



Analisis Performa Sensor Beban (Load Cell) pada Mesin Prototipe Uji Puntir Berbasis Arduino

Krisna Agung Prasodjo*, Tatang Suryana
Universitas Pamulang, Indonesia
Email: krisnaagungprasodjo57@gmail.com*

Keywords:

load cell, arduino uno, hx711, torsion testing machine, torsional moment

Abstract

This study analyzes load cell sensor performance on an Arduino-based torsion testing prototype in measuring torsional force on various material types. Microcontroller-based material testing systems are growing due to ease of use, cost efficiency, and real-time processing, but research evaluating load cell performance in torsion testing versus standard instruments remains limited. This study used an experimental method with direct testing on three specimens—ST-41 Steel, SUS-304 Stainless Steel, and brass—each 5 mm in diameter. The testing system consisted of a 350 kg capacity load cell sensor integrated with an Arduino Uno and HX711 signal amplifier module, calibrated beforehand to ensure accuracy. Each specimen was tested three times with a maximum load of 750 N. Data were analyzed by torque, torsion angle, and sensor reading accuracy, compared with theoretical calculations and standard instrument data. Results show the load cell sensor performed well with stable readings throughout testing. Average torque values were 6.60 N·m for ST-41 Steel, 9.01 N·m for SUS-304 Stainless Steel, and 4.76 N·m for brass. Sensor readings showed similarity to standard instrument data of 81.82% for ST-41 Steel, 96.67% for SUS-304 Stainless Steel, and 88.15% for brass. Differences between actual measurements and theoretical calculations were influenced by mechanical friction, material characteristics, frame stiffness, and sensor calibration. The load cell sensor integrated with Arduino Uno and HX711 proved to perform well, provide representative results, and is feasible as a digital measurement system in laboratory-scale torsion prototypes. The practical implication is an economical, accurate alternative for practicum activities and material testing research.

Kata Kunci:

load cell, arduino uno, hx711, mesin uji puntir, momen puntir.

Abstrak

Penelitian ini bertujuan menganalisis performa sensor beban (load cell) pada mesin prototipe uji puntir berbasis Arduino dalam mengukur gaya puntir pada berbagai jenis material. Sistem mikrokontroler untuk pengujian material berkembang karena menawarkan kemudahan, efisiensi biaya, dan pengolahan data real-time, namun penelitian mengevaluasi performa load cell pada uji puntir dibandingkan alat standar masih terbatas. Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan pengujian langsung pada tiga spesimen, yaitu Baja ST-41, Stainless Steel SUS-304, dan kuningan, masing-masing berdiameter 5 mm. Sistem pengujian terdiri atas sensor load cell berkapasitas 350 kg terintegrasi Arduino Uno dan modul penguat sinyal HX711, dikalibrasi sebelum pengujian untuk memastikan keakuratan pengukuran. Setiap spesimen diuji tiga kali dengan pembebanan maksimum 750 N. Data dianalisis berdasarkan momen puntir, sudut puntir, dan akurasi pembacaan sensor, dibandingkan dengan perhitungan teoritis dan data alat uji standar. Hasil menunjukkan sensor load cell bekerja baik dengan pembacaan stabil sepanjang pengujian. Nilai rata-rata momen puntir pada Baja ST-41 sebesar 6,60 N·m, Stainless Steel SUS-304 sebesar 9,01 N·m, dan kuningan sebesar 4,76 N·m. Pembacaan

sensor memiliki tingkat kemiripan terhadap data alat uji standar sebesar 81,82% pada Baja ST-41, 96,67% pada Stainless Steel SUS-304, dan 88,15% pada kuningan. Perbedaan pengukuran aktual dan perhitungan teoritis dipengaruhi kondisi pengujian seperti gesekan mekanis, karakteristik material, kekakuan rangka, serta kalibrasi sensor. Sensor load cell terintegrasi Arduino Uno dan modul HX711 terbukti berperforma baik, memberikan hasil representatif, serta layak digunakan sebagai sistem pengukuran digital prototipe uji puntir skala laboratorium. Implikasi praktisnya adalah tersedianya alternatif sistem pengukuran ekonomis dan akurat untuk praktikum dan penelitian pengujian material.

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi industri manufaktur dan rekayasa material menuntut adanya sistem pengujian mekanis yang semakin akurat, efisien, dan terintegrasi dengan sistem digital. Seiring dengan meningkatnya kebutuhan akan material yang lebih kuat, ringan, dan tahan lama, metode pengujian tradisional mulai bertransformasi menuju sistem yang lebih modern dengan memanfaatkan perangkat elektronik dan sistem kendali berbasis komputer. Kemajuan teknologi mikrokontroler, seperti Arduino, serta ketersediaan modul penguat sinyal digital seperti HX711, memungkinkan sistem pengujian material, termasuk uji puntir, dapat dilakukan secara lebih praktis, ekonomis, dan real-time (Indriana, 2020). Integrasi antara sensor (Peña Torres et al., 2025) dan mikrokontroler (Sinaga et al., 2019) memungkinkan data hasil pengujian tidak hanya lebih mudah dianalisis, tetapi juga dapat direkam dan divisualisasikan dengan lebih akurat, sehingga mendukung pengambilan keputusan yang lebih tepat dalam desain dan seleksi material ((Affandi & Huzni, 2021; Faizal & Fajar, 2020). Perkembangan ini menjadi fondasi penting dalam menjawab tantangan industri yang membutuhkan sistem pengujian dengan biaya terjangkau namun tetap menghasilkan data yang valid dan dapat dipertanggungjawabkan.

Pengujian puntir (*torsion test*) merupakan salah satu pengujian mekanis fundamental yang digunakan untuk menentukan ketahanan suatu material atau komponen terhadap beban puntir atau torsi. Pada pengujian ini, spesimen yang umumnya berbentuk batang dengan penampang melingkar dikenai torsi pada salah satu ujungnya, sedangkan ujung lainnya dipasang tetap atau dikontrol (Jimmy et al., 2023). Tujuan utama pengujian puntir adalah untuk mengetahui sifat-sifat material, meliputi modulus elastisitas geser, batas luluh geser, kekuatan puntir maksimum, serta perilaku material ketika dibebani puntir hingga mengalami patah (Mardoqueu M. Costa, 2024). Pemahaman mengenai karakteristik puntir material menjadi sangat krusial dalam berbagai aplikasi teknik, seperti pada poros transmisi, komponen otomotif, struktur pesawat terbang, dan peralatan industri yang mengalami pembebanan torsi selama operasinya (Chandra et al., 2021). Kegagalan material akibat beban puntir sering terjadi secara mendadak tanpa tanda-tanda awal yang kasatmata, sehingga pengujian puntir menjadi instrumen penting untuk mencegah kegagalan struktural yang dapat membahayakan keselamatan dan mengakibatkan kerugian ekonomi yang signifikan (Pratowo et al., 2019; Redi Putra et al., 2018).

