802	Barat Laut
408	48	128.6598	Barat Laut
432	48	126.8699	Barat Laut
456	48	123.6901	Barat Laut
480	48	113.1986	Barat Laut
504	48	108.4349	Utara
528	48	126.8699	Barat Laut
552	48	315	Tenggara
576	48	270	Selatan
600	48	253.3008	Selatan
624	48	192.5288	Barat
648	48	185.7106	Barat
672	48	180	Barat
696	48	231.3402	Barat Daya
720	48	225	Barat Daya
744	48	239.0362	Barat Daya
768	48	180	Barat
792	48	180	Barat
48	72	143.5308	Barat Laut
72	72	140.1944	Barat Laut
96	72	143.9306	Barat Laut
120	72	139.1596	Barat Laut
144	72	136.1458	Barat Laut
168	72	135.9548	Barat Laut
192	72	120.0686	Barat Laut
216	72	108.4349	Utara
240	72	130.5526	Barat Laut
264	72	135.3431	Barat Laut

**Tabel 15 Hasil Perhitungan Arah Deformasi 2020 – 2021 (lanjutan)**

<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Sudut (°)</b>	<b>Arah Deformasi</b>
288	72	135.6821	Barat Laut
312	72	97.12502	Utara
336	72	90.57873	Utara
360	72	110.7941	Utara
384	72	116.5651	Barat Laut
408	72	116.5651	Barat Laut
432	72	119.6237	Barat Laut
456	72	128.6598	Barat Laut
480	72	123.6901	Barat Laut
504	72	116.5651	Barat Laut
528	72	114.8637	Barat Laut
552	72	147.1715	Barat Laut
576	72	180	Barat
600	72	185.7106	Barat
624	72	225	Barat Daya
648	72	185.7106	Barat
672	72	185.1944	Barat
696	72	180	Barat
720	72	228.0128	Barat Daya
744	72	228.0128	Barat Daya
768	72	180	Barat
792	72	180	Barat
48	96	125.263	Barat Laut
72	96	135.8185	Barat Laut
96	96	139.3987	Barat Laut
120	96	136.7624	Barat Laut
144	96	130.6013	Barat Laut
168	96	130.8404	Barat Laut
192	96	117.8015	Barat Laut
216	96	128.2338	Barat Laut
240	96	130.3141	Barat Laut
264	96	130.0834	Barat Laut
288	96	129.8056	Barat Laut
312	96	118.3008	Barat Laut
336	96	90	Utara
360	96	109.6986	Utara
384	96	74.38901	Utara
408	96	109.5923	Utara
432	96	116.5651	Barat Laut
456	96	129.8056	Barat Laut
480	96	140.1944	Barat Laut
504	96	135	Barat Laut
528	96	120.9638	Barat Laut

**Tabel 16 Hasil Perhitungan Arah Deformasi 2020 – 2021 (lanjutan)**

<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Sudut (°)</b>	<b>Arah Deformasi</b>
552	96	122.3196	Barat Laut
576	96	145.6698	Barat Laut
600	96	154.6538	Barat Laut
624	96	233.1301	Barat Daya
648	96	190.3048	Barat
672	96	190.3048	Barat
696	96	175.6013	Barat
720	96	233.9726	Barat Daya
744	96	228.3665	Barat Daya
768	96	180	Barat
792	96	225	Barat Daya
48	120	150.3763	Barat Laut
72	120	139.8739	Barat Laut
96	120	139.7998	Barat Laut
120	120	135.8185	Barat Laut

**Tabel 17 Hasil Perhitungan Arah Deformasi 2021 – 2022**

<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Sudut (°)</b>	<b>Arah Deformasi</b>
48	48	225	Barat Daya
72	48	336.3706	Tenggara
96	48	225	Barat Daya
120	48	189.4623	Barat
144	48	277.125	Selatan
168	48	276.3402	Selatan
192	48	276.3402	Selatan
216	48	270	Selatan
240	48	317.9508	Tenggara
264	48	315	Tenggara
288	48	313.7811	Tenggara
312	48	307.875	Tenggara
336	48	296.5651	Tenggara
360	48	333.4349	Tenggara
384	48	333.4349	Tenggara
408	48	333.4349	Tenggara
432	48	333.4349	Tenggara
456	48	333.4349	Tenggara
480	48	0	Timur
504	48	0	Timur
528	48	0	Timur
552	48	0	Timur
576	48	0	Timur

