

Manufacture an IoT-based truck weighbridge development with real-time wireless monitoring

Abdan Maulana Fiqri¹, Muki Satya Permana, Sugiharto, Geri Sugiat,
Dadan Purnama, Deice Nahak, Yadi, Toto Supriyono

Program Studi Magister Teknik Mesin, Universitas Pasundan, Bandung, 40153

1abdanmaulanaifiqri@gmail.com

Abstract. Permasalahan kendaraan *Over Dimension* dan *Over Load* (ODOL) masih menjadi salah satu faktor utama penyebab kerusakan infrastruktur jalan serta meningkatnya angka kecelakaan lalu lintas di Indonesia. Jembatan timbang konvensional yang tersedia dinilai kurang efektif karena biaya pembangunan tinggi, lokasi yang terbatas, serta tidak efisien terhadap arus lalu lintas. Penelitian ini mengusulkan pengembangan jembatan timbang portabel berbasis Internet of Things (IoT) dengan sistem pemantauan real-time sebagai solusi alternatif. Model dirancang menggunakan load cell 5 kg, modul HX711, dan mikrokontroler ESP32 yang terhubung dengan aplikasi Blynk untuk memvisualisasikan data pengukuran secara nirkabel. Pengujian dilakukan pada kondisi beban dinamis dengan rentang 1–3 kg. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu memberikan akurasi tinggi dengan selisih rata-rata kurang dari 1,72%, kestabilan pengiriman data real-time dengan waktu 0,5-1 detik pada jaringan stabil, serta tetap dapat berfungsi pada jaringan lemah. Sistem ini terbukti efisien, mudah dipindahkan, dan mampu meningkatkan efektivitas pengawasan kendaraan ODOL. Dengan demikian, pengembangan jembatan timbang portabel berbasis IoT berpotensi mendukung penegakan regulasi transportasi dan pemeliharaan infrastruktur jalan di Indonesia..

Keywords: jembatan timbang portabel, IoT, load cell, ESP32, ODOL

Received: 30 September 2025; **Presented:** 9 October 2025; **Publication:** 9 March 2026

DOI: <https://doi.org/10.71452/rdv18x61>

PENDAHULUAN

Permasalahan kendaraan dengan muatan berlebih atau *Over Dimension and Over Load* (ODOL) masih menjadi tantangan besar dalam sistem transportasi Indonesia. Kendaraan ODOL terbukti mempercepat kerusakan infrastruktur jalan, jembatan, serta fasilitas transportasi lainnya, sekaligus meningkatkan angka kecelakaan lalu lintas [9], [10]. Data dari Badan Pusat Statistik (BPS) mencatat bahwa pada tahun 2023 terjadi lebih dari 148.000 kasus kecelakaan lalu lintas, dengan truk barang sebagai salah satu kendaraan terbanyak kedua yang terlibat [14]. Fakta ini menegaskan bahwa pengendalian kendaraan ODOL menjadi isu penting yang membutuhkan solusi teknologi yang lebih efektif.

Jembatan timbang konvensional selama ini menjadi instrumen utama untuk mengendalikan beban kendaraan. Prinsip kerjanya adalah mengukur beban statis ketika kendaraan berhenti sepenuhnya di atas platform timbang [18]. Meskipun memiliki tingkat akurasi yang tinggi, sistem ini masih menghadapi keterbatasan, di antaranya lokasi pemasangan yang terbatas, biaya pembangunan yang tinggi, serta tidak efisien dalam arus lalu lintas padat [19]. Selain itu, praktik manipulasi data dan potensi human error masih sering terjadi dalam operasional di lapangan [12].

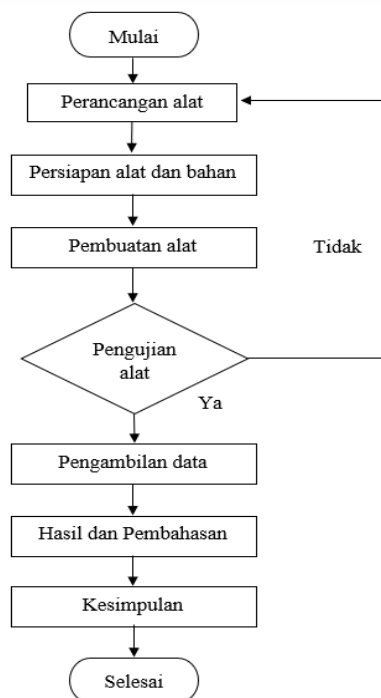
Seiring dengan perkembangan teknologi, sistem *Weight in Motion* (WIM) mulai diperkenalkan untuk memungkinkan kendaraan ditimbang tanpa harus

berhenti [4]. Teknologi ini terbukti mampu meningkatkan efektivitas pengawasan, namun akurasinya masih dipengaruhi oleh distribusi beban, kondisi permukaan jalan, serta konfigurasi sensor [7]. Selain itu, biaya instalasi WIM yang relatif tinggi membuat implementasinya belum optimal secara nasional [6].