Dalam praktik pengujian, sering dijumpai adanya perbedaan antara hasil pengukuran yang diperoleh melalui sensor *load cell* dengan hasil perhitungan teoritis maupun metode konvensional (Hastaryadi et al., 2025). Pada pengujian material dengan torsi rendah, data yang ditampilkan oleh sensor cenderung berfluktuasi akibat gangguan *noise* elektronik, sedangkan pada torsi tinggi, akurasi pengukuran cenderung menurun karena keterbatasan kapasitas sensor dan efek non-linearitas (Sani & Maha, 2018). Selain itu, apabila proses kalibrasi tidak dilakukan secara tepat, pergeseran nilai hasil pengukuran dapat terjadi sehingga validitas data menjadi terpengaruh. Faktor-faktor mekanis seperti gesekan pada sistem transmisi, ketidakselarasan poros, deformasi rangka, dan karakteristik material yang diuji juga turut

mempengaruhi akurasi hasil pengukuran (Alfian et al., 2022). Permasalahan ini menjadi tantangan serius dalam pengembangan mesin uji puntir berbasis mikrokontroler, karena sistem pengukuran harus mampu menghasilkan data torsi yang valid, akurat, dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah, terutama untuk keperluan penelitian dan pengujian material di lingkungan akademik dan industri (Chandra et al., 2021).

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji implementasi sistem berbasis mikrokontroler pada mesin uji puntir. (Handoko et al., 2024) melakukan penelitian berjudul "Perancangan Sistem Monitoring Pada Mesin Uji Puntir Berbasis Arduino" yang berfokus pada pengembangan sistem monitoring untuk mesin uji puntir manual menggunakan Arduino Mega, sensor *load cell*, limit switch, dan dial indikator. Sistem ini dirancang untuk menampilkan data momen puntir, defleksi, dan sudut puntir secara *real-time*, dengan data diolah menggunakan Microsoft Excel (Novaldy et al., 2019). Hasil kalibrasi menunjukkan fungsi persamaan *load cell* $y = 6,6498x + 48,867$ dengan tingkat keyakinan 99,98%. Pengujian pada besi beton menghasilkan rata-rata tegangan puntir 0,40 dan rata-rata sudut puntir 18,2120 rad (Wulandari et al., 2021). Namun, penelitian ini memiliki keterbatasan karena hanya menguji satu jenis material (besi beton) dan tidak melakukan perbandingan hasil pengukuran dengan alat uji puntir standar, sehingga validitas dan akurasi sistem belum terukur secara komprehensif. Selain itu, penelitian ini belum menganalisis secara mendalam parameter performa *load cell* seperti linearitas, stabilitas sinyal, dan sensitivitas pada berbagai kondisi pembebanan.

Penelitian relevan lainnya dilakukan oleh (Faizal & Fajar, 2020) dengan judul "Sistem Akuisisi Data Mesin Uji Puntir Berbasis Arduino dan Microsoft Visual C#". Penelitian ini mengembangkan sistem akuisisi data untuk mesin uji puntir menggunakan Arduino Uno R3 sebagai mikrokontroler, dengan *load cell* untuk mengukur gaya dan *rotary encoder* untuk mencatat sudut puntir. Hasil kalibrasi menunjukkan ketelitian pembacaan *rotary encoder* sebesar $0,15^\circ$ dengan fungsi persamaan $y = 0,15x$, dan ketelitian pembacaan *load cell* sebesar 0,002 kg (2 gram) dengan fungsi persamaan $y = 10,426x - 0,0011$ serta tingkat keyakinan 99,97%. Pengujian pada material ST37 menunjukkan *trendline* grafik data yang stabil. Keterbatasan penelitian ini adalah tidak dilakukannya analisis mendalam terhadap performa *load cell* pada berbagai jenis material dan kondisi pembebanan yang berbeda. Penelitian ini juga tidak membandingkan hasil pengukuran dengan perhitungan teoritis maupun alat uji standar, sehingga tingkat akurasi dan validitas data yang dihasilkan belum terukur secara kuantitatif. Kedua penelitian tersebut menunjukkan bahwa pengembangan sistem uji puntir berbasis Arduino telah dilakukan, namun masih terdapat celah penelitian yang signifikan terkait evaluasi performa *load cell* secara komprehensif (Setiawan & Ari Kurniawan, 2023).

Berdasarkan kajian terhadap penelitian terdahulu, teridentifikasi **gap penelitian** yang masih belum terjawab, yaitu belum adanya penelitian yang secara khusus dan komprehensif menganalisis performa sensor *load cell* pada sistem uji puntir berbasis Arduino dengan membandingkan hasil pengukuran terhadap alat uji puntir standar dan perhitungan teoritis, serta mengevaluasi parameter akurasi, stabilitas, dan linearitas sensor pada berbagai jenis material dengan karakteristik mekanik berbeda. Penelitian sebelumnya lebih banyak berfokus pada pemanfaatan *load cell* untuk aplikasi timbangan digital atau pengukuran gaya sederhana, dengan temuan adanya galat (*error*) pengukuran hingga 0,39% (Sam et al., 2020; Sani & Maha, 2018). Namun, penelitian yang secara spesifik mengkaji performa *load cell* dalam konteks pengujian puntir dengan berbagai variasi material masih sangat terbatas. **Urgensi** penelitian ini semakin meningkat mengingat kebutuhan akan sistem pengujian material yang akurat, ekonomis, dan mudah dioperasikan di lingkungan laboratorium pendidikan dan penelitian, terutama di negara berkembang yang memiliki keterbatasan akses terhadap peralatan uji standar yang mahal. Selain itu, pemahaman yang mendalam tentang performa *load cell* menjadi krusial untuk memastikan keandalan data pengujian yang menjadi dasar dalam

desain dan seleksi material untuk berbagai aplikasi teknik (Kirono & Amri, 2013; Shandy et al., 2025).

Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada pengembangan mesin prototipe uji puntir berbasis Arduino Uno yang terintegrasi dengan *load cell* kapasitas 350 kg dan modul HX711, dengan analisis performa sensor yang mencakup tiga parameter utama, yaitu akurasi, stabilitas, dan linearitas, pada tiga jenis material berbeda (Baja ST-41, *Stainless Steel* SUS-304, dan Kuningan) dengan diameter 5 mm. Kebaruan lainnya adalah adanya perbandingan hasil pengukuran *load cell* dengan data alat uji puntir standar yang menghasilkan tingkat kemiripan kuantitatif sebesar 81,82% pada Baja ST-41, 96,67% pada *Stainless Steel* SUS-304, dan 88,15% pada Kuningan (Umam, 2020), serta perbandingan dengan perhitungan teoritis untuk mengidentifikasi faktor-faktor aktual yang mempengaruhi perbedaan hasil pengukuran, seperti gesekan mekanis, karakteristik material, kekakuan rangka, dan proses kalibrasi sensor. Pendekatan komprehensif ini belum pernah dilakukan dalam penelitian sebelumnya, sehingga memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan sistem pengukuran digital untuk pengujian puntir yang valid dan reliabel.

