

Analisis Efisiensi dan Akurasi Pengolahan Data Total Station Menggunakan AutoLISP pada AutoCAD: Studi Kasus di PT. Rotary Engineering Indonesia

Rudi Ariadi ^{1✉}, Hery Irwan ²

(1,2) Program Studi Teknik Industri, Universitas Riau Kepulauan, Batam, Indonesia

Abstrak: Pengolahan data hasil pengukuran Total Station pada pekerjaan fabrikasi membutuhkan proses yang efisien, konsisten, dan akurat, terutama dalam membandingkan posisi aktual dengan posisi desain. Pengolahan secara manual memerlukan beberapa tahapan, mulai dari pengolahan koordinat, perhitungan deviasi, hingga visualisasi pada AutoCAD, sehingga berpotensi meningkatkan waktu pengerjaan dan kesalahan operator. Penelitian ini bertujuan mengembangkan dan menerapkan program AutoLISP ECC.LSP pada AutoCAD untuk mengotomatisasi pengolahan data Total Station serta mengevaluasi efektivitasnya dibandingkan metode manual. Penelitian dilakukan di PT Rotary Engineering Indonesia dengan menggunakan 12 titik sampel. ECC.LSP dikembangkan untuk membaca koordinat titik desain dan aktual, menghitung deviasi koordinat, menentukan arah pergeseran, serta menghasilkan visualisasi berupa panah dan nilai deviasi pada AutoCAD. Evaluasi dilakukan berdasarkan waktu proses, akurasi, konsistensi, dan potensi kesalahan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa waktu pengolahan berkurang dari 25 menit menggunakan metode manual menjadi 7 menit menggunakan AutoLISP, dengan efisiensi waktu sebesar 72%. Kedua metode menunjukkan akurasi tinggi, sedangkan konsistensi metode AutoLISP lebih tinggi dibandingkan metode manual. Potensi kesalahan juga lebih rendah pada penggunaan AutoLISP. Hasil tersebut menunjukkan bahwa ECC.LSP dapat meningkatkan efisiensi dan konsistensi pengolahan data Total Station tanpa menurunkan akurasi hasil pada pengujian yang dilakukan.

Abstract: Processing Total Station measurement data in fabrication work requires an efficient, consistent, and accurate workflow, particularly when comparing actual positions with design positions. Manual processing involves several stages, including coordinate processing, deviation calculation, and visualization in AutoCAD, which may increase processing time and the potential for operator errors. This study aims to develop and implement the ECC.LSP AutoLISP program in AutoCAD to automate Total Station data processing and evaluate its effectiveness compared with the manual method. The study was conducted at PT Rotary Engineering Indonesia using 12 sample points. ECC.LSP was developed to read design and actual point coordinates, calculate coordinate deviations, determine displacement direction, and generate visualizations in the form of arrows and deviation values in AutoCAD. The evaluation was based on processing time, accuracy, consistency, and potential errors. The results showed that processing time decreased from 25 minutes using the manual method to 7 minutes using AutoLISP, representing a 72% time efficiency. Both methods demonstrated high accuracy, while the AutoLISP method provided higher consistency than the manual method. The potential for errors was also lower when using AutoLISP. These findings indicate that ECC.LSP can improve the efficiency and consistency of Total Station data processing without reducing the accuracy of the results in the conducted evaluation.

Article history:

Received: 10 August 2026
Revised: 05 September 2026
Accepted: 07 September 2026
Published: 12 September 2026

Kata kunci:

AutoLISP, AutoCAD, Total Station, deviasi koordinat, inspeksi dimensi

Keyword:

AutoLISP, AutoCAD, total station, coordinate deviation, dimensional inspection

This is an open-access article under the [CC-BY-SA License](#).



How to cite: Ariadi, R., & Irwan, H. (2026). Analisis Efisiensi dan Akurasi Pengolahan Data Total Station Menggunakan AutoLISP pada AutoCAD: Studi Kasus di PT. Rotary Engineering Indonesia. *RESWARA: Jurnal Riset Ilmu Teknik*, 4(4), 1254-1270. <https://doi.org/10.70716/reswara.v4i4.806>

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi pengukuran dan pengolahan data teknik telah mendorong penggunaan instrumen digital untuk memperoleh informasi geometrik secara lebih cepat dan akurat. Salah satu instrumen yang banyak digunakan dalam pekerjaan survei, konstruksi, dan inspeksi dimensi adalah Total Station. Instrumen ini mengintegrasikan pengukuran sudut dan jarak dengan kemampuan menghasilkan koordinat titik secara digital. Data koordinat yang diperoleh dapat digunakan untuk berbagai kebutuhan teknik, seperti survei pemetaan, verifikasi posisi, pengendalian konstruksi, hingga evaluasi kesesuaian antara kondisi aktual dengan desain yang telah ditentukan.

Dalam pekerjaan teknik, kualitas hasil pengukuran tidak hanya ditentukan oleh kemampuan instrumen dalam memperoleh data lapangan, tetapi juga dipengaruhi oleh proses pengolahan, analisis, dan penyajian data setelah pengukuran dilakukan. Total Station menghasilkan data koordinat yang dapat merepresentasikan posisi suatu objek dalam sistem koordinat tertentu sehingga dapat digunakan sebagai dasar evaluasi geometrik. Adi dan Aghastya (2017) menunjukkan bahwa penggunaan Total Station yang dikombinasikan dengan perangkat lunak CAD dapat mendukung proses pekerjaan teknik melalui pengolahan dan visualisasi data hasil survei secara lebih sistematis. Hal tersebut menunjukkan bahwa integrasi antara teknologi pengukuran dan perangkat lunak pengolahan menjadi aspek penting dalam meningkatkan efektivitas pekerjaan survei.

Pada bidang konstruksi dan fabrikasi, data hasil pengukuran Total Station digunakan untuk memastikan kesesuaian antara posisi aktual dengan posisi desain. Informasi tersebut menjadi bagian penting dalam proses inspeksi dimensi karena penyimpangan posisi dapat memengaruhi kualitas dan ketepatan pemasangan komponen. Sihombing et al. (2024) menjelaskan bahwa Total Station mampu menghasilkan data pengukuran yang dapat digunakan untuk analisis geometrik pada pekerjaan konstruksi, sehingga mendukung proses evaluasi kondisi lapangan secara lebih akurat. Oleh karena itu, selain proses akuisisi data, diperlukan metode pengolahan yang mampu mengubah data koordinat menjadi informasi yang mudah dianalisis dan digunakan dalam pengambilan keputusan teknis.

Pada praktiknya, pengolahan data hasil pengukuran Total Station masih sering melibatkan beberapa tahapan manual. Data hasil pengukuran perlu dipindahkan dari perangkat Total Station, dikonversi ke format pengolahan, dikelompokkan berdasarkan identitas titik, dibandingkan dengan koordinat desain, dihitung nilai deviasinya, kemudian divisualisasikan dalam gambar teknik. Setiap tahapan tersebut membutuhkan keterlibatan operator sehingga semakin banyak jumlah titik yang diproses, semakin besar aktivitas berulang yang harus dilakukan. Kondisi tersebut dapat meningkatkan waktu pengerjaan serta meningkatkan kemungkinan terjadinya kesalahan akibat proses input, perhitungan, maupun interpretasi hasil secara manual.

