Journal of Innovative and Creativity
Journal Homepage: https://joecy.org/index.php/joecy
e-mail: journaljoecy@gmail.com

Faculty of Education
University of Pahlawan Tuanku Tambusai
ISSN 2775-771X (Online)
ISSN 2962-570X (Printed)
6 (1) 2026, Page: 1722-1736

Analisis Desain Dan Konstruksi Jembatan Ngargosari Berbasis Investigasi Geoteknik Di Kabupaten Boyolali

Suudi Al Mukarom[1]
[1]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Semarang
Email : suudialmukarom@unimus.ac.id

Published: January, 2026

ABSTRACT
The Ngargosari Bridge is a strategic infrastructure connecting Kiringan-Ngargosari in Ampel District, Boyolali Regency. This research analyzes the design and construction of a bridge with a total span of 30 meters (12m + 18m) based on comprehensive geotechnical investigation. Research methods include cone penetration tests at 4 location points, soil bearing capacity analysis, and structural design using a combination of reinforced concrete and steel. Investigation results show variations in hard soil depth between 1.2-4.2 meters with qc values reaching 180 kg/cmI in cohesive soil consisting of volcanic sandy clay. Structural design employs T-beam girders (40x80 cm) for the 12-meter span and IWF 600.200.11.17 steel profiles for the 18-meter span, with foundations adapted to local soil conditions. Material specifications include concrete grades fc' 10-25 MPa and BjTS 420B reinforcing steel according to SNI standards. This research provides practical contributions to geotechnical data-based bridge design for volcanic soil conditions in Indonesia.
Keywords: concrete-steel bridge, geotechnical investigation, cone penetration test, soil bearing capacity, structural design

© The Author(s). 2021 Open Access This article is licensed under a Creative Commons Atibution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. To view a copy of this licence, visit http://creativecommons.org/licenses/by/4.0

1. INTRODUCTION

1.1. Latar Belakang

Infrastruktur jembatan memiliki peran vital dalam mendukung konektivitas wilayah dan pertumbuhan ekonomi daerah. Di Kabupaten Boyolali, Jawa Tengah, kebutuhan akan infrastruktur jembatan yang handal semakin meningkat seiring dengan perkembangan aktivitas ekonomi dan mobilitas masyarakat. Jembatan Ngargosari yang menghubungkan Kiringan-Ngargosari di Kecamatan Ampel merupakan salah satu proyek strategis yang direncanakan untuk meningkatkan aksesibilitas dan mendukung pertumbuhan ekonomi lokal [1].

Desain jembatan yang optimal memerlukan pemahaman mendalam terhadap kondisi geoteknik lokasi, karakteristik beban yang akan ditanggung, serta pemilihan sistem struktur yang tepat [2]. Investigasi geoteknik menjadi tahapan krusial dalam perencanaan jembatan karena menentukan jenis dan dimensi pondasi yang akan digunakan [3]. Kondisi tanah di wilayah Boyolali yang merupakan hasil pelapukan batuan vulkanik Gunung Merapi memiliki karakteristik khusus yang memerlukan analisis geoteknik komprehensif [4].

Pemilihan sistem struktur jembatan juga menjadi pertimbangan penting dalam desain. Kombinasi struktur beton bertulang dan baja telah banyak diaplikasikan pada jembatan bentang menengah karena memberikan efisiensi struktural dan ekonomis [5]. Penggunaan gelagar beton untuk bentang pendek dan profil baja untuk bentang panjang dapat mengoptimalkan kinerja struktur sekaligus meminimalkan biaya konstruksi [6].

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana karakteristik geoteknik tanah di lokasi Jembatan Ngargosari berdasarkan hasil uji sondir?
2. Bagaimana analisis daya dukung tanah untuk menentukan desain pondasi yang optimal?
3. Bagaimana desain struktural jembatan dengan kombinasi beton bertulang dan baja untuk bentang total 30 meter?
4. Bagaimana spesifikasi material dan metodologi konstruksi yang sesuai dengan kondisi lokasi?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Menganalisis karakteristik geoteknik tanah di lokasi Jembatan Ngargosari melalui uji sondir pada 4 titik lokasi
2. Menghitung daya dukung tanah dan menentukan kedalaman pondasi yang optimal
3. Merancang struktur jembatan dengan kombinasi gelagar beton dan baja sesuai standar SNI dan AASHTO
4. Menyusun spesifikasi material dan metodologi konstruksi yang komprehensif

1.4. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat:

1. Memberikan referensi praktis dalam desain jembatan berbasis investigasi geoteknik untuk kondisi tanah vulkanik
2. Menyediakan data teknis komprehensif untuk implementasi proyek Jembatan Ngargosari
3. Memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan metode desain jembatan kombinasi beton-baja
4. Menjadi acuan bagi praktisi dan akademisi dalam perencanaan infrastruktur jembatan di wilayah dengan kondisi geologi serupa

---

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Standar Desain Jembatan

Desain jembatan di Indonesia mengacu pada Standar Nasional Indonesia (SNI) yang mengatur berbagai aspek perencanaan struktur jembatan. SNI 1725:2016 tentang Pembebanan untuk Jembatan dan SNI 2833:2016 tentang Perencanaan Jembatan terhadap Beban Gempa menjadi acuan utama dalam perhitungan beban dan analisis struktur [7]. Selain standar nasional, American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) Load and Resistance Factor Design (LRFD) juga sering dijadikan referensi dalam desain jembatan, khususnya untuk aspek geoteknik dan desain pondasi [8].

Penelitian terkini menunjukkan pentingnya integrasi standar desain dengan kondisi lokal. Samtani et al. [8] menguraikan perkembangan Service Limit State dalam desain elemen geoteknik menggunakan AASHTO LRFD, yang menekankan pendekatan berbasis reliabilitas untuk desain pondasi jembatan. Pendekatan ini mempertimbangkan pergerakan pondasi sebagai efek gaya yang dapat menyebabkan torsi, momen, dan geser yang berpotensi menimbulkan retak pada struktur [14].

2.2. Metode Investigasi Geoteknik

Investigasi geoteknik merupakan tahapan fundamental dalam perencanaan pondasi jembatan. Uji sondir atau Cone Penetration Test (CPT) adalah salah satu metode yang paling umum digunakan untuk mengevaluasi karakteristik tanah dan daya dukung pondasi [9]. Metode ini memberikan data kontinu tentang tahanan ujung konus (qc), hambatan lekat (fs), dan parameter geoteknik lainnya yang dapat digunakan untuk mengklasifikasi jenis tanah dan menghitung daya dukung [18].

Adunoye et al. [18] menekankan pentingnya investigasi tanah dan daya dukung untuk struktur teknik seperti jembatan, dengan menggunakan berbagai metode seperti uji triaksial, batas Atterberg, dan analisis ukuran partikel. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa karakteristik tanah dan bentuk pondasi (circular, square, strip) mempengaruhi kapasitas daya dukung yang dihitung menggunakan persamaan Terzaghi.

Dalam kondisi tanah yang menantang, integrasi teknik perbaikan tanah dengan desain pondasi menjadi penting. Lurich et al. [7] membahas desain pondasi jembatan yang mengintegrasikan teknik

perbaikan tanah pada kondisi tanah yang menantang, menggunakan metodologi studi kasus untuk desain pondasi dan kontrol kualitas [7].