Berdasarkan latar belakang dan gap penelitian yang telah diuraikan, **tujuan** penelitian ini adalah: (1) menganalisis pengaruh komponen *load cell* terhadap keakuratan hasil pengujian torsi pada mesin uji puntir berbasis Arduino, dan (2) menganalisis pengaruh beban uji spesimen terhadap komponen *load cell* pada mesin uji puntir berbasis Arduino. Penelitian ini dibatasi pada analisis komponen *load cell* berkapasitas 350 kg sebagai sensor pengukur torsi, yang diintegrasikan dengan Arduino Uno dan modul penguat sinyal HX711, dengan parameter yang dianalisis meliputi akurasi, sensitivitas, linearitas, dan stabilitas sinyal pada tiga jenis material uji, yaitu *Stainless Steel* SUS-304, Kuningan, dan Baja ST-41. Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah bagaimana pengaruh komponen *load cell* terhadap akurasi hasil pengujian torsi pada mesin uji puntir berbasis Arduino, serta bagaimana pengaruh beban uji spesimen terhadap komponen *load cell* pada mesin tersebut.

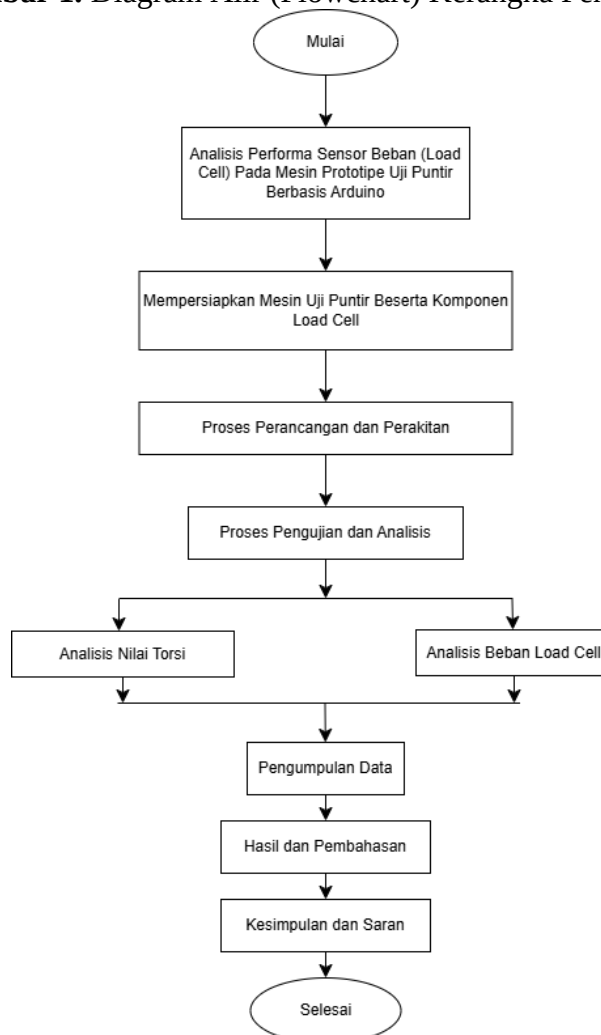
Kontribusi penelitian ini adalah menyediakan referensi ilmiah yang komprehensif mengenai performa *load cell* dalam sistem pengujian material berbasis Arduino, yang dapat menjadi acuan bagi peneliti dan praktisi dalam mengembangkan sistem pengukuran digital untuk pengujian puntir. Penelitian ini juga berkontribusi dalam mengisi kesenjangan pengetahuan terkait evaluasi kuantitatif akurasi *load cell* dengan membandingkan hasil pengukuran terhadap alat standar dan perhitungan teoritis. Adapun manfaat penelitian ini meliputi: (1) memberikan bekal pengetahuan bagi penelitian selanjutnya dalam pengembangan mesin uji puntir dengan sistem digitalisasi pengukuran yang lebih modern; (2) menyediakan alternatif sistem pengukuran yang ekonomis namun akurat untuk kegiatan praktikum dan penelitian di laboratorium, terutama bagi institusi pendidikan dengan keterbatasan anggaran; (3) memberikan data empiris mengenai performa *load cell* pada berbagai jenis material yang dapat digunakan sebagai referensi dalam seleksi material untuk aplikasi teknik; serta (4) menjadi dasar pengembangan lebih lanjut terhadap perancangan mesin uji puntir dengan sistem digitalisasi pengukuran yang lebih modern dan terintegrasi.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental kuantitatif dengan pendekatan pengujian langsung (*direct testing*) untuk menganalisis performa sensor *load cell* pada mesin prototipe uji puntir berbasis Arduino. Jenis penelitian ini dipilih karena memungkinkan pengukuran variabel secara terkontrol dan terukur, serta menghasilkan data kuantitatif yang dapat dianalisis secara statistik dan komparatif. Populasi data dalam penelitian ini adalah seluruh jenis material logam (Kara & Fitri, 2023) yang umum digunakan dalam aplikasi teknik, sedangkan sampel data yang digunakan adalah tiga jenis spesimen material, yaitu Baja ST-

41, *Stainless Steel* SUS-304, dan Kuningan, masing-masing dengan diameter 5 mm dan panjang efektif 150 mm. Teknik pengambilan sampel dilakukan secara *purposive sampling*, yaitu pemilihan material berdasarkan kriteria perbedaan karakteristik mekanik yang signifikan, meliputi kekuatan tarik, modulus elastisitas, dan ketahanan terhadap deformasi puntir, sehingga dapat memberikan variasi data yang representatif untuk mengevaluasi performa sensor *load cell* pada berbagai kondisi pembebanan (Affandi & Huzni, 2021; Redi Putra et al., 2018). Pemilihan ketiga material ini didasarkan pada penggunaannya yang luas dalam aplikasi teknik serta ketersediaan data acuan dari alat uji puntir standar dan literatur ilmiah untuk validasi hasil pengukuran.

Gambar 1. Diagram Alir (Flowchart) Kerangka Penelitian



Sumber: Diolah penulis, 2026.

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Teknik Mesin Universitas Pamulang yang beralamat di Jl. Witana Harja No. 18B, Pamulang Barat, Kecamatan Pamulang, Tangerang Selatan, Banten. Lokasi ini dipilih karena tersedianya peralatan yang memadai untuk mendukung pelaksanaan pengujian.

