



Pengembangan dan Kalibrasi Alat Bantu Pengukur Rotasi Sambungan Baja Berbasis LVDT

Y Djoko Setiyarto¹

¹Teknik Sipil Universitas Komputer Indonesia
email korespondensi, y.djoko.setiyarto@email.unikom.ac.id

SUBMITTED 5 FEBRUARI 2026 REVISED 18 FEBRUARI 2026 ACCEPTED 25 FEBRUARI 2026

ABSTRACT

Rotation measurement is a key parameter in evaluating the mechanical behavior of steel connections under moment loading. Direct measurement of rotation using conventional sensors such as Linear Variable Differential Transformers (LVDTs) is challenging, as LVDTs are primarily designed to measure translational displacement rather than angular deformation. This study presents the development and calibration of an indirect rotation measurement device based on LVDT displacement conversion using a mechanical wire-roller system. The proposed device converts rotational motion of a horizontal steel member into linear displacement through a steel wire wound around a roller, which is subsequently measured by an LVDT. The calibration was performed within a rotation range of 0°–30° using a 14 mm roller diameter under laboratory-controlled conditions. Calibration was conducted using two approaches: manual rotation measurement with a protractor and controlled loading using a Universal Testing Machine (UTM) equipped with an anglemeter. The results show that calibration performed using UTM loading provides closer agreement with theoretical arc-length calculations, particularly for small rotation angles. The average deviation of the UTM-based calibration relative to theoretical arc-length calculation was $\pm 0.94\%$, with a maximum deviation of 5.8% at small rotations. The regression model yielded $R^2 = 0.99$, indicating excellent linearity. A linear correlation between LVDT displacement and rotation angle was established and adopted as the calibration equation. The proposed measurement system demonstrates adequate accuracy and reliability for experimental investigation of rotational behavior in steel connections.

Keywords: rotation measurement, steel connection, LVDT, calibration, experimental mechanics

ABSTRAK

Pengukuran rotasi merupakan parameter penting dalam evaluasi perilaku mekanis sambungan baja yang bekerja menerima momen. Namun demikian, pengukuran rotasi secara langsung menggunakan *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT) tidak dapat dilakukan secara akurat karena LVDT pada dasarnya hanya mampu mengukur peralihan translasi. Penelitian ini bertujuan mengembangkan dan mengkalibrasi alat bantu pengukur rotasi berbasis LVDT dengan mekanisme konversi rotasi menjadi peralihan linier. Kalibrasi dilakukan dalam rentang rotasi 0° hingga 30° dengan menggunakan diameter *roller* sebesar 14 mm dalam kondisi laboratorium yang terkontrol. Alat bantu menunjukkan prinsip kerja berupa kawat baja yang tergulung pada *roller* akibat rotasi batang horisontal, sehingga menghasilkan peralihan linier yang dapat diukur oleh LVDT. Kalibrasi alat dilakukan melalui dua metode, yaitu kalibrasi manual menggunakan busur derajat dan kalibrasi menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) yang dilengkapi *anglemeter*. Hasil kalibrasi menunjukkan bahwa metode menggunakan UTM memberikan kesesuaian yang lebih baik terhadap pendekatan teoritis panjang busur, terutama pada rotasi kecil. Deviasi rata-rata kalibrasi berbasis UTM terhadap perhitungan teoritis panjang busur adalah $\pm 0,94\%$, dengan deviasi maksimum sebesar 5,8% pada rotasi kecil. Model regresi menghasilkan nilai $R^2 = 0,99$, yang menunjukkan tingkat linearitas yang sangat baik. Hubungan linier antara peralihan hasil pembacaan LVDT dan sudut rotasi berhasil ditetapkan sebagai persamaan kalibrasi. Alat bantu ini dinilai cukup andal dan akurat untuk digunakan dalam pengujian eksperimental perilaku rotasi sambungan baja.

Kata kunci: pengukuran rotasi, sambungan baja, LVDT, kalibrasi, uji eksperimental



1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Rotasi merupakan parameter penting dalam evaluasi perilaku mekanis sambungan baja yang bekerja menerima momen karena secara langsung memengaruhi kekakuan, kapasitas, serta mekanisme deformasi sambungan. Oleh karena itu, pengukuran rotasi yang akurat menjadi aspek fundamental dalam pengujian eksperimental sambungan struktural, khususnya pada kajian hubungan momen–rotasi.

Dalam pengujian laboratorium, *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT) banyak digunakan karena memiliki resolusi tinggi dan kestabilan yang baik dalam mengukur peralihan linier. Namun, LVDT tidak dirancang untuk mengukur deformasi sudut secara langsung. Penggunaan LVDT untuk merepresentasikan rotasi tanpa sistem konversi yang tepat berpotensi menghasilkan ketidakakuratan data, terutama pada tahap awal pembebanan ketika rotasi masih relatif kecil dan sangat menentukan nilai kekakuan awal sambungan.

Pendekatan yang umum dilakukan untuk mengatasi keterbatasan tersebut adalah dengan mengonversi rotasi menjadi peralihan linier melalui mekanisme tertentu, misalnya berdasarkan prinsip panjang busur. Akan tetapi, pada sistem mekanis nyata, pengaruh elastisitas material, gaya pegas, serta detail sambungan dapat menyebabkan perbedaan antara pendekatan teoritis dan hasil pengukuran aktual. Kondisi ini menunjukkan bahwa pengembangan alat bantu pengukur rotasi tidak hanya memerlukan perancangan mekanisme konversi, tetapi juga harus disertai dengan proses kalibrasi yang memadai.

Berdasarkan pertimbangan tersebut, penelitian ini mengembangkan alat bantu pengukur rotasi berbasis LVDT dengan mekanisme kawat–*roller* dan melakukan kalibrasi untuk memperoleh hubungan empiris antara peralihan yang terbaca pada LVDT dan sudut rotasi aktual. Sistem pengukuran yang diusulkan diharapkan dapat memberikan hasil yang andal dan konsisten sehingga dapat digunakan sebagai pendukung pengujian eksperimental perilaku rotasi sambungan baja.

