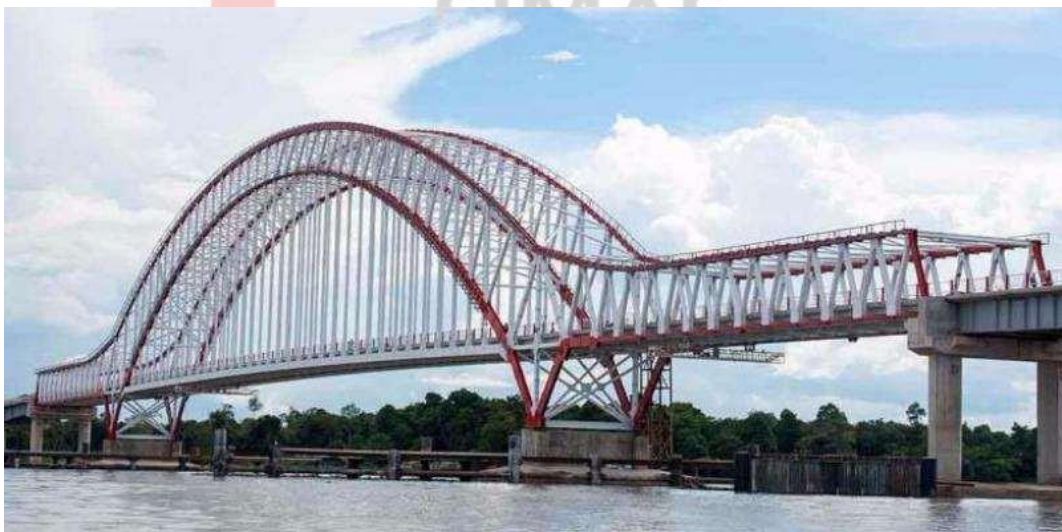


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Jembatan

Pengertian jembatan menurut Kamus Besar Bahasa Indonesia (KBBI), adalah bangunan untuk menyeberangi sungai, jurang, dan sebagainya, yang biasanya dibuat dari material kayu, besi, beton dan lain-lain. Ketchum menyatakan dalam bukunya "*Design of Highway Bridges*", bahwa jembatan merupakan struktur yang dirancang untuk menghubungkan antara 2 titik yang terpisah atau terputus oleh rintangan seperti sungai, lembah, jurang maupun rintangan fisik lainnya, dengan tujuan utama sebagai fasilitas pergerakan manusia maupun barang. Salah satu jenis jembatan yang banyak digunakan di Indonesia adalah jembatan rangka baja seperti yang terlihat pada gambar 2.1 (Supriyadi & Muntohar, 2007).



Gambar 2. 1 Jembatan Rangka Baja (Sumber: Area Teknik Sipil, 2018)

2.1.1 Klasifikasi Jembatan

Seiring dengan perkembangan zaman dan teknologi, jenis jembatan berdasarkan fungsi, lokasi, bahan konstruksi, dan tipe struktur juga ikut mengalami perkembangan, dari yang sederhana sampai pada konstruksi yang mutakhir. Berdasarkan kegunaannya jembatan dapat diklasifikasikan sebagai berikut (Kementrian PUPR, 2019):

1. Jembatan jalan raya (*highway bridge*)
2. Jembatan jalan kereta api (*railway bridge*)
3. Jembatan jalan air (*waterway bridge*).

4. Jembatan jalur pipa (*piperway bridge*)
5. Jembatan militer (*military bridge*)
6. Jembatan pejalan kaki/penyeberangan (*pedestrian bridge*)

Jembatan juga bisa dibedakan berdasarkan material konstruksinya, adapun macamnya seperti berikut (Muhammad, 2019):

1. Jembatan kayu (*log bridge*), jenis jembatan yang bentangnya relatif pendek dan masa penggunaannya juga tidak lama (jembatan sementara)
2. Jembatan beton (*concrete bridge*), jembatan yang dibuat dengan sumber material utama dari beton
3. Jembatan beton prategang (*prestressed concrete bridge*), dibangun dengan bahan berkekuatan tinggi yang merupakan alternatif menarik untuk jembatan bentang panjang. Beton prategang dipergunakan secara luas pada struktur jembatan sejak tahun 1950-an.
4. Jembatan baja (*steel bridge*), dibangun menggunakan berbagai macam komponen dan struktur baja, dengan bentang yang relatif panjang
5. Jembatan komposit (*composite bridge*), jembatan yang dibangun dengan menggabungkan dua atau lebih jenis material konstruksi

