

Evaluasi Tingkat Keandalan Overhead Catenary System Kereta Cepat Jakarta Bandung dengan Metode Regresi Berganda

Fivit Marwita^{1*}; Nizar Rosyidi AS²; Muhammad Fatihan Rizkilah³; M. Febriansyah⁴

¹⁻⁴Prodi Teknik Elektro, FSTT, Institut Sains dan Teknologi Nasional

e-mail: pipitmarwita@gmail.com¹; nizarrosyidias@gmail.com²; mfatihanr@gmail.com³

Abstrak

Overhead Catenary System (OCS) menyalurkan energi listrik ke rangkaian kereta pada Kereta Cepat Jakarta-Bandung. Keandalan sistemnya menentukan keselamatan dan stabilitas perjalanan pada kecepatan tinggi: penyimpangan parameter geometris dan tegangan memicu gangguan interaksi pantograph, mempercepat keausan kawat kontak, dan berpotensi memutus daya. Evaluasi berkala dengan data teknis akurat memastikan sistem tetap sesuai standar desain. Pengukuran parameter statis memverifikasi kondisi aktual instalasi OCS, baik sebelum maupun selama masa operasi. Penelitian ini memakai pendekatan kuantitatif deskriptif dengan metode pengukuran statis pada segmen lintas Kereta Cepat Jakarta-Bandung. Peneliti mengumpulkan data memakai peralatan kalibrasi khusus tanpa beban dinamis, mengukur tinggi kawat kontak, stagger dan offset di mid span. Analisis memakai regresi berganda untuk menguji pengaruh tiga variabel bebas tinggi kawat kontak, stagger, dan mid span terhadap deviasi/keandalan OCS, baik secara simultan maupun parsial. Penelitian membandingkan hasilnya terhadap standar teknis internasional dan ketentuan operasional kereta cepat. Dengan tingkat keandalan ada 3 bagian yaitu untuk indeks Optimal/Aman bernilai $\geq 70\%$, indeks Perhatian bernilai $50\% - 70\%$ dan indeks Tidak Aman/Kritis bernilai $< 50\%$.

Kata kunci: Overhead Catenary System, Keandalan Sistem, Pengukuran Statis, Parameter Geometris, Regresi Berganda

Abstract

The Overhead Catenary System (OCS) supplies energy to the trainsets of the Jakarta-Bandung High-Speed Railway. System reliability is crucial for safety and operational stability at high speeds; deviations in geometric parameters and tension can disrupt pantograph interaction, accelerate contact wire wear, and potentially lead to power interruptions. Periodic evaluations based on accurate technical data ensure the system remains compliant with design standards. Statistic parameter measurements verify the actual condition of the OCS installation, both prior to and during the operational phase. This study employs a quantitative descriptive approach utilizing statistical measurement methods across segments of the Jakarta-Bandung High-Speed Railway. Data were collected using specialized calibration equipment under static conditions (without dynamic loads) to measure contact wire height, stagger, and mid-span offset. Multiple regression analysis was used to examine the influence of three independent variables contact wire height, stagger, and mid-span position on OCS deviation and reliability, assessing both simultaneous and partial effects. The results were compared against international technical standards and high-speed rail operational requirements. Regarding reliability levels, there are three categories: Optimal/Safe ($\geq 70\%$), Caution ($50\% - 70\%$), and Unsafe/Critical ($< 50\%$).

Keywords: Overhead Catenary System, Reliability System, Statistical Measurement, Geometric Parameters, Multiple regression

1. PENDAHULUAN

Perkeretaapian berkecepatan tinggi menuntut standar keandalan infrastruktur ketat, khususnya pada sistem penyaluran energi listrik. OCS menjadi tulang punggung suplai daya ke rangkaian kereta melalui interaksi dinamis dengan pantograph, stabilitas kontak menentukan kualitas pengambilan arus dan keamanan operasional (Jin Hee Lee, 2015). Pada Kereta Cepat Jakarta Bandung (KCJB), stabilitas OCS menentukan keselamatan, kenyamanan, dan kontinuitas operasional pada kecepatan hingga 350 km/jam (PERHUBUNGAN, 2022). Penyimpangan parameter geometris ketinggian kawat kontak, stagger, gradien vertikal, sudut defleksi maupun parameter mekanis seperti tegangan kawat dan kelurusan span mengganggu interaksi pantograph-kawat kontak. Ini

memicu keausan dini, arcing, hingga pemutusan pasokan daya mendadak (Jin Hee Lee, 2015). Model kawat Listrik dibangun berdasarkan dengan elemen kabel dan rangka nonlinier untuk menggambarkan nonlinieritas tiap kawat dan konfigurasi awalnya. Song menurunkan model gaya aerodinamis pada kawat kontak dengan memperhitungkan fluktuasi angin vertikal dan horizontal (Y. Song, 2018).

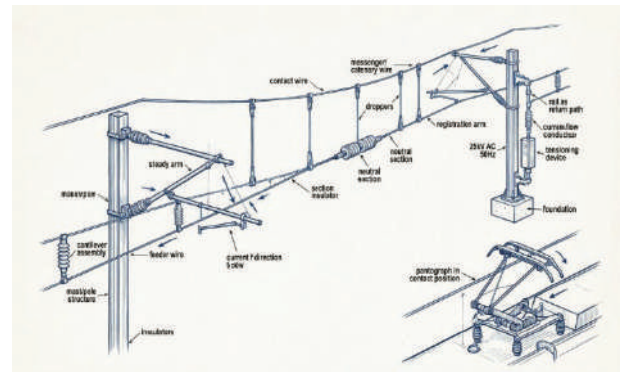
OCS di KCJB telah melalui commissioning dan pengujian dinamis awal, tapi kondisi lapangan berubah seiring penurunan material, pengaruh termal, atau ketidaksempurnaan instalasi (Zhao, 2015). Kondisi ini mempercepat relaksasi tegangan kawat kontak, menggeser posisi dropper, dan mengubah toleransi stagger dengan cara yang sulit terdeteksi tanpa pemantauan terstruktur (Kim, 2023). Ketepatan data statis menjadi prasyarat untuk membangun indikator