Meskipun berbagai penelitian telah membahas pengukuran rotasi dan pengembangan model momen–rotasi, sebagian besar studi berfokus pada respons struktural tanpa mengkaji secara rinci akurasi sistem konversi rotasi berbasis sensor translasi. Hingga saat ini belum ditemukan pengembangan alat bantu mekanis berbasis LVDT yang disertai evaluasi deviasi kuantitatif terhadap pendekatan teoritis panjang busur serta analisis statistik korelasinya. Oleh karena itu, penelitian ini menawarkan kebaruan dalam bentuk sistem konversi rotasi–translasi yang dikalibrasi secara eksperimental dan divalidasi secara kuantitatif.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan dalam penelitian ini berfokus pada bagaimana merancang alat bantu pengukur rotasi berbasis LVDT yang mampu mengonversi rotasi menjadi peralihan linier secara konsisten, bagaimana hubungan antara peralihan hasil

pembacaan LVDT dengan sudut rotasi aktual yang terjadi pada batang horisontal, serta metode kalibrasi yang paling tepat untuk menghasilkan tingkat akurasi pengukuran rotasi yang baik.

1.3 Batasan Masalah

Pembahasan dalam penelitian ini dibatasi pada pengukuran rotasi batang horisontal akibat pembebanan momen dengan menggunakan alat bantu mekanis berbasis kawat-*roller* dan sensor LVDT. Proses kalibrasi dilakukan secara manual dan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM), sementara kajian tidak mencakup analisis kapasitas atau kekuatan sambungan secara struktural.

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan mengembangkan alat bantu pengukur rotasi berbasis LVDT, menetapkan hubungan antara peralihan LVDT dan sudut rotasi melalui proses kalibrasi, serta mengevaluasi tingkat akurasi pengukuran yang dihasilkan berdasarkan metode kalibrasi yang digunakan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Hingga saat ini, tidak terdapat standar internasional yang secara spesifik mengatur metode tunggal pengukuran rotasi pada sambungan baja. Namun, standar pengujian mekanik seperti ASTM E83 (ASTM International, 2016) dan ISO 9513 (ISO, 2012) secara tegas menyatakan bahwa sensor peralihan linier, termasuk LVDT, hanya valid digunakan untuk mengukur peralihan linier. Oleh karena itu, pengukuran rotasi menggunakan LVDT harus dilakukan melalui mekanisme konversi yang jelas dan dikalibrasi secara eksperimental. Pendekatan ini sejalan dengan praktik pengujian sambungan baja yang direkomendasikan dalam AISI 360 (American Institute of Steel Construction, 2022), di mana rotasi didefinisikan sebagai perubahan sudut relatif antar elemen struktur dan harus dapat dipertanggungjawabkan secara eksperimental.

Model hubungan momen-rotasi banyak digunakan untuk merepresentasikan perilaku sambungan baja semi-kaku, khususnya sambungan baut, dan dikembangkan berdasarkan data rotasi hasil pengujian eksperimental (Kang et al., 2026). Namun demikian, sebagian besar penelitian tersebut berfokus pada formulasi model dan karakteristik kurva momen-rotasi, sementara sistem pengukuran rotasi yang digunakan dalam pengujian sering kali tidak dijelaskan secara rinci. Padahal, akurasi pengukuran rotasi, terutama pada tahap rotasi awal, sangat menentukan evaluasi kekakuan awal dan bentuk kurva momen-rotasi sambungan (McGeown et al., 2021). Ketidakakuratan pengukuran rotasi berpotensi menghasilkan interpretasi perilaku sambungan yang bias. Oleh karena itu, pengembangan dan kalibrasi sistem pengukuran rotasi yang andal menjadi aspek fundamental untuk menjamin validitas data eksperimen yang digunakan dalam pengembangan model momen-rotasi sambungan baja semi-kaku.

Penelitian (Kromanis et al., 2019) memperkenalkan pendekatan pengukuran deformasi dan rotasi struktur secara tidak langsung dengan memanfaatkan sensor

internal *smartphone*, seperti kamera dan *gyroscope*. Studi tersebut menunjukkan bahwa rotasi struktur dapat direpresentasikan melalui perubahan citra atau sinyal sudut digital, dengan tingkat akurasi yang memadai setelah dilakukan kalibrasi terhadap sistem referensi, sehingga menegaskan bahwa pengukuran rotasi tidak selalu harus dilakukan menggunakan sensor sudut konvensional secara langsung. Pendekatan tersebut relevan dengan penelitian ini karena keduanya mengusung konsep pengukuran rotasi tidak langsung melalui konversi besaran fisik, di mana rotasi tidak diukur secara langsung, melainkan diturunkan dari parameter lain yang lebih mudah direkam. Jika (Kromanis et al., 2019) mengonversi rotasi menjadi informasi citra atau sinyal digital, maka penelitian ini mengonversi rotasi batang horisontal menjadi peralihan linier melalui mekanisme kawat-*roller* yang diukur menggunakan LVDT. Dibandingkan metode berbasis *smartphone* yang sensitif terhadap noise sensor dan kondisi lingkungan, sistem mekanis berbasis LVDT yang dikembangkan dalam penelitian ini menawarkan stabilitas dan presisi yang lebih tinggi, khususnya untuk pengukuran rotasi kecil pada pengujian sambungan baja di laboratorium.

Perilaku sambungan pada struktur baja *cold-formed* sangat dipengaruhi oleh fleksibilitas elemen tipis, sehingga evaluasi kinerja sambungan tidak dapat dibatasi hanya pada kapasitas kekuatan, tetapi harus mencakup karakteristik deformasi, khususnya rotasi sambungan. Rotasi merupakan parameter kunci dalam menggambarkan respons aktual sambungan baja *cold-formed* yang bekerja menerima momen (Yu et al., 2019). Namun demikian, sensor yang umum digunakan dalam pengujian struktur, seperti *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT), hanya mampu mengukur peralihan translasi dan tidak dirancang untuk mengukur rotasi secara langsung. Keterbatasan ini menuntut adanya sistem pengukuran tidak langsung yang mampu mengonversi rotasi sambungan menjadi peralihan linier yang terukur, sehingga pengembangan alat bantu pengukur rotasi berbasis LVDT dalam penelitian ini menjadi relevan dan esensial untuk mendukung evaluasi deformasi sambungan secara eksperimental sesuai dengan tuntutan teoritis yang dikemukakan.

Respons rotasi sambungan merupakan parameter utama dalam evaluasi kekakuan, degradasi, dan disipasi energi sambungan baut baja *cold-formed* (Budziński & Ślęczka, 2023). Akurasi pengukuran rotasi, khususnya pada rotasi kecil dan selama siklus pembebanan berulang, menjadi faktor kritis dalam pembentukan kurva momen-rotasi. Oleh karena itu, alat bantu pengukur rotasi berbasis LVDT yang dikembangkan dan dikalibrasi dalam artikel ini relevan sebagai instrumen pendukung untuk meningkatkan reliabilitas data eksperimental pada pengujian sambungan momen serupa.