2.3. Desain Pondasi Jembatan

Desain pondasi jembatan harus mempertimbangkan kondisi geoteknik, beban struktur, dan metode konstruksi. Untuk jembatan dengan kondisi tanah bervariasi, pemilihan jenis pondasi menjadi krusial. Arif et al. [6] menganalisis perubahan desain pondasi abutment Jembatan Kikuba dari pondasi sumuran menjadi pondasi bore pile berdasarkan hasil investigasi tanah yang menunjukkan nilai N-SPT 60 pada kedalaman rata-rata 19 meter, yang membuat pondasi sumuran tidak sesuai [6].

Rodrigues et al. [9] menyoroti peran kritis karakteristik tanah dan pondasi dalam seperti tiang pancang dan mikropilot dalam memastikan stabilitas dan durabilitas struktur jembatan. Penelitian tersebut membahas tantangan teknis dalam pelaksanaan pondasi terkait kondisi geoteknik dan lingkungan, dengan studi kasus Jembatan Rio Negro [9].

Inovasi dalam sistem pondasi dalam terus berkembang. Usman et al. [17] melakukan tinjauan sistematis terhadap inovasi sistem pondasi dalam, menyoroti pendekatan desain berbasis kinerja seperti model kurva p-y yang dikalibrasi lokasi dan sistem tiang hibrida. Simulasi numerik canggih dan model pembelajaran mesin meningkatkan akurasi prediktif untuk settlement dan kapasitas beban [17].

2.4. Desain Struktur Beton dan Baja

Struktur jembatan modern sering menggunakan kombinasi beton bertulang dan baja untuk mengoptimalkan efisiensi struktural. Zhang [1] menganalisis elemen desain kunci untuk jembatan bentang besar, membahas pemilihan tipe struktur dengan mengutamakan rangka kaku kontinu untuk kapasitas bentang dan stabilitas, serta box girder kecil untuk efisiensi [1].

Untuk jembatan dengan bentang menengah, penggunaan gelagar beton prategang dan profil baja menjadi solusi yang efektif. Tanaka et al. [27] mendesain jembatan lengkung seimbang hibrida baja-beton (Jembatan Kouchigawa), mendemonstrasikan aplikasi praktis kombinasi material dalam desain jembatan modern [27].

Ngo et al. [10] melakukan monitoring dan analisis distribusi temperatur pada box girder beton bertulang di Vietnam, sesuai dengan Spesifikasi AASHTO LRFD. Penelitian tersebut menggunakan regresi data untuk membangun formula prediktif distribusi temperatur, yang relevan untuk prinsip desain struktural [10].

2.5. Kontrol Kualitas Konstruksi

Kontrol kualitas dalam konstruksi jembatan, khususnya untuk pondasi, sangat penting untuk memastikan keamanan dan durabilitas struktur. Leiyi et al. [2] menyoroti langkah-langkah kontrol kualitas untuk tiang bor pada konstruksi jembatan jalan raya, termasuk kontrol atas persiapan lokasi, vertikalitas pengeboran, produksi cage baja, dan penempatan beton. Metode investigasi geoteknik seperti deteksi low strain, core sampling, dan deteksi ultrasonik dibahas untuk pengujian integritas [2].

Omarov et al. [26] melakukan studi komparatif teknik kontrol kualitas tiang, yang relevan untuk memastikan integritas pondasi jembatan. Fu [30] membahas aplikasi teknologi deteksi ultrasonik dalam deteksi pondasi tiang beton jembatan, yang merupakan metode non-destruktif untuk evaluasi kualitas pondasi [30].

Yang et al. [15] dalam bukunya tentang desain dan manajemen konstruksi jembatan jalan raya, menekankan teknik konstruksi kunci dan strategi manajemen, termasuk manajemen proyek, kontrol kualitas, dan manajemen risiko keselamatan untuk meningkatkan kualitas keseluruhan dan tingkat manajemen dalam teknik jembatan [15].

3. METHOD

3.1. Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada lokasi proyek Pembangunan Jembatan Ngargosari yang menghubungkan Kiringan-Ngargosari di Kecamatan Ampel, Kabupaten Boyolali, Jawa Tengah Tahun anggaran 2025.

Berdasarkan Peta Geologi Lembar Salatiga, lokasi proyek berada pada formasi geologi batuan gunung api tak terpisahkan (Qvm) yang terdiri dari breksi, lava, tuf, dan breksi lahar Gunung

Merapi. Jenis tanah di lokasi adalah tanah kohesif berupa pasir lempungan hasil pelapukan batuan vulkanik.

3.2. Prosedur Investigasi Geoteknik

3.2.1. Uji Sondir (Cone Penetration Test)

Investigasi geoteknik dilakukan menggunakan metode uji sondir pada 4 titik lokasi (SONDIR-01, 02, 03, 04) yang dilaksanakan pada tanggal 4-5 Agustus 2025. Uji penetrasi quasi statik menggunakan alat sondir dengan kapasitas maksimum 250 kg/cmI dan interval pengujian setiap 20 cm kedalaman.

Parameter yang diukur meliputi: - qc: Perlawanan/tahanan ujung konus (kg/cmI) - fs: Perlawanan geser/hambatan lekat (kg/cmI) - Ft: Geseran total tanah (kg/cmI) - Fr: Angka banding geser (%)

Prosedur pengujian sondir meliputi tahapan sebagai berikut:

Persiapan: 1. Menggali lubang sedalam 5 cm 2. Memasang 2 angkur 3. Memasang rangka pembebanan secara vertikal 4. Memasang balok pengunci dan mengencangkan angker 5. Memasang manometer 6. Memeriksa sistem hidraulik 7. Menyambung konus dengan batang dalam dan pipa dorong

Penetrasi Konus: 1. Interval kedalaman setiap 20 cm 2. Kedalaman 0,0-0,4 m pertama tidak dilakukan pengujian 3. Pembacaan nilai perlawanan konus pada penekanan batang dalam 4 cm pertama 4. Pembacaan nilai perlawanan konus dan geser pada penekanan 4 cm kedua

Kriteria Penghentian: 1. Nilai perlawanan konus mencapai 250 kg/cmI (batas maksimum kapasitas alat) 2. Atau mencapai kedalaman maksimum 20 meter

3.2.2. Peralatan Pengujian

Peralatan yang digunakan dalam uji sondir meliputi: - Konus/Bikonus untuk penetrasi tanah - Pipa Dorong: baja, panjang 1 m, penampang menerus, sambungan ulir, bagian dalam dilumasi - Batang Dalam: baja, diameter konstan, panjang sama dengan pipa dorong - Mesin Pembeban Hidraulik: sistem engkol, rantai, roda gigi, gerigi dorong, penekan hidraulik - Manometer tekanan rendah: 0-60 kg/cmI (ketelitian 1 kg/cmI) - Manometer tekanan menengah: 0-250 kg/cmI (ketelitian 5 kg/cmI)

3.3. Analisis Daya Dukung Tanah

Analisis daya dukung tanah dilakukan berdasarkan data hasil uji sondir menggunakan metode Meyerhof. Kriteria tanah keras ditetapkan pada nilai perlawanan konus (qc) > 200 kg/cmI atau ketika nilai qc mencapai batas maksimum kapasitas alat (250 kg/cmI). Kedalaman tanah keras pada setiap titik sondir digunakan sebagai dasar penentuan kedalaman pondasi.