Klasifikasi jembatan juga bisa dibedakan berdasarkan jenis strukturalnya, antara lain (Kementrian PUPR, 2019):

1. Jembatan dengan tumpuan sederhana (*simply supported bridge*)
2. Jembatan menerus (*continuous bridge*)
3. Jembatan kantilever (*cantilever bridge*)
4. Jembatan integral (*integral bridge*)
5. Jembatan semi-integral (*semi-integral bridge*)
6. Jembatan rangka (*trusses bridge*)
7. Jembatan pelengkung tiga sendi (*arches bridge*)
8. Jembatan gantung (*suspension bridge*)
9. Jembatan kabel (*cable-stayed bridge*)
10. Jembatan urung-urung (*culverts bridge*)

2.1.1 Bagian Konstruksi Jembatan

Secara umum konstruksi jembatan terdiri dari dua bagian utama yaitu bangunan atas (*upper structure*) dan bangunan bawah (*sub structure*). Penerimaan beban antara dua bagian konstruksi juga berbeda dimana bangunan atas berhubungan langsung dengan beban-beban lalu lintas, orang, barang dan apapun yang berada di atas jembatan dan menyalurkannya ke bagian bawah jembatan. Sedangkan bangunan bawah berfungsi untuk menerima dan memikul beban yang diterima dari bangunan atas dan meneruskannya ke lapisan penopang (pondasi) dan lapisan pendukung (tanah keras) di bawahnya.

Bagian-bagian dari bangunan atas biasanya terdiri dari (Muhammad, 2019):

1. Trotoar, yang berfungsi sebagai jalur pejalan kaki yang terbuat dari beton dan dirancang lebih tinggi dari lantai jalan atau permukaan aspal.
2. Slab lantai kendaraan, berfungsi memikul beban lalu lintas yang melintas di jembatan, kemudian melimpahkan beban tersebut ke gelagar memanjang melalui gelagar melintang.
3. Gelagar (*girder*), yaitu balok utama yang berfungsi memikul beban dari lantai kendaraan dan kendaraan-kendaraan yang melewati jembatan. biasanya besar balok memanjang tergantung pada panjang bentang dan kelas jembatan.
4. Balok diafragma, merupakan pengaku dari gelagar memanjang yang tidak memikul beban pelat lantai dan diperhitungkan seperti balok biasa.
5. Ikatan pengaku, yaitu ikatan melintang yang berfungsi untuk menahan atau melawan gaya yang diakibatkan oleh angin, baik pada bagian atas maupun bagian bawah jembatan agar jembatan tetap dalam keadaan stabil.
6. Tumpuan atau *bearing*, dibuat untuk menerima gaya-gaya dari konstruksi tumpuan bangunan atas baik secara *horizontal*, vertikal maupun lateral dan menyalurkan ke bangunan di bawahnya serta mengatasi perubahan panjang yang diakibatkan perubahan suhu, serta untuk memeriksa kemungkinan rotasi pada peletakan yang akan menyertai lendutan dari struktur yang dibebani. Ada beberapa macam peletakan yaitu sendi, rol dan elastomer.

Sedangkan untuk bagian-bagian yang termasuk bangunan bawah adalah sebagai berikut:

1. Pangkal jembatan (*abutment*), atau dikenal juga dengan kepala jembatan merupakan bagian konstruksi jembatan yang terdapat di setiap bagian ujung jembatan yang berfungsi sebagai pendukung bangunan di atasnya dan penahan tanah timbunan oprit.
2. Pilar jembatan, adalah bangunan bawah yang terletak di tengah-tengah bentang antara dua buah *abutment*, berfungsi untuk memikul beban bangunan atas dan meneruskannya ke pondasi kemudian disebarkan lagi ke tanah dasar yang keras.
3. *Pile cap*, biasanya terbuat dari beton bertulang yang berfungsi mengikat tiang-tiang pondasi menjadi satu dan memindahkan beban kolom kepada tiang.
4. Pondasi, berfungsi untuk memikul beban di atas dan meneruskannya ke lapisan tanah pendukung tanpa mengalami konsolidasi yang berlebihan. Pondasi terbagi lagi menjadi 2 bagian yaitu pondasi dangkal (pondasi langsung) dan pondasi dalam (pondasi tak langsung) (Muhammad, 2019).

2.2 Deformasi

Dalam Kamus Besar Bahasa Indonesia (KBBI), deformasi diartikan sebagai perubahan bentuk atau wujud dari yang baik menjadi kurang baik. Definisi ini

mencerminkan karakter dasar deformasi sebagai gejala perubahan fisik yang berpotensi menimbulkan penurunan kualitas atau fungsi suatu struktur.