Kekakuan rotasi sambungan tidak bersifat isotropik, melainkan sangat dipengaruhi oleh arah rotasi serta konfigurasi kontak mekanis pada komponen sambungan (Chung & Won, 2023). Hasil uji eksperimental memperlihatkan perbedaan signifikan nilai kekakuan awal dan kapasitas rotasi ultimit antara arah rotasi searah dan berlawanan dengan mekanisme penguncian sambungan, yang mengindikasikan adanya kontribusi friksi, deformasi lokal, serta redistribusi

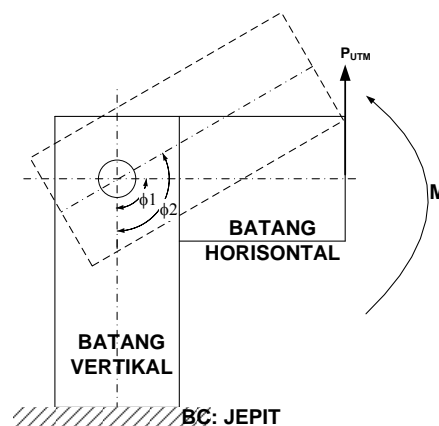
tegangan pada elemen sambungan. Penelitian ini menegaskan bahwa karakterisasi hubungan momen–rotasi harus didasarkan pada pengukuran rotasi yang presisi dan sensitif terhadap perubahan kecil deformasi sudut. Oleh karena itu, penggunaan alat bantu pengukur rotasi berbasis sensor seperti LVDT atau sistem kalibrasi sudut menjadi krusial untuk memperoleh kurva perilaku rotasi yang representatif, sekaligus memperkuat validitas metodologi pengukuran dalam penelitian sambungan struktural, termasuk pada studi sambungan baja *cold-formed* yang dikembangkan dalam artikel ini.

Rotasi merupakan parameter kunci dalam evaluasi perilaku sambungan balok–kolom baja *cold-formed*, khususnya dalam merepresentasikan kekakuan awal dan transisi nonlinier sambungan (Ummi et al., 2018). Pengukuran rotasi tidak dapat dilakukan secara akurat dengan sensor translasi konvensional seperti LVDT tanpa mekanisme konversi yang memadai. Oleh karena itu, pendekatan pengukuran tidak langsung melalui konversi rotasi menjadi peralihan linier yang terkalibrasi menjadi kebutuhan metodologis. Pendekatan ini memungkinkan perolehan kurva momen–rotasi yang stabil dan konsisten sejak tahap awal pembebanan, serta menjamin keterbandingan hasil eksperimen dengan penelitian sambungan baja *cold-formed* sebelumnya.

3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Konsep Pengukuran Rotasi

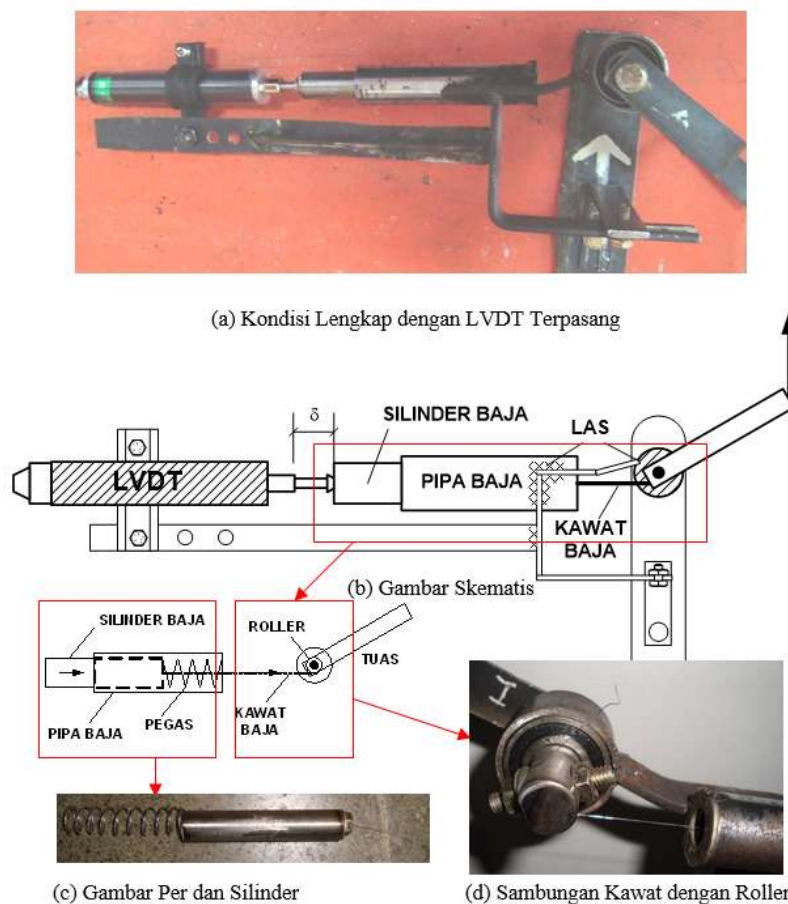
Rotasi didefinisikan sebagai perubahan sudut antara batang vertikal dan batang horisontal akibat pembebanan momen. Pada kondisi awal, sudut antara kedua batang adalah 90° . Pemberian beban menyebabkan batang horisontal berputar sehingga menghasilkan perubahan sudut yang diukur sebagai rotasi. Pengukuran rotasi pada spesimen dilakukan untuk mengetahui perubahan sudut yang dibentuk antara batang horisontal dengan batang vertikal, ketika momen (M) yang diaplikasikan pada spesimen bekerja seperti pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Pengukuran Rotasi pada Spesimen