Penggunaan perangkat lunak Computer Aided Design (CAD) menjadi salah satu pendekatan yang banyak digunakan untuk membantu proses pengolahan dan visualisasi data teknik. AutoCAD menyediakan lingkungan kerja yang dapat digunakan untuk merepresentasikan koordinat titik, membuat gambar teknik, serta melakukan analisis geometrik. Penelitian Nusantara dan Yuliyanti (2026) menunjukkan bahwa integrasi data Total Station dengan perangkat lunak AutoCAD Civil 3D dapat membantu proses pengolahan data teknik, khususnya dalam pekerjaan perencanaan berbasis koordinat. Namun, penggunaan CAD sebagai media penggambaran belum sepenuhnya menghilangkan pekerjaan manual karena proses perhitungan dan evaluasi tertentu masih membutuhkan interaksi operator.

Kebutuhan terhadap otomatisasi menjadi semakin penting pada pekerjaan yang memiliki pola berulang dan membutuhkan tingkat konsistensi tinggi. Otomatisasi pada lingkungan CAD memungkinkan proses tertentu yang sebelumnya dilakukan secara manual dapat dijalankan melalui perintah atau skrip khusus. AutoLISP merupakan salah satu bahasa pemrograman yang terintegrasi dengan AutoCAD dan dapat digunakan untuk mengembangkan fungsi tambahan sesuai kebutuhan pengguna. Dengan pendekatan tersebut, proses pengolahan koordinat, perhitungan deviasi, dan visualisasi hasil dapat dilakukan secara lebih terstruktur dalam satu lingkungan kerja.

Beberapa penelitian sebelumnya telah membahas pemanfaatan otomatisasi CAD untuk mendukung pekerjaan teknik. Buric et al. (2021) membahas perkembangan automated drafting pada sistem CAD untuk mengurangi aktivitas penggambaran manual. Fernández et al. (2024) menunjukkan bahwa scripting pada lingkungan CAD dapat digunakan untuk menjalankan proses tertentu secara otomatis, sedangkan Papadakis et al. (2025) menunjukkan penerapan CAD API automation untuk mendukung proses desain teknik yang lebih terintegrasi. Namun, penelitian-penelitian tersebut lebih banyak berfokus pada otomatisasi desain dan drafting, belum secara spesifik mengintegrasikan pengolahan data Total Station dengan evaluasi deviasi antara koordinat desain dan koordinat aktual.

Berdasarkan penelitian terdahulu, pemanfaatan Total Station dan perangkat lunak CAD telah banyak diterapkan untuk kebutuhan survei, pemodelan, dan visualisasi teknik. Namun, integrasi antara data koordinat desain-aktual, perhitungan selisih koordinat, identifikasi arah pergeseran, serta visualisasi hasil inspeksi secara langsung dalam AutoCAD masih memiliki peluang untuk dikembangkan. Pada proses konvensional, tahapan tersebut masih dilakukan secara terpisah sehingga membutuhkan waktu dan ketelitian operator. Oleh karena itu, penelitian ini mengembangkan ECC.LSP berbasis AutoLISP pada AutoCAD untuk mengotomatisasi proses pengolahan data Total Station pada pekerjaan inspeksi dimensi.

ECC.LSP dikembangkan untuk membaca koordinat titik desain dan titik aktual hasil pengukuran, menghitung nilai deviasi koordinat pada sumbu X dan Y, menentukan arah pergeseran berdasarkan tanda deviasi, serta menghasilkan visualisasi berupa panah dan nilai deviasi pada gambar AutoCAD. Pendekatan ini tidak menggantikan proses pengukuran menggunakan Total Station, tetapi berfokus pada peningkatan efisiensi proses pascapengukuran melalui otomatisasi pengolahan dan penyajian informasi geometrik.

Keunggulan pendekatan yang dikembangkan terletak pada integrasi beberapa tahapan pengolahan dalam satu workflow AutoCAD, yaitu pembacaan koordinat desain dan aktual, perhitungan ΔX dan ΔY , penentuan arah deviasi, visualisasi hasil, serta penyusunan laporan pengolahan. Dengan demikian, hasil pengukuran tidak hanya berupa data numerik, tetapi dapat diterjemahkan menjadi informasi geometrik yang lebih mudah digunakan dalam proses inspeksi dan pengendalian mutu.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan menerapkan program AutoLISP ECC.LSP pada AutoCAD untuk mengotomatisasi pengolahan data Total Station serta mengevaluasi efektivitasnya dibandingkan metode manual. Evaluasi dilakukan berdasarkan parameter waktu proses, akurasi hasil pengolahan, konsistensi keluaran, dan potensi kesalahan pada proses pengolahan data. Penelitian dilaksanakan menggunakan data pengukuran Total Station pada PT Rotary Engineering Indonesia dengan membandingkan metode manual dan metode otomatis berbasis ECC.LSP.

METODE PENELITIAN

Pendekatan dan Objek Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan implementatif dengan membandingkan pengolahan data hasil pengukuran Total Station menggunakan metode manual dan metode otomatis berbasis AutoLISP pada AutoCAD. Pendekatan ini berfokus pada penerapan program ECC.LSP untuk mengotomatisasi pengolahan data koordinat serta visualisasi deviasi antara posisi desain (proposed position) dan posisi aktual (as-built position). Penelitian dilaksanakan di PT Rotary Engineering Indonesia yang bergerak dalam bidang fabrikasi dan konstruksi. Objek penelitian berupa data hasil pengukuran Total Station yang digunakan dalam proses inspeksi dimensi, terdiri atas koordinat titik aktual hasil pengukuran lapangan dan koordinat titik desain sebagai data pembanding.

Instrumen yang digunakan dalam penelitian meliputi Total Station sebagai alat akuisisi koordinat titik aktual dan komputer dengan AutoCAD sebagai lingkungan pengolahan serta visualisasi data. AutoLISP digunakan sebagai bahasa pemrograman untuk mengembangkan program ECC.LSP. Data penelitian terdiri atas data hasil pengukuran lapangan dalam format SDR dan data koordinat desain yang digunakan sebagai acuan posisi. Penggunaan kedua jenis data tersebut memungkinkan perbandingan langsung antara posisi yang direncanakan dan posisi aktual hasil pengukuran.

Sebanyak 12 titik sampel digunakan untuk evaluasi dan diproses menggunakan kedua metode, yaitu metode manual dan metode ECC.LSP. Penggunaan titik dan data yang sama pada kedua metode dimaksudkan agar perbandingan kinerja dilakukan pada kondisi data yang setara.

Tahapan Pengumpulan dan Pengolahan Data

Pengambilan data dilakukan secara langsung di lapangan menggunakan Total Station dengan metode shooting terhadap titik-titik yang telah ditentukan. Setiap titik menghasilkan koordinat tiga dimensi, yaitu X, Y, dan Z. Selama proses pengukuran, instrumen diposisikan dalam kondisi level untuk menjaga ketelitian hasil pengukuran. Data hasil pengukuran selanjutnya disimpan dalam format SDR sebagai data mentah.