Gambar 2. Laboratorium Teknik Mesin Universitas Pamulang



Sumber: Dokumentasi penulis, 2026.

Alat dan Bahan

Peralatan utama yang digunakan dalam pembuatan mesin uji puntir prototipe disajikan pada Tabel 1, sedangkan peralatan pendukung yang digunakan selama proses pembuatan dan pengujian disajikan pada Tabel .

Tabel 1. Alat Uji Puntir

Bahan	Jumlah
Baja Hollow Kotak 40 x 40 x 1 (mm)	1 Pcs
Plat Besi 3 mm	1 Pcs
Pillow Block	1 Pcs
Chuck 4 Inch	2 Pcs
Besi AS 18 mm	2 Pcs
Roda 10 cm	4 Pcs
Arduino Uno	1 Pcs
Load Cell 350 Kg	1 Pcs
LCD 16 x 2	1 Pcs
Relay	1 Pcs
Potensio Meter	1 Pcs
HX711	1 Pcs
Buton	3 Pcs
Motor Induksi	1 Pcs

Sumber: Data penelitian, diolah penulis, 2026.

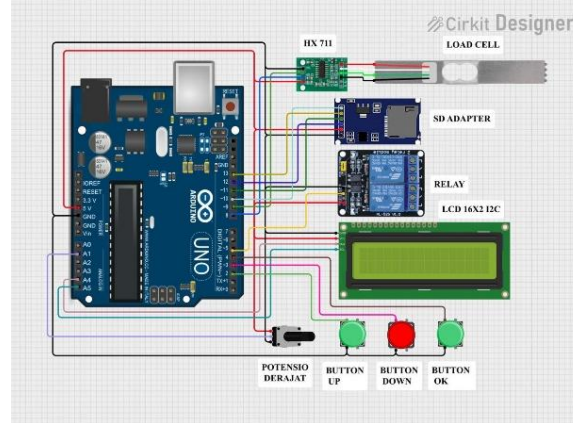
Tabel 2. Bahan Uji Puntir (Peralatan Pendukung)

Alat	Jumlah
Meteran	1 Pcs

Alat	Jumlah
Jangka Sorong	1 Pcs
Las Listrik	1 Pcs
Spidol	2 Pcs
Grinda	2 Pcs
Volt Meter	1 Pcs

Sumber: Data penelitian, diolah penulis, 2026.

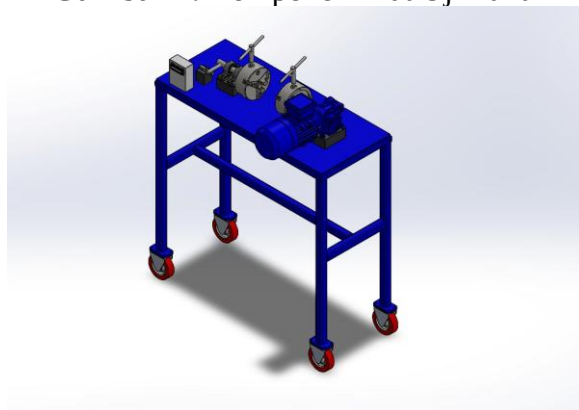
Gambar 3. Wiring Diagram Sistem Uji Puntir



Sumber: Perancangan penulis, 2026.

Gambar 3 menunjukkan rangkaian sistem uji puntir berbasis Arduino dengan load cell sebagai sensor utama untuk mengukur gaya. Sinyal dari load cell diperkuat dan dikonversi oleh modul HX711 sebelum diproses oleh Arduino, kemudian ditampilkan pada LCD dan disimpan ke SD Card. Sistem dilengkapi tombol kontrol dan relay untuk pengoperasian mesin. Potensiometer digunakan sebagai sensor sudut untuk mengukur derajat putaran secara real-time. Secara keseluruhan, sistem mampu mengukur gaya puntir dengan cukup baik, dengan performa yang dipengaruhi oleh kalibrasi dan kondisi pengujian.

Gambar 4. Komponen Alat Uji Puntir



Sumber: Dokumentasi penulis, 2026.

Perakitan alat uji puntir diawali dengan pembuatan rangka utama menggunakan baja ASTM A36 berbentuk hollow kotak berukuran 40 x 40 x 1 mm. Rangka dirakit dengan dimensi

panjang 100 cm, lebar 40 cm, dan tinggi 90 cm, kemudian dilakukan proses pengelasan pada setiap sambungan agar struktur kokoh. Selanjutnya, plat besi tebal 3 mm dipasangkan pada bagian atas rangka sebagai meja kerja, dan pada bagian tengah rangka ditambahkan angkur untuk meningkatkan kekakuan dan stabilitas alat saat pengujian berlangsung.

Tahap berikutnya adalah pemasangan sistem penggerak, yaitu motor listrik 1 fasa yang diposisikan pada rangka dan dikunci dengan baut agar tidak terjadi pergeseran. Motor dihubungkan dengan poros utama berdiameter 18 mm sebagai media transmisi daya, yang dipasang menggunakan pillow block bearing agar putaran tetap stabil dan meminimalkan getaran. Pada ujung poros utama dipasangkan chuck berukuran 4 inch yang berfungsi untuk menjepit spesimen uji, sedangkan di sisi berlawanan dipasangkan poros kedua yang juga dilengkapi chuck dan terhubung dengan sensor beban (load cell) untuk mengukur gaya puntir yang terjadi selama pengujian. Pada bagian kaki rangka dipasangkan empat roda berukuran 10 cm untuk memudahkan mobilitas alat. Setelah seluruh komponen terpasang, dilakukan pengecekan keselarasan poros, kekencangan baut, serta uji coba awal guna memastikan alat uji puntir dapat bekerja dengan baik dan stabil.

Gambar 5. Mesin Uji Puntir



Sumber: Dokumentasi penulis, 2026.

Alat uji puntir merupakan perangkat yang digunakan untuk mengetahui besarnya gaya puntir yang terjadi pada suatu benda uji. Pengujian dilakukan dengan cara memutar atau memuntir batang uji secara terus-menerus hingga mencapai batas tertentu atau sampai benda uji mengalami kegagalan (putus).

Gambar 6. Sensor Beban (Load Cell)



Sumber: Dokumentasi penulis, 2026.

Load cell merupakan sensor yang digunakan untuk mengukur besarnya beban atau gaya yang bekerja pada suatu objek. Prinsip kerjanya mirip dengan sensor tekanan, yaitu mendeteksi perubahan akibat adanya gaya yang diberikan. Ketika beban diterapkan, elemen logam pada load cell akan mengalami deformasi elastis, yang kemudian diubah menjadi sinyal listrik untuk diolah lebih lanjut. Prinsip kerja load cell adalah mengubah gaya atau beban yang diterima menjadi sinyal listrik: elemen elastis pada load cell mengalami deformasi (regangan) sangat kecil yang dideteksi oleh strain gauge, sehingga terjadi perubahan nilai resistansi listrik. Perubahan resistansi kemudian diolah melalui rangkaian Wheatstone Bridge menjadi tegangan listrik yang besarnya sebanding dengan beban yang diberikan, dan sinyal ini selanjutnya diperkuat serta dibaca oleh sistem pengukuran.