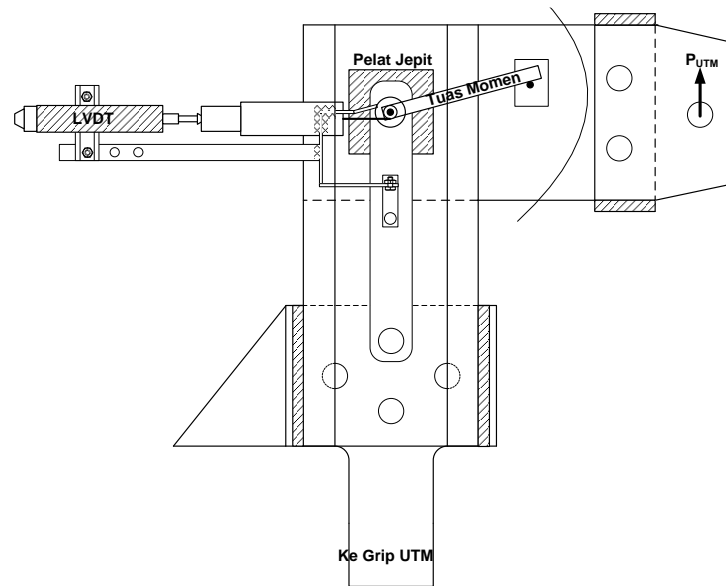
3.2 Rancang Bangun Alat Bantu

Alat bantu pengukur rotasi terdiri atas kawat baja berdiameter kecil, *roller* baja, silinder baja, pegas, pipa baja, dan sensor LVDT, yang terhubung secara kuat pada tuas vertikal dan tuas horisontal seperti pada Gambar 3.2. Secara detail, Gambar 3.2a merupakan kondisi nyata alat bantu yang nantinya akan dipasang pada spesimen sambungan momen yang terdiri dari batang baja vertikal dan horisontal seperti pada Gambar 3.3, sedemikian hingga tuas vertikal melekat pada spesimen batang baja vertikal dan tuas horisontal melekat pada spesimen baja horisontal.



Gambar 3.2 Silinder Baja dan *Roller* sebagai Sensor Rotasi

Gambar 3.2 b merupakan gambar rencana skematis alat bantu pengukur rotasi tersebut. Mekanisme pengukurannya adalah saat batang baja horisontal dari spesimen bergerak akibat gaya ke atas, maka tuas horisontal dari alat bantu pengukur rotasi akan ikut bergerak ke atas sedemikian hingga menarik dan menggulung kawat baja. Hal tersebut terjadi karena kawat baja dihubungkan ke batang horisontal dan dililitkan pada *roller* seperti pada Gambar 3.2 d. Ketika spesimen berotasi, *roller* menggulung kawat baja dan menarik silinder baja secara linier. Pergerakan linier dari silinder baja terjadi secara perlahan karena tertahan oleh pegas seperti yang terlihat pada Gambar 3.2 c. Besarnya peralihan silinder baja sebesar δ yang diakibatkan tarikan dari kawat baja akan terukur oleh LVDT.



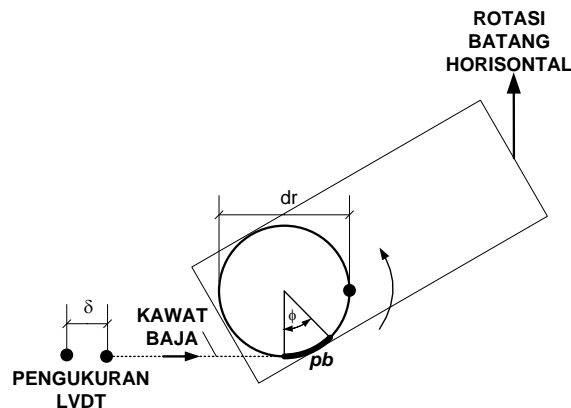
Gambar 3.3 Alat Bantu Pengukur Rotasi dengan Menggunakan LVDT

3.3 Penentuan Korelasi Antara Rotasi dan Translasi LVDT

Secara matematika sederhana, untuk mengetahui besarnya sudut atau rotasi yang diukur oleh alat bantu beserta LVDT tersebut dapat dinyatakan dengan rumus panjang busur (p_b) seperti pada Persamaan 3.1, yaitu:

$$\text{panjang busur } (p_b) = \frac{\text{rotasi } (\phi)}{360^0} \times \pi \times \text{diameter roller } (d_r) \quad (3.1)$$

Sebagai ilustrasi pada Gambar 3.4, jika menggunakan diameter *roller* sebesar 14 mm, maka rotasi batang horizontal sebesar 10° akan menghasilkan panjang busur (p_b) sebesar 1.22 mm. Dengan perkataan lain, akibat rotasi batang horizontal sebesar 10° akan menyebabkan *roller* menggulung kawat baja sepanjang 1.22 mm, yang sekaligus menyebabkan adanya translasi horizontal (δ) dari silinder baja sebesar 1.22 mm juga.



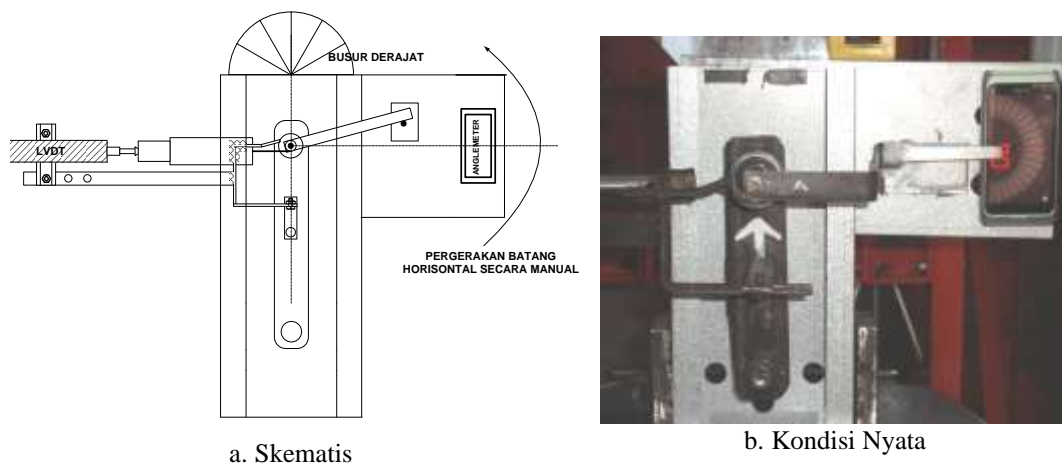
Gambar 3.4 Korelasi antara Pengukuran LVDT (δ) dengan Rotasi Terukur

Adanya pengaruh gaya pegas, cara penyambungan kawat ke *roller*, dan sifat elastisitas dari kawat baja yang cukup tipis, berpotensi menyebabkan terjadinya perbedaan antara hasil pengukuran LVDT dengan rumus panjang busur, sehingga untuk mengetahui korelasi antara besar rotasi dengan data hasil pengukuran LVDT (δ), perlu dilakukan kalibrasi.