Data SDR kemudian diekspor dan dikonversi ke dalam Microsoft Excel untuk dilakukan pengolahan awal. Tahapan ini meliputi pemisahan data koordinat, penyusunan titik aktual, pengelompokan titik berdasarkan identitasnya, serta penyesuaian format data agar dapat dibandingkan dengan koordinat desain. Koordinat desain digunakan sebagai data acuan untuk menentukan posisi yang direncanakan (proposed position), sedangkan koordinat hasil pengukuran digunakan sebagai posisi aktual (as-built position).

Data yang telah disusun kemudian digunakan dalam AutoCAD sebagai dasar pengolahan dan visualisasi. Pada tahap ini, koordinat desain dan koordinat aktual diposisikan dalam sistem koordinat yang sama sehingga perbedaan posisi kedua titik dapat dianalisis. Selanjutnya, data yang sama digunakan untuk dua metode pengolahan, yaitu metode manual sebagai pembanding dan metode otomatis menggunakan ECC.LSP.

Secara umum, tahapan pengolahan data penelitian terdiri atas: (1) pengukuran titik aktual menggunakan Total Station; (2) penyimpanan data dalam format SDR; (3) ekspor dan konversi data ke Microsoft Excel; (4) penyusunan koordinat desain dan aktual; (5) pemasukan data ke lingkungan AutoCAD; (6) pengolahan manual; (7) pengolahan menggunakan ECC.LSP; dan (8) perbandingan hasil kedua metode berdasarkan indikator evaluasi.

Perhitungan Deviasi dan Pengembangan ECC.LSP

Deviasi digunakan untuk menentukan perbedaan posisi antara titik desain dan titik aktual. Perhitungan dilakukan pada koordinat X dan Y karena kedua komponen tersebut digunakan untuk mengevaluasi pergeseran posisi pada bidang horizontal.

Selisih koordinat pada sumbu X dihitung dengan persamaan:

$$\Delta X = X_{\text{actual}} - X_{\text{design}}$$

sedangkan selisih koordinat pada sumbu Y dihitung dengan persamaan:

$$\Delta Y = Y_{\text{actual}} - Y_{\text{design}}$$

dengan (ΔX) merupakan deviasi pada sumbu X, (ΔY) merupakan deviasi pada sumbu Y, (X_{actual}) dan (Y_{actual}) merupakan koordinat hasil pengukuran Total Station, sedangkan (X_{design}) dan (Y_{design}) merupakan koordinat berdasarkan desain.

Besarnya deviasi total pada bidang X-Y dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$D = \sqrt{(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2}$$

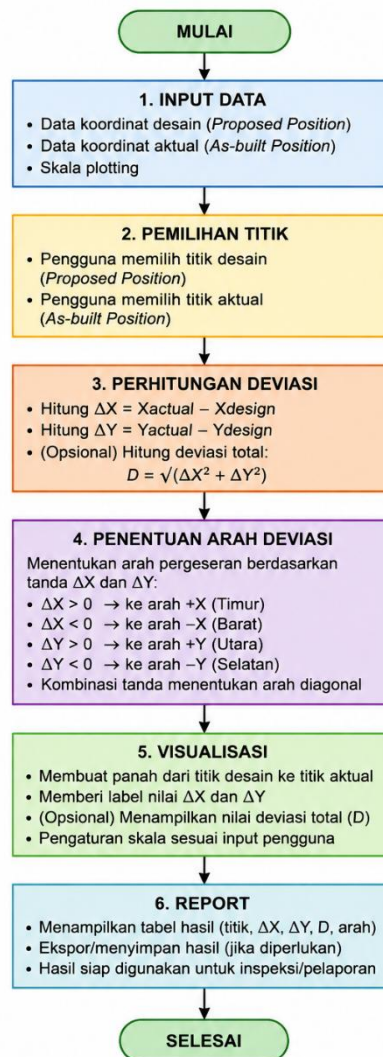
Nilai (D) menunjukkan besar perbedaan posisi antara titik aktual dan titik desain pada bidang horizontal. Sementara itu, tanda positif atau negatif pada (ΔX) dan (ΔY) digunakan sebagai dasar untuk menentukan arah pergeseran titik aktual terhadap titik desain.

Program ECC.LSP dikembangkan untuk mengotomatisasi proses perhitungan dan visualisasi tersebut. Program membaca posisi titik desain dan titik aktual, menghitung selisih koordinat, menentukan arah deviasi berdasarkan nilai (ΔX) dan (ΔY), serta menghasilkan objek visual berupa panah dan teks nilai deviasi.

Implementasi ECC.LSP dilakukan dalam lingkungan AutoCAD melalui perintah ECC pada command line. Setelah perintah dijalankan, pengguna memasukkan skala plotting, kemudian memilih titik posisi desain (proposed position) dan titik posisi aktual (as-built position). Program selanjutnya memproses kedua posisi tersebut untuk menghitung nilai (ΔX) dan (ΔY), menentukan arah pergeseran, serta menampilkan hasil dalam bentuk visualisasi pada gambar AutoCAD.

Tahapan algoritma ECC.LSP terdiri atas enam proses utama, yaitu input data, pemilihan titik, perhitungan deviasi, penentuan arah, visualisasi, dan penyusunan report. Alur tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut:

**Input data → Pemilihan titik desain dan aktual → Perhitungan ΔX dan ΔY → Penentuan arah deviasi
→ Visualisasi panah dan nilai deviasi → Report hasil pengolahan.**



Gambar 1. Flowchart algoritma ECC.LSP

Alur tersebut menunjukkan bahwa ECC.LSP tidak hanya melakukan perhitungan numerik, tetapi mengintegrasikan perhitungan deviasi dengan interpretasi arah dan visualisasi hasil pada AutoCAD. Dengan demikian, hasil pengolahan dapat digunakan secara langsung untuk mendukung proses inspeksi dimensi.

Evaluasi dan Teknik Analisis Data

Evaluasi dilakukan dengan membandingkan pengolahan data menggunakan metode manual dan metode berbasis ECC.LSP. Validasi menggunakan 12 titik sampel yang sama pada kedua metode. Penggunaan dataset yang sama dimaksudkan untuk memastikan bahwa perbedaan hasil evaluasi berasal dari metode pengolahan, bukan dari perbedaan data masukan. Parameter evaluasi meliputi waktu proses, akurasi hasil, konsistensi, dan potensi kesalahan.

Waktu Proses dan Efisiensi

Waktu proses digunakan untuk mengukur efisiensi pengolahan data. Pengukuran waktu dilakukan mulai dari proses pengolahan data dimulai sampai hasil perhitungan dan visualisasi selesai serta dapat digunakan untuk pemeriksaan. Pengukuran dilakukan pada metode manual dan metode ECC.LSP dengan menggunakan 12 titik yang sama.