Gambar 7. Kerangka Alat Uji Puntir



Sumber: Dokumentasi penulis, 2026.

Salah satu bagian utama pada mesin uji puntir adalah rangka (kerangka), yang merupakan komponen penting karena berfungsi sebagai penopang dan tempat terpasangnya seluruh komponen pada alat uji puntir.

Gambar 8. Chuck



Sumber: Dokumentasi penulis, 2026.

Chuck merupakan salah satu komponen perlengkapan pada mesin uji puntir yang berfungsi untuk menjepit atau mengikat benda kerja selama proses pengujian berlangsung.

Gambar 9. Motor Induksi



Sumber: Dokumentasi penulis, 2026.

Motor listrik adalah perangkat yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik, sedangkan kebalikannya disebut generator atau dinamo. Motor listrik 1 fasa yang digunakan termasuk motor induksi yang bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik, dimana sumber listrik berada pada stator dan arus pada rotor timbul akibat induksi melalui celah udara. Dalam industri, motor induksi banyak digunakan sebagai penggerak, seperti pada kompresor, pompa, dan mesin produksi.

Spesifikasi dan Prinsip Kerja Sensor Beban (Load Cell)

Sensor beban (load cell) digunakan untuk mengukur gaya atau berat dalam berbagai aplikasi teknik dan industri. Alat ini banyak dimanfaatkan pada timbangan digital, sistem pengujian material, serta mesin industri untuk memantau beban kerja. Dalam bidang teknik mesin, load cell digunakan pada alat uji seperti mesin uji tarik dan uji puntir untuk mengetahui besarnya gaya atau torsi yang bekerja pada benda uji. Selain itu, load cell juga digunakan dalam sistem kontrol otomatis untuk memastikan beban tetap dalam batas aman dan meningkatkan akurasi serta efisiensi proses.

Metode Pengumpulan Data

Metode pengumpulan data pada penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan pengujian langsung. Langkah-langkah meliputi persiapan alat dan spesimen, pengkondisian mesin uji dalam kondisi standar, serta pengecekan motor penggerak dan komponen terkait. Selanjutnya dilakukan kalibrasi sensor load cell untuk memastikan keakuratan pengukuran. Pengujian dilakukan dengan memberikan beban puntir pada spesimen Baja ST-41, Stainless Steel SUS-304, dan Kuningan, kemudian data gaya yang terbaca dicatat dalam satuan Newton. Setiap pengujian dilakukan sebanyak tiga kali untuk memperoleh data yang valid, kemudian data yang diperoleh dianalisis untuk mengevaluasi performa sensor load cell berdasarkan akurasi dan konsistensi pengukuran.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data Pengamatan

Data penelitian ini diperoleh dengan menguji mesin uji puntir dan sensor beban (load cell) 350 kg dengan variasi spesimen Baja ST-41, Stainless Steel SUS-304, dan kuningan, yang masing-masing berdiameter 5 mm, dengan beban maksimum yang diberikan sebesar 750 N. Setiap pengujian dilakukan sebanyak tiga kali untuk memperoleh data yang akurat (Saribulan et al., 2023). Data hasil pengujian kemudian dibandingkan antara hasil pengukuran

menggunakan load cell, data mesin uji puntir standar, dan perhitungan teoritis, untuk menentukan momen puntir (T), tegangan geser (τ), dan sudut puntir (θ), serta menganalisis hubungan antara gaya dan tegangan output sensor guna mengetahui kinerja, akurasi, dan linearitas sensor load cell pada sistem uji punter (Arbi, 2014).

Data Sensor Beban (Load Cell) pada Mesin Puntir

Tabel 3. Hasil Momen Puntir dan Sudut Puntir Load Cell

Spesimen	Pengujian 1	Pengujian 2	Pengujian 3	Rata-rata
Baja ST-41 (Momen Puntir)	6,68 N.m	6,43 N.m	6,73 N.m	6,60 N.m
Baja ST-41 (Sudut Puntir)	45°	55°	30°	43,33°
SS SUS-304 (Momen Puntir)	9,20 N.m	9,03 N.m	8,81 N.m	9,01 N.m
SS SUS-304 (Sudut Puntir)	40°	30°	30°	33,33°
Kuningan (Momen Puntir)	4,70 N.m	4,55 N.m	5,04 N.m	4,76 N.m
Kuningan (Sudut Puntir)	90°	70°	88°	82,67°

Sumber: Hasil pengujian, diolah penulis, 2026.

Berdasarkan Tabel 3 diperoleh hasil pengujian sensor beban (load cell) terhadap tiga jenis spesimen, yaitu Baja ST-41, Stainless Steel SUS-304, dan kuningan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa Stainless Steel SUS-304 menghasilkan nilai torsi rata-rata tertinggi sebesar 9,01 N.m dengan rata-rata sudut puntir 33,33°, sedangkan Baja ST-41 menghasilkan torsi rata-rata 6,60 N.m dengan sudut puntir 43,33°. Kuningan menghasilkan nilai torsi rata-rata paling rendah yaitu 4,76 N.m, namun memiliki sudut puntir terbesar sebesar 82,67°. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kuningan lebih mudah mengalami deformasi akibat pembebanan puntir dibandingkan dua material lainnya. Perbedaan nilai torsi dan sudut puntir tersebut menunjukkan bahwa sensor load cell mampu mendeteksi perubahan gaya puntir sesuai karakteristik masing-masing material. Pembacaan sensor pada ketiga spesimen juga menunjukkan hasil yang relatif konsisten pada setiap pengujian sehingga dapat disimpulkan bahwa sensor memiliki kestabilan pembacaan yang baik selama proses pengujian, dengan pembacaan yang mengikuti karakteristik masing-masing material tanpa fluktuasi signifikan pada setiap pengujian.

Data Alat Uji Puntir Standar

Berikut ini adalah data yang diperoleh dari uji puntir standar dengan diameter 5 mm.

Tabel 4. Data Alat Uji Puntir Standar

Jenis Material	Batas Tegangan Geser	Estimasi Torsi Maksimum Hingga Patah
Baja ST-41	250 - 300 N/mm ²	4,41 - 5,40 N.m
Stainless Steel SUS-304	310 - 380 N/mm ²	7,61 - 9,32 N.m
Kuningan	180 - 220 N/mm ²	4,41 - 5,40 N.m

Sumber: Data alat uji standar, diolah penulis, 2026.

