

ANALISIS PENURUNAN MUKA TANAH (*LAND SUBSIDENCE*) DI PULAU JAWA BAGIAN UTARA MENGGUNAKAN DATA CORS TAHUN 2021-2025

TEDY MAS BUDIMAN¹, SONI DARMAWAN², HENRI KUNCORO³

**¹Program Studi Teknik Geodesi, Fakultas Teknik Sipil & Perencanaan,
Institut Teknologi Nasional Bandung, Jl. PPH. Hasan Mustapa No.23 Kota
Bandung, Jawa Barat**

Email tedy.mas@mhs.itenas.ac.id

ABSTRAK

Penurunan muka tanah merupakan permasalahan serius yang berdampak pada wilayah Indonesia, khususnya di kawasan utara Pulau Jawa. Fenomena ini telah tercatat secara signifikan di kota-kota besar seperti Jakarta, Semarang, dan Pekalongan, menyebabkan kerusakan infrastruktur, peningkatan risiko banjir rob, dan tantangan dalam penataan ruang. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pola perubahan penurunan muka tanah di wilayah utara Pulau Jawa dalam rentang waktu 2021–2025 berdasarkan data yang diperoleh dari sistem Continuously Operating Reference Station (CORS). Data GNSS diolah menggunakan perangkat lunak GAMIT untuk estimasi posisi harian, kemudian dilanjutkan dengan GLOBK untuk memperoleh kecepatan vertikal. Metode Precise Point Positioning (PPP) dan Kalman Filtering digunakan guna meningkatkan akurasi data serta meminimalisir gangguan atmosfer dan pergeseran tektonik. Hasil analisis menunjukkan bahwa seluruh titik pengamatan mengalami penurunan muka tanah (subsidence) dengan kecepatan vertikal berkisar antara –5,15 mm/tahun hingga –9,94 mm/tahun. Stasiun CPAI (Pati) mencatat penurunan tertinggi sebesar –9,94 mm/tahun, sedangkan penurunan terendah tercatat di stasiun CREM (Madura) sebesar –5,15 mm/tahun. Secara spasial, wilayah pantura Jawa seperti Jakarta Utara, Cirebon, Semarang, dan Surabaya menunjukkan tingkat penurunan yang lebih signifikan dibandingkan wilayah lainnya. Evaluasi kualitas data menunjukkan bahwa seluruh hasil pengolahan memenuhi kriteria teknis, yaitu $Fract < 0,10$ dan $WRMS < 10$ mm, yang mengindikasikan bahwa estimasi posisi dan kecepatan yang dihasilkan memiliki tingkat akurasi yang tinggi dan dapat diandalkan untuk analisis spasial dan pengambilan kebijakan mitigasi secara berkelanjutan.

Kata Kunci: Penurunan Muka Tanah, CORS, GNSS, GAMIT/GLOBK.

ABSTRACT

Land subsidence is a serious issue affecting many regions of Indonesia, particularly in the northern part of Java Island. This phenomenon has been significantly recorded in major cities such as Jakarta, Semarang, and Pekalongan, leading to infrastructure damage, increased tidal flood risk, and challenges in spatial planning. This study aims to analyze the pattern of land subsidence in the northern Java region over the period of 2021–2025 using data obtained from the Continuously

Operating Reference Station (CORS) system GNSS data were processed using GAMIT software for daily position estimation, followed by GLOBK to obtain vertical velocities. The Precise Point Positioning (PPP) method and Kalman Filtering were employed to improve data accuracy and minimize atmospheric disturbances and tectonic shifts. The analysis results indicate that all observation points experienced land subsidence, with vertical velocities ranging from -5.15 mm/year to -9.94 mm/year. The CPAI station (Pati) recorded the highest rate of subsidence at -9.94 mm/year, while the lowest was recorded at the CREM station (Madura) at -5.15 mm/year. Spatially, northern coastal areas such as North Jakarta, Cirebon, Semarang, and Surabaya exhibited more significant subsidence levels compared to other regions. Data quality evaluation shows that all processing results met technical criteria, with $Fract < 0.10$ and $WRMS < 10$ mm, indicating that the estimated positions and velocities have high accuracy and are reliable for spatial analysis and sustainable mitigation policy development.

Keyword: Land Subsidence, CORS, GNSS, GAMIT/GLOBK.

1. PENDAHULUAN

Fenomena penurunan muka tanah (*land subsidence*) merupakan salah satu isu geospasial yang kompleks dan semakin mendapat perhatian di Indonesia, khususnya di wilayah utara Pulau Jawa (Pantura). Kawasan ini dikenal sebagai daerah dengan tingkat urbanisasi tinggi, pertumbuhan penduduk pesat, serta aktivitas ekonomi yang intensif (Abidin dkk., 2011; Gumilar dkk., 2015). Berdasarkan hasil penelitian sebelumnya, penyebab utama penurunan muka tanah di wilayah ini meliputi: eksploitasi air tanah secara berlebihan, beban bangunan dan infrastruktur berat di atas lapisan tanah lunak, serta faktor geologi dan tektonik lokal yang mendukung terjadinya kompaksi lapisan tanah (Chaussard dkk., 2013; Ng dkk., 2012; Murdohardono & Sudarsono, 1998).

Penurunan ini tidak bersifat seragam, melainkan sangat bergantung pada karakteristik tanah, kedalaman akuifer, aktivitas manusia, dan tekanan pembangunan (Zebker dkk., 2010; Del Soldato dkk., 2018). Kota-kota besar seperti Jakarta, Semarang, Pekalongan, dan Surabaya telah lama menjadi objek studi terkait fenomena ini. Berdasarkan studi (Chaussard dkk. 2013), laju penurunan muka tanah di kota-kota tersebut bervariasi, dengan estimasi berkisar antara 1 hingga 20 cm per tahun. Nilai ini sangat signifikan dalam konteks geodetik dan tata ruang wilayah, terutama bila dikombinasikan dengan kenaikan muka air laut (*sea level rise*) (Syvitski dkk., 2009; Minderhoud dkk., 2019). Dampaknya sangat luas, termasuk: meningkatnya frekuensi dan intensitas banjir rob, kerusakan infrastruktur, gangguan sistem drainase dan sanitasi, hingga perubahan pola penggunaan lahan (Setyawan dkk., 2020; Phien-wej dkk., 2006).

Untuk mendeteksi dan memantau fenomena ini, berbagai metode geodetik dan penginderaan jauh telah digunakan oleh para peneliti. Metode tradisional seperti leveling memiliki akurasi tinggi, namun terbatas dari sisi cakupan spasial dan efisiensi waktu (Hanson dkk., 2010). Sementara itu, metode GPS geodetik memungkinkan pemantauan titik secara presisi dan efisien, serta *Interferometric Synthetic Aperture Radar* (InSAR) menawarkan cakupan spasial luas dan resolusi tinggi (Ferretti dkk., 2001; Hooper dkk., 2004). Namun, masing-masing metode memiliki keterbatasan teknis seperti sensitivitas terhadap vegetasi atau awan.

Penelitian ini secara khusus memanfaatkan data dari *Continuously Operating Reference Station* (CORS), bagian dari sistem pemantauan GNSS permanen dengan akurasi tinggi dan resolusi temporal harian. Dengan pendekatan ini, penelitian ini mampu mendeteksi dinamika vertikal

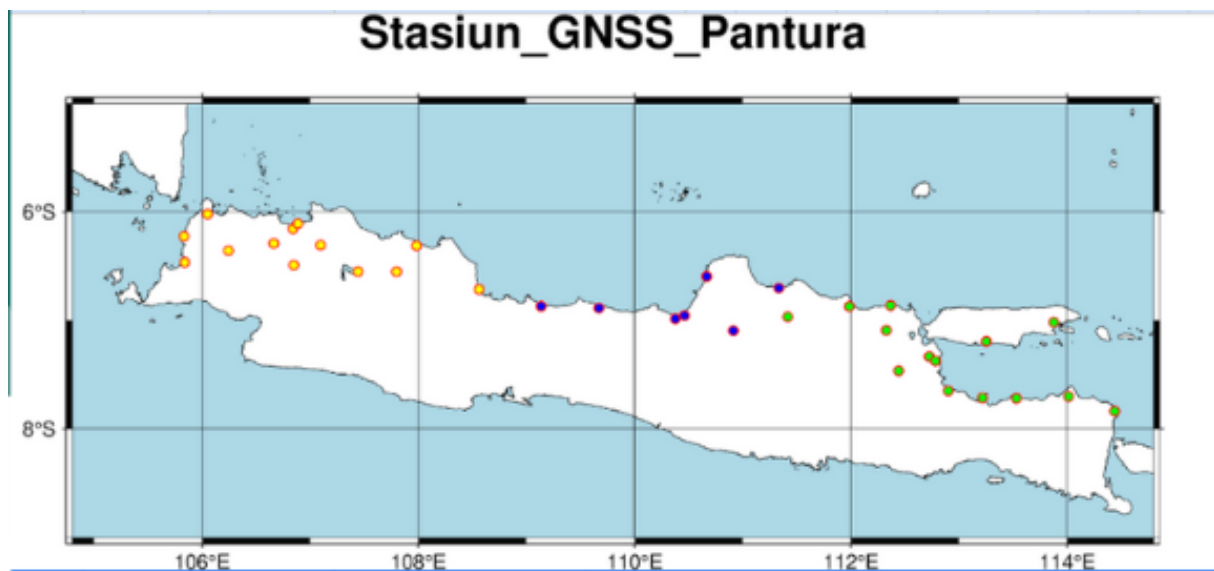
permukaan tanah secara kontinyu dan akurat (Blewitt dkk., 2018; King dkk., 2010). Data GNSS dari stasiun CORS diolah menggunakan kombinasi perangkat lunak ilmiah GAMIT/GLOBK, yang dikenal mampu menghasilkan estimasi deformasi vertikal dengan ketelitian hingga skala milimeter per tahun (Herring dkk., 2010; Ding dkk., 2021).