Secara lebih teknis, Kuang (1996) seperti yang dikutip dalam Safi'i dkk. (2014) menyatakan bahwa deformasi merupakan fenomena perubahan bentuk, posisi, dan dimensi objek yang dianalisis melalui pergerakan titik secara absolut maupun relatif. Dalam pendekatan absolut, posisi titik ditinjau secara mandiri, sedangkan dalam pendekatan relatif, posisi dianalisis berdasarkan hubungan dengan titik acuan. Konsep ini menegaskan pentingnya kerangka referensi dalam kajian deformasi, baik dalam sistem absolut maupun relatif.

Dalam penelitian ini akan berfokus pada deformasi struktural jembatan. Deformasi struktural jembatan dapat terjadi akibat aktivitas seismik, beban lalu lintas, kondisi tanah, penuaan material maupun pengaruh elemen lingkungan seperti suhu atau angin. Selama jembatan masih beroperasi atau digunakan secara aktif maka pemantauan rutin harus dilakukan, meliputi pemantauan awal setelah konstruksi jembatan selesai, pemantauan rutin sebagai contoh pemantauan deformasi jembatan dan pemantauan khusus untuk tetap memastikan keamanan dan stabilitas struktur jembatan (Kapović dkk., 2005).

Prosedur umum pemantauan deformasi struktur jembatan meliputi pengukuran perpindahan spasial dari titik-titik tertentu pada bagian jembatan. Pergeseran diukur baik secara *horizontal* maupun vertikal. Struktur seperti jembatan memerlukan survei berkala untuk memantau pergerakan dan penurunan jangka panjang atau lendutan dan deformasi pembebanan jangka pendek. Pemantauan jangka panjang biasanya memerlukan pengamatan untuk memantau titik-titik pada struktur dari titik referensi eksternal (jaringan referensi) yang dibangun di atas tanah yang stabil di luar zona deformasi (Caspary, 2000 seperti dikutip dalam Kapović dkk., 2005). Proses pemantauan yang lebih rutin dapat digunakan untuk memantau perilaku jangka pendek jembatan dengan hanya membatasi pengamatan pada titik-titik tertentu di sepanjang jembatan (Kapović dkk., 2005). Perhitungan dasar untuk deformasi atau pergeseran bisa dihitung menggunakan rumus atau persamaan sebagai berikut ini:

2.2.1 Pergeseran *Horizontal*

Pergeseran *horizontal* dihitung dari pergeseran sumbu X dan pergeseran sumbu Y titik pantau. Secara sederhana untuk mencari pergeseran sumbu X dan sumbu Y digunakan persamaan (1)(2) dan (3).

$$\begin{aligned} dX_n &= X_o - X_n \\ dY_n &= Y_o - Y_n \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (1)$$

(Sumber: Septidwiandari, 2015)

Dimana:

dX = Deformasi sumbu X

dY = Deformasi sumbu Y

X_0 = Koordinat X untuk waktu periode awal

Y_0 = Koordinat Y untuk waktu periode awal

X_n = Koordinat X untuk waktu pengamatan berkala (2, 3, 4, ..., 8)

Y_n = Koordinat Y untuk waktu pengamatan berkala (2, 3, 4, ..., 8)

Setelah mendapatkan nilai dX dan dY , selanjutnya dilakukan perhitungan resultan untuk mengetahui besar pergeseran *horizontal* dan membantu menentukan arah pergeseran. Perhitungan dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$\text{Resultan} = \sqrt{dX^2 + dY^2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

(Sumber: Septidwiandari, 2015)

2.2.2 Pergeseran Vertikal

Perhitungan pergeseran vertikal dilakukan dengan menggunakan komponen Z (Elevasi). Nilai pada komponen Z tersebut kemudian dikurangi dengan nilai Z dari pengukuran sebelumnya atau dengan menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$dZ = Z_0 - Z_n \quad \dots\dots\dots (3)$$

(Sumber: Septidwiandari, 2015)

Dimana:

dZ = Deformasi vertikal

Z_0 = Ketinggian waktu periode awal

Z_n = Ketinggian waktu pengamatan berkala (2, 3, 4, ..., 8)

Namun, perlu dipahami bahwa setiap pengukuran mengandung ketidakpastian atau kesalahan. Menggunakan perhitungan sederhana seperti yang dijelaskan sebelumnya tidak secara optimal mempertimbangkan karakteristik kesalahan dalam pengukuran, terutama ketika melibatkan banyak observasi dan diperlukan estimasi yang paling akurat serta uji signifikansi. Oleh karena itu, untuk memperoleh analisis deformasi yang lebih robust (lebih akurat, stabil dan dapat dipercaya) dan inferensi statistik yang valid, diperlukan metode estimasi yang mampu meminimalkan pengaruh kesalahan acak. Salah satu metode yang paling umum dan efektif untuk tujuan ini adalah hitung perataan kuadrat terkecil.