Berdasarkan Tabel 4 diketahui bahwa Stainless Steel SUS-304 memiliki estimasi torsi maksimum paling tinggi yaitu 7,61-9,32 N.m, sedangkan Baja ST-41 dan kuningan memiliki estimasi torsi maksimum 4,41-5,40 N.m. Data standar ini digunakan sebagai acuan untuk

mengevaluasi hasil pembacaan sensor load cell pada mesin prototipe sehingga dapat diketahui tingkat kesesuaian hasil pengukuran terhadap alat uji standar.

Perhitungan Momen Puntir

Momen puntir dihitung dari gaya yang bekerja pada lengan poros, secara teoritis dirumuskan sebagai $T = F \times r$, dengan T adalah momen puntir (N.m), F adalah gaya yang bekerja tegak lurus lengan poros (N), dan r adalah jari-jari (m). Berdasarkan data pengujian, dengan gaya pembebanan 750 N dan jari-jari lengan 0,04 m, diperoleh momen puntir teoritis sebesar 30 N.m untuk setiap spesimen (Baja ST-41, Stainless Steel SUS-304, dan Kuningan).

Tabel 5. Data Hasil Perhitungan Momen Puntir

Spesimen	Jari-jari (m)	Gaya (N)	Momen Puntir (N.m)
Baja ST-41	0,04	750	30
Stainless Steel SUS-304	0,04	750	30
Kuningan	0,04	750	30

Sumber: Hasil perhitungan penulis, 2026.

Berdasarkan Tabel 5 diperoleh hasil perhitungan momen puntir teoritis sebesar 30 N.m untuk seluruh spesimen. Nilai tersebut diperoleh karena gaya pembebanan dan panjang lengan momen yang digunakan pada setiap pengujian dibuat sama, sehingga secara teoritis tidak terdapat perbedaan nilai momen puntir antar spesimen. Apabila dibandingkan dengan hasil pembacaan load cell pada Tabel 3, terlihat bahwa nilai momen puntir aktual lebih kecil dibandingkan hasil teoritis. Perbedaan tersebut dipengaruhi oleh kondisi pengujian aktual seperti gesekan mekanis pada sistem, deformasi spesimen, sensitivitas sensor load cell, serta proses kalibrasi sensor, sehingga hasil pengukuran aktual tidak sepenuhnya sama dengan hasil perhitungan teoritis.

Momen Inersia Polar, Tegangan Geser, dan Sudut Puntir

Karena spesimen yang diuji berbentuk pejal, momen inersia polar dihitung menggunakan persamaan $J = (\pi.d^4)/32$, dengan J adalah momen inersia polar (m⁴) dan d adalah diameter spesimen. Untuk spesimen berdiameter 5 mm diperoleh $J = 6,13 \times 10^{-11}$ m⁴. Tegangan geser dihitung menggunakan persamaan $\tau = 16.T/(\pi.d^3)$, dengan τ adalah tegangan geser (N/m²), T adalah momen puntir (N.m), dan d adalah diameter spesimen. Berdasarkan momen puntir teoritis sebesar 30 N.m, diperoleh tegangan geser sebesar 1.222,9 MPa untuk ketiga spesimen. Sudut puntir dihitung menggunakan persamaan $\theta = T.L/(J.G)$, dengan L adalah panjang efektif spesimen (m) dan G adalah modulus geser material (Pa). Dengan panjang efektif 0,15 m, diperoleh modulus geser Baja ST-41 sebesar 80×10^9 Pa yang menghasilkan sudut puntir 0,918 rad (52,6°); Stainless Steel SUS-304 dengan modulus geser 77×10^9 Pa menghasilkan sudut puntir 0,953 rad (54,6°); dan Kuningan dengan modulus geser 40×10^9 Pa menghasilkan sudut puntir 1,835 rad (105,1°).

Tabel 6. Data Hasil Perhitungan Sudut Puntir

Spesimen	Sudut Puntir (°)	Radian (rad)
Baja ST-41	52,6	0,918
Stainless Steel SUS-304	54,6	0,953

Spesimen	Sudut Puntir (°)	Radian (rad)
Kuningan	105,1	1,835

Sumber: Hasil perhitungan penulis, 2026.

Berdasarkan Tabel 6, perhitungan sudut puntir secara teoritis menunjukkan bahwa kuningan memiliki sudut puntir terbesar yaitu $105,1^\circ$ (1,835 rad), diikuti Stainless Steel SUS-304 sebesar $54,6^\circ$ (0,953 rad), dan Baja ST-41 sebesar $52,6^\circ$ (0,918 rad). Besarnya sudut puntir pada kuningan menunjukkan bahwa material tersebut memiliki kekakuan geser yang lebih rendah sehingga lebih mudah mengalami deformasi akibat pembebanan puntir. Sebaliknya, Baja ST-41 menunjukkan sudut puntir paling kecil sehingga memiliki kemampuan menahan deformasi puntir yang lebih baik pada kondisi pengujian yang sama.

Tabel 7. Data Hasil Perhitungan Teoritis (Momen Puntir dan Sudut Puntir)

Spesimen	Momen Puntir (T)	Sudut Puntir (ϕ)
Baja ST-41	30 N.m	$52,6^\circ$
Stainless Steel SUS-304	30 N.m	$54,6^\circ$
Kuningan	30 N.m	$105,1^\circ$

Sumber: Hasil perhitungan penulis, 2026.

Berdasarkan Tabel 7 dapat diketahui bahwa hasil perhitungan teoritis menghasilkan nilai momen puntir sebesar 30 N.m pada seluruh spesimen, sedangkan sudut puntir berbeda pada masing-masing material. Perbedaan sudut puntir menunjukkan bahwa setiap material memiliki karakteristik mekanik yang berbeda terhadap pembebanan puntir meskipun menerima momen puntir yang sama. Nilai momen puntir teoritis pada ketiga spesimen tetap sebesar 30 N.m, sedangkan sudut puntir mengalami perubahan sesuai karakteristik material; kuningan memperlihatkan peningkatan sudut puntir paling besar dibandingkan Baja ST-41 dan Stainless Steel SUS-304. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa semakin rendah kekakuan suatu material maka deformasi puntir yang terjadi akan semakin besar. Dengan demikian, parameter sudut puntir menjadi indikator penting dalam mengevaluasi perilaku deformasi material selama pengujian, dan hubungan antara momen puntir dan sudut puntir dipengaruhi oleh sifat mekanik masing-masing material, bukan hanya besarnya pembebanan yang diberikan.