3.4 Metode Kalibrasi

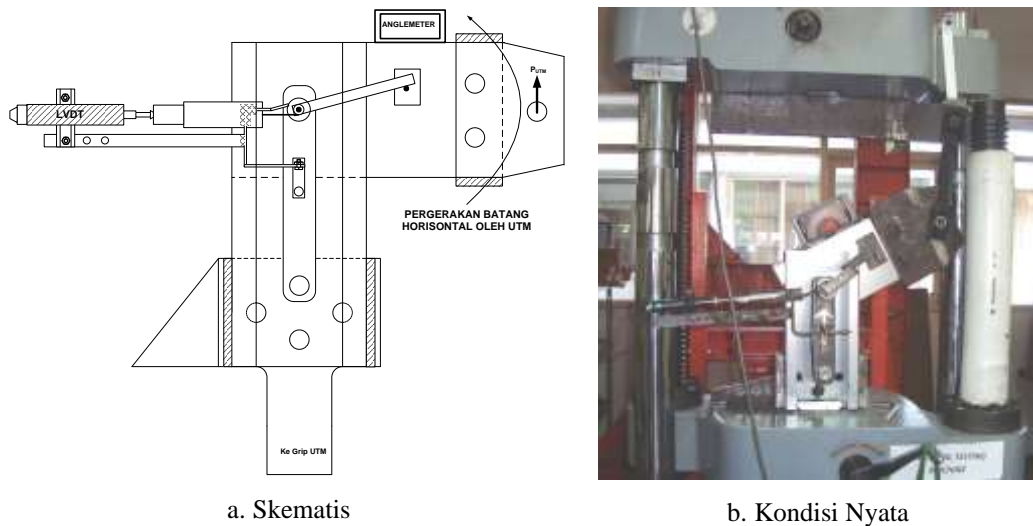
Kalibrasi dilakukan dengan 2 cara, yaitu cara yang pertama adalah secara manual dengan menggerakkan batang baja horisontal tanpa bantuan sistem pembebanan, dan cara yang kedua adalah secara otomatis menggunakan pergerakan *Universal Testing Machine* (UTM). Data yang diperoleh dari kalibrasi ini adalah rotasi dan peralihan LVDT.

Kalibrasi secara manual dapat dimungkinkan karena spesimen tidak tersambung secara kaku, melainkan hanya tersambung oleh baut pada pusat rotasi. Kalibrasi manual dilakukan dengan menggunakan bantuan busur derajat dan *anglemeter* seperti pada Gambar 3.5. Spesimen batang horisontal diputar secara perlahan, secara manual dengan tangan sedemikian hingga diperoleh data sudut perputaran yang menyesuaikan rotasi spesimen berdasarkan *anglemeter* dan busur derajat. Perputaran ini sekaligus berdampak terhadap pengukuran peralihan dari LVDT.



Gambar 3.5 Kalibrasi Manual (Busur Derajat dan *Anglemeter*)

Pada cara yang kedua, perubahan rotasi yang diakibatkan perputaran spesimen batang horisontal oleh UTM, dimana besarnya rotasi yang diukur berdasarkan *anglemeter*. Perputaran ini juga berdampak terhadap pengukuran peralihan dari LVDT. Secara skematis, kalibrasi dengan UTM dapat dilihat pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Kalibrasi UTM (*Anglemeter*)

Studi eksperimental pada sambungan balok–kolom baja *cold-formed* (Maali et al., 2022) menunjukkan bahwa evaluasi kapasitas rotasi sangat bergantung pada akurasi sistem pengukuran rotasi yang digunakan. Pengukuran yang tidak terkalibrasi dengan baik dapat menyebabkan ketidakpastian pada penentuan kekakuan awal dan kapasitas rotasi sambungan. Oleh karena itu, penggunaan sistem pengukuran rotasi tidak langsung berbasis konversi peralihan linier yang dikalibrasi, sebagaimana diterapkan dalam penelitian ini, merupakan pendekatan metodologis yang tepat dan sejalan dengan penelitian terdahulu pada sambungan baja *cold-formed*.

3.5 Analisis Statistik Kalibrasi

Evaluasi tingkat akurasi sistem kalibrasi dilakukan melalui analisis statistik terhadap selisih antara hasil pengukuran LVDT dan nilai referensi teoritis yang dihitung berdasarkan pendekatan panjang busur. Parameter statistik yang digunakan meliputi *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE), *Root Mean Square Error* (RMSE), dan simpangan baku *error* (*standard deviation of error*). Ketiga parameter ini dipilih karena mampu merepresentasikan kesalahan relatif, kesalahan absolut, serta konsistensi distribusi error secara komprehensif.

Mean Absolute Percentage Error (MAPE) menyatakan rata-rata kesalahan relatif dalam satuan persen terhadap nilai referensi (Chai & Draxler, 2014). Secara matematis, MAPE dirumuskan seperti Persamaan 3.2 berikut :

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Y_i - Y_{ref,i}}{Y_{ref,i}} \right| \times 100\% \quad (3.2)$$

dengan keterangan:

- n = jumlah data pengamatan,
- Y_i = nilai hasil pengukuran atau hasil kalibrasi ke-i,
- $Y_{ref,i}$ = nilai referensi teoritis (panjang busur) ke-i,
- $|\cdot|$ = nilai absolut.

Nilai MAPE yang semakin kecil menunjukkan tingkat deviasi relatif yang semakin

rendah terhadap model teoritis.

Root Mean Square Error (RMSE) digunakan untuk mengukur besarnya kesalahan absolut rata-rata dalam satuan asli pengukuran (mm). Parameter ini memberikan bobot lebih besar terhadap *error* yang bernilai tinggi karena menggunakan kuadrat selisih. RMSE dinyatakan sebagai Persamaan 3.3 dengan notasi yang sama seperti pada persamaan sebelumnya (Chai & Draxler, 2014).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - Y_{ref,i})^2} \quad (3.3)$$

Nilai RMSE yang kecil mengindikasikan bahwa hasil pengukuran mendekati nilai referensi secara absolut.