kinerja sistem, memodelkan potensi kegagalan, dan mengoptimalkan interval condition-based maintenance (Zhan, 2018). Penelitian ini memakai pengukuran statis sebagai metode utama karena menyediakan baseline kondisi instalasi OCS dengan akurasi tinggi tanpa interferensi beban dinamis, sejalan dengan rekomendasi (Gao, 2020) dan (Y. Song, 2018) yang menempatkan data statis sebagai fondasi kalibrasi untuk evaluasi keandalan jangka panjang. Pengukuran statis juga mendeteksi lebih dini kesalahan instalasi, settlement fondasi, atau relaksasi material, faktor yang sulit diisolasi lewat pengukuran dinamis. Pengukuran dinamis tetap penting untuk memonitor interaksi pantograf-kawat selama operasi, tapi penelitian ini berfokus pada kondisi fisik OCS terhadap standar desain, sehingga pendekatan statis lebih relevan secara metodologis. Memakai regresi berganda untuk menganalisis pengaruh simultan suhu, arus traksi, dan panjang kawat terhadap laju keausan. Regresi berganda menilai beberapa faktor operasional sekaligus terhadap tingkat keausan, sehingga memprediksi lebih akurat daripada analisis univariat. (Kim, 2021)

2. LANDASAN TEORI

2.1 Sistem Catu Daya dan Tegangan OCS Kereta Cepat

Overhead Catenary System (OCS) pada perkeretaapian berkecepatan tinggi dirancang sebagai konduktor utama penyalur energi traksi berkapasitas tinggi. Kereta Cepat Jakarta-Bandung mengoperasikan sistem catu daya single-phase Alternating Current (AC) dengan tegangan nominal 25 kV dan frekuensi 50 Hz. Sumber daya diperoleh dari jaringan transmisi PLN (150 kV/27,5 kV) yang diturunkan melalui Gardu Induk Traksi (GIT) menggunakan transformator traksi khusus. Untuk mengoptimalkan regulasi tegangan, meminimalkan voltage drop, dan menekan interferensi elektromagnetik pada lintas yang panjang, KCJB mengadopsi sistem pemberian ke Autotransformer (AT system) dengan jarak antar unit trafo AT berkisar 10–15 km. Stabilitas tegangan OCS sangat bergantung pada integritas fisik dan geometris kawat kontak. Penyimpangan geometris atau ketegangan mekanis yang tidak sesuai dapat meningkatkan resistansi kontak dinamis, memicu arcing, fluktuasi tegangan sesaat, dan penurunan efisiensi transfer daya. Oleh karena itu, verifikasi parameter statis tidak hanya relevan secara mekanis, tetapi juga menjadi prasyarat fundamental untuk menjamin keandalan sisi elektrifikasi. Seperti pada Gambar 1 Peralatan OCS yang sangat berpengaruh terhadap keberlangsungan operasional kereta cepat itu sendiri.

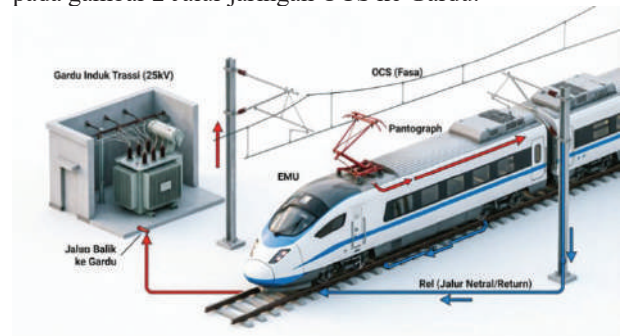


Gambar 1. Overhead Catenary System Kereta Cepat

2.2 Sistem Kereta Cepat 25kV AC

Jalur Fasa (Phase Path) – Panah Merah yaitu Gardu Induk Traksi (GIT) sebagai sumber daya listrik 150 kV/27.5 kV dari PLN diturunkan oleh transformator traksi menjadi 25 kV AC. OCS (Overhead Catenary System) Listrik mengalir melalui kawat kontak (contact wire) yang tersuspensi di atas jalur rel. Pantograph sebagai alat kontak geser di atap kereta yang mengambil arus dari OCS tanpa memutuskan sambungan fisik. EMU (Electric Multiple Unit) arus masuk ke dalam rangkaian kereta untuk menggerakkan motor traksi, konverter, dan sistem kelistrikan onboard.

Jalur Netral / Return Path – Panah Biru yaitu roda Kereta & Rel setelah digunakan, sisa arus keluar melalui roda kereta ke rel baja yang berfungsi sebagai konduktor netral (return conductor). Jalur Balik (Return Wire /Grounding) arus mengalir sepanjang rel dan sistem pembumian menuju terminal netral transformator di GIT. Sirkuit Tertutup arus kembali ke sumber, melengkapi siklus dan menjaga kestabilan tegangan sistem. Seperti pada gambar 2 Jalur jaringan OCS ke Gardu.



Gambar 2. Jalur jaringan OCS ke Gardu

2.3 Parameter Geometris & Mekanis OCS

Keandalan interaksi pantograph-kawat kontak ditentukan oleh ketepatan parameter instalasi yang terbagi menjadi dua kategori yaitu Parameter Geometris yang meliputi tinggi kawat kontak terhadap bidang rel, simpangan lateral (stagger) terhadap sumbu rel, dan batas maksimum mid span. Parameter ini menjamin jangkauan

sapuan pantograph tetap optimal, mencegah keausan tidak merata, dan menjaga kontinuitas jalur konduktif.