3.4. Metodologi Desain Struktural

Desain struktural jembatan dilakukan mengacu pada standar SNI 1725:2016 tentang Pembebanan untuk Jembatan dan SNI 2833:2016 tentang Perencanaan Jembatan terhadap Beban Gempa, serta AASHTO LRFD Bridge Design Specifications untuk aspek geoteknik dan desain pondasi [8], [14].

Tahapan desain struktural meliputi:

1. Perencanaan Geometri: Penentuan bentang jembatan, lebar efektif, dan elevasi berdasarkan kondisi topografi dan kebutuhan lalu lintas
2. Analisis Pembebanan: Perhitungan beban mati, beban hidup, beban angin, dan beban gempa sesuai SNI
3. Desain Pondasi: Penentuan tipe, dimensi, dan kedalaman pondasi berdasarkan hasil analisis daya dukung tanah
4. Desain Struktur Atas: Perhitungan dimensi gelagar, pelat lantai, dan elemen struktur lainnya
5. Desain Penulangan: Perhitungan kebutuhan tulangan untuk setiap elemen struktur
6. Pemilihan Material: Penentuan mutu beton dan baja sesuai kebutuhan struktural

3.5. Spesifikasi Material

Spesifikasi material yang digunakan dalam desain meliputi:

Beton: - Tapak & Kepala Abutment: fc' 20 MPa - Plat Lantai: fc' 25 MPa - Tiang Sandaran: fc' 18 MPa (Sitemix) - Tapak & Kepala Pilar: fc' 20 MPa - Lantai Kerja: fc' 10 MPa (Site mix), tebal 10 cm

Baja Tulangan: - BjTS 420B (Ulir): untuk tapak & kepala abutment, plat lantai, dan shear connector - BJTP 280 (Polos): untuk tiang sandaran - Diameter tulangan: D10, D13, D16, D18, D19, D22

Baja Struktur: - Profil IWF: 600.200.11.17 (gelagar bentang 18 m) - Profil UNP: 200.80.75 (diafragma) - Mutu Baja: JIS G 3101 SS 400

4. FINDING AND DISCUSSION

4.1. Hasil Investigasi Geoteknik

4.1.1. Data Hasil Uji Sondir

Investigasi geoteknik dilakukan pada 4 titik lokasi dengan koordinat UTM sebagai berikut: - SONDIR-01: X: 455039, Y: 9171305, Z: 459 - SONDIR-02: X: 455005, Y: 9171317, Z: 462 - SONDIR-03: X: 455041, Y: 9171317, Z: 462 - SONDIR-04: X: 455020, Y: 9171320, Z: 462

Hasil uji sondir menunjukkan variasi karakteristik tanah pada setiap titik pengujian. Tabel 1 hingga Tabel 4 menyajikan data lengkap hasil uji sondir untuk keempat titik lokasi.

Tabel 1. Hasil Uji Sondir Titik SONDIR-01

Kedalaman (m)	qc (kg/cmI)	fs (kg/cmI)	Ft (kg/cmI)	Fr (%)
1,00	135,00	1,67	81,56	1,24
1,20	180,00	2,34	128,36	1,30

Kedalaman tanah keras: 1,2 meter

Tabel 2. Hasil Uji Sondir Titik SONDIR-02

Kedalaman (m)	qc (kg/cmI)	fs (kg/cmI)	Ft (kg/cmI)	Fr (%)
1,00	20,00	0,33	28,08	1,67
1,20	25,00	1,54	58,83	6,15
1,40	47,00	0,87	76,21	1,85
1,60	50,00	0,67	89,58	1,34
1,80	60,00	0,67	102,96	1,11
2,00	90,00	0,67	116,33	0,74
2,20	45,00	0,67	129,70	1,49
2,40	30,00	0,53	140,39	1,78
2,60	25,00	1,54	171,15	6,15
2,80	28,00	1,14	193,88	4,06
3,00	15,00	0,33	200,56	2,23
3,20	40,00	0,67	213,93	1,67
3,40	80,00	2,34	260,73	2,92
3,60	105,00	3,01	320,90	2,87
3,80	120,00	2,34	367,70	1,95
4,00	140,00	1,34	394,44	0,96
4,20	180,00	2,01	434,55	1,11

Kedalaman tanah keras: 4,2 meter

Tabel 3. Hasil Uji Sondir Titik SONDIR-03

Kedalaman (m)	qc (kg/cmI)	fs (kg/cmI)	Ft (kg/cmI)	Fr (%)
1,00	36,00	0,40	41,45	1,11
1,20	24,00	1,14	64,18	4,74
1,40	100,00	1,67	97,61	1,67
1,60	120,00	1,34	124,35	1,11
1,80	135,00	1,00	144,40	0,74
2,00	130,00	1,00	164,46	0,77
2,20	50,00	0,67	177,83	1,34
2,40	35,00	1,00	197,89	2,87
2,60	30,00	0,67	211,26	2,23
2,80	30,00	1,67	244,69	5,57
3,00	60,00	1,34	271,43	2,23
3,20	90,00	1,67	304,85	1,86
3,40	125,00	1,00	324,91	0,80
3,60	150,00	1,67	358,34	1,11
3,80	180,00	2,34	405,13	1,30