2.3 Hitung Perataan Kuadrat Terkecil (*Least Square*)

Hitung perataan kuadrat terkecil (*Least-Squares*) merupakan salah satu pendekatan utama dalam bidang keteknikan, yang digunakan untuk membentuk model atau persamaan dari kumpulan data titik, serta mengevaluasi ketelitian hasil pengukuran dalam proses validasi model. Metode ini tergolong dalam pendekatan berbasis distribusi kesalahan, ditandai oleh mekanisme pengurangan kesalahan total (*global error*) yang dihitung sepanjang seluruh rentang pendekatan, dengan akurasi yang meningkat seiring bertambahnya orde pendekatan (Bismo, 2015).

Berbeda dengan pendekatan asimtotik, seperti yang dikembangkan melalui deret Taylor dan cenderung mengoptimalkan kesalahan pada titik-titik lokal tertentu, metode kuadrat terkecil berfokus pada reduksi kesalahan secara menyeluruh. Dalam konteks statistik, metode ini sangat berperan dalam analisis data acak dan evaluasi kesalahan eksperimen, menjadikannya alat yang efektif dalam pemrosesan data empiris secara ilmiah (Bismo, 2015).

Dalam aplikasi dunia teknik, khususnya teknik sipil, metode kuadrat terkecil sering digunakan sebagai metode identifikasi sistem berbasis data untuk berbagai keperluan seperti perencanaan konstruksi, survei, dan analisis stabilitas struktur. Dengan memanfaatkan data pengukuran deformasi pada berbagai titik sepanjang struktur jembatan, metode ini memungkinkan perhitungan tren deformasi secara keseluruhan, mengingat MKT dikenal luas untuk kemampuannya dalam mengestimasi parameter sistem dari data observasi (Ataei dkk., 2025). Hasil analisis ini tidak hanya membantu dalam memprediksi pola deformasi di masa depan, tetapi juga memberikan wawasan penting untuk perencanaan pemeliharaan dan peningkatan keamanan struktur jembatan. Dalam proses hitung perataan banyak menggunakan matriks.

Matriks adalah pengelompokan bilangan yang disusun dalam bentuk baris dan kolom yang berbentuk segi empat. Setiap bilangan dalam matriks disebut unsur dari matriks tersebut (Kahar, 2006). Dalam membaca matriks disesuaikan dengan Jumlah unsur yang ada pada baris dan kolom matriks. Sebagai contoh sebagai berikut:

$$\text{Matriks } A = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{bmatrix}$$

Matriks A dibaca Matriks 2×2 karena terdisiri atas 2 baris dan 2 kolom. Dengan jumlah unsur ada 4 yaitu 1, 2, 3, 4 dengan letak masing-masing secara berurutan adalah $a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$. Sebagai contoh unsur 1 terletak pada a_{11} artinya unsur 1 terletak pada baris 1 kolom 1 pada matriks A .

Penelitian ini akan banyak menggunakan operasi perhitungan matriks seperti operasi perkalian matriks, matriks transpose dan matriks invers.

1. Operasi perkalian matriks

Perkalian dua matriks dapat dilakukan jika jumlah baris matriks pertama sama dengan Jumlah kolom matriks kedua. Dimana hasil perkalian matriks $A (b \times k)$ dengan matriks $B (c \times m)$ akan menghasilkan matriks $C (b \times m)$.

$$\text{Contoh: } AB = C = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ b_{31} & b_{32} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix}$$

Dari contoh diatas matriks $A (2 \times 2)$ dikalikan dengan matriks $B (3 \times 2)$ menghasilkan matriks $C (2 \times 2)$.