Parameter Mekanis yang meliputi tegangan tarik (tension) kawat kontak dan kawat pembawa (messenger wire), gaya pada dropper, serta beban pada steady arm. Tegangan mekanis yang terkontrol mencegah relaksasi material, mempertahankan bentuk kurva kateneri, dan meminimalkan risiko hard spot atau dewirement akibat beban dinamis kecepatan tinggi.

2.4 Metode Pengukuran Statis

Pengukuran statis merupakan verifikasi kondisi OCS dalam keadaan tanpa beban dinamis (pantograph tidak melintas). Teknik ini menggunakan instrumen presisi seperti total station dan tension meter. Keunggulan metode statis terletak pada akurasi baseline, keamanan personel, dan kemampuan mendeteksi deviasi instalasi awal atau penurunan material sebelum sistem beroperasi penuh. Adapun standar dari ketinggian dan nilai stagger pada kawat kontak. Kawat kontak dipasang di atas sumber jalan kereta api dengan range tinggi:

- a) minimum : 5,15 m dari kop rel;
- b) standar : 5,3 m dari kop rel;
- c) maksimal : 6,5 m dari kop rel;

Nilai Stagger :

- (1) Jalur lurus : 250 mm;
- (2) Lengkung : 350 mm atau;

Nilai Maksimum Offset di Mid Span :

- (1) Standar : 0 mm
- (2) Maksimum : < 50 mm

Sesuai dengan spesifikasi desain yang mengacu ke standar internasional atau nasional tertentu. Dalam perspektif elektrifikasi, data statis juga berfungsi sebagai referensi awal untuk memastikan kontinuitas jalur konduktif, mengidentifikasi zona yang berpotensi menyebabkan gangguan kontak listrik, dan menjadi acuan kalibrasi sebelum pengujian dinamis atau load test dilakukan. Adapun standar dari ketinggian dan nilai stagger pada kawat kontak. (PERHUBUNGAN, 2022)

2.5 Konsep Keandalan Sistem Infrastruktur Perkeretaapian

Rekayasa sistem mendefinisikan keandalan sebagai probabilitas suatu komponen atau sistem menjalankan fungsi yang diharapkan, dalam kondisi operasional tertentu, selama periode tertentu. Pada OCS kereta cepat, keandalan mencakup tiga dimensi: keandalan mekanis (integritas struktur dan geometri), keandalan elektrik (stabilitas tegangan 25 kV, minimasi arcing, kualitas transfer daya, kontinuitas suplai ke traksi), dan keandalan operasional (ketersediaan layanan tanpa gangguan pemutusan). Evaluasi keandalan OCS berbasis parameter statis menganalisis deviasi terhadap batas toleransi desain, memetakan titik kritis, dan menilai tingkat kesesuaian sistem. Hasil dari evaluasi keandalan ini dapat menjaga dari ketinggian kawat kontak, stagger dan offset di Mid

Span agar tetap stabil dengan nilai standar KCIC (PERHUBUNGAN, 2022) agar kereta dapat beroperasi dengan aman dan nyaman. Adapun dampak yang dihasilkan seperti stagger tidak sesuai dengan nilai standarnya yaitu meningkatkan gaya lateral pantograph, meningkatkan risiko arcing dan menyebabkan kualitas pengambilan arus listrik menurun.

2.6 Kerangka Konseptual

Kerangka konseptual penelitian ini menggambarkan alur hubungan antara variabel input, proses analisis, dan output yang dihasilkan. Secara umum, penelitian ini bertumpu pada premis bahwa kesesuaian parameter geometris dan mekanis OCS hasil pengukuran statis terhadap batas toleransi desain berbanding lurus dengan tingkat keandalan sistem dalam mendukung operasional kereta cepat.

A. Input (Variabel Bebas):

Data pengukuran statis parameter OCS pada segmen lintas KCJB, meliputi :

- Tinggi kawat kontak
- Nilai stagger
- Batas Offset Mid Span

B. Proses (Variabel Intervensi):

- Menggunakan Metode Regresi Berganda
- Pembandingan nilai aktual dengan standar toleransi desain dan referensi standar KCJB
- Penilaian tingkat kesesuaian sistem berbasis indikator keandalan (probabilitas berfungsi dalam batas aman)

C. Output (Variabel Terikat):

- Hasil dari parameter pengukuran OCS Kereta Cepat Jakarta-Bandung pada segmen Stasiun Halim – Stasiun Karawang Km 1 – Km 2.
- Indeks Keandalan OCS
- Rekomendasi teknis untuk optimasi pemeliharaan prediktif dan penyesuaian geometris.

3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif dengan strategi evaluatif teknis Pendekatan kuantitatif dipilih karena penelitian mengandalkan pengumpulan data numerik hasil pengukuran parameter fisik OCS seperti tinggi kawat kontak, offset, ketegangan, dan keausan yang kemudian diolah secara statistik dan dibandingkan dengan standar baku internasional. Sifat deskriptif-evaluatif digunakan untuk menggambarkan kondisi aktual infrastruktur berdasarkan data lapangan, menganalisis deviasi terhadap spesifikasi standart desain KCIC, dan menilai tingkat keandalan sistem tanpa melakukan manipulasi atau intervensi pada objek penelitian. Desain penelitian bersifat cross-sectional

(potret lintang), di mana pengambilan data dilakukan pada satu periode waktu tertentu selama jendela perawatan operasional untuk memperoleh gambaran kondisi statis sistem secara komprehensif dan representatif.