Dengan menggunakan data dari periode 2021–2025, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tren penurunan muka tanah di wilayah utara Jawa secara kuantitatif dan spasial, serta menyajikan pola penurunan berdasarkan hasil pemrosesan data CORS. Hasil ini diharapkan dapat menjadi dasar ilmiah dalam perencanaan tata ruang wilayah, pengendalian pemanfaatan air tanah, serta mendukung mitigasi risiko geohazard di kawasan padat penduduk yang rentan terhadap deformasi tanah.

2. DATA DAN METODE PENELITIAN

2.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian mencakup sebagian wilayah di utara Pulau Jawa **Gambar 1**, yang meliputi beberapa provinsi yaitu Banten, DKI Jakarta, Jawa Barat, Jawa Tengah, dan Jawa Timur. Wilayah ini dikenal sebagai kawasan padat aktivitas dengan karakteristik geografis yang relatif datar dan berdekatan langsung dengan Laut Jawa. Lokasi penelitian difokuskan pada zona-zona yang mengalami tekanan tinggi akibat urbanisasi, industrialisasi, serta eksploitasi air tanah yang berlebihan, seperti terlihat pada **Gambar 1**. Kawasan ini menjadi pusat berbagai kegiatan ekonomi seperti pelabuhan, perdagangan, industri, pemukiman padat penduduk, serta fasilitas transportasi dan logistik yang vital.



Gambar 1. Peta Wilayah Utara Pulau Jawa

Sumber: BIG (Badan Informasi Geospasial)

2.2 Data dan Peralatan Penelitian

Adapun data dan perangkat yang digunakan selama proses penelitian ini dalam rangka mengidentifikasi penurunan muka tanah di wilayah utara Pulau Jawa berdasarkan data CORS periode 2021–2025 adalah sebagai berikut:

1. Data yang digunakan:

- Data posisi harian GNSS dari stasiun CORS (*Continuously Operating Reference Station*) milik Badan Informasi Geospasial (BIG) periode tahun 2021–2025 dalam format RINEX.
- Metadata lokasi dan spesifikasi teknis stasiun CORS di wilayah utara Pulau Jawa.
- Data batas administrasi wilayah studi dalam format *shapefile* (.shp) untuk keperluan analisis spasial dan pemetaan.
- Data orbit satelit GNSS dari *International GNSS Service* (IGS) untuk koreksi orbit dan referensi global.
- Model atmosfer (ionosfer dan troposfer) untuk koreksi kesalahan propagasi sinyal GNSS.

2. Peralatan dan perangkat lunak yang digunakan:

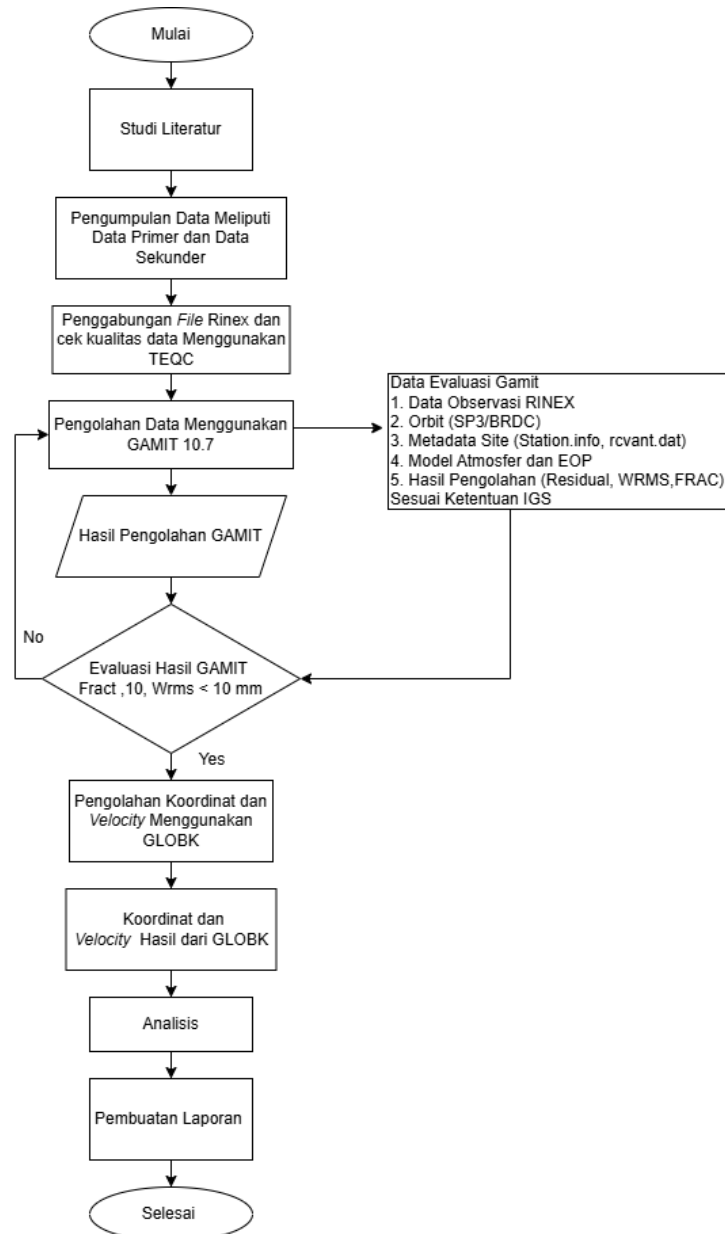
- Laptop Acer Aspire 5 dengan spesifikasi prosesor Intel Core i5 dan RAM 8 GB.
- Perangkat lunak GAMIT 10.7 untuk pemrosesan data GNSS harian.
- Perangkat lunak GLOBK 5.35 untuk integrasi temporal dan estimasi kecepatan vertikal.
- Aplikasi MATLAB untuk visualisasi tren kecepatan dan pergeseran vertikal.
- Program *Microsoft Excel* untuk rekapitulasi, tabulasi, dan analisis statistik hasil pemrosesan data.

2.3 Tahapan Penelitian

Penelitian ini diawali dengan pengumpulan data GNSS harian dari beberapa stasiun CORS (*Continuously Operating Reference Station*) yang tersebar di wilayah utara Pulau Jawa. Data yang dikumpulkan merupakan data primer dalam format RINEX, yang mencatat posisi harian stasiun secara kontinu selama periode tahun 2021–2025. Selain itu, data eksternal berupa batas administrasi wilayah studi dalam format *shapefile* (.shp) juga dihimpun untuk keperluan analisis spasial dan pemetaan hasil.

Langkah selanjutnya adalah pemrosesan data GNSS menggunakan perangkat lunak GAMIT 10.7, untuk memperoleh posisi harian stasiun yang telah dikoreksi dari pengaruh orbit satelit, efek atmosfer, serta kesalahan pengamatan. Hasil dari GAMIT kemudian digabungkan menggunakan GLOBK 5.35, guna memperoleh estimasi kecepatan vertikal (*vertical velocity*) dari setiap stasiun dalam satuan mm/tahun.

Setelah memperoleh estimasi kecepatan vertikal, dilakukan visualisasi dalam bentuk grafik dan peta untuk melihat dinamika penurunan muka tanah secara spasial dan temporal di seluruh wilayah studi. Hasil ini kemudian dianalisis lebih lanjut untuk mengidentifikasi pola-pola penurunan yang signifikan dan menghubungkannya dengan kemungkinan faktor-faktor pendorong seperti kondisi geologi lokal, kepadatan infrastruktur, serta intensitas penggunaan air tanah. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui seberapa signifikan penurunan muka tanah terjadi di masing-masing area studi, serta memberikan masukan ilmiah untuk mitigasi dan perencanaan wilayah yang lebih adaptif.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

Studi Literatur

Literatur yang dikaji meliputi teori deformasi tanah, konsep *land subsidence*, teknik pemantauan GNSS berbasis CORS, serta studi-studi terdahulu yang menggunakan perangkat lunak GAMIT/GLOBK. Tujuan dari tahap ini adalah memperoleh dasar teoritis dan metodologis yang kuat untuk mendukung analisis data..