Simpangan baku *error* pada Persamaan 3.4 digunakan untuk menggambarkan tingkat penyebaran error terhadap nilai rata-ratanya. Error setiap pengamatan didefinisikan sebagai:

$$e_i = Y_i - Y_{ref,i} \quad (3.4)$$

Simpangan baku *error* (Montgomery et al., 2021) dihitung menggunakan Persamaan 3.5 berikut:

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2} \quad (3.5)$$

di mana:

e_i = *error* pengamatan ke- i ,

\bar{e} = rata-rata *error*,

n = jumlah data.

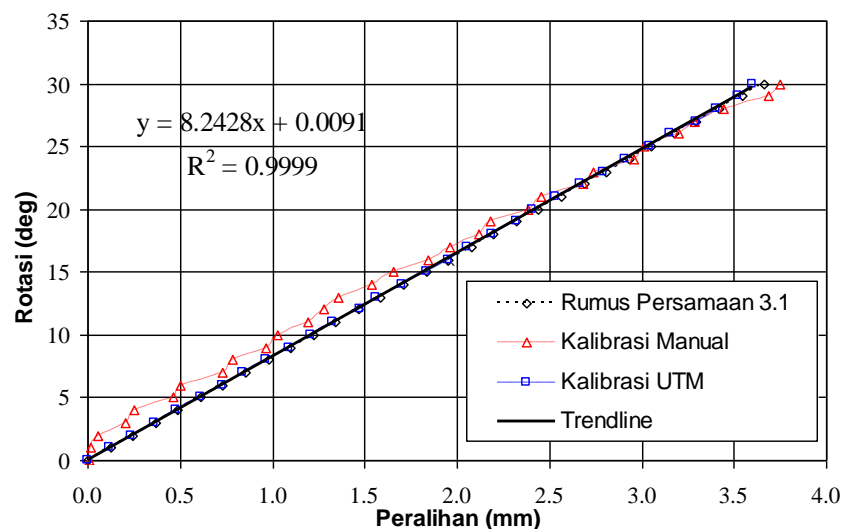
Nilai simpangan baku yang kecil menunjukkan konsistensi sistem pengukuran yang tinggi serta variasi *error* yang rendah. Kombinasi ketiga parameter tersebut memberikan dasar kuantitatif yang kuat dalam menilai akurasi dan stabilitas sistem kalibrasi yang dikembangkan.

4. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Hasil kalibrasi alat bantu pengukur rotasi dapat dilihat pada Tabel 4.1. Tabel tersebut memperlihatkan korelasi antara rotasi (dalam satuan derajat) dengan panjang kawat yang tergulung *roller* (dalam satuan mm). Besarnya rotasi yang dinyatakan oleh anglemeter tercatat pada kolom 1 dari Tabel 4.1. Panjang kawat yang tergulung dapat dihitung dengan menggunakan rumus panjang busur sesuai persamaan 3.1, yang hasilnya tercatat pada kolom 2 dari Tabel 4.1. Besarnya peralihan yang terukur oleh LVDT akibat kalibrasi manual tercatat pada kolom 3, dan akibat kalibrasi UTM tercatat pada kolom 5. Sedangkan perbedaan yang ditimbulkan antara rumus panjang busur dengan kalibrasi manual dan kalibrasi UTM dapat dilihat pada kolom 4 dan kolom 6.

Panjang kawat tergulung *roller* yang dihitung dengan rumus panjang busur bila dibandingkan dengan hasil bacaan LVDT, terlihat adanya perbedaan. Perbedaan yang paling kecil dihasilkan kalibrasi dengan menggunakan UTM (kolom 6). Perbedaan yang dihasilkan terlihat signifikan terutama terjadi pada kalibrasi manual (kolom 5), pada saat batang horisontal mengalami rotasi awal ($< 10^\circ$). Hasil kalibrasi pada tabel tersebut bila disajikan dalam bentuk kurva akan terlihat seperti pada Gambar 4.1. Karena kalibrasi dengan UTM memiliki perbedaan yang relatif kecil dengan persamaan 3.1, maka data tersebut dipilih untuk dibuat kurva *trendline* dengan memanfaatkan fasilitas di MS.EXCEL. Hasil kurva *trendline* tersebut menghasilkan persamaan: $y = 8.2428x + 0.0091$ yang menyatakan hubungan antara hasil bacaan LVDT (X dalam mm) dengan rotasi (Y dalam degree). Persamaan kalibrasi yang diperoleh pada penelitian ini memberikan dasar kuantitatif untuk pengukuran rotasi berbasis LVDT. Persamaan ini juga berlaku untuk konfigurasi geometrik dan karakteristik mekanis alat bantu yang digunakan dalam penelitian ini. Dengan karakteristik hubungan linier yang stabil, persamaan tersebut berpotensi digunakan pada penelitian lain yang mengkaji perilaku momen–rotasi sambungan baja (Savero Devtrina & Setiyarto, 2020; Setiyarto, 2012, 2018).

Analisis statistik tambahan dilakukan untuk mengevaluasi akurasi model kalibrasi berdasarkan Persamaan 3.2 hingga Persamaan 3.5. Nilai koefisien determinasi ($R^2 = 0.99$) menunjukkan hubungan linier yang sangat kuat antara peralihan LVDT dan rotasi terukur. Nilai rata-rata deviasi absolut (*Mean Absolute Percentage Error*, MAPE) untuk kalibrasi UTM adalah $\pm 0.94\%$, dengan simpangan baku 0.78% . Nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) sebesar 0.041 mm menunjukkan kesalahan prediksi yang sangat kecil. Uji signifikansi regresi menunjukkan bahwa koefisien slope signifikan secara statistik ($p < 0.001$). Hasil ini memperlihatkan bahwa model kalibrasi yang diperoleh memiliki reliabilitas tinggi untuk rentang rotasi yang diuji.



Gambar 4.1 Korelasi Peralihan Keluaran LVDT dengan Rotasi Terukur

Pada penelitian sambungan baja skala besar (Simões da Silva et al., 2023) karakteristik kekakuan awal dan transisi menuju perilaku nonlinier sangat dipengaruhi oleh akurasi pengukuran rotasi pada tahap awal pembebanan. Tanpa adanya persamaan kalibrasi yang tervalidasi, penggunaan LVDT secara langsung berpotensi menghasilkan ketidakakuratan pada rotasi kecil, yang pada akhirnya dapat memengaruhi interpretasi kekakuan awal dan karakter semi-rigid sambungan. Dengan menerapkan persamaan kalibrasi yang diperoleh dalam penelitian ini, data peralihan linier dari LVDT tidak lagi ditafsirkan sebagai pendekatan geometris sederhana, melainkan sebagai hasil konversi empiris yang telah mempertimbangkan respons sistem mekanis pengukuran.