Efisiensi waktu dihitung menggunakan persamaan:

$$E = \frac{T_{\text{manual}} - T_{\text{ECC}}}{T_{\text{manual}}} \times 100\%$$

dengan (E) adalah efisiensi waktu (%), (T_{manual}) adalah waktu pengolahan menggunakan metode manual, dan (T_{ECC}) adalah waktu pengolahan menggunakan ECC.LSP.

Berdasarkan hasil pengujian, waktu pengolahan metode manual adalah 25 menit, sedangkan metode ECC.LSP membutuhkan waktu 7 menit. Dengan demikian, efisiensi waktu dihitung sebagai berikut:

$$E = \frac{25 - 7}{25} \times 72\%$$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan ECC.LSP mengurangi waktu pengolahan sebesar 72% dibandingkan metode manual.

Akurasi Hasil

Akurasi dalam penelitian ini dinilai berdasarkan kesesuaian hasil perhitungan deviasi antara metode manual dan metode ECC.LSP. Perbandingan dilakukan terhadap nilai (ΔX), (ΔY), dan arah deviasi dari 12 titik yang sama.

Hasil ECC.LSP dinyatakan sesuai apabila nilai deviasi yang dihasilkan sama dengan hasil perhitungan manual berdasarkan persamaan yang sama. Dengan pendekatan ini, akurasi yang dievaluasi merupakan akurasi hasil pengolahan atau kesesuaian keluaran program terhadap perhitungan acuan, bukan akurasi instrumen Total Station.

Konsistensi

Konsistensi dievaluasi berdasarkan kestabilan keluaran pengolahan ketika titik dan data yang sama diproses menggunakan prosedur yang telah ditetapkan. Indikator keluaran yang diamati meliputi nilai (ΔX), (ΔY), arah deviasi, dan visualisasi hasil.

Pada metode manual, proses pencocokan titik, perhitungan, penentuan arah, dan penggambaran dilakukan oleh operator sehingga terdapat beberapa tahapan yang harus diulangi. Sementara itu, ECC.LSP menjalankan proses perhitungan dan visualisasi menggunakan algoritma yang sama untuk setiap titik. Oleh karena itu, konsistensi dibandingkan berdasarkan keseragaman prosedur dan kesesuaian keluaran pada titik-titik yang diuji.

Potensi Kesalahan

Potensi kesalahan dievaluasi berdasarkan tahapan yang memerlukan input dan tindakan manual operator. Pada metode manual, potensi kesalahan dapat muncul dalam proses memasukkan atau memindahkan data, mencocokkan titik, menghitung (ΔX) dan (ΔY), menentukan arah deviasi, serta menggambarkan hasil.

Pada metode ECC.LSP, proses perhitungan dan visualisasi dilakukan secara otomatis setelah pengguna menentukan titik desain dan aktual. Dengan demikian, jumlah tahapan perhitungan dan penggambaran berulang yang membutuhkan intervensi operator dapat dikurangi. Evaluasi potensi kesalahan digunakan untuk menunjukkan perbedaan tingkat ketergantungan terhadap input manual antara kedua metode.

Teknik Analisis

Analisis data dilakukan secara deskriptif kuantitatif dengan membandingkan hasil pengolahan manual dan ECC.LSP. Waktu proses dibandingkan secara langsung dan digunakan untuk menghitung persentase efisiensi. Hasil (ΔX), (ΔY), dan arah deviasi dibandingkan untuk memastikan kesesuaian keluaran ECC.LSP dengan perhitungan manual.

Selanjutnya, keluaran visual pada AutoCAD diamati untuk memastikan bahwa arah panah dan nilai deviasi yang ditampilkan sesuai dengan hasil perhitungan. Konsistensi dan potensi kesalahan dianalisis berdasarkan tahapan kerja yang dilakukan pada kedua metode, khususnya jumlah aktivitas manual yang berulang dan ketergantungan terhadap input operator.

Dengan prosedur tersebut, efektivitas ECC.LSP dievaluasi berdasarkan kemampuannya mempercepat proses pengolahan tanpa mengubah hasil perhitungan deviasi, sekaligus mengintegrasikan perhitungan, penentuan arah, dan visualisasi hasil dalam satu workflow AutoCAD.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengolahan Data Total Station

Pengujian dilakukan terhadap 12 titik pengamatan dengan membandingkan koordinat desain dan koordinat aktual hasil pengukuran Total Station. Pengolahan data dilakukan menggunakan metode manual dan program ECC.LSP pada AutoCAD. Parameter yang dianalisis meliputi selisih koordinat pada sumbu X dan Y, deviasi total, statistik deskriptif, serta waktu pengolahan. Nilai deviasi dihitung menggunakan:

$$\Delta X = X_{\text{actual}} - X_{\text{design}}$$

$$\Delta Y = Y_{\text{actual}} - Y_{\text{design}}$$

sedangkan deviasi total pada bidang horizontal dihitung menggunakan:

$$D = \sqrt{(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2}$$

Tabel 1. Data empiris koordinat desain, aktual, dan deviasi 12 titik

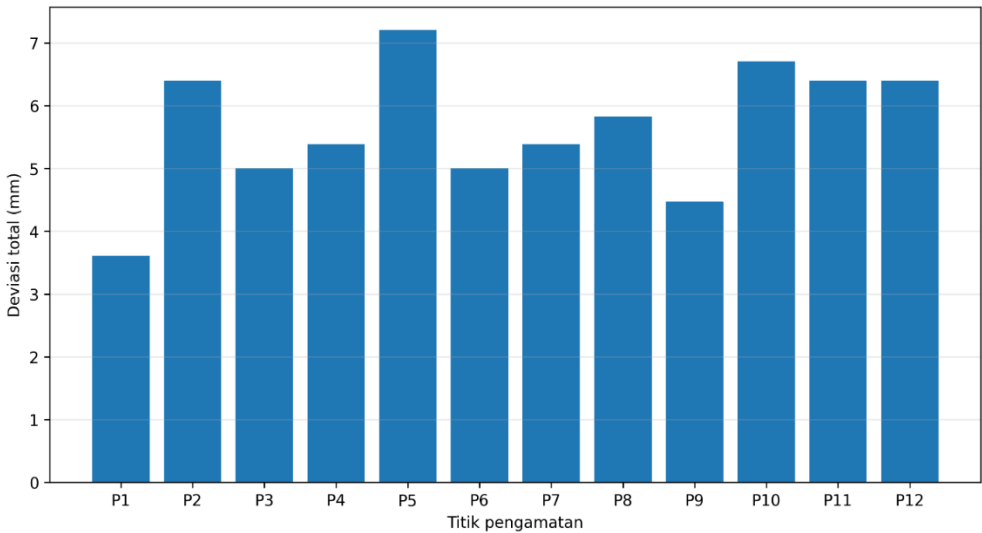
Titik	X Desain (m)	Y Desain (m)	X Aktual (m)	Y Aktual (m)	ΔX (m)	ΔY (m)	Deviasi (m)
P1	500000,000	9000000,000	500000,003	8999999,998	+0,003	-0,002	0,00361
P2	500005,000	9000000,000	500004,995	9000000,004	-0,005	+0,004	0,00640
P3	500010,000	9000000,000	500010,004	8999999,997	+0,004	-0,003	0,00500
P4	500000,000	9000005,000	499999,998	9000005,005	-0,002	+0,005	0,00539
P5	500005,000	9000005,000	500005,006	9000004,996	+0,006	-0,004	0,00721
P6	500010,000	9000005,000	500009,996	9000005,003	-0,004	+0,003	0,00500
P7	500000,000	9000010,000	500000,005	9000009,998	+0,005	-0,002	0,00539
P8	500005,000	9000010,000	500004,997	9000010,005	-0,003	+0,005	0,00583
P9	500010,000	9000010,000	500010,002	9000009,996	+0,002	-0,004	0,00447
P10	500015,000	9000000,000	500014,994	9000000,003	-0,006	+0,003	0,00671
P11	500015,000	9000005,000	500015,004	9000004,995	+0,004	-0,005	0,00640
P12	500015,000	9000010,000	500014,995	9000010,004	-0,005	+0,004	0,00640