Pengumpulan Data Primer dan Sekunder

Pengumpulan data dilakukan dengan mengunduh data harian dari stasiun CORS (*Continuously Operating Reference Station*) yang dikelola oleh Badan Informasi Geospasial (BIG). Data yang dikumpulkan terbagi menjadi dua jenis, yaitu:

- Data Primer: File observasi GNSS harian dalam format RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*), berasal dari stasiun-stasiun CORS yang berada di wilayah Pantai Utara (Pantura) Pulau Jawa. Berikut merupakan jumlah data pada setiap tahunnya :
 - Data Tahun 2021 = 170 hari
 - Data Tahun 2022 = 350 hari
 - Data Tahun 2023 = 362 Hari
 - Data Tahun 2024 = 342 Hari
 - Data Tahun 2025 = 75 Hari
- Data Sekunder: Informasi pendukung yang diperlukan dalam proses pengolahan GNSS, mencakup:
 - Data orbit satelit (format SP3 atau BRDC)
 - Metadata stasiun, seperti file station.info dan rcvant.dat
 - Model atmosfer (untuk koreksi troposfer dan ionosfer)
 - Parameter orientasi bumi atau EOP (*Earth Orientation Parameters*)

Penggabungan File RINEX dan Cek Kualitas Data dengan TEQC

Sebelum dilakukan proses pengolahan lebih lanjut, file RINEX dari masing-masing stasiun GNSS digabungkan dan dilakukan pengecekan kualitas menggunakan perangkat lunak TEQC (*Translation, Editing, and Quality Checking*). Tahap ini penting untuk memastikan bahwa data yang digunakan memiliki kualitas yang baik. Adapun tujuan dari pemeriksaan ini meliputi:

- Mendeteksi anomali data
- Mengetahui adanya hilangnya sinyal atau *cycle slip*
- Mengidentifikasi efek multipath (pantulan sinyal)
- Menyaring data yang tidak memenuhi standar kualitas

Data yang lolos pemeriksaan kualitas akan diteruskan ke tahap pengolahan berikutnya, sedangkan data yang bermasalah akan dikeluarkan dari analisis untuk menjaga akurasi hasil akhir.

Pengolahan Data Menggunakan GAMIT 10.7

Setelah data dinyatakan valid, pengolahan dilakukan menggunakan perangkat lunak GAMIT versi 10.7. GAMIT digunakan untuk menghitung solusi koordinat harian dari setiap stasiun CORS berdasarkan observasi GNSS. Proses pengolahan ini mempertimbangkan berbagai koreksi penting, antara lain:

- Koreksi orbit satelit
- Model atmosfer troposfer dan ionosfer
- Parameter orientasi bumi (EOP)
- Efek antenna dan lingkungan lokal lainnya

Output dari tahapan ini adalah file solusi posisi harian dalam sistem koordinat global (biasanya ITRF). Data posisi ini kemudian menjadi dasar untuk analisis deformasi atau penurunan muka tanah.

Evaluasi Hasil Pengolahan GAMIT

Hasil pengolahan dengan GAMIT dievaluasi menggunakan dua parameter utama:

- *Fractional RMS* (FRAC) harus kurang dari 0,10.

- *Weighted Root Mean Square* (WRMS) harus kurang dari 10 mm. Evaluasi ini dilakukan untuk memastikan bahwa estimasi koordinat harian yang dihasilkan cukup akurat dan konsisten. Jika hasil pengolahan tidak memenuhi kriteria, maka dilakukan pemeriksaan ulang terhadap data input dan proses GAMIT.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil dan Analisis Kecepatan

Hasil pengolahan data GNSS menggunakan perangkat lunak GAMIT/GLOBK, diperoleh estimasi kecepatan vertikal rata-rata tahunan (*vertical velocity*) dari masing-masing stasiun CORS yang tersebar di wilayah Pantai Utara Pulau Jawa. Nilai kecepatan ini merepresentasikan tren penurunan muka tanah (*subsidence*) dalam satuan mm/tahun pada periode 2021–2025. Detail nilai kecepatan vertikal (VN), kecepatan arah timur (VE), kecepatan horizontal (VH), beserta simpangan bakunya (σ) disajikan pada **Tabel 1** berikut :

Tabel 1. Nilai Kecepatan Pergeseran Titik selama 2021-2025

No	Stasiun	Provinsi	Kota	VN (mm/th)	σ VN	VE (mm/th)	σ VE	VH (mm/th)	σ VH
1	CWRU	Banten	Serang	-10.55	1.01	2.48	0.64	10.84	1.18
2	CJKT	DKI Jakarta	Jakarta Utara	-9.88	0.94	2.92	0.66	10.31	1.16
3	CJKU	DKI Jakarta	Jakarta Utara	-7.25	0.97	2.45	0.64	7.66	1.15
4	CCIR	Jawa Barat	Cirebon	-10.31	1.03	3.10	0.71	10.76	1.25
5	CROL	Jawa Barat	Indramayu	-9.31	1.00	2.31	0.64	9.59	1.18
6	CSBG	Jawa Barat	Subang	-6.75	0.98	2.13	0.63	7.07	1.15
7	CPKL	Jawa Tengah	Pekalongan	-7.13	0.91	1.74	0.62	7.34	1.09
8	CSEM	Jawa Tengah	Semarang	-8.28	0.95	2.68	0.65	8.70	1.13
9	CTGL	Jawa Tengah	Tegal	-8.51	0.94	2.72	0.66	8.91	1.13
10	CSMG	Jawa Tengah	Semarang	-11.72	1.05	3.01	0.68	12.11	1.26
11	CPAI	Jawa Timur	Probolinggo	-12.61	1.21	1.98	0.67	12.76	1.34
12	CPAI	Jawa Timur	Pasuruan	-10.20	1.04	3.31	0.71	10.75	1.26
13	CPBO	Jawa Timur	Bojonegoro	-8.95	1.03	2.86	0.66	9.39	1.22
14	CSBY	Jawa Timur	Surabaya	-13.40	1.08	3.12	0.72	13.76	1.31
15	CSIT	Jawa Timur	Situbondo	-10.14	1.12	2.84	0.70	10.52	1.27
16	CTBN	Jawa Timur	Tuban	-9.80	1.03	2.45	0.67	10.08	1.22
17	CBRN	Jawa Timur	Banyuwangi	-13.52	0.82	2.20	0.65	13.70	1.04
18	CREM	Jawa Timur	Rembang	-7.40	0.93	2.02	0.62	7.69	1.10

Berdasarkan Hasil dari **Tabel 1** dari estimasi kecepatan vertikal rata-rata tahunan menunjukkan bahwa seluruh stasiun CORS di wilayah studi mengalami penurunan muka tanah (*subsiden*), yang ditandai oleh nilai kecepatan vertikal (VN) negatif. Nilai ini disajikan dalam satuan mm/tahun dan disertai dengan ketidakpastian (σ VN), serta komponen horizontal (VE dan VH) sebagai indikator tambahan untuk memahami arah dan besaran perpindahan tanah secara menyeluruh. Stasiun dengan penurunan tertinggi tercatat pada CBRN (Banyuwangi) sebesar $-13,52$ mm/tahun dengan ketidakpastian $\pm 0,82$ mm dan kecepatan horizontal total (VH) sebesar $13,70$ mm/tahun.

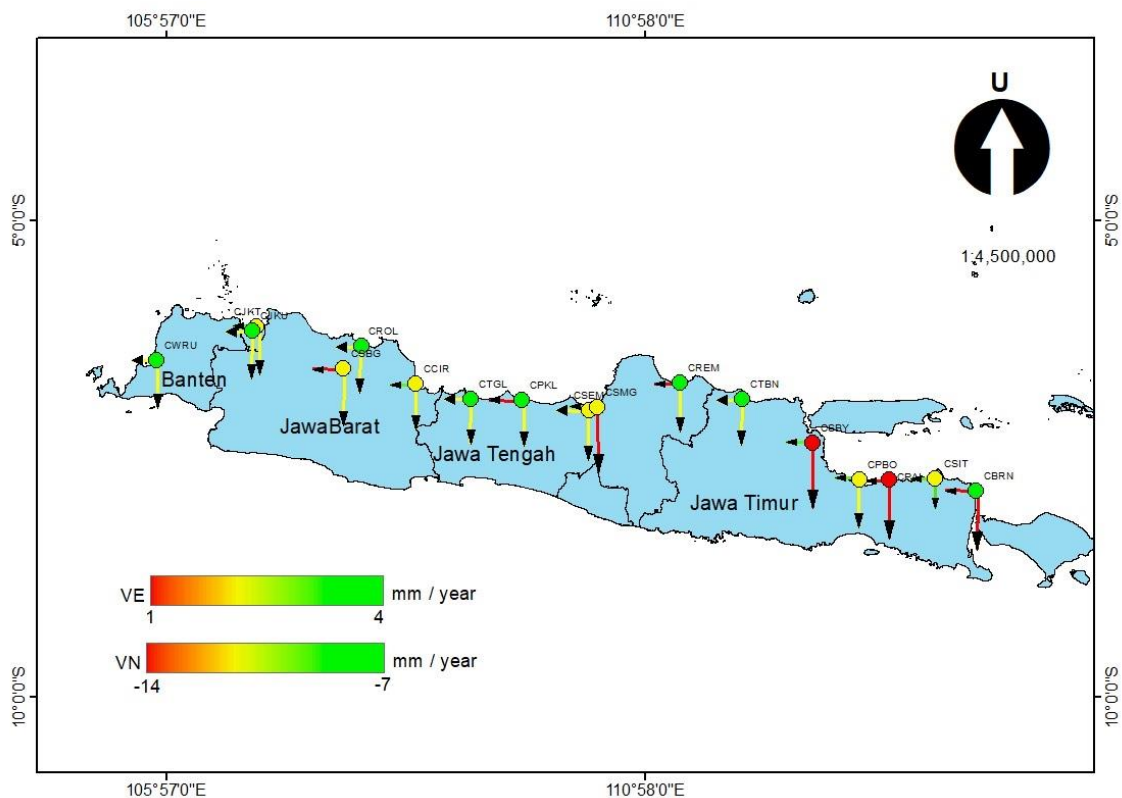
Ini menjadi titik dengan laju penurunan vertikal terbesar secara absolut. Stasiun CSBY (Surabaya) juga menunjukkan penurunan sangat tinggi, yaitu $-13,40$ mm/tahun dengan VH sebesar $13,76$ mm/tahun, menjadikannya titik tertinggi kedua dalam tren subsiden secara vertikal dan horizontal. Stasiun CPAI (Probolinggo) mencatat penurunan vertikal $-12,61$ mm/tahun dengan VH sebesar $12,76$ mm/tahun, diikuti oleh CSMG (Semarang) sebesar $-11,72$ mm/tahun dan VH $12,11$ mm/tahun, yang juga mengindikasikan laju deformasi yang signifikan.