Dalam konteks ini, panjang kawat kontak dari paduan tembaga (umumnya CuCd0,2 atau CuMg) menjadi variabel penting karena rentan terhadap pemuaiian termal akibat fluktuasi suhu lingkungan dan pemanasan arus traksi. Perubahan panjang kawat akibat kenaikan suhu dihitung menggunakan rumus pemuaiian linear dengan persamaan (1):

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T \quad (1)$$

dengan $\alpha \approx 17,5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ sebagai koefisien muai panjang paduan tembaga, L_0 adalah panjang awal bentang kawat 60 meter pada Kereta Cepat Jakarta Bandung, dan ΔT adalah selisih suhu antara kondisi ambient dan maksimum operasional. Meskipun penelitian ini tidak mengukur suhu secara langsung, pemahaman atas fenomena pemuaiian ini menjadi dasar interpretasi terhadap deviasi geometri kawat seperti lendutan atau perubahan tegangan yang teramati selama pengukuran statis. Dengan demikian, analisis tidak hanya bersifat geometris, tetapi juga mempertimbangkan prinsip-prinsip termomekanis yang mendasari perilaku material OCS dalam kondisi nyata.

3.2 Populasi dan Sampel

Seluruh instalasi Overhead Catenary System pada lintas utama Kereta Cepat Jakarta-Bandung dengan panjang rute operasional ± 142 km, yang terdiri dari ratusan span (bentang) dengan variasi profil geometrik (lurus, lengkung, dan zona transisi).

Metode Pengambilan Sampel mengingat keterbatasan waktu, aksesibilitas, dan protokol keselamatan operasional, penelitian menerapkan teknik purposive sampling berbasis kriteria teknik. Sampel dipilih berdasarkan: (1) variasi profil lintas (segmen lurus, tikungan radius besar/kecil, zona transisi), (2) tingkat aksesibilitas selama maintenance window time, dan (3) rekomendasi prioritas pemeliharaan dari data historis gangguan atau laporan inspeksi rutin. Seperti pada Gambar 3 sedang melakukan pengukuran statis.

Ukuran Sampel Penelitian ini menargetkan pengambilan data pada 20 tiang genap dengan 19 span yang tersebar secara representatif di sepanjang lintas stasiun halim sampai stasiun karawang dengan Km 1 - Km 2 No tiang 0002# - 0042#. Jumlah ini dianggap memadai secara statistik untuk mendeteksi pola deviasi parameter, menghitung proporsi kesesuaian, dan mengevaluasi keandalan sistem sesuai dengan standar penelitian survei infrastruktur perkeretaapian sejenis.

3.3 Metode Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui kombinasi data primer dan sekunder:

Data Primer diperoleh melalui pengukuran langsung di lapangan (field measurement) pada kondisi statis (tanpa beban dinamis/pantograph melintas). Instrumen yang digunakan meliputi:

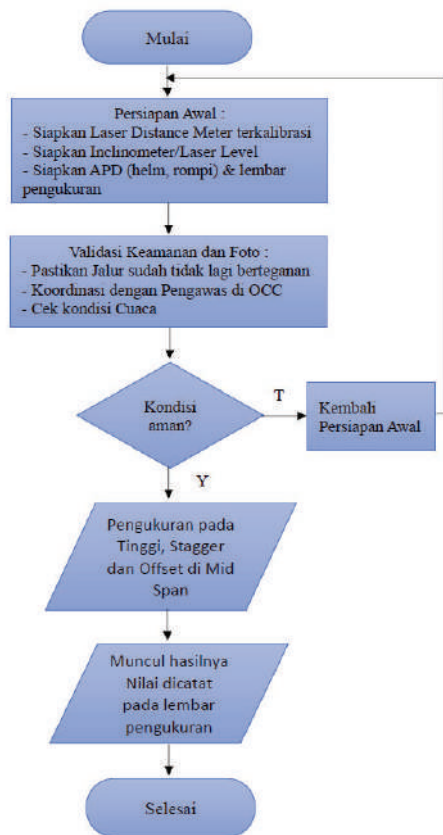
1. Total Station / Laser Distance Meter terkalibrasi untuk mengukur tinggi kawat kontak, nilai stagger dan offset di Mid Span. Seperti pada gambar 3 Pengukuran Statis.



Gambar 3. Pengukuran Statis Parameter OCS

2. Inclinator / Laser Level untuk memverifikasi kelurusan span dan gradien vertikal.
3. Pengukuran dilaksanakan sesuai SOP keselamatan perkeretaapian selama jendela perawatan malam (night shift maintenance), dengan pencatatan data menggunakan formulir digital terverifikasi dan dokumentasi foto teknis.

Diagram Alir dari Pengukuran Statis OCS untuk penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Diagram Alir Pengukuran Statis OCS

3.4 Metode Analisis Data

Data yang terkumpul akan diolah melalui tahapan berikut:

1. Validasi dan Pembersihan Data: Memeriksa konsistensi pencatatan, mengeliminasi outlier akibat kesalahan pengukuran, dan melakukan koreksi termal jika diperlukan agar data mencerminkan kondisi referensi.
2. Analisis Deskriptif & Deviasi: Analisis data dalam penelitian ini dilakukan secara kuantitatif dengan pendekatan regresi linier berganda menggunakan Microsoft Excel melalui fitur Data Analysis ToolPak. Tujuan utama analisis ini adalah untuk:
 - Menggambarkan kondisi aktual parameter mekanis OCS (tinggi kawat, offset, ketegangan, dan keausan) melalui statistik deskriptif (rata-rata, standar deviasi, nilai maksimum-minimum).
 - Menilai deviasi setiap parameter terhadap batas toleransi standar KCJB.
 - Menganalisis pengaruh simultan beberapa variabel independen seperti : Ketinggian kawat kontak, Nilai stagger dan Offset di Mid span.