Pembahasan

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, sensor beban (load cell) yang diintegrasikan pada mesin prototipe uji puntir berbasis Arduino mampu mendeteksi perubahan gaya puntir pada setiap spesimen yang diuji, yaitu Baja ST-41, Stainless Steel SUS-304, dan kuningan. Pengujian dilakukan sebanyak tiga kali pada setiap spesimen untuk memperoleh hasil yang lebih konsisten. Nilai rata-rata hasil pembacaan sensor menunjukkan bahwa Stainless Steel SUS-304 menghasilkan torsi sebesar 9,01 N.m, Baja ST-41 sebesar 6,60 N.m, sedangkan kuningan sebesar 4,76 N.m. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa sensor load cell mampu membedakan karakteristik mekanik setiap material berdasarkan besar gaya puntir yang diterima.

Apabila dibandingkan dengan data alat uji puntir standar, hasil pembacaan load cell menunjukkan tingkat kesesuaian yang cukup baik. Pada material Stainless Steel SUS-304, hasil

pembacaan load cell sebesar 9,01 N.m masih berada dalam rentang estimasi torsi maksimum alat uji puntir standar yaitu 7,61-9,32 N.m, sehingga dapat dikatakan memiliki tingkat kesesuaian yang sangat baik. Pada Baja ST-41 diperoleh nilai 6,60 N.m, sedangkan data standar menunjukkan rentang 4,41-5,40 N.m, sehingga hasil pengujian lebih tinggi dari nilai standar. Demikian pula pada kuningan diperoleh 4,76 N.m, yang masih berada dalam rentang standar 4,41-5,40 N.m. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pembacaan sensor load cell mampu mendekati hasil pengujian alat standar, terutama pada material Stainless Steel SUS-304 dan kuningan.

Selanjutnya dilakukan perbandingan antara hasil pengujian menggunakan load cell dengan hasil perhitungan teoritis. Berdasarkan perhitungan teoritis diperoleh nilai momen puntir sebesar 30 N.m untuk seluruh spesimen karena gaya pembebanan dan panjang lengan momen dibuat sama. Namun demikian, hasil pengujian aktual menggunakan load cell menunjukkan nilai yang lebih kecil dibandingkan hasil teoritis. Perbedaan ini disebabkan karena perhitungan teoritis menggunakan kondisi ideal tanpa mempertimbangkan faktor-faktor seperti gesekan pada sistem transmisi, kehilangan energi mekanik, toleransi dimensi spesimen, sensitivitas sensor, dan proses kalibrasi alat. Oleh karena itu, hasil teoritis digunakan sebagai nilai acuan, sedangkan hasil load cell menggambarkan kondisi aktual yang terjadi selama proses pengujian.

Untuk mengetahui tingkat kesesuaian hasil pengukuran terhadap alat uji puntir standar, dilakukan perhitungan persentase kemiripan menggunakan nilai rata-rata hasil pengujian.

Tabel 8. Perbandingan Hasil Load Cell dan Standar

Material	Load Cell (N.m)	Standar (N.m)	Kemiripan (%)
Baja ST-41	6,60	5,40	81,82 %
Stainless Steel SUS-304	9,01	9,32	96,67 %
Kuningan	4,76	5,40	88,15 %

Sumber: Hasil pengujian dan pengolahan data penulis, 2026.

Berdasarkan Tabel 8, hasil tersebut dapat diketahui bahwa pembacaan sensor load cell pada material Stainless Steel SUS-304 memiliki tingkat kemiripan tertinggi terhadap alat uji standar, yaitu sebesar 96,67%. Selanjutnya diikuti oleh kuningan sebesar 88,15%, sedangkan Baja ST-41 memiliki tingkat kemiripan sebesar 81,82%. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa performa sensor load cell memiliki tingkat akurasi yang paling baik pada pengujian Stainless Steel SUS-304.

Tabel 9. Perbandingan Hasil Load Cell dan Teoritis

Material	Teoritis (N.m)	Load Cell (N.m)	Error (%)
Baja ST-41	30	6,60	78,00 %
Stainless Steel SUS-304	30	9,01	69,97 %
Kuningan	30	4,76	84,13 %

Sumber: Hasil pengujian dan perhitungan penulis, 2026.

Berdasarkan Tabel 9, hasil tersebut menunjukkan bahwa nilai kesalahan terhadap teori masih cukup besar. Hal ini bukan disebabkan oleh ketidakmampuan sensor load cell, melainkan

karena perhitungan teoritis menggunakan asumsi kondisi ideal, sedangkan pengujian aktual dipengaruhi oleh kondisi mekanik mesin, kekakuan rangka, gesekan pada chuck, deformasi spesimen, serta proses kalibrasi sensor. Oleh sebab itu, hasil pengujian aktual lebih tepat dibandingkan dengan hasil teoritis dalam menggambarkan kondisi sebenarnya selama pengujian.

Secara keseluruhan dapat disimpulkan bahwa sensor load cell yang diintegrasikan dengan Arduino Uno dan modul HX711 mampu bekerja dengan baik dalam mendeteksi perubahan gaya puntir pada mesin prototipe uji puntir. Sensor menunjukkan respons yang stabil selama proses pengujian serta mampu menghasilkan data yang mendekati alat uji standar, khususnya pada material Stainless Steel SUS-304. Berdasarkan hasil tersebut, sistem yang dirancang telah memenuhi tujuan penelitian sebagai alat ukur digital untuk pengujian puntir dan data yang dihasilkan dapat digunakan sebagai alternatif sistem pengukuran pada kegiatan praktikum maupun penelitian di laboratorium.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, pengolahan data, serta pembahasan mengenai analisis performa sensor beban (load cell) pada mesin prototipe uji puntir berbasis Arduino, dapat disimpulkan bahwa sensor load cell yang diintegrasikan dengan Arduino Uno dan modul HX711 mampu bekerja dengan baik dalam mengukur gaya puntir, dengan pembacaan yang stabil dan konsisten pada setiap pengujian terhadap spesimen Baja ST-41, Stainless Steel SUS-304, dan kuningan, dengan nilai rata-rata torsi berturut-turut sebesar 6,60 N.m, 9,01 N.m, dan 4,76 N.m, sehingga sensor mampu mendeteksi perbedaan karakteristik mekanik setiap material yang diuji. Hasil pengukuran menggunakan sensor load cell juga menunjukkan kesesuaian yang baik dengan data alat uji puntir standar, dengan tingkat kemiripan sebesar 81,82% pada Baja ST-41, 96,67% pada Stainless Steel SUS-304, dan 88,15% pada kuningan, sehingga sensor dinilai layak digunakan sebagai sistem pengukuran gaya puntir pada mesin prototipe berbasis Arduino. Perbedaan antara hasil pengujian aktual dan hasil perhitungan teoritis dipengaruhi oleh kondisi pengujian yang tidak sepenuhnya ideal, seperti gesekan pada sistem mekanik, proses kalibrasi sensor, serta karakteristik material yang diuji, sehingga sensor load cell mampu memberikan hasil pengukuran yang representatif untuk pengujian puntir pada skala laboratorium. Berdasarkan hasil tersebut, penulis menyarankan agar penelitian selanjutnya menggunakan variasi beban, jenis material, dimensi spesimen, dan jumlah pengulangan yang lebih banyak agar performa sensor load cell dapat dievaluasi secara komprehensif serta diperoleh hasil pengujian yang lebih akurat dan representatif, serta mengembangkan mesin prototipe uji puntir berbasis Arduino melalui kalibrasi sensor secara berkala, penggunaan sensor sudut digital (rotary encoder), dan penambahan sistem penyimpanan data (data logging) agar proses pengukuran menjadi lebih akurat, efisien, dan mudah dianalisis.