Stasiun CWRU (Serang) dan CCIR (Cirebon) masing-masing mencatat kecepatan penurunan $-10,55$ mm/tahun dan $-10,31$ mm/tahun, dengan nilai VH masing-masing di atas 10 mm/tahun, menempatkan keduanya dalam kategori subsiden ekstrem. Beberapa stasiun di Jawa Timur seperti CPAS (Pasuruan), CSIT (Situbondo), dan CTBN (Tuban) juga mencatat nilai penurunan cukup tinggi, masing-masing sebesar $-10,20$ mm/tahun, $-10,14$ mm/tahun, dan $-9,80$ mm/tahun. Ketiganya memiliki VH di kisaran 10 mm/tahun, menguatkan indikasi konsistensi pola penurunan di kawasan timur. Di wilayah Jakarta, CJKT dan CJKU menunjukkan laju penurunan masing-masing $-9,88$ mm/tahun dan $-7,25$ mm/tahun, yang meskipun sedikit lebih kecil dibanding wilayah lainnya, tetap menunjukkan tren penurunan yang signifikan dengan VH masing-masing $10,31$ mm/tahun dan $7,66$ mm/tahun. Stasiun-stasiun lain seperti CPBO (Bojonegoro), CROL (Indramayu), dan CTGL (Tegal) mencatat penurunan di kisaran $-8,51$ mm/tahun hingga $-9,31$ mm/tahun, dengan VH di atas 8 mm/tahun, menempatkannya dalam kategori subsiden menengah hingga tinggi.

Stasiun dengan penurunan paling rendah di antaranya adalah CREM (Rembang) dengan nilai $-7,40$ mm/tahun, disusul oleh CPKL (Pekalongan) sebesar $-7,13$ mm/tahun, dan CSBG (Subang) sebesar $-6,75$ mm/tahun. Meskipun nilainya lebih kecil, ketiganya tetap menunjukkan tren penurunan yang konsisten dan signifikan dalam jangka panjang. Beberapa kemungkinan penyebab dari pola subsiden yang teridentifikasi di atas mencakup tekanan akibat eksploitasi air tanah secara berlebihan, khususnya di kawasan padat penduduk dan industrialisasi tinggi seperti Surabaya, Jakarta, dan Cirebon, sebagaimana telah dibahas dalam studi (Abidin dkk., 2011) dan (Chaussard dkk., 2013). Selain itu, beban struktur infrastruktur dan bangunan berat yang berdiri di atas tanah aluvial muda juga diduga mempercepat penurunan muka tanah, sebagaimana dicatat dalam penelitian oleh (Kuehn dkk., 2009) di delta perkotaan pesisir. Laju penurunan yang tinggi di beberapa wilayah timur seperti Banyuwangi dan Probolinggo juga mungkin dipengaruhi oleh kombinasi faktor hidrogeologis dan tata guna lahan yang tidak terkendali, di mana tanah endapan lepas dan aktivitas ekstraksi air tanah menjadi faktor dominan (Riastama dkk., 2022). Dengan demikian, meskipun variasi antar lokasi cukup lebar, pola umum menunjukkan bahwa sebagian besar wilayah di Pulau Jawa tetap berada dalam risiko penurunan tanah yang patut diwaspadai.

Analisis ini menggunakan data pengamatan GNSS dari periode 2021–2025, yang memberikan gambaran tren penurunan muka tanah dalam rentang waktu menengah. Periode ini cukup untuk mengidentifikasi pola spasial dan besaran laju penurunan secara akurat di wilayah studi, namun masih relatif singkat untuk menangkap variabilitas jangka panjang, termasuk pengaruh siklus musiman dan anomali tahunan. Oleh karena itu, perpanjangan periode pengamatan di masa mendatang sangat penting untuk memperoleh estimasi kecepatan yang lebih stabil, mengurangi potensi bias akibat fluktuasi temporal, serta meningkatkan pemahaman terhadap dinamika deformasi tanah secara komprehensif.

Visualisasi arah dan besarnya kecepatan penurunan muka tanah (VN) dan pergeseran horizontal (VE) tahunan di setiap stasiun CORS di wilayah utara Pulau Jawa disajikan dalam bentuk peta pada **Gambar 3** Panah menunjukkan arah vektor pergerakan, sementara warna mewakili skala kecepatan berdasarkan legenda yang tersedia. Vektor yang mengarah vertikal ke bawah menandakan adanya subsiden atau penurunan muka tanah, sedangkan vektor horizontal menunjukkan arah dominan dari pergeseran posisi stasiun. Ukuran dan warna panah memperlihatkan besar kecepatan pergerakan, memungkinkan interpretasi spasial mengenai wilayah yang mengalami perubahan posisi signifikan. Informasi ini sangat penting dalam mengidentifikasi area rawan dan mendukung pengambilan kebijakan mitigasi serta perencanaan pembangunan wilayah pesisir.



Gambar 3. Peta Sebaran Kecepatan Pergeseran Titik selama 2021-2025

Berdasarkan hasil Visualisasi pada **Gambar 3** memperlihatkan peta sebaran vektor kecepatan pergerakan tanah berdasarkan data dari stasiun CORS di wilayah utara Pulau Jawa. Peta ini menampilkan tiga komponen kecepatan yaitu VE (komponen timur), VN (komponen utara), dan VU (komponen vertikal). Panah horizontal menunjukkan arah dan besar pergeseran dalam bidang horizontal (VE dan VN), sedangkan panah vertikal menghadap ke bawah menunjukkan penurunan muka tanah (subsiden). Warna panah mencerminkan besar kecepatan, dengan gradasi warna dari hijau hingga merah.

Sebagian besar stasiun memperlihatkan arah vektor horizontal ke tenggara hingga selatan, ditunjukkan oleh panah horizontal yang mengarah ke kanan-bawah (VE positif dan VN negatif). Hal ini terlihat pada stasiun-stasiun di wilayah Jawa Barat dan Jawa Tengah seperti CCIR, CROL,

CTGL, dan CSMG, yang menunjukkan arah pergerakan konsisten ke tenggara. Wilayah Jawa Timur menunjukkan pola vektor dominan ke selatan, terlihat pada stasiun seperti CSBY, CPBO, dan CSIT. Pada titik-titik tersebut, arah vektor horizontal condong ke bawah, dengan nilai VE yang lebih kecil dibanding VN.

Komponen vertikal (VU) divisualisasikan dengan panah tegak ke bawah yang menunjukkan subsiden. Warna merah mengindikasikan penurunan dengan kecepatan tinggi. Stasiun seperti CSBY (Surabaya), CBRN (Banyuwangi), dan CPAI (Probolinggo) menunjukkan panah vertikal merah dengan nilai penurunan lebih dari -13 mm/tahun. Stasiun lainnya seperti CREM (Rembang), CTBN (Tuban), dan CSBG (Subang) menampilkan warna kuning hingga hijau pada panah vertikal, yang menunjukkan laju penurunan moderat berkisar antara -5 hingga -7 mm/tahun.

Perbandingan antara stasiun CORS yang berlokasi dekat garis pantai dengan yang berada lebih jauh ke pedalaman menunjukkan adanya kecenderungan perbedaan laju penurunan muka tanah yang cukup jelas. Stasiun pesisir seperti CSBY (Surabaya), CBRN (Banyuwangi), dan CPAI (Probolinggo) mencatat laju penurunan tinggi di atas -12 mm/tahun, sedangkan stasiun yang lebih jauh dari pantai seperti CREM (Rembang) dan CSBG (Subang) hanya mengalami penurunan moderat, berkisar -5 hingga -7 mm/tahun. Hal ini mengindikasikan bahwa wilayah pesisir cenderung lebih rentan terhadap subsiden, yang diduga dipicu oleh kombinasi faktor seperti eksploitasi air tanah yang intensif, intrusi air laut, dan sifat tanah aluvial yang lepas. Sementara itu, daerah pedalaman meskipun relatif lebih stabil secara vertikal, tetap berpotensi mengalami deformasi akibat faktor lokal seperti beban infrastruktur berat atau karakteristik geologi setempat.

Berdasarkan analisis ini, fenomena penurunan muka tanah kemungkinan besar dipengaruhi oleh kombinasi faktor antropogenik dan alami. Di wilayah perkotaan seperti Surabaya, penggunaan air tanah secara berlebihan untuk kebutuhan industri dan rumah tangga telah disebutkan sebagai penyebab utama terjadinya subsidensi (Abidin dkk., 2011). Selain itu, beban infrastruktur berat di atas tanah aluvial yang lunak juga mempercepat kompaksi tanah secara alami (Nguyen dkk., 2021). Di sisi lain, faktor geologi lokal seperti keberadaan endapan muda serta proses tektonik juga bisa berkontribusi terhadap dinamika vertikal tanah, sebagaimana dibahas oleh (Gunawan dkk., 2020). Oleh karena itu, perbedaan laju dan arah pergerakan tanah yang diamati pada masing-masing stasiun kemungkinan merupakan hasil interaksi dari berbagai faktor tersebut.