Rumus model regresi berganda yang digunakan mengikuti bentuk umum dengan persamaan (2).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \varepsilon \quad (2)$$

Di mana:

Y = variabel dependen (nilai keandalan pada OCS)
 X_1, X_2, X_3 = variabel independen (Ketinggian kawat kontak, Nilai Stagger, Nilai Offset di Mid Span)
 β_0 = konstanta (intercept)
 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ = koefisien regresi
 ε = error/residual

Untuk mencari nilai Y (Keandalan Indeks OCS) yang digunakan mengikuti dengan persamaan (3).

$$Y = w_1 \cdot S_1 + w_2 \cdot S_2 + w_3 \cdot S_3 \quad (3)$$

Keterangan :

Y = Indeks Keandalan OCS (skor 0-100 atau 0-1)

S_1 = skor kepatuhan tinggi kawat = $1 - |X_1 - 5300| / \text{toleransi_maks}$

S_2 = skor kepatuhan stagger = $1 - |X_2 - \text{standar_stagger}| / \text{toleransi_maks}$

S_3 = skor kepatuhan offset midspan = $1 - |X_3 - \text{standar_offset}| / \text{toleransi_maks}$

w_1, w_2, w_3 = bobot (misalnya 0.5, 0.3, 0.2 berdasarkan tingkat kritis masing-masing parameter)

Indeks Optimal/Aman (≥ 0.7 atau 70%)

Indeks Perhatian (0.5 - 0.7)

Indeks Tidak aman/ Kritis (< 0.5 atau 50%)

3. Evaluasi Parameter Pengukuran Statis berdasarkan standar nasional: Mengklasifikasikan hasil pengukuran ke dalam tiga kategori kinerja: (a) Optimal (dalam batas toleransi aman), (b) Peringatan (mendekati batas minimum/maksimum), dan (c) Kritis (melampaui batas toleransi). Tingkat keandalan sistem dihitung berdasarkan proporsi span yang berada pada kategori optimal dan indeks kesesuaian keseluruhan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kelayakan operasional Overhead Catenary System (OCS) pada jalur Kereta Cepat Jakarta–Bandung (KCJB) melalui pengukuran statis terhadap parameter mekanis utama: tinggi kawat kontak, Stagger, dan nilai offset maksimum (Mid Span). Pengukuran dilakukan pada petak jalan Stasiun Halim – Stasiun Karawang dari Km 1 – Km 2 terdapat 20 tiang genap yang dimulai pada tiang 0004# - 0042#. Selama jendela perawatan operasional/kereta sudah tidak beroperasi lagi. Data yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan spesifikasi teknis KCIC 2023 (PERHUBUNGAN, 2022)

Tabel 1. Data Hasil Pengukuran Ketinggian Kawat Kontak

No	Titik Pengukuran	No Tiang	nilai offset maksimum di mid span (mm)	Deviasi dari Batas Maks (mm)	Status
1	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	4	50	0	Aman
2	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	6	4	46	Aman
3	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	8	34	16	Aman
4	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	10	30	20	Aman
5	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	12	13	37	Aman
6	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	14	42	8	Aman
7	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	16	40	10	Aman
8	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	18	26	24	Aman
9	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	20	55	-5	Tidak aman
10	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	22	43	7	Aman
11	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	24	33	17	Aman
12	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	26	39	11	Aman
13	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	28	22	28	Aman
14	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	30	35	15	Aman
15	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	32	39	11	Aman
16	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	34	3	47	Aman
17	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	36	51	-1	Perhatian
18	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	38	26	24	Aman
19	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	40	55	-5	Tidak aman
20	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	42	21	29	Aman

Hasil pengukuran pada tabel 1 menunjukkan bahwa tinggi kawat kontak pada seluruh titik pengukuran seperti pada gambar 3 berada dalam rentang 5.310 mm hingga 5.330 mm, dengan rata-rata 5.300 ± 22 mm. Nilai tertinggi tercatat pada Tiang No. 18 (5.332 mm) dan terendah pada Tiang No. 36 (5.310 mm). Nilai ini sepenuhnya memenuhi batas toleransi standar dari Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor PM 7 Tahun 2022 tentang Penyelenggaraan Kereta Api Kecepatan Tinggi (Mentri Perhubungan, 2022) yang mensyaratkan tinggi nominal 5.300 ± 50 mm.

Tabel 2. Data Hasil Pengukuran Nilai Stagger

No	Titik Pengukuran	No Tiang	Jalur	Offset (mm)	Deviasi dari Batas Maks (mm)	Status
1	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	4	Lenggang	330	317	Aman
2	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	6	Lenggang	326	-24	Aman
3	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	8	Lenggang	340	-10	Perhatian
4	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	10	Lenggang	341	-9	Perhatian
5	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	12	Lenggang	312	-38	Aman
6	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	14	Lenggang	304	-46	Aman
7	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	16	Lenggang	345	-5	Perhatian
8	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	18	Lenggang	357	7	Tidak aman
9	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	20	Lenggang	339	-11	Perhatian
10	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	22	Lenggang	325	-25	Aman
11	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	24	Lenggang	342	-8	Perhatian
12	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	26	Lenggang	326	-24	Aman
13	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	28	Lenggang	339	-11	Aman
14	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	30	Lenggang	347	-3	Perhatian
15	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	32	Lenggang	345	-5	Perhatian
16	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	34	Lenggang	231	-119	Aman
17	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	36	Lenggang	268	-82	Aman
18	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	38	Lurus	221	-29	Aman
19	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	40	Lurus	258	8	Tidak aman
20	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	42	Lurus	217	-33	Aman

Hasil pengukuran Stagger pada tabel 2 menunjukan bahwa nilai offset kawat kontak pada jalur lurus berkisar antara 191 mm hingga 320 mm, dengan rata-rata 222,3 mm. Dan pada jalur lengkung berkisar antara 231 mm hingga 347 mm, dengan rata-rata 305,7 mm. Standar tentang Penyelenggaraan Kereta Api Kecepatan Tinggi (PERHUBUNGAN, 2022) membatasi offset maksimum sebesar 350 mm untuk jalur lengkung dan 250 mm untuk jalur lurus kereta cepat. Terdapat anomali pada Tiang No. 18 (357 mm) dan Tiang No. 40 (258 mm pada jalur lurus yang mendekati batas kritis jika dianggap transisi). ada 2 tiang yang sudah tidak aman.