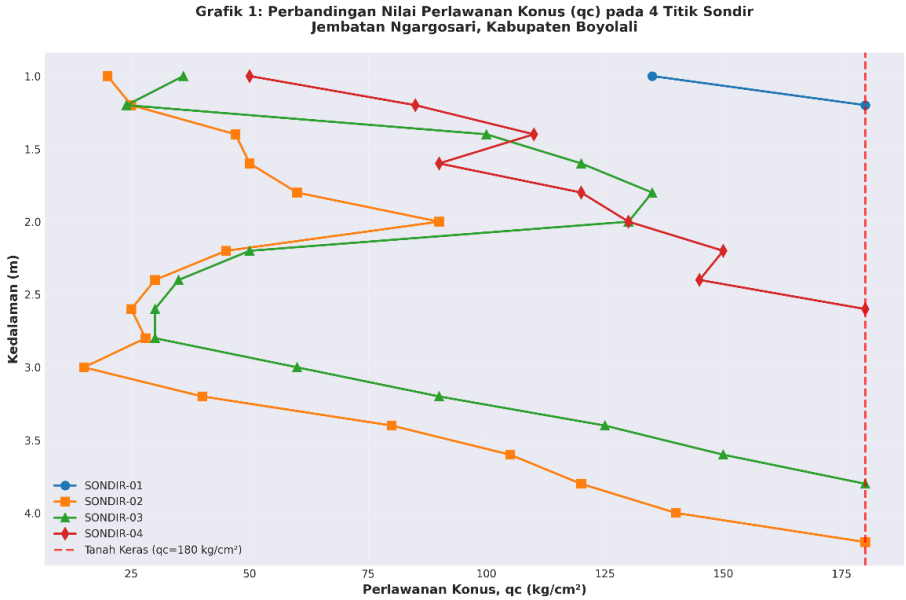
Kedalaman tanah keras: 3,8 meter

Tabel 4. Hasil Uji Sondir Titik SONDIR-04

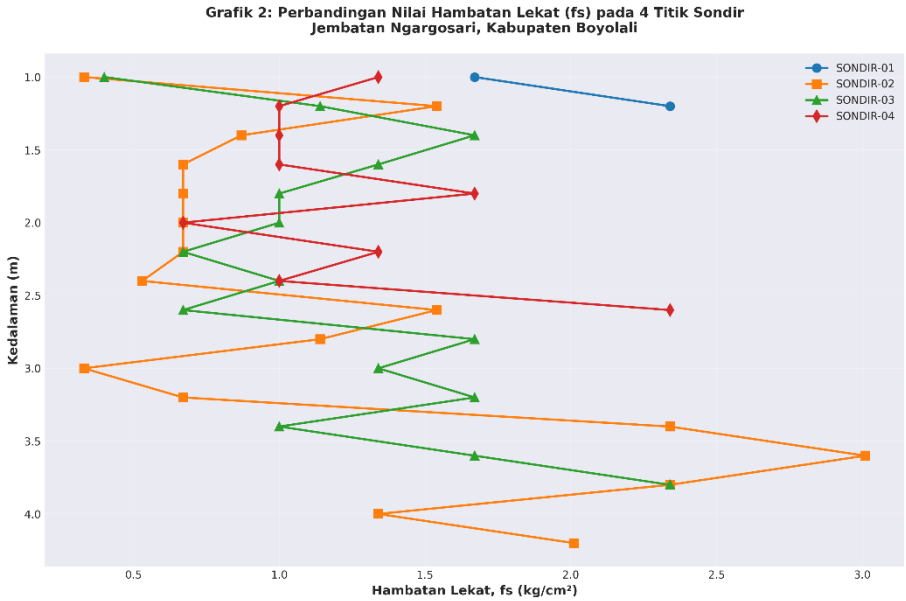
Kedalaman (m)	qc (kg/cmI)	fs (kg/cmI)	Ft (kg/cmI)	Fr (%)
1,00	50,00	1,34	80,22	2,67
1,20	85,00	1,00	100,28	1,18
1,40	110,00	1,00	120,34	0,91
1,60	90,00	1,00	140,39	1,11
1,80	120,00	1,67	173,82	1,39
2,00	130,00	0,67	187,19	0,51
2,20	150,00	1,34	213,93	0,89
2,40	145,00	1,00	233,99	0,69
2,60	180,00	2,34	280,79	1,30

Kedalaman tanah keras: 2,6 meter

Grafik 1. Perbandingan Nilai Perlawanan Konus (qc) pada 4 Titik Sondir



Grafik 2. Perbandingan Nilai Hambatan Lekat (fs) pada 4 Titik Sondir

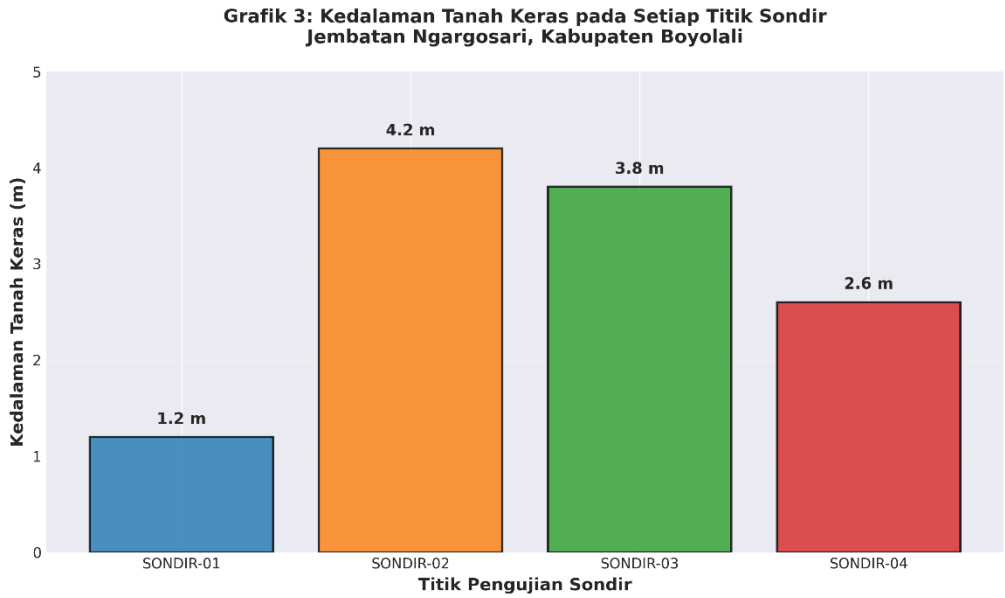


4.1.2. Karakteristik Lapisan Tanah

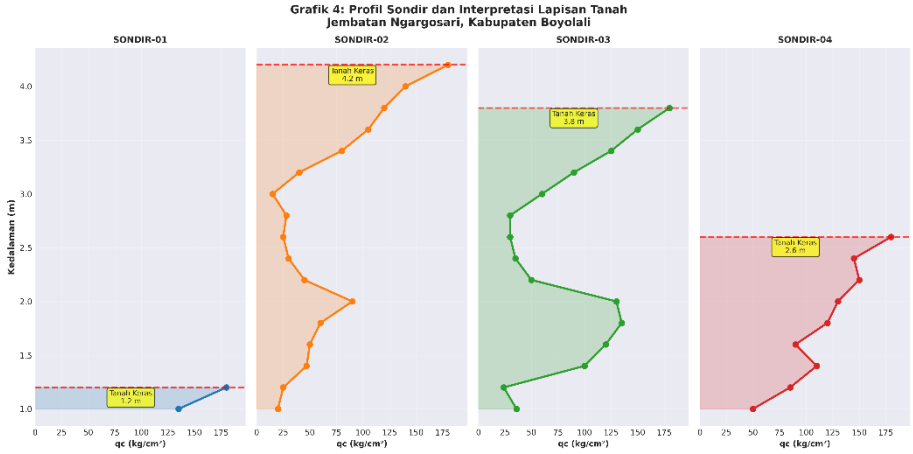
Berdasarkan hasil uji sondir, karakteristik lapisan tanah di lokasi Jembatan Ngargosari dapat diidentifikasi sebagai berikut:

1. Jenis Tanah: Tanah kohesif berupa pasir lempungan hasil pelapukan batuan vulkanik Gunung Merapi, sesuai dengan formasi geologi Qvm (batuan gunung api tak terpisahkan) yang terdiri dari breksi, lava, tuf, dan breksi lahar.
2. Variasi Kedalaman Tanah Keras: Hasil investigasi menunjukkan variasi signifikan kedalaman tanah keras pada keempat titik pengujian:
   - SONDIR-01: 1,2 meter (qc = 180 kg/cmI) - lapisan tanah keras paling dangkal
   - SONDIR-02: 4,2 meter (qc = 180 kg/cmI) - lapisan tanah keras paling dalam
   - SONDIR-03: 3,8 meter (qc = 180 kg/cmI)
   - SONDIR-04: 2,6 meter (qc = 180 kg/cmI)
3. Rentang Nilai Parameter Tanah:
   - Tahanan ujung konus (qc): 15 - 180 kg/cmI
   - Hambatan lekat (fs): 0,33 - 3,01 kg/cmI
   - Geseran total (Ft): 28,08 - 434,55 kg/cmI
   - Angka banding geser (Fr): 0,51 - 6,15 %

Grafik 3. Kedalaman Tanah Keras pada Setiap Titik Sondir



Grafik 4. Profil Sondir dan Interpretasi Lapisan Tanah



Variasi kedalaman tanah keras yang signifikan (1,2 hingga 4,2 meter) mengindikasikan heterogenitas kondisi tanah di lokasi proyek. Hal ini konsisten dengan karakteristik tanah vulkanik yang umumnya memiliki variasi lateral yang tinggi akibat proses deposisi material vulkanik yang tidak seragam [4], [19].