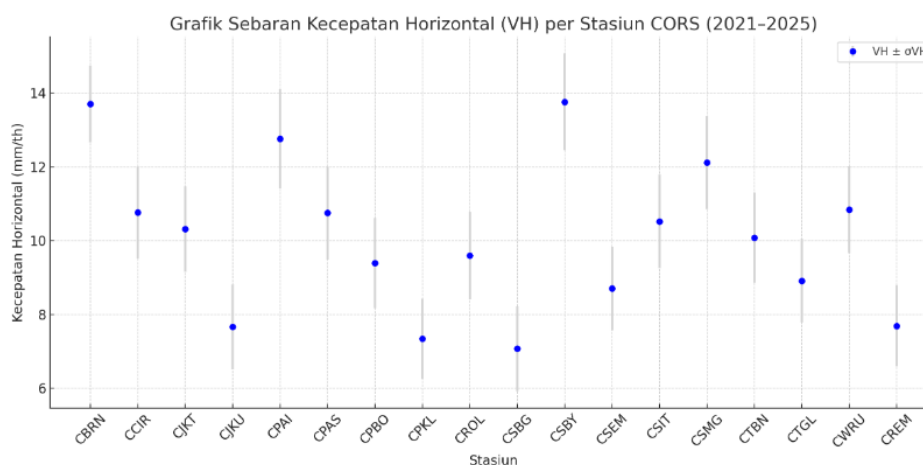
3.2 Analisis Kecepatan Pergeseran Horizontal

Hasil pengolahan data GNSS menggunakan perangkat lunak GAMIT/GLOBK juga menghasilkan estimasi kecepatan horizontal rata-rata tahunan (VH) dari masing-masing stasiun CORS yang tersebar di sepanjang wilayah Pantai Utara Pulau Jawa. Kecepatan horizontal ini menggambarkan pergerakan titik secara lateral (timur-barat dan utara-selatan) dalam satuan mm/tahun selama periode 2021–2025. Nilai kecepatan tersebut disertai dengan simpangan baku (σ_{VH}) untuk menunjukkan ketidakpastian pengukuran. Rincian data kecepatan horizontal dan simpangannya dari masing-masing stasiun CORS disajikan pada **Tabel 2** berikut:

Tabel 2. Nilai Kecepatan Pergeseran Horizontal Tahun 2021-2025

No	Stasiun	VH (mm/th)	σ VH (mm/th)	Provinsi
1	CBRN	13.70	1.04	Jawa Timur
2	CCIR	10.76	1.25	Jawa Barat
3	CJKT	10.31	1.16	DKI Jakarta
4	CJKU	7.66	1.15	DKI Jakarta
5	CPAI	12.76	1.34	Jawa Timur
6	CPAS	10.75	1.26	Jawa Timur
7	CPBO	9.39	1.22	Jawa Timur
8	CPKL	7.34	1.09	Jawa Tengah
9	CROL	9.59	1.18	Jawa Barat
10	CSBG	7.07	1.15	Jawa Timur
11	CSBY	13.76	1.31	Jawa Timur
12	CSEM	8.70	1.13	Jawa Tengah
13	CSIT	10.52	1.27	Jawa Timur
14	CSMG	12.11	1.26	Jawa Tengah
15	CTBN	10.08	1.22	Jawa Timur
16	CTGL	8.91	1.13	Jawa Tengah
17	CWRU	10.84	1.18	Banten
18	CREM	7.69	1.10	Jawa Timur

Nilai hasil pada **Tabel 2** disajikan dalam bentuk grafik sebaran kecepatan pergeseran horizontal tahunan (VH), yang merupakan gabungan dari komponen kecepatan VE (timur) dan VN (utara) pada masing-masing stasiun CORS di wilayah utara Pulau Jawa selama periode 2021–2025 yang disajikan pada **Gambar 4** Nilai ini merepresentasikan laju perpindahan posisi stasiun secara lateral dalam satuan mm/tahun.



Gambar 4. Grafik Sebaran Kecepatan Horizontal per Stasiun tahun 2021-2025

Berdasarkan hasil **Tabel 2** dan visualisasi **Gambar 4** Stasiun CSBY (Surabaya) dan CBRN (Brebes) mencatat kecepatan pergeseran horizontal tertinggi, masing-masing sebesar 13,76 mm/tahun dan 13,70 mm/tahun, menunjukkan tingkat pergerakan lateral yang cukup signifikan di kedua wilayah tersebut. Disusul oleh stasiun CPAI (Pekalongan) dan CSMG (Semarang) yang mencatat kecepatan pergeseran horizontal sebesar 12,76 mm/tahun dan 12,11 mm/tahun. Ini menunjukkan dinamika pergeseran horizontal yang cukup aktif di wilayah tengah pantura.

Sementara itu, stasiun seperti CCIR (Cirebon), CPAS (Subang), CSIT (Situbondo), dan CWRU (Waru) mencatat kecepatan pergeseran horizontal antara 10,5 hingga 10,8 mm/tahun. Meskipun sedikit lebih rendah, angka ini tetap menunjukkan adanya aktivitas pergerakan lateral di beberapa lokasi sepanjang pantai utara Jawa. Di sisi lain, stasiun seperti CJKU (Jakarta Utara) dan CPKL (Kendal) mencatat kecepatan yang lebih rendah, yaitu masing-masing 7,66 mm/tahun dan 7,34 mm/tahun. Stasiun CREM (Rempoa) dan CSBG (Subang Barat) mencatat kecepatan antara 7,07 hingga 7,69 mm/tahun.

Secara keseluruhan, data ini memperlihatkan adanya variasi dalam intensitas pergeseran horizontal tahunan di wilayah utara Pulau Jawa. Adanya pergerakan horizontal ini dapat dikaitkan sebagai respon geodetik terhadap proses penurunan muka tanah yang telah banyak dilaporkan sebelumnya. Penurunan muka tanah yang signifikan di kawasan pantura, sebagaimana dijelaskan dalam studi oleh (Abidin dkk., 2011) dan (Chaussard dkk., 2013), diduga turut memicu redistribusi tegangan kerak secara lokal, yang dalam jangka panjang dapat tercermin dalam pola pergeseran horizontal ini.

3.3 Analisis Kecepatan Pergeseran Vertikal

Hasil pengolahan data GNSS menggunakan perangkat lunak GAMIT/GLOBK, menampilkan hasil pengolahan data GNSS menggunakan perangkat lunak GAMIT/GLOBK, berupa estimasi kecepatan vertikal rata-rata tahunan (VU) dari masing-masing stasiun CORS di wilayah Pantai Utara Pulau Jawa pada periode 2021–2025. Nilai dalam tabel disajikan dalam satuan mm/tahun beserta simpangan bakunya (σ VU) disajikan pada **Tabel 3** :

Tabel 3. Nilai Kecepatan Pergeseran Vertikal Tahun 2021-2025

No	Stasiun	VU (mm/th)	σ VU (mm/th)	Provinsi
1	CBRN	-5.70	0.80	Jawa Timur
2	CCIR	-8.21	1.10	Jawa Barat
3	CJKT	-6.85	0.92	DKI Jakarta
4	CJKU	-6.20	0.93	DKI Jakarta
5	CPAI	-9.94	1.13	Jawa Timur
6	CPAS	-7.10	1.02	Jawa Timur
7	CPBO	-6.72	0.99	Jawa Timur
8	CPKL	-6.24	0.85	Jawa Tengah
9	CROL	-5.83	0.95	Jawa Barat
10	CSBG	-7.02	0.96	Jawa Timur
11	CSBY	-9.45	1.11	Jawa Timur

No	Stasiun	VU (mm/th)	σ VU (mm/th)	Provinsi
12	CSEM	-7.35	0.93	Jawa Tengah
13	CSIT	-6.87	1.01	Jawa Timur
14	CSMG	-7.82	1.09	Jawa Tengah
15	CTBN	-6.35	0.96	Jawa Timur
16	CTGL	-5.91	0.92	Jawa Tengah
17	CWRU	-6.40	0.98	Banten
18	CREM	-5.15	0.89	Jawa Timur

Berdasarkan hasil pada **Tabel 3** dinamika kecepatan pergeseran vertikal (VU) pada masing-masing stasiun CORS selama periode 2021–2025 ditampilkan pada Tabel 3.3. Seluruh stasiun mencatat nilai VU negatif, yang mengindikasikan bahwa penurunan muka tanah (subsiden) terjadi secara konsisten di wilayah utara Pulau Jawa, meskipun dengan intensitas yang bervariasi di setiap lokasi. Stasiun CPAI (Pekalongan) mencatat laju penurunan paling tinggi dengan nilai -9.94 mm/tahun, diikuti oleh CSBY (Surabaya) dengan -9.45 mm/tahun, menunjukkan bahwa kedua wilayah tersebut mengalami subsiden yang tergolong ekstrem.