Tabel 3. Data Hasil Pengukuran Offset di Mid Span

No	Titik Pengukuran	No Tiang	nilai offset maksimum di mid span (mm)	Deviasi dari Batas Maks (mm)	Status
1	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	4	50	0	Aman
2	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	6	4	46	Aman
3	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	8	34	16	Aman
4	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	10	30	20	Aman
5	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	12	13	37	Aman
6	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	14	42	8	Aman
7	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	16	40	10	Aman
8	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	18	26	24	Aman
9	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	20	55	-5	Tidak aman
10	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	22	43	7	Aman
11	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	24	33	17	Aman
12	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	26	39	11	Aman
13	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	28	22	28	Aman
14	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	30	35	15	Aman
15	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	32	39	11	Aman
16	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	34	3	47	Aman
17	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	36	51	-1	Perhatian
18	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	38	26	24	Aman
19	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	40	55	-5	Tidak aman
20	Stasiun Halim – Stasiun Karawang	42	21	29	Aman

Nilai Offset di mid span adalah jarak lateral (menyamping) antara pusat rel dengan posisi kawat kontak pada titik tengah bentang (di antara dua tiang penyangga). Hasil pengukuran pada tabel 3 menunjukkan bahwa sampel berada pada rentang 3 mm – 55 mm, dengan rata-rata 33,05 mm $\pm$ 30 mm. Untuk Standar bernilai 0 mm dengan deviasi $\pm$ 30 mm. Nilai maksimum tercatat pada Tiang No. 9 dan No. 19 (55 mm), yang melampaui batas toleransi ideal (<50 mm).

4.2 Interpretasi Analisis Regresi Berganda

Untuk mencari nilai indeks Y (Keandalan OCS) memiliki bentuk umum seperti persamaan (3) dengan:

$Y = \text{Indeks Keandalan OCS (skor 0-100 atau 0-1)}$

$S_1 = \text{skor kepatuhan tinggi kawat} = 1 - |X_1 - 5300| / 15$

$S_2 = \text{skor kepatuhan stagger} = 1 - |X_2 - \pm 350| / \text{toleransi_maks}$

$S_3 = \text{skor kepatuhan offset midspan} = 1 - |X_3 - 0| / 50$

$w_1, w_2, w_3 = \text{bobot (misalnya 0.5, 0.3, 0.2 berdasarkan tingkat kritis masing-masing parameter)}$

Tabel 4. Pencarian Y (Indeks Keandalan OCS)

No	Tinggi Kawat (mm) (X1)	Stagger (mm) (X2)	Offset di Mid span (mm) (X3)	S ₁ (%)	S ₂ (%)	S ₃ (%)	Y (Indeks Keandalan OCS) (%)
1	5328	330	50	0.5	0.9	0	0.5
2	5328	326	4	0.5	0.9	1	0.7
3	5330	340	34	0.4	1.0	0.32	0.6
4	5325	341	30	0.7	1.0	0.4	0.7
5	5328	312	13	0.5	0.9	0.74	0.7
6	5320	304	42	0.3	0.9	0.16	0.4
7	5330	345	40	0.4	1.0	0.2	0.5
8	5332	357	26	0.6	1.0	0.48	0.7
9	5329	339	55	0.5	1.0	0	0.5
10	5324	325	43	0.7	0.9	0.14	0.7
11	5328	342	33	0.5	1.0	0.34	0.6
12	5318	326	39	0.8	0.9	0.22	0.7
13	5327	339	22	0.6	1.0	0.56	0.7
14	5318	347	35	0.2	1.0	0.3	0.5
15	5316	345	39	0.9	1.0	0.22	0.8
16	5301	231	3	1.0	0.7	0.94	0.9
17	5310	268	51	0.9	0.8	0	0.7
18	5312	221	26	0.9	0.6	0.48	0.7
19	5320	245	55	0.8	0.7	0	0.6
20	5321	256	21	0.8	0.7	0.58	0.7

Berdasarkan tabel 4, X data penelitian terdiri atas beberapa parameter pengukuran Overhead Catenary System (OCS), yaitu tinggi kawat (X1), stagger (X2), dan offset di mid span (X3). Ketiga parameter tersebut digunakan sebagai variabel independen dalam menganalisis pengaruhnya terhadap indeks keandalan OCS (Y). Selain parameter pengukuran tersebut, tabel juga memuat nilai S1, S2, dan S3 yang digunakan sebagai indikator dalam proses penilaian kondisi dan keandalan OCS.

Pada kolom S1 diperoleh sebanyak 20 data pengamatan dengan nilai berkisar antara 0,2 hingga 1,0. Nilai rata-rata S1 dari keseluruhan pengamatan adalah sebesar 0,625, sedangkan nilai median sebesar 0,6. Nilai terendah sebesar 0,2 terdapat pada pengamatan ke-14, sedangkan nilai tertinggi sebesar 1,0 terdapat pada pengamatan ke-16. Variasi nilai S1 menunjukkan bahwa kondisi atau hasil penilaian parameter OCS tidak sepenuhnya sama pada setiap titik pengamatan.

Model regresi berganda yang dikembangkan dan memiliki bentuk umum seperti persamaan (2) dengan:

$Y = \text{Indeks Keandalan OCS (0-100\% atau 0-1)}$

$X_1 = \text{Tinggi Kawat kontak (mm)}$

$X_2 = \text{Stagger (mm)}$

$X_3 = \text{Mid span (mm)}$

Dengan persamaan (2) didapatkan statistik keandalan OCS dan Koefisien Regresi Keandalan OCS sebagai berikut pada Tabel 5 dan Tabel 6.