**Tabel 18 Hasil Perhitungan Arah Deformasi 2021 – 2022 (lanjutan)**

<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Sudut (°)</b>	<b>Arah Deformasi</b>
600	48	357.1376	Timur
624	48	356.9872	Timur
648	48	353.2902	Timur
672	48	330.9454	Tenggara
696	48	330.9454	Tenggara
720	48	0	Timur
744	48	355.2364	Timur
768	48	315	Tenggara
792	48	0	Timur
48	72	225	Barat Daya
72	72	225	Barat Daya
96	72	225	Barat Daya
120	72	180	Barat
144	72	315	Tenggara
168	72	276.3402	Selatan
192	72	270	Selatan
216	72	341.2742	Timur
240	72	319.8645	Tenggara
264	72	319.9697	Tenggara
288	72	325.3591	Tenggara
312	72	336.1941	Tenggara
336	72	296.5651	Tenggara
360	72	0	Timur
384	72	0	Timur
408	72	0	Timur
432	72	0	Timur
456	72	0	Timur
480	72	0	Timur
504	72	0	Timur
528	72	0	Timur
552	72	5.194429	Timur
576	72	0	Timur
600	72	341.5651	Timur
624	72	356.9872	Timur
648	72	356.9872	Timur
672	72	0	Timur
696	72	0	Timur
720	72	0	Timur
744	72	0	Timur
768	72	354.8056	Timur
792	72	0	Timur
48	96	236.7683	Barat Daya
72	96	225	Barat Daya

**Tabel 19 Hasil Perhitungan Arah Deformasi 2021 – 2022 (lanjutan)**

<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Sudut (°)</b>	<b>Arah Deformasi</b>
96	96	225	Barat Daya
120	96	135	Barat Laut
144	96	225	Barat Daya
168	96	252.1213	Selatan
192	96	282.0948	Selatan
216	96	286.6992	Selatan
240	96	332.5924	Tenggara
264	96	331.7626	Tenggara
288	96	325.6539	Tenggara
312	96	0	Timur
336	96	0	Timur
360	96	0	Timur
384	96	315	Tenggara
408	96	0	Timur
432	96	0	Timur
456	96	0	Timur
480	96	0	Timur
504	96	0	Timur
528	96	333.4349	Tenggara
552	96	333.4349	Tenggara
576	96	339.2277	Timur
600	96	341.5651	Timur
624	96	341.5651	Timur
648	96	0	Timur
672	96	357.9546	Timur
696	96	0	Timur
720	96	3.012788	Timur
744	96	0	Timur
768	96	0	Timur
792	96	354.2894	Timur
48	120	235.8855	Barat Daya
72	120	244.5367	Barat Daya
96	120	270	Selatan
120	120	273.0128	Selatan

**Tabel 20 Hasil Perhitungan Arah Deformasi 2022 – 2023**

<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Sudut (°)</b>	<b>Arah Deformasi</b>
48	48	0	Timur
72	48	90	Utara
96	48	110.7723	Utara
120	48	109.0256	Utara

**Tabel 21 Hasil Perhitungan Arah Deformasi 2022 – 2023 (lanjutan)**

<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Sudut (°)</b>	<b>Arah Deformasi</b>
144	48	90	Utara
168	48	63.43495	Timur Laut
192	48	90	Utara
216	48	90	Utara
240	48	347.9052	Timur
264	48	315	Tenggara
288	48	311.1859	Tenggara
312	48	239.3227	Barat Daya
336	48	270	Selatan
360	48	133.5312	Barat Laut
384	48	140.7106	Barat Laut
408	48	180	Barat
432	48	180	Barat
456	48	0	Timur
480	48	90	Utara
504	48	63.43495	Timur Laut
528	48	63.43495	Timur Laut
552	48	64.65382	Timur Laut
576	48	41.98721	Timur Laut
600	48	45	Timur Laut
624	48	51.34019	Timur Laut
648	48	45	Timur Laut
672	48	45	Timur Laut
696	48	42.27369	Timur Laut
720	48	42.51045	Timur Laut
744	48	42.27369	Timur Laut
768	48	45	Timur Laut
792	48	59.03624	Timur Laut
48	72	82.23483	Utara
72	72	90	Utara
96	72	106.1892	Utara
120	72	106.1892	Utara
144	72	110.7723	Utara
168	72	108.4349	Utara
192	72	91.90915	Utara
216	72	90	Utara
240	72	32.27564	Timur Laut
264	72	36.38435	Timur Laut
288	72	34.38034	Timur Laut
312	72	40.60129	Timur Laut
336	72	90	Utara
360	72	90	Utara
384	72	93.01279	Utara

**Tabel 22 Hasil Perhitungan Arah Deformasi 2022 – 2023 (lanjutan)**

<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Sudut (°)</b>	<b>Arah Deformasi</b>
408	72	151.6992	Barat Laut
432	72	180	Barat
456	72	315	Tenggara
480	72	0	Timur
504	72	63.43495	Timur Laut
528	72	63.43495	Timur Laut
552	72	64.65382	Timur Laut
576	72	84.80557	Utara
600	72	41.98721	Timur Laut
624	72	51.34019	Timur Laut
648	72	45	Timur Laut
672	72	45	Timur Laut
696	72	45	Timur Laut
720	72	39.80557	Timur Laut
744	72	42.27369	Timur Laut
768	72	42.27369	Timur Laut
792	72	48.01279	Timur Laut
48	96	88.15239	Utara
72	96	90	Utara
96	96	108.4349	Utara
120	96	110.7723	Utara
144	96	106.1892	Utara
168	96	137.7263	Barat Laut
192	96	102.0948	Utara
216	96	161.5651	Barat
240	96	46.39718	Timur Laut
264	96	41.98721	Timur Laut
288	96	43.72697	Timur Laut
312	96	91.97493	Utara
336	96	84.80557	Utara
360	96	90	Utara
384	96	64.65382	Timur Laut
408	96	120.0686	Barat Laut
432	96	154.5367	Barat Laut
456	96	270	Selatan
480	96	315	Tenggara
504	96	63.43495	Timur Laut
528	96	90	Utara
552	96	116.5651	Barat Laut
576	96	120.0686	Barat Laut
600	96	96.00901	Utara
624	96	45	Timur Laut
648	96	45	Timur Laut