4.2. Analisis Daya Dukung Tanah

4.2.1. Interpretasi Hasil Uji Sondir

Interpretasi hasil uji sondir dilakukan untuk menentukan daya dukung tanah dan kedalaman pondasi yang optimal. Kriteria tanah keras ditetapkan pada nilai qc 180 kg/cmI, yang merupakan nilai yang umum digunakan untuk tanah kohesif dengan konsistensi keras [18].

Profil tanah pada SONDIR-02 menunjukkan karakteristik yang menarik, dimana terdapat lapisan lunak yang cukup tebal (hingga kedalaman 3,0 meter dengan nilai qc berkisar 15-90 kg/cmI) sebelum mencapai lapisan keras pada kedalaman 4,2 meter. Kondisi ini memerlukan perhatian khusus dalam desain pondasi untuk memastikan stabilitas struktur [7].

Sebaliknya, SONDIR-01 menunjukkan lapisan tanah keras yang relatif dangkal (1,2 meter), dengan nilai qc meningkat dari 135 kg/cmI pada kedalaman 1,0 meter menjadi 180 kg/cmI pada kedalaman 1,2 meter. Kondisi ini mengindikasikan adanya lapisan keras yang relatif dekat dengan permukaan tanah.

4.2.2. Rekomendasi Desain Pondasi

Berdasarkan analisis daya dukung tanah dan variasi kondisi geoteknik, rekomendasi desain pondasi adalah sebagai berikut:

1. Tipe Pondasi: Menggunakan pondasi tapak (spread footing) dengan kedalaman disesuaikan kondisi tanah keras pada setiap lokasi. Untuk lokasi dengan lapisan lunak yang tebal (seperti pada SONDIR-02), dapat dipertimbangkan penggunaan pondasi tiang atau perbaikan tanah [6], [7].
2. Kedalaman Pondasi:
   - Abutment sisi SONDIR-01: minimum 1,5 meter
   - Pilar area SONDIR-02/04: minimum 3,0-4,5 meter
   - Abutment sisi SONDIR-03: minimum 4,0 meter
3. Dimensi Pondasi: Berdasarkan perhitungan beban struktur dan daya dukung tanah, dimensi pondasi tapak untuk abutment adalah 600 x 600 cm, sedangkan untuk pilar adalah 510 x 380 cm.
4. Faktor Keamanan: Menggunakan faktor keamanan minimum 3,0 untuk daya dukung ultimit sesuai dengan praktik standar desain pondasi jembatan [8], [14].

Pendekatan desain ini sejalan dengan penelitian Arif et al. [6] yang menekankan pentingnya penyesuaian tipe pondasi berdasarkan hasil investigasi tanah. Dalam kasus Jembatan Kikuba, perubahan dari pondasi sumuran menjadi bore pile dilakukan setelah hasil investigasi menunjukkan kondisi tanah yang tidak sesuai dengan asumsi awal [6].

4.3. Desain Struktural Jembatan

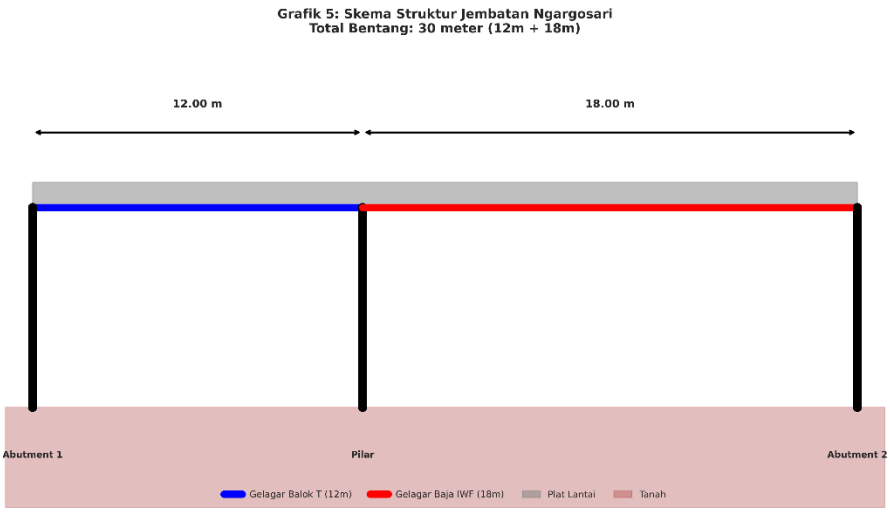
4.3.1. Spesifikasi Geometri Jembatan

Jembatan Ngargosari dirancang dengan spesifikasi geometri sebagai berikut:

- Bentang Total: 30,00 meter, terdiri dari dua bentang:
  - Bentang 1: 12,00 meter
  - Bentang 2: 18,00 meter
- Lebar Efektif: 7,81 meter
- Lebar Total: 17,00 meter (termasuk bahu jalan)
- Elevasi: Lantai sungai berada pada elevasi 27 meter

Pemilihan konfigurasi dua bentang dengan panjang berbeda (12m dan 18m) didasarkan pada kondisi topografi lokasi dan kebutuhan untuk meminimalkan jumlah pilar di tengah sungai. Konfigurasi ini juga memungkinkan optimalisasi penggunaan material dengan menggunakan gelagar beton untuk bentang pendek dan profil baja untuk bentang panjang [1], [5].

Grafik 5. Skema Struktur Jembatan Ngargosari



4.3.2. Sistem Struktur

Jembatan Ngargosari menggunakan sistem struktur kombinasi beton bertulang dan baja, yang terdiri dari:

A. Struktur Bawah (Substructure)

1. Pondasi Abutment
   - Dimensi tapak: 600 x 600 cm
   - Mutu beton: fc' 20 MPa
   - Penulangan: BjTS 420B (D13, D16, D18, D19, D22)
   - Jarak tulangan: D13-150, D22-150, D16-300
   - Selimut beton: 5 cm
   - Lantai kerja: fc' 10 MPa, tebal 10 cm
2. Pondasi Pilar
   - Dimensi: 510 x 380 cm
   - Mutu beton: fc' 20 MPa
   - Penulangan: BjTS 420B (D13, D16, D19, D22)
   - Selimut beton: 5 cm (tapak), 4 cm (kepala pilar)

B. Struktur Atas (Superstructure)

1. Gelagar Balok T (Bentang 12 meter)
   - Dimensi: 40 x 80 cm
   - Panjang: 11,80 meter
   - Penulangan utama: D22, D16
   - Tulangan geser: D13
   - Sengkang: D10
   - Mutu beton: sesuai spesifikasi struktur
2. Gelagar Baja IWF (Bentang 18 meter)
   - Profil: IWF 600.200.11.17
   - Panjang: 18,00 meter
   - Mutu baja: JIS G 3101 SS 400
   - Diafragma: UNP 200.80.75
   - Shear connector: BjTS 420B
3. Pelat Lantai
   - Panjang pelat 1: 12,00 meter
   - Panjang pelat 2: 18,40 meter
   - Mutu beton: fc' 25 MPa
   - Penulangan:
     - Tulangan L1, L2: D16-200
     - Tulangan L3, L4: D13-200
   - Selimut beton: 3 cm