Tabel 4.1 Hasil Kalibrasi Alat Bantu Pengukur Rotasi

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Rotasi (°)	Panjang Busur (mm)	Kalibrasi 1 (Manual)		Kalibrasi 2 (UTM)	
		(mm)	Beda (%)	(mm)	Beda (%)
0	0.000	0.000		0.000	
1	0.122	0.016	86.9	0.115	5.8
2	0.244	0.056	77.1	0.239	2.1
3	0.366	0.200	45.4	0.362	1.2
4	0.488	0.248	49.2	0.482	1.3
5	0.611	0.464	24.0	0.608	0.4
6	0.733	0.504	31.2	0.732	0.1
7	0.855	0.728	14.8	0.840	1.7
8	0.977	0.782	19.9	0.968	0.9
9	1.099	0.968	11.9	1.089	0.9
10	1.221	1.024	16.1	1.208	1.1
11	1.343	1.192	11.3	1.325	1.4
12	1.465	1.280	12.6	1.472	-0.5
13	1.587	1.355	14.6	1.564	1.5
14	1.710	1.536	10.2	1.704	0.3
15	1.832	1.656	9.6	1.832	0.0
16	1.954	1.840	5.8	1.952	0.1
17	2.076	1.960	5.6	2.056	1.0
18	2.198	2.120	3.5	2.188	0.5
19	2.320	2.184	5.9	2.320	0.0
20	2.442	2.384	2.4	2.411	1.3
21	2.564	2.456	4.2	2.532	1.3
22	2.686	2.680	0.2	2.669	0.6
23	2.809	2.736	2.6	2.791	0.6
24	2.931	2.954	-0.8	2.911	0.7
25	3.053	3.008	1.5	3.041	0.4
26	3.175	3.200	-0.8	3.152	0.7
27	3.297	3.288	0.3	3.291	0.2
28	3.419	3.440	-0.6	3.401	0.5
29	3.541	3.688	-4.1	3.523	0.5
30	3.663	3.752	-2.4	3.601	1.7

Hasil pengujian menunjukkan bahwa perbedaan antara rotasi teoritis yang dihitung berdasarkan pendekatan panjang busur dan rotasi yang diperoleh dari

pembacaan LVDT cukup signifikan, khususnya pada rentang rotasi kecil. Fenomena ini sejalan dengan temuan dalam kajian teknik pengukuran peralihan struktur (Ma et al., 2023), yang menyatakan bahwa sistem pengukuran tidak langsung berbasis LVDT sangat dipengaruhi oleh karakteristik mekanis elemen konversi, seperti elastisitas kawat, gaya pegas, serta gesekan pada *roller*. Faktor-faktor tersebut menyebabkan respons sistem aktual menyimpang dari asumsi geometri ideal, terutama pada tahap awal pergerakan.

Perbandingan hasil kalibrasi menunjukkan bahwa metode kalibrasi menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) yang dilengkapi anglemeter memberikan tingkat kesesuaian yang lebih baik terhadap pendekatan teoritis dibandingkan kalibrasi manual. Hal ini mengindikasikan bahwa proses pembebanan yang terkontrol dan seragam mampu meminimalkan ketidakpastian pengukuran yang umumnya muncul akibat pengaruh gaya luar dan ketidakkonsistenan pergerakan pada kalibrasi manual. Temuan ini konsisten dengan rekomendasi dalam literatur, yang menekankan pentingnya kalibrasi berbasis sistem pembebanan terkontrol untuk sistem pengukuran rotasi tidak langsung.

Hubungan linier antara peralihan hasil pembacaan LVDT dan rotasi yang terukur, yang dinyatakan melalui persamaan kalibrasi empiris, menunjukkan bahwa meskipun LVDT tidak dirancang untuk mengukur rotasi secara langsung, kombinasi antara mekanisme konversi mekanis dan prosedur kalibrasi yang tepat mampu menghasilkan sistem pengukuran rotasi yang andal. Dengan demikian, alat bantu pengukur rotasi yang dikembangkan dalam penelitian ini dapat diposisikan sebagai solusi praktis dan aplikatif untuk mendukung pengujian eksperimental perilaku rotasi sambungan baja, khususnya pada kondisi rotasi kecil hingga menengah.

Kecenderungan linier pada hasil kalibrasi alat bantu pengukur rotasi yang diperoleh dalam penelitian ini selaras juga dengan kebutuhan eksperimental yang dilaporkan pada studi sambungan balok-balok menggunakan *compressed wood connectors* (Mehra et al., 2021), di mana akurasi pembacaan rotasi kecil berpengaruh langsung terhadap bentuk kurva momen-rotasi dan estimasi kekakuan sambungan. Dengan demikian, alat bantu yang dikembangkan tidak hanya relevan untuk sambungan baja, tetapi juga dapat mendukung studi eksperimental lintas material yang memerlukan karakterisasi momen-rotasi secara presisi.

5.KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan seluruh tahapan pengembangan, pengujian, dan kalibrasi yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa pengukuran rotasi sambungan baja menggunakan LVDT tidak dapat dilakukan secara langsung tanpa adanya mekanisme konversi, karena LVDT pada prinsipnya hanya mampu merekam peralihan linier dengan ketelitian tinggi. Alat bantu pengukur rotasi yang dikembangkan dalam penelitian ini, berbasis mekanisme kawat-*roller* dan pegas, terbukti mampu mengonversi perputaran batang horisontal menjadi peralihan linier

yang sebanding dan dapat diukur secara akurat oleh LVDT. Hasil analisis menunjukkan bahwa perbedaan antara pendekatan teoritis panjang busur dan hasil pengukuran aktual tidak dapat dihindari akibat pengaruh elastisitas kawat baja, gaya pegas, serta detail mekanis sistem. Namun demikian, melalui proses kalibrasi yang sistematis, khususnya menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) yang dilengkapi anglemeter, hubungan antara peralihan LVDT dan sudut rotasi dapat ditentukan dengan tingkat kesesuaian yang baik. Persamaan kalibrasi linier yang diperoleh mampu merepresentasikan perilaku sistem pengukuran secara konsisten dalam rentang rotasi yang diuji, sehingga alat bantu ini dinilai andal dan layak digunakan untuk mendukung pengujian eksperimental perilaku rotasi sambungan baja, termasuk dalam evaluasi hubungan momen–rotasi dan kekakuan sambungan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kalibrasi menggunakan UTM menghasilkan deviasi rata-rata $\pm 0.94\%$ terhadap pendekatan teoritis panjang busur, dengan deviasi maksimum 5.8% pada rotasi kecil dan koefisien determinasi $R^2 = 0.99$. Nilai ini secara signifikan lebih baik dibandingkan kalibrasi manual yang menghasilkan deviasi hingga 86.9% pada rotasi awal. Persamaan kalibrasi $y = 8.2428x + 0.0091$ terbukti stabil dalam rentang 0° hingga 30° dan mampu merepresentasikan karakteristik sistem mekanis aktual. Kebaruan penelitian ini terletak pada pengembangan sistem konversi rotasi–translasi berbasis LVDT yang divalidasi secara kuantitatif dan statistik, sehingga dapat digunakan sebagai metode alternatif yang andal untuk pengujian momen–rotasi sambungan baja skala laboratorium.