2. Matriks transpos

Matriks transpos adalah matriks yang dioperasikan dengan melakukan pertukaran unsur baris menjadi kolom dan sebaliknya dari matriks asalnya. Sebagai contoh matriks A yang di transpos akan dinotasikan dengan A^T .

$$\text{Contoh: } A = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \\ 5 & 6 \end{bmatrix} \text{ maka } A^T = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 2 & 4 & 6 \end{bmatrix}$$

3. Matriks invers/kebalikan

Matriks invers adalah matriks baru yang Ketika dikalikan dengan matriks asalnya akan menghasilkan matriks identitas. Matriks invers hanya ada untuk matriks persegi dimana Jumlah baris dan kolom sama serta determinannya tidak sama dengan nol. Matriks invers dinotasikan dengan A^{-1} . Cara menentukan invers matriks bisa menggunakan rumus berikut:

$$A^{-1} = \frac{1}{\det A} \times \text{adj}A$$

$$\text{Jika matriks } A = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \text{ maka } A^{-1} = \frac{1}{(ad-bc)} \times \begin{bmatrix} d & -b \\ -c & a \end{bmatrix}$$

2.4 Uji Hipotesis

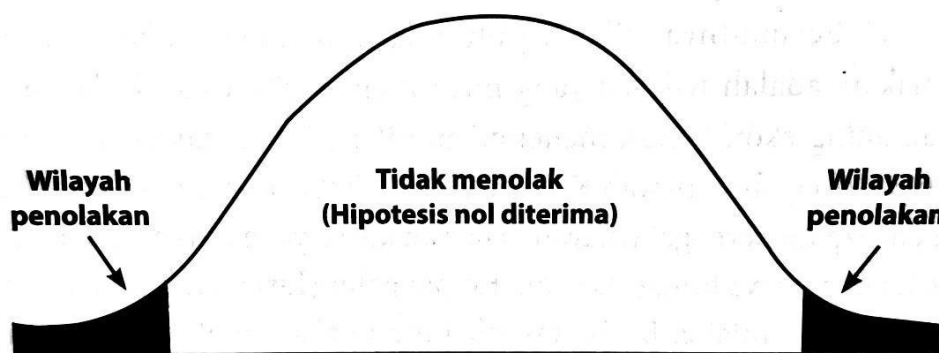
Suatu hipotesis dapat didefinisikan sebagai, pernyataan formal mengenai hubungan antara variabel dan diuji secara langsung. Dalam hal ini, perkiraan yang dibuat terhadap hubungan antara variabel dapat benar atau salah. Hipotesis nol menyatakan bahwa perbedaan statistik atau hubungan yang ditemukan dalam analisis disebabkan adanya kesalahan acak. Melakukan uji hipotesis berarti melakukan uji signifikansi yang berarti peneliti harus menentukan untuk menerima atau menolak hipotesis nol. Jika H_0 diterima, maka H_1 harus ditolak; dan begitupun sebaliknya (Morissan, 2012).

Uji-t merupakan salah satu metode statistik parametrik yang digunakan untuk mengevaluasi apakah rata-rata suatu kelompok sampel berbeda secara signifikan dari suatu nilai referensi. Pengujian ini didasarkan pada asumsi bahwa data bersifat interval atau rasio, terdistribusi normal, serta memiliki varian yang homogen. Uji-t satu sampel secara khusus dimanfaatkan saat peneliti hendak membandingkan rata-rata suatu parameter yang diperoleh dari sampel terhadap

nilai acuan yang ditentukan sebelumnya. Dalam konteks penelitian ini, uji-t digunakan untuk memastikan apakah perbedaan nilai estimasi parameter benar-benar signifikan secara statistik, atau sekadar hasil dari fluktuasi acak yang tidak bermakna (Morissan, 2012).

Untuk menentukan signifikansi statistik suatu penelitian menggunakan Uji-T, maka lebih dulu ditentukan suatu nilai kritis berdasarkan tingkat signifikansi dan nilai derajat kebebasan hipotesis nol yang akan diuji. Nilai kritis akan berfungsi sebagai ambang batas untuk membandingkan statistik uji yang dihitung dari data.

Jika hasil perhitungan menunjukkan nilai absolut t-hitung lebih besar dari nilai t-kritis maka nilai t-hitung tersebut jatuh ke dalam daerah penolakan hipotesis nol, sehingga dalam kasus ini H_0 bisa ditolak. Sebaliknya jika nilai absolut t-hitung lebih kecil atau sama dengan nilai t-kritis, maka nilai t-hitung tersebut jatuh dalam daerah penerimaan (gagal menolak H_0), artinya tidak ada cukup bukti statistik untuk mendukung adanya deformasi signifikan (Morissan, 2012). Sebagai ilustrasi daerah penerimaan dan area penolakan bisa dilihat pada gambar 2. 2



Gambar 2. 1 Grafik Wilayah Penolakan untuk Uji-T (Ekor-Dua) (Sumber: Morissan, 2012)

Dengan hipotesis yang dirumuskan yaitu:

H_0 (Hipotesis Nol/Awal): “Tidak ada deformasi signifikan yang terjadi pada titik pantau selama periode pengamatan” (tidak terjadi deformasi)

H_1 (Hipotesis Alternatif): “Ada deformasi signifikan yang terjadi pada titik pantau selama periode pengamatan” (terjadi deformasi)

2.4.1 Signifikansi Statistik

Signifikansi statistik tidak bertujuan untuk menunjukkan apakah suatu penelitian itu penting atau tidak penting. Signifikansi statistik hanya mengacu pada kemungkinan bahwa hubungan yang diteliti pada sampel dapat disebabkan semata-mata karena adanya kesalahan *sampling* (*sampling error*). Peneliti sering kali membedakan antara signifikansi statistik dan signifikansi substantif. Istilah yang terakhir ini mengacu pada apakah hubungan antara variabel cukup besar sehingga

mampu membentuk perbedaan yang bermakna. Jika signifikansi statistik dapat dihitung, maka signifikansi substantif dibuat berdasarkan penilaian (Morissan, 2012).

2.5 Metode Survei Terestris

Metode survei terestris adalah salah satu metode pemetaan yang bertujuan untuk menggambarkan kondisi topografi suatu wilayah di atas permukaan bumi. Keunggulan dari survei terestris ini yaitu ketelitian yang lebih tinggi dibandingkan pemetaan metode fotogrametri, namun metode ini memiliki kekurangan dari segi akuisisi data yang membutuhkan waktu yang lama tergantung dengan luas wilayah yang akan dipetakan. Dalam bidang ilmu ukur tanah, secara umum pengukuran terestris ini dibagi dalam dua jenis pengukuran yaitu pengukuran poligon dan pengukuran detail situasi (Sukmawati dkk., 2018). Proses *monitoring* deformasi menggunakan metode survei terestris bisa dijadikan solusi yang efektif dan efisien dari segi biaya dan waktu dengan tetap menjaga akurasi pengukuran yang bisa disesuaikan dengan kebutuhan (Sukmawati dkk., 2018).

2.6 Total station



Gambar 2. 3 Alat *Total station* (Sumber: Mahajan, 2021)

Total station (gambar 2.2) merupakan salah satu alat ukur terestris yang banyak digunakan dalam survei modern dengan menggabungkan fungsi *theodolite* dan *Electronic Distance Measurement* (EDM). *Total station* sudah dilengkapi processor, sehingga bisa digunakan untuk menghitung jarak datar maupun jarak miring, koordinat *Easting*, *Northing* dan beda tinggi secara langsung tanpa menggunakan alat tambahan. *Total station* banyak digunakan dalam kegiatan survei dan pemetaan karena dapat memberi data yang akurat (Adi & Aghastya, 2017). Beberapa keunggulan dari *total station* dapat dijabarkan seperti dibawah:

1. Akurasi tinggi, *total station* mampu memberikan hasil pengukuran yang tingkat akurasinya tinggi sampai sangat tinggi
2. Efisien, proses pengukuran menggunakan *total station* lebih cepat dan efisien jika dibandingkan dengan pengukuran manual sehingga dapat menghemat waktu.
3. Data hasil pengukuran menggunakan *total station* disimpan dan diolah secara digital pada alat sehingga lebih mudah dipahami dan mudah untuk diolah lebih lanjut.
4. Penggunaannya lebih fleksibel, dapat digunakan untuk berbagai jenis pengukuran, termasuk pengukuran tanah, bangunan, pengawasan kegiatan konstruksi, pemantauan deformasi, pemetaan situasi dan lain sebagainya.

2.7 Titik Kontrol Dasar

Titik kontrol dalam kegiatan survei dan pemetaan dibagi menjadi dua yaitu titik kontrol *horizontal* dan titik kontrol vertikal. Pada penelitian ini klasifikasi titik kontrol yang digunakan adalah orde 3.

2.7.1 Titik Kontrol Horizontal

Titik kontrol *horizontal* adalah kumpulan beberapa titik yang memiliki koordinat (X, Y) yang telah ditentukan, dengan tingkat akurasi tinggi dan digunakan sebagai referensi dalam kegiatan survei dan pemetaan. Titik-titik ini membentuk jaringan kontrol *horizontal* yang satu sama lainnya dikaitkan dengan data jarak, sudut dan koordinatnya ditentukan dengan metode pengukuran atau pengamatan tertentu. Titik ini membantu dalam penentuan posisi relatif dari titik-titik lain di lapangan. Titik kontrol *horizontal* sangat penting dalam berbagai aplikasi geospasial, termasuk pemetaan topografi, konstruksi, dan pemantauan deformasi. Selain sebagai referensi, titik kontrol *horizontal* juga digunakan untuk memastikan data survei dan pemetaan konsisten sehingga dapat diintegrasikan dengan data yang lain (BSN, 2002). Klasifikasi titik kontrol *horizontal* dikenal juga dengan sebutan orde jaringan, yang dilihat berdasarkan tingkat akurasi dan metode pengukurannya. Spesifikasi teknis terkait metode dan strategi pengamatan jaring titik kontrol geodetik bisa dilihat pada tabel 2.1.