Stasiun CCIR (Cirebon) dan CSMG (Semarang) mencatat penurunan yang juga signifikan, masing-masing sebesar -8.21 mm/tahun dan -7.82 mm/tahun, memperlihatkan bahwa wilayah tengah Pantura juga mengalami dinamika vertikal yang cukup besar. Stasiun lain seperti CPAS (Subang), CSEM (Semarang Timur), dan CSIT (Situbondo) menunjukkan laju penurunan antara -7.10 hingga -7.35 mm/tahun, yang termasuk dalam kategori subsiden sedang hingga tinggi. Di wilayah DKI Jakarta, stasiun CJKT dan CJKU mencatat nilai -6.85 mm/tahun dan -6.20 mm/tahun, memperlihatkan bahwa tren penurunan tanah masih terjadi secara aktif di kawasan tersebut. Beberapa stasiun lainnya, seperti CBRN (Brebes), CROL (Rembang), CTGL (Tegal), dan CREM (Rempoa) mencatat laju penurunan yang lebih rendah, antara -5.15 hingga -5.91 mm/tahun, namun tetap menunjukkan pola subsiden yang konsisten dari waktu ke waktu.

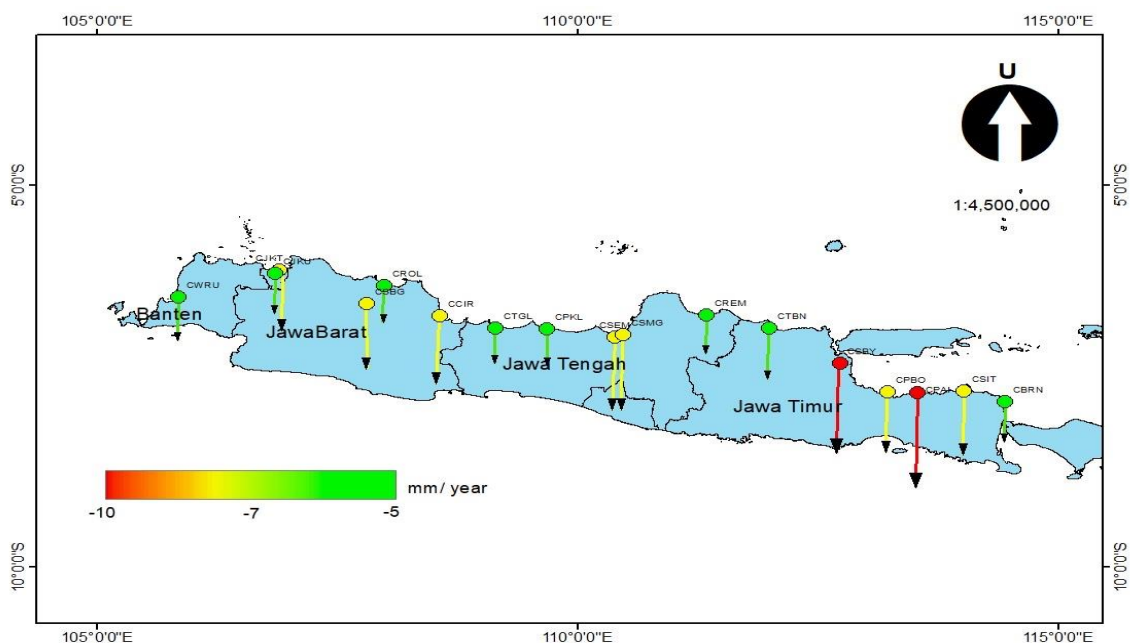
Secara keseluruhan, hasil ini memperlihatkan bahwa seluruh wilayah pantai utara Jawa mengalami penurunan muka tanah tahunan, dengan tingkat keparahan yang berbeda-beda. Penurunan ini kemungkinan besar disebabkan oleh kombinasi beberapa faktor, di antaranya eksploitasi air tanah secara berlebihan untuk kebutuhan domestik dan industri yang banyak terjadi di wilayah pesisir, beban infrastruktur perkotaan yang meningkat, serta kompresi alami lapisan tanah aluvial yang lunak dan tebal. Penelitian sebelumnya oleh (Abidin dkk., 2011) juga menunjukkan bahwa eksploitasi air tanah merupakan penyumbang utama terjadinya penurunan muka tanah di Jakarta, dan kondisi serupa dapat terjadi pula di kota-kota Pantura lainnya. Selain itu, hasil kajian dari (Chaussard dkk., 2013) juga mengonfirmasi bahwa dinamika penurunan tanah di daerah pesisir utara Jawa dipengaruhi oleh aktivitas manusia dan sifat geologi setempat, sehingga pengamatan yang berkelanjutan sangat diperlukan untuk mitigasi dan perencanaan.

Perbandingan antara stasiun CORS yang berada dekat garis pantai dan yang berlokasi lebih jauh ke pedalaman menunjukkan adanya perbedaan signifikan dalam laju penurunan muka tanah. Stasiun pesisir seperti CSBY (Surabaya), CBRN (Banyuwangi), dan CPAI (Probolinggo) mencatat laju penurunan di atas -12 mm/tahun, sedangkan stasiun yang lebih jauh dari pantai seperti CREM (Rembang) atau CSBG (Subang) menunjukkan penurunan lebih moderat, berkisar -5

hingga -7 mm/tahun. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa wilayah pesisir lebih rentan terhadap subsiden akibat kombinasi faktor seperti eksploitasi air tanah intensif, intrusi air laut, dan sifat tanah aluvial yang lepas. Sementara itu, daerah pedalaman cenderung lebih stabil secara vertikal, meskipun deformasi tetap dapat terjadi akibat faktor lokal seperti beban infrastruktur atau sifat geologi setempat.

Periode pengamatan 2021–2025 memberikan gambaran tren penurunan muka tanah yang lebih representatif karena mencakup variasi musiman dan tahunan, termasuk pengaruh siklus curah hujan, perubahan muka air tanah, serta aktivitas pembangunan infrastruktur yang terus berlangsung. Rentang waktu ini juga memungkinkan identifikasi pola penurunan yang konsisten dari tahun ke tahun, sehingga dapat meminimalkan bias yang mungkin muncul pada analisis jangka pendek. Namun, untuk memperkuat validitas temuan, periode data yang lebih panjang tetap diperlukan agar dapat membedakan antara fluktuasi sementara dan tren jangka panjang yang permanen.

Visualisasi arah dan besarnya kecepatan vertikal rata-rata tahunan (*Vertical Up, VU*) dari masing-masing stasiun CORS yang tersebar di sepanjang wilayah Pantai Utara Pulau Jawa pada periode 2021–2025 disajikan pada **Gambar 5**.



Gambar 5. Peta Sebaran Kecepatan Pergeseran Vertikal 2021-2025

Berdasarkan Hasil Visualisasi Peta pada **Gambar 5** menampilkan distribusi spasial kecepatan penurunan muka tanah (komponen vertikal/VU) di wilayah utara Pulau Jawa selama periode 2021–2025, berdasarkan estimasi dari 18 stasiun CORS. Visualisasi menggunakan skema warna dari hijau (penurunan rendah) hingga merah (penurunan tinggi), dengan kisaran nilai antara -5 mm/tahun hingga -10 mm/tahun. Seluruh stasiun menunjukkan arah vektor ke bawah, yang mengindikasikan bahwa penurunan muka tanah (subsiden) terjadi secara merata di sepanjang pantai utara Jawa. Wilayah Jawa Timur, khususnya pada stasiun CPBO, CPAI, CSBY, dan CSIT, mencatat penurunan paling signifikan, tergolong dalam warna merah dengan laju antara -9.0

hingga -10 mm/tahun. Sebaliknya, wilayah Jawa Barat seperti stasiun CRKL, CTGL, dan CWRU menunjukkan nilai penurunan yang lebih rendah, yaitu sekitar -5 mm/tahun, yang tergambar dalam warna hijau.

Wilayah Jawa Tengah menunjukkan pola peralihan dari penurunan sedang ke rendah, dengan kecepatan di stasiun seperti CSBG, CPKL, dan CTBN berada dalam rentang -6 hingga -7 mm/tahun. Pola ini memperlihatkan adanya transisi intensitas penurunan dari barat ke timur. Vektor penurunan yang seragam di seluruh stasiun memperlihatkan bahwa dinamika vertikal di kawasan pantai utara Jawa memiliki kecenderungan yang konsisten secara spasial. Penurunan muka tanah di wilayah ini kemungkinan besar disebabkan oleh kombinasi faktor antropogenik dan alami, seperti ekstraksi air tanah yang berlebihan, pembebanan dari pembangunan infrastruktur, serta kompaksi alami lapisan tanah aluvial yang lunak.

Studi sebelumnya oleh (Abidin dkk., 2011) menunjukkan bahwa di wilayah seperti Jakarta dan Semarang, eksploitasi air tanah berkontribusi signifikan terhadap tingkat subsiden tahunan. Selain itu, karakteristik geologi wilayah pesisir yang didominasi oleh sedimen muda memperbesar potensi terjadinya konsolidasi tanah akibat beban permukaan. Peta ini menjadi representasi penting dalam mengidentifikasi zona-zona yang mengalami subsiden signifikan serta mendukung pengambilan keputusan dalam rangka mitigasi risiko di wilayah pantai utara Pulau Jawa. Visualisasi ini juga menegaskan pentingnya pemantauan berkelanjutan menggunakan sistem GNSS seperti CORS untuk mendeteksi perubahan geodetik secara presisi.