REFERENSI

- Affandi, & Huzni, S. (2021). Analisis Numerik Kekuatan Puntir Baja Karbon Rendah Menggunakan Software (Solidworks). *R.E.M. (Rekayasa Energi Manufaktur) Jurnal*, 6(2), 29–36. <https://doi.org/10.21070/r.e.m.v6i2.1628>
- Alfian, R., Wirawan, R., Hudha, L. S., Qomariyah, N., Rahayu, S., & Marzuki, M. (2022). Pemanfaatan Sensor Load Cell Dalam Pembuatan Prototipe Alat Uji Tekan Portabel. *Wahana Fisika*, 7(1), 82–92. <https://doi.org/10.17509/wafi.v7i1.46990>

- Arbi, M. H. (2014). *Hubungan Antara Tegangan-Regangan pada Beton*. 14(10), 38–44.
- Chandra, D., Budiarto, U., & Yudo, H. E. (2021). Analisa Teknis Kekuatan dan Perbandingan Biaya Material Poros Baling-Baling Kapal Nelayan Daerah Batang dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga. *Jurnal Teknik Perkapalan*, 9(4), 334–342. <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval>
- Faizal, K., & Fajar, A. (2020). Sistem Akuisisi Data Mesin Uji Puntir Berbasis Arduino dan Microsoft Visual C#. *Rotasi*, 22(3), 155–161.
- Handoko, D., Bashirila, R., & Rohermanto, A. (2024). Perancangan Sistem Monitoring pada Mesin Uji Puntir Berbasis Arduino. *Jurnal Mesin Nusantara*, 7(2), 154–165. <https://doi.org/10.29407/jmn.v7i2.21977>
- Hastaryadi, R. B. A., Dionisius, F., Asa, F., & Sutanto, W. (2025). *Prototipe Pengukuran Torsi Baut pada Industri Otomotif Menggunakan Sensor Load Cell*. 13(1).
- Indriana, P. (2020). *Penentuan Momen Inersia Benda Tegar (Slander Rod) Menggunakan Metode Osilasi Bandul Fisis Berbasis Mikrokontroler*. 1.
- Jimmy, Mukhnizar, & Abu, R. (2023). Pembuatan Alat Uji Puntir (Manufacturing Torsion Test Equipment). *UNES Journal of Sciencetech Research*, 8(2), 1–14. <https://ojs.ekasakti.org/index.php/UJSR/>
- Kara, R. B., & Fitri, M. (2023). Modifikasi Desain Mesin Uji Puntir Material Logam Dan Komposit. *ALMIKANIKA*, 5(1). <https://doi.org/10.32832/almikanika.v5i1.8924>
- Kirono, S., & Amri, A. (2013). Pengaruh Tempering pada Baja ST 37 yang Mengalami Karburasi dengan Bahan Padat terhadap Sifat Mekanis dan Struktur Mikro. In *Jurusan Mesin, Universitas Muhammadiyah Jakarta: C*.
- Novaldy, F., R, M. G., Awan, N., & P, A. T. (2019). Rancang Bangun Prototype Counter Barang Berbasis Arduino Uno. In *Tugas Akhir* (Vol. 8, Number 2).
- Peña Torres, P., Marlés Betancourt, C., & Capera García, C. E. (2025). Alternativas estratégicas para el desarrollo de negocios verdes productivos del Caquetá (Colombia). *Revista Universidad y Empresa*, 27(48). <https://doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/empresa/a.14620>
- Pratowo, B., Surya, I., & Witoni. (2019). *Analisis Kekuatan Fatik Baja Karbon Rendah SC10 dengan Tipe Rotary Bending*. 17, 16.
- Redi Putra, R., Jokosisworo, S., & Wibawa Budi, A. S. (2018). Analisa Kekuatan Puntir, Kekuatan Tarik dan Kekerasan Baja ST 60 sebagai Bahan Poros Baling-Baling Kapal (Propeller Shaft) setelah Proses Tempering. *Jurnal Teknik Perkapalan*, 6(1), 83–90. <http://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval>
- Sam, N. N., Rifaldi, M., Wibowo, N. R., & Nur, M. (2020). Rancang Bangun Modul Praktik Load Cell dengan Kapasitas 20 Kg Berbasis Arduino Nano. *Mechatronics Journal in Professional and Entrepreneur*, 2(1), 21–26.
- Sani, R. A., & Maha, A. I. (2018). Konstruksi Timbangan Digital Menggunakan Load Cell Berbasis Arduino Uno dengan Tampilan LCD (Liquid Crystal Display). *EINSTEIN E-JOURNAL*, 5(2), 15–19. <https://doi.org/10.24114/einstein.v5i2.11837>
- Saribulan, N., Rahman, H., & Rasanjani, S. (2023). Development of Poverty Alleviation Research in Indonesia: Bibliometric Analysis and Content Analysis. *Journal of Social Sciences and Humanities*, 12(2), 309–321. <https://doi.org/10.23887/jish.v12i2.62375>
- Setiawan, K. R., & Ari Kurniawan. (2023). Aplikasi Presensi Karyawan Berbasis Mobile Untuk Meningkatkan Kedisiplinan Karyawan Dalam Bekerja Menggunakan Metode Location Based Service (LBS) Pada PT. Teknolab Caraka Internasional. *Jurnal Manajemen Informasi*, 15.
- Shandy, S. A. S., Khalid, A., Fatharani, A., Rachma, I. N., Herlina, F., Eka, A. E., & Afridon, M. S. (2025). *Mekanika Bahan*. CV HEI Publishing Indonesia.

- Sinaga, F. O., Amdani, K., & Rajagukguk, J. (2019). *Rancang Bangun Miniatur Eskalator Otomatis Menggunakan Sensor Berat (Load Cell) Berbasis Mikrokontroler ATMEGA 2560*. 15–21.
- Umam, K. (2020). *Uji Puntir pada Baja ST-41 dengan Menggunakan Alat Uji Rotary (Twist)*.
- Wulandari, A. I., Alamsyah, & Agusty, C. L. (2021). *Analisis Tegangan Regangan pada Pelat Deck dan Bottom Kapal Ferry RO-RO Menggunakan Finite Element Method*. 15, 45–52.