2.7.2 Titik Kontrol Vertikal

Titik kontrol vertikal (posisi secara Z) merujuk pada posisi di permukaan bumi yang ditandai secara fisik dan digunakan sebagai acuan dalam menentukan posisi vertikal dalam sistem referensi geospasial. Titik-titik ini memastikan pengukuran posisi vertikal objek lain dapat dilakukan dengan akurat dan konsisten. Bidang ketinggian yang biasanya digunakan berupa ketinggian muka air laut rata-

rata (*Mean Sea Level*) atau ditentukan secara lokal. Titik kontrol vertikal biasanya diukur menggunakan metode pengukuran beda tinggi sipat datar, pengukuran trigonometris dan pengukuran barometris. Metode sipat datar merupakan cara pengukuran beda tinggi yang paling teliti jika dibandingkan dengan metode lainnya dan paling banyak digunakan sampai saat ini (Safrel, 2010). Klasifikasi titik kontrol geodetik bisa dilihat pada tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Spesifikasi Teknis Metode Dan Strategi Pengamatan Jaringan Titik Kontrol Geodetik Orde-00 S/D Orde-4 (GPS)

Keterangan	Orde Jaringan					
	00	0	1	2	3	4
Metode pengamatan	GPS kontinu	Survei GPS	Survei GPS	Survei GPS	Survei GPS	Survei GPS
Lama pengamatan/sesi	kontinu	24 Jam	6 Jam	2 Jam	1 Jam	0.25 Jam
Data pengamatan utama untuk penentuan posisi	Fase dua frekuensi i	Fase dua frekuensi i	Fase dua frekuensi i	Fase dua frekuensi i	Fase satu frekuensi i	Fase satu frekuensi i
Mode pengamatan	Jaring tetap	Jaring	Jaring	Jaring	Jaring	Radial
Pengamatan independen di setiap titik						
• Setidaknya 3 kali (% dari jumlah titik)	100%	50%	40%	20%	10%	-
• Setidaknya 2 kali (% dari jumlah titik)	100%	100%	100%	100%	100%	-
Interval data pengamatan	30	30	30	15	15	15
Jumlah satelit minimum	Tidak ada	4 satelit				
Nilai PDOP yang diperlukan	Tidak ada	Lebih kecil dari 10				
Elevasi satelit minimum	15 ⁰					
Pengamatan data meteorologist	Ya	Ya	Ya	Tidak	Tidak	Tidak

*) SNI 19-6724-2002 (BSN, 2002)

2.8 Penelitian Sebelumnya

Penelitian ini merujuk ke beberapa penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya, yang membahas tentang deformasi jembatan dengan beberapa metode pengukuran yang berbeda dengan konsep yang sama. Berikut merupakan informasi terkait penelitian sebelumnya tentang pemantauan deformasi dan beberapa metode yang digunakan disajikan dalam tabel 2.2:

Tabel 2. 2 Informasi Penelitian Sebelumnya

Judul Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian	Gap
Beshr, A. A. E. (2015), " <i>Structural Deformation Monitoring and Analysis of Highway Bridge Using Accurate Geodetic Techniques</i> "	Teknik geodesi menggunakan GPS <i>dual frequency receiver</i> dan <i>total station</i> GeoMax; transformasi tujuh parameter untuk memastikan akurasi data yang diperoleh	Penyimpangan koordinat bervariasi dari 42.23 mm sampai 1.19 mm; nilai maksimum deformasi 8.3 cm (<i>horizontal</i>) dan 4.7 cm (<i>vertikal</i>)	Metode memerlukan peralatan yang cukup mahal dan kompleks; membutuhkan keahlian tinggi untuk analisis data dan interpretasi hasil
Suprayogi, dkk (2020), "Survei Deformasi Dengan Metode GNSS Tahun 2019 Di Sekitar Jembatan Penggaron"	Metode survei GNSS dengan pengamatan dua kali masing-masing 8 jam; analisis data menggunakan <i>software</i> GAMIT 10.7	Pergeseran terbesar pada titik BMDU sebesar 0.051 meter ke arah 89.537 derajat; pergerakan tanah signifikan di sekitar Jembatan Penggaron	Memerlukan jaringan CORS yang stabil; durasi pengamatan yang cukup lama; bergantung pada kondisi atmosfer dan multipath efek
Azeez, A.K. (2018), " <i>Deformation Monitoring Using Total stations: An Evaluation Of System Performance</i> "	menggunakan metode uji statis dengan simulasi bendungan di sekitar Gedung Geospatial Nottingham (NGB) di Universitas Nottingham. <i>Total stations</i> digunakan	Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa <i>total stations</i> , khususnya model Leica TCA2003, Leica TS30, dan Trimble S6, memiliki kemampuan yang baik untuk	Masih terdapat beberapa area yang dapat diperbaiki. Misalnya, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengevaluasi kinerja <i>total</i>