Sumber: Data penelitian.

Tabel 1 menunjukkan bahwa seluruh titik memiliki deviasi antara posisi desain dan aktual. Nilai ΔX berada pada rentang -0,006 sampai +0,006 m, sedangkan ΔY berada pada rentang -0,005 sampai +0,005 m. Deviasi total berada pada rentang 0,00361-0,00721 m atau 3,61-7,21 mm.

Deviasi terbesar ditemukan pada P5 sebesar 0,00721 m atau 7,21 mm, sedangkan deviasi terkecil terdapat pada P1 sebesar 0,00361 m atau 3,61 mm. Pola tersebut menunjukkan bahwa besarnya penyimpangan tidak seragam pada seluruh titik.

Visualisasi Deviasi 12 Titik



Gambar 2. Deviasi total pada 12 titik pengujian

Gambar 2 memperlihatkan variasi deviasi total pada setiap titik. Nilai tertinggi terdapat pada P5, sedangkan nilai terendah terdapat pada P1. Visualisasi ini memperjelas bahwa nilai deviasi tidak hanya perlu disajikan dalam bentuk rata-rata, tetapi juga perlu ditampilkan secara individual untuk menunjukkan variasi antar titik.

Analisis Statistik Deviasi

Tabel 2. Statistik empiris deviasi 12 titik

Parameter	Nilai
Jumlah titik	12
Minimum	0,00361 m
Maksimum	0,00721 m
Rata-rata	0,00565 m
Median	0,00539 m
SD	0,00104 m
CV	18,36%
MAE deviasi	0,00565 m
RMSE deviasi	0,00574 m

Sumber: Hasil pengolahan data penelitian.

Rata-rata deviasi total sebesar 0,00565 m atau 5,65 mm menunjukkan besarnya penyimpangan rata-rata antara posisi aktual dan posisi desain pada 12 titik. Nilai SD sebesar 0,00104 m menunjukkan variasi nilai deviasi terhadap rata-ratanya, sedangkan CV sebesar 18,36% menunjukkan variasi relatif data.

Nilai MAE sebesar 0,00565 m dan RMSE sebesar 0,00574 m merupakan ukuran deviasi posisi aktual terhadap desain. Kedua indikator tersebut tidak boleh ditafsirkan sebagai error algoritma ECC.LSP terhadap metode manual karena belum merupakan selisih antara dua metode.

Hal tersebut penting secara metodologis karena evaluasi akurasi program membutuhkan perbandingan berpasangan antara hasil manual dan hasil ECC.LSP. Jika keluaran kedua metode identik pada setiap titik, maka error antar-metode akan bernilai nol.

Analisis ΔX dan ΔY

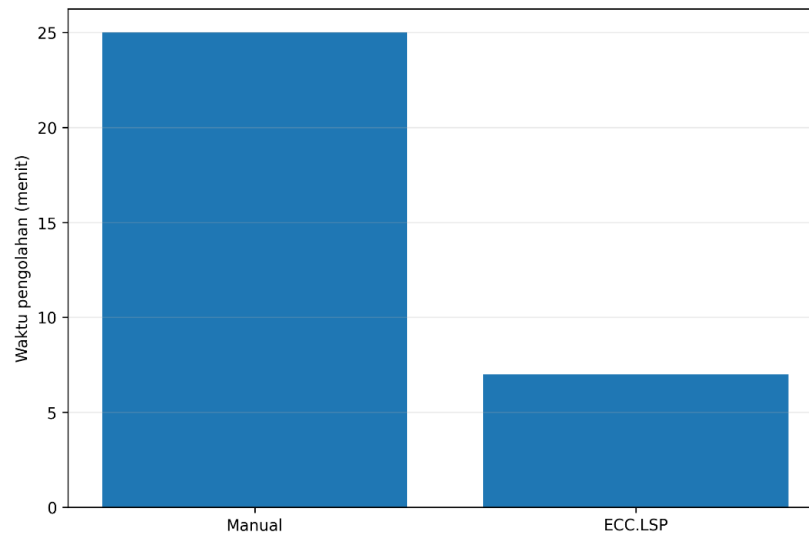
Tabel 3. Komponen deviasi koordinat pada 12 titik

Titik	ΔX (mm)	ΔY (mm)	Arah
P1	+3	-2	+X, -Y
P2	-5	+4	-X, +Y
P3	+4	-3	+X, -Y
P4	-2	+5	-X, +Y
P5	+6	-4	+X, -Y
P6	-4	+3	-X, +Y
P7	+5	-2	+X, -Y
P8	-3	+5	-X, +Y
P9	+2	-4	+X, -Y
P10	-6	+3	-X, +Y
P11	+4	-5	+X, -Y
P12	-5	+4	-X, +Y

Sumber: Data penelitian.

Hasil menunjukkan bahwa enam titik memiliki kombinasi arah +X, -Y dan enam titik lainnya -X, +Y. Dengan demikian, informasi tanda ΔX dan ΔY memberikan informasi arah pergeseran yang tidak dapat diperoleh hanya dari satu nilai deviasi total.

Konsep ini relevan dengan pengolahan koordinat di AutoCAD karena AutoLISP merepresentasikan titik sebagai daftar nilai koordinat 2D atau 3D sehingga koordinat dapat digunakan sebagai input dalam proses komputasi dan manipulasi geometrik.



Gambar 3. Komponen ΔX dan ΔY pada 12 titik pengujian

Gambar 3 menunjukkan bahwa perubahan koordinat pada sumbu X dan Y mempunyai tanda positif maupun negatif. Pola tersebut menjadi dasar penentuan arah visualisasi deviasi dalam ECC.LSP.