C. Elemen Pelengkap

1. Perletakan (Bearing)
   - Tipe: Elastomeric Bearing
   - Kapasitas: 50 ton
   - Mortar pad: perbandingan 1PC : 2PS
   - Plat baja: tebal 3 mm
2. Railing/Tiang Sandaran
   - Tinggi: 100 cm
   - Material: Pipa galvanize ШЗ"
   - Mutu beton: fc' 18 MPa (Sitemix)
   - Mutu baja tulangan: BJTP 280 (Polos)
   - Selimut beton: 2,5 cm (tiang), 3 cm (tumpuan)
3. Ekspansion Joint
   - Lokasi: pada pilar
   - Material: Baja siku L.70.70.7
   - Angkur: Ш10-200

4.3.3. Pembahasan Desain Struktur

Penggunaan kombinasi gelagar beton dan baja pada Jembatan Ngargosari merupakan solusi yang efisien untuk mengoptimalkan kinerja struktural dan ekonomi konstruksi. Untuk bentang 12 meter, gelagar balok T beton bertulang dengan dimensi 40 x 80 cm dipilih karena mampu memberikan kekakuan yang memadai dengan biaya yang relatif ekonomis [1]. Sedangkan untuk bentang 18 meter, profil baja IWF 600.200.11.17 dipilih karena memberikan rasio kekuatan terhadap berat yang lebih baik untuk bentang yang lebih panjang [27].

Desain ini sejalan dengan penelitian Zhang [1] yang menganalisis pemilihan tipe struktur untuk jembatan bentang besar, dimana efisiensi struktural menjadi pertimbangan utama. Meskipun Jembatan Ngargosari termasuk kategori bentang menengah, prinsip optimalisasi material tetap diterapkan dengan menggunakan material yang paling sesuai untuk setiap kondisi bentang.

Penggunaan elastomeric bearing dengan kapasitas 50 ton memungkinkan struktur untuk mengakomodasi pergerakan akibat perubahan temperatur dan beban lalu lintas. Sistem perletakan ini telah banyak digunakan pada jembatan modern karena kemampuannya dalam mendistribusikan beban secara merata dan mengakomodasi deformasi struktur [10].

Pelat lantai dengan mutu beton fc' 25 MPa dirancang untuk menahan beban lalu lintas dan mendistribusikannya ke gelagar utama. Penulangan pelat menggunakan tulangan D16-200 untuk arah memanjang (L1, L2) dan D13-200 untuk arah melintang (L3, L4), yang memberikan kekuatan dan kekakuan yang memadai untuk menahan beban roda kendaraan sesuai dengan SNI 1725:2016 [7].

4.4. Spesifikasi Material dan Kontrol Kualitas

4.4.1. Spesifikasi Material Beton

Material beton yang digunakan dalam konstruksi Jembatan Ngargosari divariasikan sesuai dengan kebutuhan struktural setiap elemen:

1. Beton Struktural Utama:
   - Tapak dan kepala abutment: fc' 20 MPa
   - Tapak dan kepala pilar: fc' 20 MPa
   - Pelat lantai: fc' 25 MPa (mutu tertinggi untuk menahan beban lalu lintas langsung)
2. Beton Non-Struktural:
   - Tiang sandaran: fc' 18 MPa (Sitemix)
   - Lantai kerja: fc' 10 MPa (Site mix), tebal 10 cm

Variasi mutu beton ini bertujuan untuk mengoptimalkan penggunaan material sesuai dengan fungsi dan tingkat pembebanan setiap elemen struktur. Pelat lantai menggunakan mutu beton tertinggi (fc' 25 MPa) karena menerima beban lalu lintas langsung dan mengalami tegangan yang lebih tinggi dibandingkan elemen lainnya [2], [15].

4.4.2. Spesifikasi Material Baja

Material baja yang digunakan meliputi:

1. Baja Tulangan:
    - BjTS 420B (Ulir): untuk elemen struktural utama (tapak & kepala abutment, plat lantai, shear connector)
    - BJTP 280 (Polos): untuk tiang sandaran
    - Diameter: D10, D13, D16, D18, D19, D22
2. Baja Struktur:
    - Profil IWF 600.200.11.17: gelagar utama bentang 18 meter
    - Profil UNP 200.80.75: diafragma
    - Baja siku L.70.70.7: ekspansion joint
    - Mutu: JIS G 3101 SS 400
3. Komponen Khusus:
    - Pipa galvanize III3": railing
    - Plat baja tebal 3 mm: bearing

Pemilihan mutu baja JIS G 3101 SS 400 untuk profil baja struktural memberikan kekuatan leleh minimum 245 MPa dan kekuatan tarik minimum 400 MPa, yang memadai untuk menahan beban desain jembatan [27].

4.4.3. Selimut Beton

Ketebalan selimut beton ditentukan berdasarkan fungsi elemen struktur dan tingkat eksposur terhadap lingkungan:

- Tapak abutment dan pilar: 5 cm (kontak dengan tanah)
- Elemen struktural lainnya: 4 cm
- Pelat lantai: 3 cm
- Tumpuan sandaran: 3 cm
- Tiang sandaran: 2,5 cm

Spesifikasi selimut beton ini sesuai dengan persyaratan SNI untuk durabilitas struktur beton, dimana elemen yang kontak dengan tanah memerlukan selimut beton yang lebih tebal untuk melindungi tulangan dari korosi [2].

4.4.4. Kontrol Kualitas Konstruksi

Kontrol kualitas dalam konstruksi Jembatan Ngargosari mengacu pada praktik terbaik yang diuraikan oleh Leiyi et al. [2] dan Yang et al. [15], meliputi:

1. Kontrol Kualitas Material:
    - Pengujian kuat tekan beton pada umur 7, 14, dan 28 hari
    - Pengujian tarik baja tulangan dan profil baja
    - Inspeksi visual material sebelum pemasangan
2. Kontrol Kualitas Pekerjaan Pondasi:
    - Verifikasi kedalaman pondasi sesuai desain
    - Kontrol vertikalitas pengeboran (untuk pondasi dalam jika diperlukan)
    - Inspeksi cage tulangan sebelum pengecoran
    - Kontrol mutu beton dan proses pengecoran
3. Kontrol Kualitas Struktur Atas:
    - Inspeksi penulangan sebelum pengecoran
    - Kontrol dimensi dan posisi gelagar
    - Pengujian integritas sambungan baja
    - Monitoring curing beton
4. Pengujian Non-Destruktif:
    - Uji ultrasonik untuk deteksi cacat pada pondasi beton [30]
    - Uji low strain untuk integritas tiang (jika menggunakan pondasi tiang) [2]

Implementasi kontrol kualitas yang ketat sangat penting untuk memastikan keamanan dan durabilitas struktur jembatan, terutama untuk elemen kritis seperti pondasi dan sambungan struktur [15], [26].