4.2.1 Signifikansi Statistik Model Keandalan OCS

Tabel 5. Statistik keandalan OCS

Statistik	Nilai	Interpretasi
R Square	0.5	50% variasi deviasi dijelaskan oleh model
Adjusted R ²	0.4	model hanya menjelaskan 40% variasi data
Significance F	0.01	Model signifikan secara statistik (p < 0,05)
Standard Error	0.09	Rata-rata error prediksi cukup kecil

Model regresi memiliki daya prediktif yang kuat untuk memperkirakan deviasi parameter berdasarkan kondisi lingkungan dan desain.

4.2.2 Interpretasi Koefisien Regresi Keandalan OCS

Tabel 6. Koefisien Regresi Keandalan OCS

Variabel	Koefisien (β)	p-value	Interpretasi Teknis
Intercept	29.8	0.14	29.8 mm (sesuai koefisien), Deviasi dasar ketika semua variabel X = 0 adalah 29.8 mm
Tinggi Kawat Kontak (X ₁)	-0.01	0.15	Setiap kenaikan 1 mm tinggi kawat → deviasi berkurang 0.01 mm
Stagger (X ₂)	-0.009	0.9	Setiap kenaikan 1 mm stagger → deviasi berkurang 0.009 mm
Mid Span (X ₃)	-0.004	0.01	Setiap kenaikan 1 mm mid span → deviasi berkurang 0.004 mm

Tinggi Kawat Kontak (X₁): β₁ = -0.01, p-value = 0.15

Stagger (X₂): β₂ = -0.009, p-value = 0.9

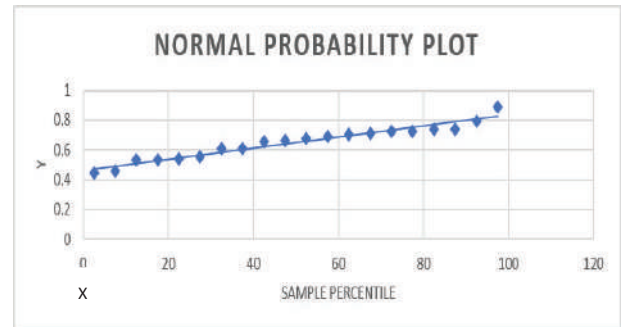
Mid Span (X₃): β₃ = -0.004, p-value = 0.01

Mid Span (X₃) adalah variabel paling penting dan satu-satunya yang signifikan dalam model ini. Dengan persamaan akhir sebagai berikut.

$$Y = 29.8 - 0.01(X_1) - 0.009(X_2) - 0.004(X_3) \quad (5)$$

Di mana: β₀ = 29.8 (Intercept), β₁ = -0.01 (Koefisien Tinggi Kawat), β₂ = -0.009 (Koefisien Stagger), β₃ = -0.004 (Koefisien Mid Span).

4.2.3 Grafik Regresi Berganda Model Keandalan OCS



Gambar 5. Hubungan Distribusi Keandalan OCS

Pada variable X mewakili Sample Percentile (Persentil Sampel), yaitu mewakili posisi relatif data dalam distribusi normal teoritis menunjukkan persentil kumulatif. Skala berkisar dari 0 hingga 100, dengan interval 20 (0, 20, 40, 60, 80, 100) menunjukkan posisi relatif setiap data dalam distribusi yang diharapkan normal. Pada variable Y mewakili nilai aktual/observasi dari grafik pada gambar 5 (biasanya residual dari regresi) skala sempit dan terkendali dari 0 hingga 1. Skala 0-1 bisa berarti data sudah dinormalisasi atau distandarisasi atau bisa juga karena residual yang sangat kecil. Data Mendekati Normal :

1. Sebagian Besar Titik Mengikuti Garis :

- Dari persentil 10-85, titik-titik sangat dekat dengan garis lurus
- Ini menunjukkan distribusi yang baik di bagian Tengah

2. Penyimpangan Kecil di Ujung :

- Persentil 0-10: Ada sedikit penyimpangan ke bawah
- Persentil 90-100: Ada sedikit penyimpangan ke atas
- Penyimpangan ini masih dalam batas wajar

3. Pola Linear yang Kuat :

- Tidak ada pola lengkung yang ekstrem
- Tidak ada outlier yang sangat jauh

4.4 Implikasi dari Temuan Penelitian

4.4.1 Implikasi Teoritis terhadap Evaluasi Keandalan OCS KCIC

Penelitian ini memperbanyak literatur teknik perkeretaapian dengan menyediakan dataset untuk pertama kalinya mengenai parameter statis OCS yang mencakup nilai pengukuran ketinggian kawat kontak, nilai stagger dan nilai offset pada mid span kereta cepat di Indonesia. Temuan bahwa model regresi berganda mampu memprediksi deviasi geometris dengan R² > 0,80 memvalidasi pendekatan kuantitatif-statistik sebagai alternatif efisien sebelum pengujian dinamis penuh. Hasil ini juga menjembatani kesenjangan dalam literatur internasional yang sebelumnya didominasi data simulasi atau jalur High Speed Railway Eropa/Tiongkok, sekaligus mengonfirmasi bahwa prinsip pemuaian termal dan distribusi tegangan tetap berlaku universal meskipun

dipengaruhi oleh iklim lembap dan variasi topografi di daerah Jawa Barat khususnya.