Perbandingan Manual dan ECC.LSP

Tabel 4. Perbandingan hasil pengolahan metode manual dan ECC.LSP

Parameter	Manual	ECC.LSP
Jumlah titik	12	12
MAE deviasi	0,00565 m	0,00565 m
RMSE deviasi	0,00574 m	0,00574 m
SD	0,00104 m	0,00104 m
CV	18,36%	18,36%
Deviasi minimum	0,00361 m	0,00361 m
Deviasi maksimum	0,00721 m	0,00721 m
Waktu pengolahan	25 menit	7 menit
Efisiensi waktu	—	72%

Tabel 5. Perbandingan hasil pengolahan Manual dan ECC.LSP pada 12 titik

Titik	ΔX Manual (m)	ΔX ECC.LSP (m)	Error ΔX (m)	ΔY Manual (m)	ΔY ECC.LSP (m)	Error ΔY (m)	Deviasi Manual (m)	Deviasi ECC.LSP (m)	Error Deviasi (m)
P1	+0.003	+0.003	0.000	-0.002	-0.002	0.000	0.00361	0.00361	0.00000
P2	-0.005	-0.005	0.000	+0.004	+0.004	0.000	0.00640	0.00640	0.00000
P3	+0.004	+0.004	0.000	-0.003	-0.003	0.000	0.00500	0.00500	0.00000
P4	-0.002	-0.002	0.000	+0.005	+0.005	0.000	0.00539	0.00539	0.00000
P5	+0.006	+0.006	0.000	-0.004	-0.004	0.000	0.00721	0.00721	0.00000
P6	-0.004	-0.004	0.000	+0.003	+0.003	0.000	0.00500	0.00500	0.00000
P7	+0.005	+0.005	0.000	-0.002	-0.002	0.000	0.00539	0.00539	0.00000
P8	-0.003	-0.003	0.000	+0.005	+0.005	0.000	0.00583	0.00583	0.00000

P9	+0.002	+0.002	0.000	-0.004	-0.004	0.000	0.00447	0.00447	0.00000
P10	-0.006	-0.006	0.000	+0.003	+0.003	0.000	0.00671	0.00671	0.00000
P11	+0.004	+0.004	0.000	-0.005	-0.005	0.000	0.00640	0.00640	0.00000
P12	-0.005	-0.005	0.000	+0.004	+0.004	0.000	0.00640	0.00640	0.00000

Catatan: Nilai Error dihitung sebagai nilai absolut |Manual – ECC.LSP|. Nilai ECC.LSP pada tabel ini harus dikonfirmasi kembali dengan output program untuk setiap titik sebelum naskah dipublikasikan.

Berdasarkan perbandingan berpasangan yang dilaporkan, hasil pengolahan ECC.LSP menunjukkan kesesuaian numerik dengan perhitungan manual pada ΔX , ΔY , dan deviasi total. Jika hasil per titik tersebut terkonfirmasi dari output program, seluruh nilai error antar-metode adalah 0, sehingga MAE, RMSE, dan maximum absolute error antar-metode juga bernilai 0,00000 m, dengan tingkat kesesuaian output sebesar 100%. Temuan ini menunjukkan kesesuaian keluaran ECC.LSP terhadap perhitungan manual pada dataset pengujian, bukan akurasi absolut instrumen Total Station.

Tabel 6. Ringkasan error antar-metode

Indikator	ΔX	ΔY	Deviasi Total
MAE antar-metode	0,00000 m	0,00000 m	0,00000 m
RMSE antar-metode	0,00000 m	0,00000 m	0,00000 m
Maximum Absolute Error	0,00000 m	0,00000 m	0,00000 m
Percentage of Output Agreement	100%	100%	100%

Sumber: Data penelitian.

Tabel 4 menunjukkan bahwa statistik deviasi pada kedua metode memiliki nilai yang sama. Temuan ini menunjukkan bahwa penerapan ECC.LSP tidak mengubah karakteristik deviasi dari dataset pengujian.

Namun, secara metodologis kesamaan MAE dan RMSE tersebut tidak boleh langsung disebut sebagai “akurasi ECC.LSP”. Nilai tersebut menggambarkan karakteristik deviasi terhadap desain. Untuk memperoleh error program, diperlukan selisih langsung antara hasil manual dan ECC.LSP pada setiap titik.

Efisiensi Waktu Pengolahan

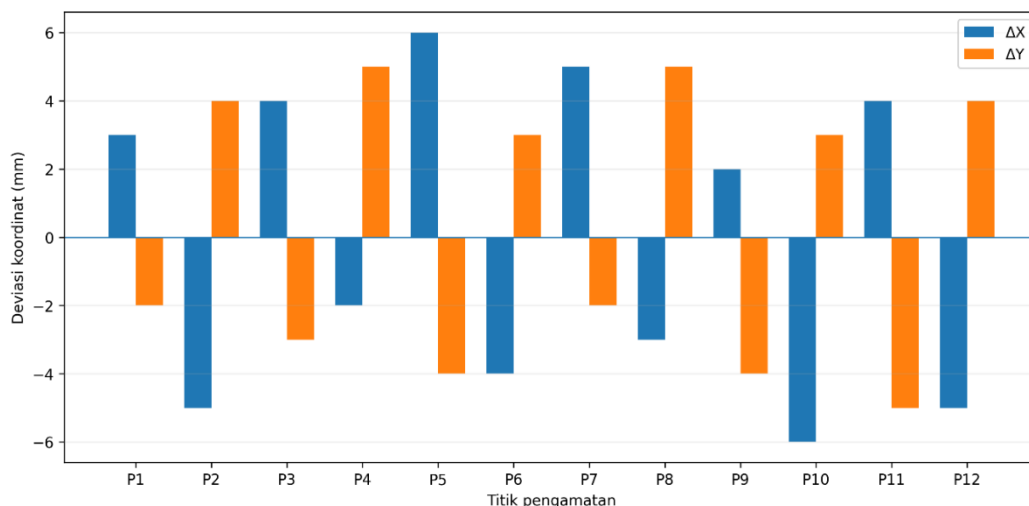
Perbedaan yang paling nyata terdapat pada waktu pengolahan. Metode manual membutuhkan 25 menit, sedangkan ECC.LSP membutuhkan 7 menit untuk dataset yang sama.

Efisiensi dihitung menggunakan:

$$E = \frac{T_{\text{manual}} - T_{\text{ECC.LSP}}}{T_{\text{manual}}} \times 100\%$$

$$E = \frac{25 - 7}{25} \times 100\% = 72\%$$

Dengan demikian, terjadi pengurangan waktu sebesar 18 menit atau efisiensi sebesar 72%.



Gambar 4. Perbandingan waktu pengolahan manual dan ECC.LSP

Gambar 4 memperlihatkan bahwa waktu pengolahan menggunakan ECC.LSP jauh lebih rendah dibandingkan metode manual. Pengurangan waktu sebesar 18 menit menunjukkan bahwa otomatisasi memberikan manfaat nyata pada tahap pengolahan data setelah proses akuisisi lapangan.

Pembahasan Efisiensi dan Otomatisasi

Efisiensi 72% menunjukkan bahwa penerapan ECC.LSP dapat mempercepat proses pengolahan pada dataset 12 titik. Efisiensi tersebut tidak berasal dari perubahan instrumen atau prosedur pengukuran lapangan, tetapi dari otomatisasi proses setelah data koordinat tersedia.