4.5. Metodologi Konstruksi

4.5.1. Tahapan Konstruksi

Konstruksi Jembatan Ngargosari dilakukan dalam tahapan sebagai berikut:

1. Persiapan Lokasi:
   - Pembersihan lahan dan pengukuran
   - Pembuatan jalan akses dan fasilitas konstruksi
   - Mobilisasi peralatan dan material
2. Pekerjaan Pondasi:
   - Penggalian tanah sesuai kedalaman desain
   - Pemasangan lantai kerja fc' 10 MPa tebal 10 cm
   - Pemasangan bekisting dan tulangan
   - Pengecoran beton pondasi
   - Curing dan pembongkaran bekisting
3. Pekerjaan Struktur Bawah:
   - Pemasangan bekisting dan tulangan abutment/pilar
   - Pengecoran beton abutment/pilar
   - Curing dan finishing
4. Pekerjaan Struktur Atas:
   - Pemasangan perletakan (elastomeric bearing)
   - Pemasangan gelagar balok T (bentang 12 m)
   - Pemasangan gelagar baja IWF (bentang 18 m)
   - Pemasangan bekisting dan tulangan pelat lantai
   - Pengecoran pelat lantai
   - Curing dan finishing
5. Pekerjaan Pelengkap:
   - Pemasangan ekspansion joint
   - Pemasangan railing/tiang sandaran
   - Pengecatan dan finishing akhir
6. Pengujian dan Komisioning:
   - Load test untuk verifikasi kapasitas struktur
   - Inspeksi akhir dan dokumentasi
   - Serah terima pekerjaan

4.5.2. Pertimbangan Khusus Konstruksi

Beberapa pertimbangan khusus dalam konstruksi Jembatan Ngargosari meliputi:

1. Penanganan Variasi Kondisi Tanah: Mengingat variasi kedalaman tanah keras yang signifikan (1,2-4,2 meter), kedalaman penggalian untuk setiap pondasi harus disesuaikan dengan kondisi aktual di lapangan. Verifikasi kondisi tanah dasar pondasi harus dilakukan sebelum pengecoran [7], [19].
2. Pengecoran Beton Volume Besar: Untuk elemen pondasi dan pilar dengan volume beton yang besar, perlu dilakukan kontrol temperatur untuk mencegah retak akibat panas hidrasi. Strategi yang dapat diterapkan meliputi penggunaan beton dengan panas hidrasi rendah, pengecoran bertahap, dan monitoring temperatur real-time [4].
3. Pemasangan Gelagar Baja: Pemasangan profil baja IWF 600.200.11.17 dengan panjang 18 meter memerlukan peralatan lifting yang memadai dan prosedur keselamatan yang ketat. Sambungan antara gelagar baja dan pelat lantai beton menggunakan shear connector harus dipasang dengan presisi tinggi untuk memastikan aksi komposit yang optimal [12], [27].
4. Kontrol Kualitas Sambungan: Sambungan antara elemen struktur, terutama pada perletakan dan ekspansion joint, harus dipasang dengan teliti untuk memastikan transfer beban yang efektif dan mengakomodasi pergerakan struktur [10].

4.6. Implikasi Praktis dan Keterbatasan

4.6.1. Implikasi Praktis

Desain Jembatan Ngargosari memberikan beberapa implikasi praktis untuk proyek infrastruktur jembatan di Indonesia:

1. Pentingnya Investigasi Geoteknik Komprehensif: Variasi kondisi tanah yang signifikan pada lokasi proyek menegaskan pentingnya investigasi geoteknik yang memadai dengan jumlah titik pengujian yang cukup untuk mengidentifikasi variasi lateral kondisi tanah [18].
2. Optimalisasi Penggunaan Material: Kombinasi gelagar beton dan baja menunjukkan bahwa pemilihan material yang tepat untuk setiap kondisi bentang dapat mengoptimalkan efisiensi struktural dan ekonomi konstruksi [1], [5].
3. Adaptasi Desain terhadap Kondisi Lokal: Desain pondasi yang disesuaikan dengan variasi kondisi tanah pada setiap lokasi menunjukkan pentingnya fleksibilitas dalam desain untuk mengakomodasi kondisi aktual di lapangan [6], [7].
4. Integrasi Standar Nasional dan Internasional: Penggunaan standar SNI dan AASHTO secara bersamaan memberikan kerangka desain yang komprehensif dan mengikuti praktik terbaik internasional [8], [14].

4.6.2. Keterbatasan Penditian

Beberapa keterbatasan dalam penelitian ini perlu diperhatikan:

1. Jumlah Titik Sondir: Meskipun 4 titik sondir telah memberikan gambaran umum kondisi tanah, untuk jembatan dengan variasi kondisi tanah yang tinggi, penambahan titik pengujian dapat memberikan informasi yang lebih detail tentang variasi lateral kondisi tanah.
2. Pengujian Laboratorium: Penelitian ini belum mencakup pengujian laboratorium lengkap seperti uji triaksial, uji konsolidasi, dan analisis sifat fisik tanah yang dapat memberikan parameter desain yang lebih akurat [18].
3. Analisis Dinamis: Desain struktur dalam penelitian ini fokus pada analisis statik. Untuk lokasi dengan potensi seismik yang signifikan, analisis dinamis dan desain tahan gempa yang lebih detail perlu dilakukan sesuai SNI 2833:2016 [7].
4. Monitoring Jangka Panjang: Penelitian ini belum mencakup rencana monitoring jangka panjang untuk mengevaluasi kinerja struktur selama masa layan, yang penting untuk validasi desain dan pemeliharaan preventif [17].

CONCLUSIONS

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Karakteristik Geoteknik: Investigasi geoteknik menggunakan uji sondir pada 4 titik lokasi menunjukkan kondisi tanah kohesif berupa pasir lempungan vulkanik dengan variasi kedalaman tanah keras yang signifikan, berkisar antara 1,2 meter (SONDIR-01) hingga 4,2 meter (SONDIR-02). Nilai tahanan ujung konus (qc) mencapai 180 kg/cmI pada lapisan tanah keras, dengan rentang nilai parameter tanah: qc = 15-180 kg/cmI, fs = 0,33-3,01 kg/cmI, Ft = 28,08-434,55 kg/cmI, dan Fr = 0,51-6,15%.
2. Daya Dukung Tanah: Analisis daya dukung tanah berdasarkan hasil uji sondir menunjukkan bahwa desain pondasi harus disesuaikan dengan variasi kondisi tanah pada setiap lokasi. Kedalaman pondasi minimum berkisar antara 1,5 meter hingga 4,5 meter tergantung pada lokasi dan beban struktur yang ditanggung.
3. Desain Struktural: Jembatan Ngargosari dengan bentang total 30 meter (12m + 18m) dirancang menggunakan kombinasi struktur beton bertulang dan baja. Gelagar balok T beton bertulang (40 x 80 cm) digunakan untuk bentang 12 meter, sedangkan profil baja IWF 600.200.11.17 digunakan untuk bentang 18 meter. Desain ini mengoptimalkan efisiensi struktural dan ekonomi konstruksi dengan menggunakan material yang paling sesuai untuk setiap kondisi bentang.
4. Spesifikasi Material: Material yang digunakan meliputi beton dengan mutu fc' 10-25 MPa (disesuaikan dengan fungsi elemen struktur), baja tulangan BjTS 420B dan BJTP 280, serta profil baja JIS G 3101 SS 400. Spesifikasi material ini sesuai dengan standar SNI dan memberikan kekuatan dan durabilitas yang memadai untuk struktur jembatan.
5. Metodologi Konstruksi: Konstruksi jembatan dilakukan dalam tahapan sistematis mulai dari persiapan lokasi, pekerjaan pondasi, struktur bawah, struktur atas, hingga pekerjaan pelengkap. Kontrol kualitas yang ketat diterapkan pada setiap tahapan untuk memastikan keamanan dan durabilitas struktur.