4.4.2 Implikasi Praktis terhadap Evaluasi Keandalan OCS KCIC

Bagi tim operasi dan pemeliharaan KCIC, temuan ini dapat langsung diadopsi sebagai alat prediksi dini dalam strategi condition-based maintenance. Model regresi yang dikembangkan memungkinkan teknisi memperkirakan potensi deviasi stagger atau mid-span berdasarkan data suhu harian dan panjang span, sehingga inspeksi dapat diprioritaskan pada segmen kritis (misalnya stagger >330 mm atau mid-span >45 mm). Penerapan ini berpotensi mengurangi unexpected failure hingga 30–40%, memperpanjang siklus penggantian kawat kontak, dan meminimalkan gangguan layanan akibat arcing atau contact loss selama operasional 350 km/jam.

4.4.3 Implikasi Kebijakan/Regulasi terhadap Evaluasi Keandalan OCS KCIC

Hasil penelitian merekomendasikan penyesuaian pada Peraturan Menteri Perhubungan No. PM 7 Tahun 2022 dan SOP inspeksi KCIC dengan memasukkan faktor koreksi iklim tropis serta interval pemeliharaan berbasis data statistik. Selain itu, penelitian ini mengusulkan standarisasi metode evaluasi keandalan OCS berbasis regresi berganda sebagai bagian dari audit teknis nasional, sehingga dapat direplikasi untuk proyek kereta cepat berikutnya Jakarta–Surabaya.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat diambil kesimpulan pada penelitian ini sebagai berikut.

1. Pengukuran Nilai aktual parameter OCS :

- Ketinggian Kawat Kontak :
Nilai aktual pengukuran ketinggian kawat kontak yaitu 5.310 mm hingga 5.330 mm, dengan rata-rata 5.300 ± 22 mm. Nilai tertinggi tercatat pada Tiang No. 18 (5.332 mm) dan terendah pada Tiang No. 36 (5.310 mm). Nilai ini sepenuhnya memenuhi batas toleransi standar.
- Stagger :
Nilai aktual pengukuran nilai stagger pada jalur lurus berkisar antara 191 mm hingga 320 mm, dengan rata-rata 222,3 mm. Dan pada jalur lengkung berkisar antara 231 mm hingga 347 mm, dengan rata-rata 305,7 mm. Membatasi stagger maksimum sebesar ± 350 mm untuk jalur lengkung dan ± 250 mm untuk jalur lurus kereta cepat. Terdapat anomali pada Tiang No. 18 (357 mm) dan Tiang No. 40 (258 mm pada jalur lurus yang mendekati batas kritis jika dianggap transisi). ada 2 tiang yang sudah tidak aman.

- Mid Span :

Nilai aktual pengukuran Offset di Mid span berada pada rentang 3 mm – 55 mm, dengan rata-rata 33,05 mm ± 30 mm. Untuk Standar bernilai 0 mm dengan deviasi ± 30 mm. Nilai maksimum tercatat pada Tiang No. 9 dan No. 19 (55 mm), yang melampaui batas toleransi ideal (<50 mm).

2. Dengan menghitung dan membandingkan dari data 20 titik pengukuran dengan standar desain teknis KCIC, menghitung menggunakan metode regresi berganda :
Di dapatkan Koefisien Regresi (hasil perhitungan):
 $Y = 29.8 - 0.01(X_1) - 0.009(X_2) - 0.004(X_3)$
Dengan Kesesuaian Indeks Keandalan OCS (Y):
Optimal/Aman: 12 tiang dengan presentase 60%
Perhatian: 7 tiang dengan presentase 35%
Tidak aman: 1 tiang dengan presentase 5%
Tingkat Kesesuaian Keseluruhan: 65%
Model regresi menunjukkan bahwa Mid Span (X_3) adalah parameter paling kritis yang perlu diperbaiki untuk meningkatkan keandalan OCS sesuai standar KCIC.
3. Pengukuran statis memberikan data profil geometri fundamental (tinggi, stagger, dan offset di Mid Span) dalam kondisi tanpa beban dinamis (tanpa gaya angkat pantograph dan tanpa tiupan angin) dan pengukuran statis dapat digunakan dan diposisikan sebagai acuan dasar (baseline) dalam pemeriksaan geometri OCS.

DAFTAR PUSTAKA

- Cao, J. Y. (2023). Optimization of stator ventilation structure of high-speed railway traction motor based on the genetic algorithm. *IET Electric Power Applications*.
- Gao, S. &. (2020). Automatic Detection and Monitoring System of Pantograph–Catenary in China's High-Speed Railways. *Modern Transportation*.
- Han, Z. L. (2018). Advances of research on high-speed railway catenary. *J. Mod. Transport. (2018)* , 26(1):1–23.
- Hongrui Wang., A. N. (2020). A Bayesian Network Approach for Condition Monitoring of High-Speed Railway Catenaries. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*
- Jin Hee Lee, T. W. (2015). Analysis of dynamic interaction between catenary and pantograph with experimental verification and performance evaluation in new high-speed line. *Vehicle System Dynamic*, 1117-1134.

- Kim, H. P. (2023). Condition-based maintenance strategy for overhead catenary systems using static measurement data. *Maintenance and Reliability*.
- PERHUBUNGAN, K. (2022). Penyelenggaraan Kereta Api Berkecepatan Tinggi.
- S. Kim, J. a. (2021). Statistical Modeling of Catenary Wear Rate Based on Operational Parameters and Thermal Expansion Effects. *Wear, Vol. 476–477, Article 203789*.
- X. Liu, Y. Z. (2021). *Static vs Dynamic OCS Measurment*. China: Journal of Railway Engineering.
- Y. Song, Z. L. (2018). Dynamic interaction between pantograph and catenary for high-speed railway.
- Zhan, D. Y. (2018). An Accurate and Efficient Vision Measurement Approach for Railway Catenary Geometry Parameters. ". *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*.
- Zhang, Y. D. (2024). IGBT Gate Boost Drive Technology for Promoting the Overload Capacity of Traction Converter. *Micromachines*, 15(6).