Sebagai saran, untuk aplikasi pada pengujian siklik, sistem pengukuran rotasi ini perlu diuji lebih lanjut terhadap fenomena *cyclic degradation* dan *mechanical hysteresis* yang dapat timbul akibat gesekan *roller*, kelonggaran sambungan kawat, serta karakteristik nonlinier pegas. Pada pembebanan berulang, potensi slip mikro pada kawat dan perubahan tegangan awal (*initial tension loss*) dapat menyebabkan akumulasi deviasi pembacaan rotasi, terutama pada siklus dengan amplitudo kecil yang menentukan kekakuan awal dan disipasi energi. Selain itu, kalibrasi disarankan dilakukan secara berkala setiap kali alat digunakan pada konfigurasi spesimen atau kondisi pembebanan yang berbeda, guna memastikan keandalan data yang dihasilkan. Penggunaan satuan rotasi dalam radian dan integrasi langsung dengan sistem akuisisi data digital juga dapat dipertimbangkan untuk mempermudah analisis lanjutan, terutama pada penelitian sambungan semi-kaku dan studi perilaku nonlinier. Dengan pengembangan tersebut, alat bantu pengukur rotasi ini diharapkan dapat diaplikasikan secara lebih luas pada berbagai jenis pengujian eksperimental struktur baja di laboratorium.

DAFTAR PUSTAKA

- American Institute of Steel Construction. (2022). *AISC 360-22: Specification for structural steel buildings*. American Institute of Steel Construction.
- ASTM International. (2016). *ASTM E83-16: Standard practice for verification and classification of extensometer systems*. ASTM International.
- Budziński, R., & Ślęczka, L. (2023). Experimental investigations of steel cold-

- formed moment-resisting bolted lap joints under monotonic and cyclic loading. *Archives of Civil Engineering*, 69(4), 359–377. <https://doi.org/10.24425/ace.2023.147664>
- Chai, T., & Draxler, R. R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? -Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific Model Development*, 7(3), 1247–1250. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>
- Chung, D. H., & Won, J. H. (2023). Experimental Study on the Rotational Stiffness of Pocket Type Scaffolding Connection According to the Rotation Direction. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/app13095500>
- ISO. (2012). *ISO 9513:2012 Metallic materials — Calibration of extensometer systems used in uniaxial testing*.
- Kang, M., Hou, S., Cai, J., & Zhang, L. (2026). A Moment-Rotation Model of Semi-Rigid Steel Structure Joints with Bolted Connection. *Buildings*, 16(1), 182. <https://doi.org/10.3390/buildings16010182>
- Kromanis, R., Xu, Y., Lydon, D., Martinez del Rincon, J., & Al-Habaibeh, A. (2019). Measuring structural deformations in the laboratory environment using smartphones. *Frontiers in Built Environment*, 5. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2019.00044>
- Ma, Z., Choi, J., & Sohn, H. (2023). Structural displacement sensing techniques for civil infrastructure: A review. *Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience*, 2(3). <https://doi.org/10.1016/j.iintel.2023.100041>
- Maali, M., Sağıroğlu, M., Kılıç, M., & Aydın, A. C. (2022). Experimental study on the rotation capacity of bolted and welded beam-column connection using cold-formed steel sections. *Challenge Journal of Structural Mechanics*, 8(4), 133. <https://doi.org/10.20528/cjsmec.2022.04.001>
- McGeown, C., Huseynov, F., Hester, D., McGetrick, P., O'Brien, E. J., & Pakrashi, V. (2021). Using measured rotation on a beam to detect changes in its structural condition. *Journal of Structural Integrity and Maintenance*, 6(3), 159–166. <https://doi.org/10.1080/24705314.2021.1906092>
- Mehra, S., O'Ceallaigh, C., Sotayo, A., Guan, Z., & Harte, A. M. (2021). Experimental characterisation of the moment-rotation behaviour of beam-beam connections using compressed wood connectors. *Engineering Structures*, 247, 113132. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2021.113132>
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2021). *Intruduction to Linier Regression Analysis* (6th ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Savero Devtrina, F., & Setiyarto, Y. D. (2020). Studi eksperimental penggunaan sekrup tipe self drilling screw pada sambungan baja ringan (cold formed steel). *CRANE: Civil Engineering Research Journal*, 1(1).
- Setiyarto, Y. D. (2012). Perilaku Sambungan Sekrup (Self Drilling Screw) Pada Sambungan Momen Sebidang Untuk Struktur Baja Ringan. *Jurnal Teknik Sipil*, 8(1), 17–32.
- Setiyarto, Y. D. (2018). Use of grooved clamping plate to increase strength of bolted moment connection on cold formed steel structures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 407(1).



<https://doi.org/10.1088/1757-899X/407/1/012082>

- Simões da Silva, L., Craveiro, H., Conde, J., Simões, R., Martins, C., Catinaccio, A., Mladenov, D., Lopes, J. B., Feito, D. A., & Bault, C. (2023). Experimental behaviour of large-size beam-to-column steel joints for the DUNE Neutrino Experiment. *Thin-Walled Structures*, 191. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.110996>
- Umami, R., Nadya, K., & Usman, F. (2018). An Experimental Analysis on the Moment Rotation of Beam-Column Connection using Cold-form Steel Section. *International Journal of Engineering & Technology*, 668–673. www.sciencepubco.com/index.php/IJET
- Yu, W.-W., La Boubé, R. A., & Chen, H. (2019). *Cold-formed steel design* (5th ed.). John Wiley & Sons.