Perbandingan antara stasiun CORS yang berlokasi dekat garis pantai dengan yang berada lebih jauh ke pedalaman menunjukkan adanya perbedaan pola penurunan yang cukup mencolok. Stasiun pesisir seperti CPAI (Pekalongan), CSBY (Surabaya), dan CPBO (Bojonegoro pesisir) mencatat laju penurunan mendekati -10 mm/tahun, sedangkan stasiun yang terletak lebih jauh dari pantai seperti CWRU (Purwakarta) atau CRKL (Karawang) menunjukkan penurunan lebih rendah, sekitar -5 mm/tahun. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa wilayah pesisir lebih rentan terhadap subsiden, kemungkinan akibat kombinasi tekanan hidrologis seperti intrusi air laut dan penurunan muka air tanah, serta sifat tanah aluvial yang lepas dan mudah terkompaksi. Sementara itu, daerah pedalaman cenderung lebih stabil secara vertikal, meskipun deformasi tanah tetap dapat terjadi akibat beban infrastruktur atau karakteristik geologi setempat.

3.4 Validasi dengan Hasil Penelitian Sebelumnya

Hasil estimasi kecepatan penurunan muka tanah (Vertical Up, VU) dari masing-masing stasiun CORS di sepanjang Pantai Utara Pulau Jawa pada periode 2021–2025 yang diperoleh melalui pengolahan data GNSS menggunakan perangkat lunak GAMIT/GLOBK dibandingkan dengan hasil studi sebelumnya. Perbandingan ini bertujuan untuk mengevaluasi konsistensi dan perkembangan tren subsidensi antar periode waktu. Nilai kecepatan penurunan muka tanah (VU) tersebut, beserta data historis dari literatur atau publikasi sebelumnya, disajikan secara rinci dalam **Tabel 4** berikut:

Tabel 4. Perubahan Pergeseran Vertikal Utara Pulau Jawa Tahun 2021-2025

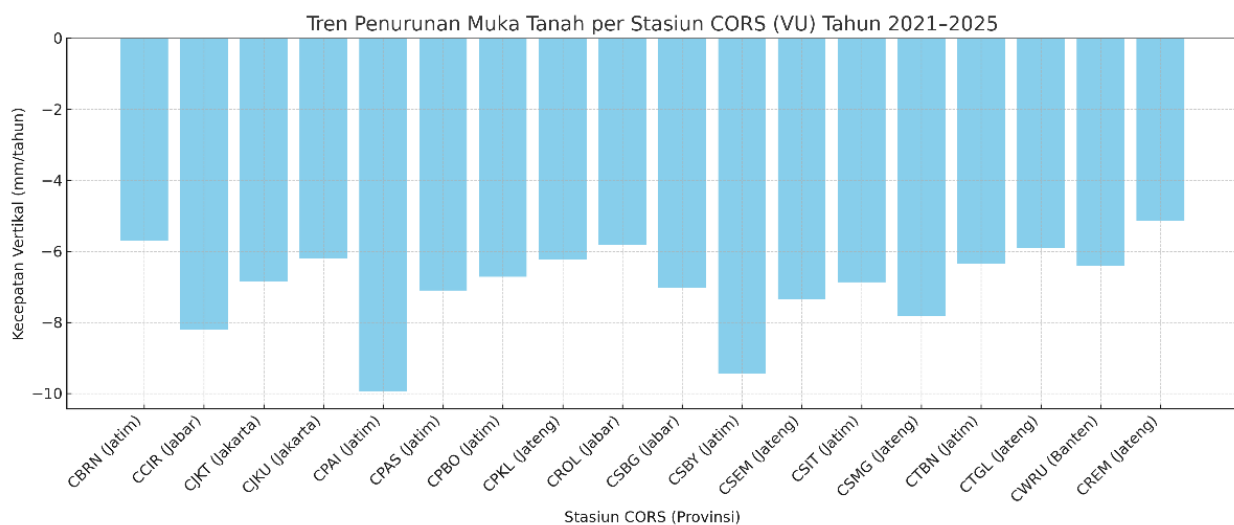
No	Lokasi / Stasiun CORS	VU (2021– 2025)(mm/th)	Studi Sebelumnya (Tahun)VU (mm/th)	Sumber / Keterangan
1	CSBY (Surabaya)	–9.45	–16.08 (2022)	Riastama dkk. (2022)
2	CPAI (Pati)	–9.94	–15 hingga –20 (2011–2018)	Abidin dkk. (2011); Nugroho (2018)
3	CCIR (Cirebon)	–8.21	–10.5 (2020)	Hidayat dkk. (2020)
4	CJKT (Jakarta)	–6.85	–11 s.d. –20 (2008–2015)	Chaussard dkk. (2013); Abidin dkk. (2011)
5	CSEM (Semarang)	–7.35	–10.0 (2018), –12.4 (2020)	Rizaldy dkk. (2018), Hidayat dkk. (2020)
6	CSMG (Semarang)	–7.82	–14.7 (2018)	Hidayat dkk. (2020)
7	CSBG (Bandung- Cirebon Border)	–7.02	–8.8 (2024)	Sidiq, T.P. (2024)
8	CTGL (Tegal)	–5.91	–6.0 (perkiraan)	Tidak tersedia, estimasi berbasis GNSS umum

Berdasarkan hasil pada **Tabel 4**, data pengamatan VU (*Vertical Up*) pada Tabel 3.4 dari beberapa stasiun CORS pada periode 2021–2025, seluruh lokasi menunjukkan nilai negatif yang mengindikasikan terjadinya penurunan muka tanah yang masih aktif. Namun, tren penurunan ini cenderung melambat jika dibandingkan dengan hasil studi sebelumnya. Misalnya, stasiun CSBY (Surabaya) menunjukkan penurunan sebesar –9,45 mm/th, lebih rendah dibandingkan hasil penelitian Riastama dkk. (2022) yang mencatat –16,08 mm/th. Begitu pula CPAI (Pati) mencatat –9,94 mm/th, menurun dibandingkan kisaran –15 hingga –20 mm/th pada periode 2011–2018 (Abidin dkk., 2011; Nugroho, 2018).

Penurunan yang serupa juga terlihat di stasiun lain seperti CCIR (Cirebon), CJKT (Jakarta), CSEM dan CSMG (Semarang), serta CSBG (perbatasan Bandung-Cirebon). Perbedaan nilai VU ini dapat dikaitkan secara kemungkinan dengan pengaruh faktor lokal seperti intensitas ekstraksi air tanah yang terus menurun seiring kebijakan pengendalian pemanfaatan air tanah di beberapa kota

besar, perubahan penggunaan lahan, serta perbedaan karakteristik geologi dan litologi wilayah sebagaimana dijelaskan dalam studi terdahulu (Abidin dkk., 2011; Chaussard dkk., 2013; Hidayat dkk., 2020).

Sebagai contoh, lapisan sedimen lunak di wilayah utara Jawa seperti Jakarta dan Semarang secara geologis sangat rentan terhadap konsolidasi akibat pembebanan bangunan dan ekstraksi air tanah yang berlebihan, sebagaimana dijelaskan oleh (Chaussard dkk., 2013). Meskipun tren perlambatan terjadi, stasiun seperti CPAI dan CSMG masih mencatat penurunan signifikan, yang menunjukkan bahwa masalah ini belum sepenuhnya tertangani dan membutuhkan perhatian lanjutan. Visualisasi Grafik Penurunan Muka Tanah disajikan dalam **Gambar 6**.



Gambar 6. Grafik Sebaran Kecepatan Vertikal per Stasiun tahun 2021-2025

Berdasarkan hasil grafik pada **Gambar 6** memperkuat informasi bahwa seluruh wilayah utara Jawa mengalami penurunan muka tanah (subsiden) dalam rentang 5 hingga hampir 10 mm per tahun. Stasiun CPAI, CSBY, dan CCIR menjadi wilayah paling terdampak dengan VU mendekati – 10 mm/tahun. Data ini penting sebagai dasar dalam menyusun strategi mitigasi bencana dan adaptasi perubahan ruang wilayah .

Berdasarkan data tersebut, dapat disimpulkan bahwa hasil penelitian ini masih menunjukkan tren penurunan muka tanah yang konsisten dengan studi sebelumnya, meskipun nilai-nilainya relatif lebih rendah. Hal ini dapat disebabkan oleh:

- Rentang waktu pengamatan yang berbeda (penelitian ini menggunakan periode 2021–2025).
- Perbaikan kebijakan tata kelola air tanah dan pembangunan berkelanjutan di beberapa wilayah.
- Pengaruh lokal seperti rekahan atau pemadatan tanah yang mungkin tidak terekam sepenuhnya dalam resolusi spasial CORS.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pemrosesan dan analisis data CORS menggunakan metode GNSS berbasis perangkat lunak ilmiah GAMIT/GLOBK, penelitian ini berhasil mengidentifikasi fenomena penurunan muka tanah (*subsidence*) di wilayah Pantai Utara Pulau Jawa selama periode 2021–2025.