**Tabel 23 Hasil Perhitungan Arah Deformasi 2022 – 2023 (lanjutan)**

<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Sudut (°)</b>	<b>Arah Deformasi</b>
672	96	45	Timur Laut
696	96	45	Timur Laut
720	96	45	Timur Laut
744	96	45	Timur Laut
768	96	42.27369	Timur Laut
792	96	45	Timur Laut
48	120	74.98164	Utara
72	120	86.30861	Utara
96	120	106.1892	Utara
120	120	106.1892	Utara

**Tabel 24 Hasil Perhitungan Arah Deformasi 2023 - 2024**

<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Sudut (°)</b>	<b>Arah Deformasi</b>
48	48	127.8283	Barat Laut
72	48	7.47733	Timur
96	48	340.9065	Timur
120	48	312.0643	Tenggara
144	48	303.6901	Tenggara
168	48	243.4349	Barat Daya
192	48	239.9314	Barat Daya
216	48	244.5367	Barat Daya
240	48	275.6176	Selatan
264	48	276.7662	Selatan
288	48	274.844	Selatan
312	48	273.8785	Selatan
336	48	51.17992	Timur Laut
360	48	0	Timur
384	48	0	Timur
408	48	87.27369	Utara
432	48	90	Utara
456	48	180	Barat
480	48	0	Timur
504	48	180	Barat
528	48	180	Barat
552	48	270	Selatan
576	48	221.9872	Barat Daya
600	48	228.0128	Barat Daya
624	48	228.0128	Barat Daya
648	48	264.2894	Selatan
672	48	0	Timur
696	48	0	Timur

**Tabel 25 Hasil Perhitungan Arah Deformasi 2023 – 2024 (lanjutan)**

<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Sudut (°)</b>	<b>Arah Deformasi</b>
720	48	180	Barat
744	48	0	Timur
768	48	0	Timur
792	48	180	Barat
48	72	293.3281	Tenggara
72	72	45	Timur Laut
96	72	82.87498	Utara
120	72	329.1001	Tenggara
144	72	273.0128	Selatan
168	72	298.3008	Tenggara
192	72	282.0948	Selatan
216	72	250.3462	Selatan
240	72	274.5378	Selatan
264	72	275.6176	Selatan
288	72	274.6106	Selatan
312	72	255.0049	Selatan
336	72	276.3402	Selatan
360	72	264.8056	Selatan
384	72	225	Barat Daya
408	72	84.80557	Utara
432	72	90	Utara
456	72	110.7723	Utara
480	72	0	Timur
504	72	0	Timur
528	72	174.2894	Barat
552	72	225	Barat Daya
576	72	227.7263	Barat Daya
600	72	227.7263	Barat Daya
624	72	228.0128	Barat Daya
648	72	276.3402	Selatan
672	72	0	Timur
696	72	90	Utara
720	72	0	Timur
744	72	180	Barat
768	72	0	Timur
792	72	135	Barat Laut
48	96	238.5125	Barat Daya
72	96	225	Barat Daya
96	96	346.3013	Timur
120	96	351.9268	Timur
144	96	126.5631	Barat Laut
168	96	270	Selatan
192	96	219.6855	Barat Daya

**Tabel 26 Hasil Perhitungan Arah Deformasi 2023 – 2024 (lanjutan)**

<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Sudut (°)</b>	<b>Arah Deformasi</b>
216	96	235.8403	Barat Daya
240	96	307.2348	Tenggara
264	96	295.8664	Tenggara
288	96	267.0492	Selatan
312	96	45	Timur Laut
336	96	45	Timur Laut
360	96	173.6598	Barat
384	96	225	Barat Daya
408	96	284.0362	Selatan
432	96	45	Timur Laut
456	96	65.77225	Timur Laut
480	96	87.27369	Utara
504	96	135	Barat Laut
528	96	264.2894	Selatan
552	96	264.8056	Selatan
576	96	268.1524	Selatan
600	96	207.7585	Barat Daya
624	96	205.3462	Barat Daya
648	96	276.3402	Selatan
672	96	180	Barat
696	96	225	Barat Daya
720	96	0	Timur
744	96	0	Timur
768	96	0	Timur
792	96	135	Barat Laut
48	120	208.831	Barat Daya
72	120	225	Barat Daya
96	120	315	Tenggara
120	120	348.4399	Timur