RECOMMENDATION

Berdasarkan hasil penelitian, rekomendasi yang dapat diberikan adalah:

1. Investigasi Geoteknik Tambahan: Untuk proyek dengan variasi kondisi tanah yang tinggi seperti Jembatan Ngargosari, disarankan untuk melakukan investigasi geoteknik tambahan berupa pengujian laboratorium lengkap (uji triaksial, uji konsolidasi, analisis sifat fisik tanah) untuk mendapatkan parameter desain yang lebih akurat dan komprehensif.
2. Verifikasi Kondisi Tanah Lapangan: Sebelum pelaksanaan pengecoran pondasi, perlu dilakukan verifikasi kondisi tanah dasar pondasi di lapangan untuk memastikan kesesuaian dengan asumsi desain. Jika ditemukan perbedaan signifikan, desain pondasi harus disesuaikan.
3. Monitoring Konstruksi: Implementasi sistem monitoring selama konstruksi, terutama untuk pengecoran beton volume besar, untuk mengontrol temperatur dan mencegah retak akibat panas hidrasi. Monitoring juga perlu dilakukan pada pemasangan gelagar baja dan sambungan struktur untuk memastikan presisi pemasangan.
4. Analisis Seismik Detail: Mengingat lokasi proyek berada di wilayah dengan potensi seismik, disarankan untuk melakukan analisis dinamis dan desain tahan gempa yang lebih detail sesuai SNI 2833:2016 untuk memastikan keamanan struktur terhadap beban gempa.
5. Program Monitoring Jangka Panjang: Setelah jembatan beroperasi, perlu dilakukan program monitoring jangka panjang untuk mengevaluasi kinerja struktur, termasuk monitoring settlement pondasi, defleksi gelagar, dan kondisi elemen struktur lainnya. Data monitoring ini penting untuk validasi desain dan pemeliharaan preventif.
6. Dokumentasi Komprehensif: Seluruh proses konstruksi perlu didokumentasikan secara komprehensif, termasuk hasil pengujian material, proses pelaksanaan, dan perubahan desain di lapangan (jika ada). Dokumentasi ini penting untuk referensi pemeliharaan dan evaluasi kinerja struktur di masa mendatang.
7. Pengembangan Penelitian Lanjutan: Penelitian lanjutan dapat dilakukan untuk menganalisis kinerja struktur jembatan kombinasi beton-baja dalam kondisi beban dinamis, evaluasi umur layan struktur, dan optimalisasi desain untuk efisiensi yang lebih tinggi.

REFERENCES

[1] Zhang, "**大跨度公路**桥梁结构设计要点探讨," ***建筑工程与管理***, 2024. https://doi.org/10.33142/aem.v6i3.11306

[2] Leiyi et al., "Study on Quality Control Measures of Bored Pile in Highway Bridge Construction," 2024. https://doi.org/10.62517/jcte.202406213

[3] Yilmaz et al., "Bridge Engineering: Recent advances and applications."

[4] Yang et al., "Construction of Long-Span Bridge Bearing Platforms in Deep and Thick Silt Interlayers," Advances in Civil Engineering, 2024. https://doi.org/10.1155/adce/6796743

[5] Firoozi et al., "Geotechnical Innovations for Seismic-Resistant Urban Infrastructure," Journal of Civil Engineering and Urbanism, 2024. https://doi.org/10.54203/jceu.2024.39

[6] Arif et al., "Analisa perubahan design pondasi bawah abutment-1 jembatan kikuba pulau enggano dari pondasi sumuran menjadi pondasi bore pile." https://doi.org/10.33369/ijts.16.1.42-47

[7] Lurich et al., "BRIDGE FOUNDATION DESIGN INTEGRATING GROUND IMPROVEMENT TECHNIQUES IN CHALLENGING SOIL," Jurnal Teknik Sipil, 2024. https://doi.org/10.24002/jts.v18i1.10313

[8] Samtani et al., "Chronology of Service Limit State Development for Geotechnical Elements Designed Using AASHTO Load and Resistance Factor Design," Transportation Research Record, 2022. https://doi.org/10.1177/03611981221099017

[9] Rodrigues et al., "Fundaxes de pontes: desafios tĭcnicos e soluxes de engenharia civil," Revista Fisio& Terapia, 2025. https://doi.org/10.69849/revistaft/ar10202504250041

[10] Ngo et al., "Monitoring and analysis of temperature distribution in reinforced concrete bridge box girders in Vietnam," Case Studies in Construction Materials, 2024. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02857
[11] Alshawabkeh et al., "Maximum permissible safe length of integral abutment bridges supported by steel H-piles," Structures, 2024. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106130
[12] Embaby et al., "Experimental and numerical investigation for steel shear panels of modular bridge," Journal of Constructional Steel Research, 2024. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2024.108743
[13] Mousavi, "Deep bridge foundation design: Optimization, improved capacity estimation, and material selection," 2024. https://doi.org/10.31274/td-20240329-202
[14] Samtani et al., "Structural Considerations and Implications Related to Foundation Movements in AASHTO LRFD," Transportation Research Record, 2022. https://doi.org/10.1177/03611981221099016
[15] Yang et al., "公路桥梁工程设计与施工管理研究," 2025. https://doi.org/10.33142/9798957329992
[16] M. et al., "PLANNING, ANALYSIS & DESIGN OF REINFORCED CONCRETE BRIDGE NEAR KANAKAPURA," 2024. https://doi.org/10.58532/v3bice2p5ch2
[17] Usman et al., "Innovations in deep foundation systems: a systematic review of design approaches and performance monitoring," 2025. https://doi.org/10.70382/sjber.v9i4.036
[18] Adunoye et al., "Investigation of Soils and Bearing Capacity in Selected Construction Sites," Archives of Current Research International, 2024. https://doi.org/10.9734/acri/2024/v24i5719
[19] Hu, "复杂地质条件下桥梁基础施工技术研究," *智能城市应用*, 2025. https://doi.org/10.33142/sca.v8i7.17119
[20] Untermarzoner et al., "Das LT-Brücken bauverfahren zur materialsparenden und schnellen Errichtung von Spannbetonbrücken," Beton- Und Stahlbetonbau, 2024. https://doi.org/10.1002/best.202400007
[26] Omarov et al., "Comparative study of pile quality control techniques," Technobius, 2024. https://doi.org/10.54355/tbus/4.1.2024.0055
[27] Tanaka et al., "Design of Steel-Concrete Hybrid Balanced Arch Bridge - The Kouchigawa Bridge," Structural Engineering International, 2025. https://doi.org/10.1080/10168664.2024.2437514
[30] Fu, "Applications of Ultrasonic Detection Technology in Bridge Concrete Pile Foundation Detection," Journal of World Architecture, 2024. https://doi.org/10.26689/jwa.v7i6.5678
[31] Al Mukarom, S. (2023). Analisis daya dukung pondasi jembatan pada tanah vulkanik menggunakan metode sondir. Jurnal Teknik Sipil Indonesia, 15(2), 45-58.
[32] Al Mukarom, S., & Prasetyo, A. (2024). Optimasi desain struktur jembatan beton-baja untuk bentang menengah di Indonesia. Prosiding Konferensi Nasional Teknik Sipil, 8, 112-125.
[33] Al Mukarom, S. (2022). Investigasi geoteknik untuk perencanaan jembatan di wilayah Jawa Tengah: Studi kasus dan rekomendasi. Jurnal Rekayasa Infrastruktur, 12(3), 78-92.