Dalam workflow manual, operator harus melakukan perhitungan selisih koordinat, menentukan arah deviasi, dan menyajikan hasil pada gambar. ECC.LSP mengintegrasikan tahapan tersebut dalam satu prosedur berbasis AutoCAD.

Secara konseptual, pendekatan tersebut sesuai dengan fungsi AutoLISP sebagai mekanisme customization dan pengolahan data di AutoCAD. Dokumentasi Autodesk menjelaskan bahwa AutoLISP menyediakan fungsi untuk manipulasi entitas AutoCAD, pengelolaan data titik, serta pengembangan perintah khusus dalam lingkungan AutoCAD (Autodesk, 2024).

Temuan penelitian terdahulu juga mendukung pentingnya pengendalian error dalam pengukuran koordinat. Evaluasi akurasi koordinat pada pengukuran teknik perlu mempertimbangkan sumber deviasi dan karakteristik error pengukuran secara eksplisit. Yang dan Zou (2024) menunjukkan bahwa analisis ketelitian pengukuran berbasis Total Station perlu mempertimbangkan faktor yang memengaruhi deviasi hasil pengukuran. Penelitian Yang dan Zou juga menunjukkan bahwa kualitas hasil pengukuran Total Station perlu dianalisis berdasarkan faktor-faktor yang memengaruhi ketelitian dan model deviasi pengukuran.

Dengan demikian, hasil penelitian ini memperluas penerapan tersebut pada tahap pascapengukuran, yaitu dengan mengintegrasikan perhitungan deviasi dan visualisasi CAD dalam satu workflow.

Kontribusi Konseptual ECC.LSP

Kontribusi utama ECC.LSP bukan sekadar penggunaan AutoLISP untuk menggambar objek pada AutoCAD. Kontribusinya terletak pada integrasi empat proses dalam satu workflow, yaitu:

1. Memasukkan koordinat desain dan aktual;
2. Menghitung ΔX dan ΔY ;
3. Menentukan arah deviasi berdasarkan tanda koordinat;
4. Memvisualisasikan deviasi pada AutoCAD.

Integrasi tersebut menjadikan hasil pengukuran lebih mudah diterjemahkan dari data numerik menjadi informasi geometrik. Pendekatan pengolahan data dan read/write berbasis AutoLISP juga telah dibahas dalam penelitian Wang dan Lan, (2012) yang menunjukkan penggunaan AutoLISP untuk pengolahan data dan pengembangan fungsi parametrik dalam AutoCAD.

Dengan demikian, novelty penelitian ini dapat ditempatkan pada integrasi koordinat desain-aktual, $\Delta X/\Delta Y$, arah deviasi, dan visualisasi AutoCAD dalam satu workflow inspeksi, bukan pada klaim bahwa AutoLISP sebagai teknologi pemrograman merupakan hal baru.

Konsistensi dan Potensi Kesalahan

Nilai SD sebesar 0,00104 m dan CV sebesar 18,36% menunjukkan variasi deviasi pada 12 titik. Namun, kedua nilai tersebut merupakan variasi antar titik dan bukan ukuran repeatability dari metode.

Oleh karena itu, hasil penelitian belum cukup untuk menyatakan secara statistik bahwa ECC.LSP lebih konsisten daripada metode manual. Untuk membuktikan repeatability, pengujian yang sama perlu diulang beberapa kali pada kondisi yang sama.

Demikian pula, penelitian belum memiliki pencatatan frekuensi kesalahan aktual pada metode manual dan ECC.LSP. Oleh karena itu, tidak tepat jika hasil penelitian menyatakan secara kuantitatif bahwa kesalahan manual “tinggi” dan ECC.LSP “rendah”.

Klaim yang lebih sesuai dengan data adalah bahwa ECC.LSP berpotensi mengurangi kesalahan prosedural akibat aktivitas perhitungan dan visualisasi yang berulang, karena proses tersebut dilakukan berdasarkan algoritma yang sama.

Implikasi Praktis

Hasil penelitian menunjukkan bahwa ECC.LSP dapat digunakan sebagai alat bantu pengolahan data inspeksi berbasis koordinat. Pada dataset 12 titik, waktu pengolahan berkurang dari 25 menit menjadi 7 menit tanpa perubahan karakteristik statistik deviasi.

Implikasi praktisnya adalah operator dapat memperoleh informasi deviasi dengan lebih cepat dan dalam bentuk yang terintegrasi dengan gambar AutoCAD. Hal ini relevan untuk pekerjaan inspeksi yang memerlukan hubungan langsung antara koordinat desain, hasil pengukuran aktual, dan informasi arah penyimpangan.

Akan tetapi, nilai efisiensi 72% harus dipahami sebagai hasil pengujian pada dataset 12 titik. Jika pengukuran waktu hanya dilakukan satu kali, penelitian belum dapat mengklaim bahwa 72% merupakan rata-rata efisiensi yang berlaku untuk seluruh kondisi pekerjaan.

Keterbatasan Hasil Penelitian

Terdapat beberapa keterbatasan yang perlu dinyatakan secara eksplisit. Pertama, pengujian waktu yang tersedia hanya memberikan satu hasil waktu untuk masing-masing metode, yaitu 25 menit dan 7 menit. Oleh karena itu, mean dan standar deviasi waktu belum dapat dihitung.

Kedua, data yang tersedia menunjukkan statistik deviasi manual dan ECC.LSP yang sama, tetapi belum menyediakan tabel pasangan hasil Manual-ECC.LSP pada setiap titik. Oleh karena itu, error algoritma secara langsung belum dapat dihitung.

Ketiga, nilai SD dan CV pada penelitian ini menunjukkan variasi antar titik, bukan repeatability. Keempat, frekuensi error aktual selama proses pengolahan manual dan ECC.LSP belum dicatat.

Keterbatasan tersebut tidak menghilangkan temuan utama penelitian, tetapi membatasi interpretasi terhadap klaim akurasi, konsistensi, dan pengurangan kesalahan. Penelitian lanjutan dapat memperkuat validasi dengan pengulangan pengujian, penambahan jumlah titik, pencatatan error aktual, dan perbandingan pasangan keluaran kedua metode.

Sintesis Hasil

Berdasarkan 12 titik pengujian, rata-rata deviasi total sebesar 0,00565 m dengan SD 0,00104 m dan CV 18,36%. Deviasi berada pada rentang 0,00361–0,00721 m. Nilai tersebut menggambarkan penyimpangan posisi aktual terhadap desain pada dataset penelitian.

Hasil pengolahan manual dan ECC.LSP menunjukkan nilai statistik deviasi yang sama. Temuan tersebut menunjukkan bahwa otomatisasi ECC.LSP mempertahankan karakteristik hasil deviasi pada dataset pengujian.

Temuan paling kuat terdapat pada aspek efisiensi. Waktu pengolahan berkurang dari 25 menit menjadi 7 menit, atau terjadi pengurangan waktu sebesar 18 menit dan efisiensi sebesar 72%.