Seluruh stasiun CORS yang dianalisis menunjukkan nilai kecepatan vertikal (VU) negatif, yang menandakan terjadinya penurunan muka tanah dengan laju yang bervariasi antar lokasi. Dari 18 stasiun yang diamati, CPAI (Pati) mencatat laju penurunan tertinggi sebesar –9,94 mm/tahun, diikuti oleh CSBY (Surabaya) sebesar –9,45 mm/tahun, dan CCIR (Cirebon) sebesar –8,21 mm/tahun. Sebaliknya, stasiun dengan laju penurunan terkecil adalah CREM (Madura), yaitu sebesar –5,15 mm/tahun. Beberapa stasiun lain seperti CJKT, CJKU, CSEM, dan CTGL juga menunjukkan penurunan dengan kisaran antara –5 hingga –7 mm/tahun, yang meskipun lebih kecil, tetap menunjukkan tren subsiden yang perlu diawasi.

Secara spasial, fenomena penurunan muka tanah ini terkonsentrasi di kawasan perkotaan besar di utara Pulau Jawa, seperti Jakarta Utara, Cirebon, Pekalongan, Semarang, dan Surabaya. Area-area tersebut menjadi wilayah paling terdampak dan rentan terhadap risiko lanjutan seperti gangguan terhadap infrastruktur, kerusakan lingkungan, hingga ancaman sosial-ekonomi akibat perubahan karakteristik tanah.

Peta visualisasi vektor penurunan tanah menunjukkan pola konsisten antara arah deformasi vertikal dominan dan pergeseran horizontal yang mengarah ke tenggara, memperkuat dugaan akan deformasi spasial kompleks yang sedang terjadi di wilayah pesisir utara Jawa.

Grafik tren penurunan muka tanah pada tiap stasiun menunjukkan penurunan yang relatif stabil dari tahun ke tahun, dengan fluktuasi kecil yang masih berada dalam batas simpangan baku (σ) yang wajar. Selain itu, evaluasi kualitas data dari hasil pengolahan menunjukkan bahwa semua hasil memenuhi kriteria teknis ($\text{Fract} < 0,10$ dan $\text{WRMS} < 10$ mm), menandakan bahwa data GNSS yang digunakan memiliki akurasi tinggi dan dapat diandalkan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Badan Informasi Geospasial (BIG) dan *International GNSS Service* (IGS) atas penyediaan data CORS dan data orbit satelit yang dapat diakses secara terbuka untuk keperluan penelitian ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah mendukung kelancaran pelaksanaan penelitian ini, baik secara teknis maupun moral.

Ucapan terima kasih secara khusus penulis sampaikan kepada Bapak Dr. Soni Darmawan, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, masukan, dan motivasi selama proses penelitian dan penyusunan laporan ini berlangsung.

DAFTAR RUJUKAN

Abidin, H. Z., Andreas, H., Gumilar, I., Sidiq, T. P., & Fukuda, Y. (2011). Land subsidence in Jakarta (Indonesia): Characteristics, impacts and causes. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2(1), 1–18. <https://doi.org/10.1080/19475705.2010.535078>

- Chaussard, E., Amelung, F., Abidin, H. Z., & Hong, S.-H. (2013). Sinking cities in Indonesia: ALOS PALSAR detects rapid subsidence due to groundwater and gas extraction. *Remote Sensing of Environment*, 128, 150–161. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.10.015>
- Geng, J., Shi, C., Ge, M., Dodson, A., & Liu, J. (2019). Improving the estimation of tropospheric delays in precise point positioning using multi-GNSS observations. *GPS Solutions*, 23(1), 1–9.
- Herring, T. A., King, R. W., & Floyd, M. A. (2018). *GAMIT/GLOBK Reference Manual*. MIT Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences.
- Hidayat, R., Priyono, A., & Rizaldy, A. (2020). Monitoring tanah ambles menggunakan teknologi InSAR di wilayah utara Jawa. *Jurnal Geodesi Indonesia*, 9(2), 134–147.
- Nugroho, R. W. (2018). Analisis penurunan tanah di Pekalongan menggunakan metode DInSAR. *Skripsi Teknik Geodesi*, UGM.
- Riastama, R., Nurjaya, I. G. P., & Sugiharto, D. (2022). Analisis Penurunan Tanah di Surabaya dengan Metode InSAR dan Validasi Data CORS. *Jurnal Geomatika*, 28(2), 77–85.
- Rizaldy, A., Hidayat, R., & Priyono, A. (2018). Integrasi data InSAR dan GNSS untuk pemantauan deformasi tanah di Semarang. *Prosiding Seminar Nasional Geomatika*, 212–219.
- Sidiq, T. P. (2024). Evaluasi penurunan tanah di perbatasan Bandung-Cirebon dengan data GNSS multi-tahun. *Jurnal Geodesi dan Geomatika Indonesia*, 12(1), 45–53.
- Blewitt, G., Kreemer, C., Hammond, W. C., Plag, H. P., Stein, S., & Okal, E. (2006). Rapid determination of earthquake magnitude using GPS for tsunami warning systems. *Geophysical Research Letters*, 33(11). <https://doi.org/10.1029/2006GL026145>
- BIG (Badan Informasi Geospasial). (2021). *Jaringan Referensi Geodetik Nasional: Manual dan Standar Teknis CORS*. Cibinong: Pusat Jaring Kontrol Geodesi BIG.
- Fattahi, H., & Amelung, F. (2016). InSAR bias and uncertainty due to the systematic error from DEM and atmospheric delay. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(7), 6045–6062. <https://doi.org/10.1002/2016JB013230>
- IGS (International GNSS Service). (2020). *Technical Report of the IGS*. <https://igs.org>
- Kusuma, I. R., & Wibowo, H. (2021). Monitoring Land Subsidence Using GNSS CORS and Sentinel-1A Data in Semarang Coastal Area. *Jurnal Geomatika*, 27(2), 135–145.
- Melachroinos, S. A., & Sideris, M. G. (2017). On the integration of GNSS and InSAR observations for crustal deformation studies. *Geomatica*, 71(3), 229–240. <https://doi.org/10.5623/cig2017-303>
- NASA (National Aeronautics and Space Administration). (2023). *GNSS Modernization Overview*. <https://www.nasa.gov/directorates/heo/gnss>
- Sari, L. N., & Surono, S. (2019). Analisis Deformasi Tanah Menggunakan Data GPS dan CORS di Wilayah Pekalongan. *Jurnal Teknik ITS*, 8(2), A185–A189.
- Yunus, A., Abidin, H. Z., & Gumilar, I. (2020). Monitoring Penurunan Tanah Menggunakan GPS Geodetik dan Leveling di Wilayah Semarang. *Jurnal Geodesi Undip*, 9(1), 53–63.
- Amin, I. M., & Nugroho, H. D. (2021). Integrasi Data GNSS dan InSAR untuk Monitoring Penurunan Tanah di Wilayah Perkotaan. *Jurnal Geodesi Indonesia*, 10(1), 19–30. <https://doi.org/10.5614/jgi.2021.10.1.3>
- Andreas, H., Gumilar, I., & Abidin, H. Z. (2016). Monitoring Long-Term Land Subsidence in Jakarta Using GNSS Continuous Data. *Proceedings of FIG Working Week*, Christchurch, New Zealand.
- Darul, A., & Santosa, P. B. (2020). Identifikasi Penurunan Muka Tanah Menggunakan Data GNSS CORS di Kota Pekalongan. *Jurnal Geodesi Undip*, 9(2), 95–103.

- Kahar, J., & Fadli, M. (2022). Pemanfaatan Data CORS untuk Analisis Deformasi Tanah di Daerah Rawan Banjir. *Jurnal Geoinformatika*, 8(1), 42–50.
- Murdohardono, D., & Sudarsono, B. (2001). Land subsidence monitoring in Jakarta and its possible relation with groundwater extraction. *Proceedings of the 2nd International Symposium on Land Subsidence*, Tokyo.
- Abidin, H.Z., et al. (2011). *Environmental Impacts of Land Subsidence in Urban Areas of Indonesia*. Disaster Prevention and Management.
- Chaussard, E., et al. (2013). *Land subsidence in Jakarta and its relation with urban development*. Journal of Geophysical Research: Solid Earth.
- Ferretti, A., et al. (2001). *Permanent scatterers in SAR interferometry*. IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing.
- Hooper, A., et al. (2004). *A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers*. Geophysical Research Letters.
- Herring, T. A., King, R. W., & McClusky, S. C. (2010). *GAMIT/GLOBK Reference Manual*.
- King, M., et al. (2010). *An assessment of the impact of filtering and statistical methods on GPS-derived estimates of deformation*. Journal of Geodesy.
- Minderhoud, P. S. J., et al. (2019). *The relation between land subsidence and flood risk in Jakarta*. Nature Communications.
- Blewitt, G., et al. (2018). *Tracking the Earth's surface mass redistributions using geodetic GNSS*. Journal of Geophysical Research.
- Setyawan, A., et al. (2020). *Subsidence-Induced Coastal Flooding in Semarang*. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science.
- Zebker, H. A., et al. (2010). *Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface*. Reviews of Geophysics.
- Sunarjo, B., & Sutanto, E. (2015). Analisis Penurunan Tanah Akibat Ekstraksi Air Tanah di Wilayah Pantura Jawa Tengah. *Jurnal Air Tanah Indonesia*, 3(2), 75–82.
- Wirahadikusumah, R. D., & Abdullah, M. (2018). Urban Development and Land Subsidence in Coastal Areas: A Case Study in Java. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 7(1), 72–81. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2017.12.002>
- Yulianingsih, R., & Syamsul, H. (2017). Hubungan Antara Tekanan Bangunan dan Penurunan Tanah Berdasarkan Pengamatan GPS di Kota Jakarta. *Jurnal Geodetika*, 21(2), 109–117.