	untuk mengukur sudut-sudut <i>horizontal</i> dan vertikal serta jarak ke titik-titik target yang dipasang pada struktur. Data yang dikumpulkan kemudian dianalisis menggunakan perangkat lunak pemrosesan data otomatis seperti Leica GeoMoS.	pemantauan deformasi struktural. Hasil pengujian menunjukkan bahwa <i>total stations</i> ini dapat mencapai akurasi dan presisi yang tinggi dalam pengukuran deformasi.	<i>stations</i> dalam kondisi cuaca yang beragam dan lingkungan yang lebih kompleks. Selain itu, pengembangan teknologi dan perangkat lunak yang lebih canggih dapat meningkatkan efisiensi dan akurasi pemantauan.
Hulwani, Z., dkk. (2022) “Analisis Kestabilan Terowongan Menggunakan Data Pemantauan Deformasi Massa Batuan Dengan <i>Total station</i> Pada Terowongan Kereta Api Notog”	Penelitian ini menggunakan <i>total station</i> STA 395 untuk mengukur deformasi massa batuan di sekitar terowongan. Pengukuran dilakukan pada tiga titik pantau: dinding kiri (titik A), atap (titik B), dan dinding kanan (titik C)1. Data yang dikumpulkan kemudian dianalisis menggunakan perangkat lunak pemrosesan data otomatis seperti Leica GeoMoS. Penentuan kriteria kestabilan didasarkan pada	Penelitian ini menunjukkan bahwa terowongan kereta api Notog BH 1440 berada dalam kondisi stabil. Pengukuran deformasi massa batuan menggunakan <i>total station</i> menunjukkan bahwa perpindahan pada titik A (dinding kiri) adalah 2,4 mm, titik B (atap) adalah 1,5 mm, dan titik C (dinding kanan) adalah 2,2 mm. Berdasarkan kriteria kestabilan yang digunakan, terowongan dikategorikan stabil	Meskipun penelitian ini menunjukkan bahwa terowongan dalam kondisi stabil, masih terdapat beberapa area yang dapat diperbaiki. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengevaluasi kinerja <i>total stations</i> dalam kondisi cuaca yang beragam dan lingkungan yang lebih kompleks.

	laju perpindahan menurut Zhenxiang (1984), Cording (1974), dan UG Geotech PT. Freeport (2000)		
Hakim, R. N. (2016) “Monitoring Deformasi Dinding Dan Atap Terowongan Tambang Emas Bawah Tanah Menggunakan Total station Reflektorless”	menggunakan <i>total station reflektorless</i> untuk mengukur deformasi pada dinding dan atap terowongan. Pengukuran dilakukan pada titik-titik yang dipilih di sekitar terowongan, dan data yang dikumpulkan dianalisis menggunakan perangkat lunak pemrosesan data otomatis. Metode ini memungkinkan pengukuran yang lebih mudah dan akurat dibandingkan dengan metode tradisional yang memerlukan reflektor.	Penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan <i>total station reflektorless</i> dapat secara efektif memantau deformasi pada dinding dan atap terowongan tambang emas bawah tanah. Pengukuran yang dilakukan menunjukkan bahwa terdapat perpindahan yang signifikan pada beberapa titik pengamatan, dengan rata-rata perpindahan sebesar 18 mm.	Diperlukan pengembangan teknologi dan metode pemantauan yang lebih canggih untuk meningkatkan akurasi dan efisiensi dalam pemantauan deformasi terowongan tambang. Selain itu, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk memahami dampak lingkungan dan kondisi operasi lainnya terhadap kinerja <i>total station reflektorless</i> .