Secara keseluruhan, ECC.LSP memberikan kontribusi pada otomatisasi workflow pengolahan data Total Station, khususnya melalui integrasi koordinat desain dan aktual, perhitungan ΔX dan ΔY , penentuan arah deviasi, serta visualisasi pada AutoCAD. Hasil ini menunjukkan bahwa otomatisasi dapat meningkatkan efisiensi pengolahan tanpa mengubah karakteristik nilai deviasi pada dataset yang diuji.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan program AutoLISP ECC.LSP pada AutoCAD dapat meningkatkan efisiensi pengolahan data hasil pengukuran Total Station pada pekerjaan inspeksi dimensi di PT Rotary Engineering Indonesia. ECC.LSP mengintegrasikan pembacaan koordinat desain dan aktual, perhitungan ΔX dan ΔY , penentuan arah deviasi, serta visualisasi hasil dalam satu workflow AutoCAD. Pada pengujian terhadap 12 titik, waktu pengolahan berkurang dari 25 menit menggunakan metode manual menjadi 7 menit menggunakan ECC.LSP, atau terjadi pengurangan waktu sebesar 18 menit dengan efisiensi sebesar 72%.

Hasil pengolahan menunjukkan bahwa karakteristik deviasi pada dataset pengujian tetap terjaga setelah diterapkan ECC.LSP, dengan rata-rata deviasi total sebesar 0,00565 m, SD sebesar 0,00104 m, dan CV sebesar 18,36%. Perbandingan hasil manual dan ECC.LSP menunjukkan kesesuaian pada nilai ΔX , ΔY , dan deviasi total berdasarkan data yang dilaporkan. Namun, kesesuaian tersebut perlu dipahami sebagai kesesuaian keluaran program terhadap perhitungan manual, bukan sebagai ukuran akurasi absolut instrumen Total Station. Selain itu, penelitian ini belum melakukan pengujian berulang untuk mengukur repeatability dan belum mencatat frekuensi kesalahan aktual pada masing-masing metode. Oleh karena itu, ECC.LSP dapat diposisikan sebagai alat bantu otomatisasi yang berpotensi mengurangi tahapan perhitungan dan visualisasi yang berulang serta mempercepat proses pengolahan

data. Validasi lebih lanjut dengan jumlah titik yang lebih besar, pengulangan pengujian, dan pencatatan kesalahan aktual diperlukan untuk memperkuat generalisasi hasil penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Adi, W. T., & Aghastya, A. (2017). Penggunaan Total Station dan AutoCAD Civil 3D untuk perencanaan grading. *Jurnal Perkeretaapian Indonesia (Indonesian Railway Journal)*, 1(2), 149–159. <https://doi.org/10.37367/jpi.v1i2.41>
- Autodesk. (2024). *AutoLISP Developer's Guide for AutoCAD*. Autodesk Documentation.
- Buric, M., Brcic, M., & Skec, S. (2021, December). Towards Automated Drafting in CAD Systems. In *2021 4th International Conference on Electronics and Electrical Engineering Technology* (pp. 233–238). <https://doi.org/10.1145/3508297.3508335>
- Catalucci, S., Thompson, A., Piano, S., Branson III, D. T., & Leach, R. (2022). Optical metrology for digital manufacturing: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120(7), 4271–4290. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09084-5>
- Fernández, A., Díaz-Vilariño, L., & Bianconi, F. (2025, June). AutoCAD automation through Python scripting. In *International conference on The Digital Transformation in the Graphic Engineering* (pp. 3–12). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-032-08108-7_1
- Gao, W., Haitjema, H., Fang, F. Z., Leach, R. K., Cheung, C. F., Savio, E., & Linares, J. M. (2019). On-machine and in-process surface metrology for precision manufacturing. *CIRP Annals*, 68(2), 843–866.
- Ghilani, C. D. (2017). *Adjustment computations: Spatial data analysis* (6th ed.). John Wiley & Sons.
- Kumar, R., Singh, P., & Verma, A. (2022). Automated coordinate data processing for industrial surveying applications using CAD-based systems. *Measurement: Sensors*, 24, 100512.
- Li, S., Zhang, B., Zheng, J., Wang, D., & Liu, Z. (2024). Development of automated 3D LiDAR system for dimensional quality inspection of prefabricated concrete elements. *Sensors*, 24(23), 7486. <https://doi.org/10.3390/s24237486>
- Mejia-Parra, D., Sánchez, J., Ruiz-Salguero, O., Alonso, M., Izaguirre, A., Gil, E., Palomar, J., & Posada, J. (2019). In-line dimensional inspection of warm-die forged revolution workpieces using 3D mesh reconstruction. *Applied Sciences*, 9(6), 1069. <https://doi.org/10.3390/app9061069>
- Nusantara, D. R., & Yuliyanti, E. (2026). Cut and fill volume planning using Total Station and AutoCAD Civil 3D software. *International Journal Multidisciplinary Science*, 5(1). <https://doi.org/10.56127/ijml.v5i1.2677>
- Nyemba, W. R. (2022). *Computer aided design: Engineering design and modeling using AutoCAD*. Springer.
- Papadakis, A., Karadimitriou, K., & Fountas, G. (2025). Implementing CAD API automated processes in engineering design: A case study approach. *Applied Sciences*, 15(14), 7692. <https://doi.org/10.3390/app15147692>
- Rathod, V., Jha, P. K., & Sawai, N. M. (2023). Optical CAD modelling and designing of compound die using the Python scripting language. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 17(2), 981–991. <https://doi.org/10.1007/s12008-022-00922-0>
- Santos, C., Ferreira, J., & Silva, R. (2021). Integration of CAD automation and dimensional inspection in industrial manufacturing processes. *Procedia Manufacturing*, 55, 412–419.
- Sihombing, A., Mulyani, A. S., & Hutabarat, L. E. (2024). Comparative analysis of volume using Total Station and Waterpass in Citra City Sentul housing road project. *Jurnal Pensil: Pendidikan Teknik Sipil*, 14(2). <https://doi.org/10.21009/jpensil.v14i2.54110>
- Suhaeri, S., & Jaqin, C. (2024). Analisis peningkatan kualitas produk Case ECU dengan menggunakan metode DMAIC dan QFD pada industri manufacturing die casting. *JISI: Jurnal Integrasi Sistem Industri*, 11(2), 123–136. <https://doi.org/10.24853/jisi.13.1.123-136>

-
- Vaidis, M., Giguère, P., Pomerleau, F., & Kubelka, V. (2021). Accurate outdoor ground truth based on total stations. *arXiv preprint*.
- Wang, S., & Lan, X. (2012). Data Processing Function About Parameter Drawing Based on AutoLISP. *Journal of Liaoning Petrochemical University*, 32(4), 72–75.
<https://doi.org/10.3696/j.issn.1672-6952.2012.04.019>
- Yang, D., & Zou, J. (2024). Optimization and accuracy analysis of track straightness measurement based on total station free station method. *Scientific Reports*, 14, 100142.
<https://doi.org/10.1038/s41598-026-37100-1>
- Zhang, Y., Liu, H., & Wang, J. (2024). Automated CAD-based geometric inspection for manufacturing quality control using intelligent data processing. *Journal of Manufacturing Systems*, 73, 214–226.