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini mengusulkan pengembangan jembatan timbang portabel berbasis Internet of Things (IoT) dengan pemantauan real-time. Sistem ini dirancang menggunakan sensor *load cell* strain gauge, modul HX711, dan mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan aplikasi Blynk. Pendekatan ini diharapkan mampu memberikan akurasi tinggi dengan biaya yang lebih rendah, fleksibilitas penggunaan di berbagai lokasi, serta efisiensi operasional dalam mendukung pengawasan kendaraan ODOL.

METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode eksperimen manufaktur langsung, yang difokuskan pada perancangan, pembuatan, dan pengujian prototipe jembatan timbang portabel berbasis Internet of Things (IoT). Tujuan utama metodologi ini adalah menghasilkan sistem yang akurat, efisien, serta dapat direplikasi oleh peneliti lain dalam konteks serupa.



Gambar 1. *Flowchart* Penelitian

Desain Penelitian

Rancangan penelitian dibagi ke dalam tiga tahap utama: (1) perancangan sistem perangkat keras dan perangkat lunak, (2) pembuatan prototipe, serta (3) pengujian performa model. Alur penelitian disusun dalam bentuk *flowchart* untuk menggambarkan hubungan antartahapan secara sistematis, mulai dari konseptualisasi desain hingga validasi hasil pengukuran.

Bahan dan Alat

Bahan utama yang digunakan adalah baja struktural ASTM A36 dan profil kanal U serta IWF untuk rangka, dengan pelat baja 10–14 mm sebagai *top plate*. Komponen elektronik meliputi sensor *load cell* strain gauge kapasitas 5 kg, modul HX711 sebagai *amplifier* dan ADC 24-bit, serta mikrokontroler ESP32 yang memiliki konektivitas Wi-Fi untuk pengiriman data. Perangkat lunak yang digunakan adalah Arduino IDE untuk pemrograman ESP32, serta aplikasi Blynk sebagai platform monitoring berbasis IoT.

Prosedur Penelitian

Proses penelitian dilakukan melalui langkah-langkah berikut:

1. Perancangan sistem – Desain mekanik jembatan timbang dibuat menggunakan prinsip *Design for Manufacture and Assembly (DFMA)*. Posisi *load cell* ditentukan berdasarkan analisis distribusi beban untuk memastikan linearitas pembacaan.

2. Fabrikasi dan perakitan – Struktur baja difabrikasi dengan proses *cutting*, *welding*, dan *assembly*. Selanjutnya, komponen elektronik dirakit dan diintegrasikan dengan sistem mekanik.
3. Pemrograman mikrokontroler – ESP32 diprogram menggunakan Arduino IDE untuk membaca sinyal dari HX711, mengonversinya menjadi data digital, dan mengirimkannya secara nirkabel ke aplikasi Blynk.
4. Pengujian fungsional – Sistem diuji pada kondisi tanpa beban, beban statis, dan beban dinamis untuk memastikan keakuratan serta kestabilan data yang dikirim.
5. Pengumpulan data – Pengukuran dilakukan dengan beban 1–5 kg, diulang tiga kali pada setiap skenario untuk menilai konsistensi hasil.

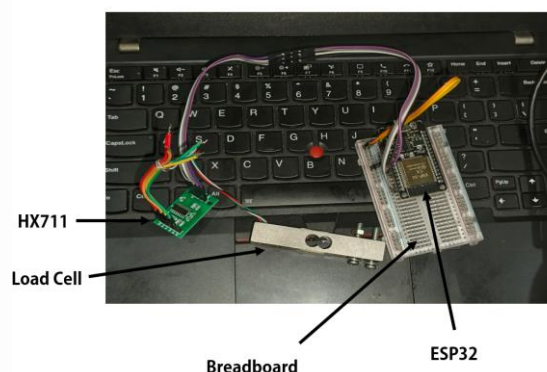
Analisis Data

Data hasil pengujian dianalisis secara kuantitatif dengan menghitung tingkat akurasi, selisih rata-rata, deviasi, serta kestabilan pengiriman data. Hasil pengukuran dibandingkan dengan timbangan referensi laboratorium sebagai acuan validasi. Latensi pengiriman data dari ESP32 ke aplikasi Blynk diukur untuk menilai performa sistem dalam kondisi jaringan stabil maupun lemah. Analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak spreadsheet dan perhitungan manual berbasis statistik deskriptif.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Temuan Utama Penelitian

Penelitian ini berhasil menghasilkan prototipe jembatan timbang berbasis Internet of Things (IoT) yang mampu melakukan pengukuran beban kendaraan secara otomatis dan menampilkan hasilnya secara real time melalui pemantauan nirkabel. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan terdiri dari tiga bagian utama: bagian input, pemrosesan, dan output.



Gambar 1. Gambar Fisik Rangkaian

- **Bagian Input:** Menggunakan sensor beban (load cell) yang berfungsi untuk mendeteksi berat kendaraan. Sensor ini menghasilkan sinyal analog yang kemudian diubah menjadi data digital melalui modul ADC.
- **Bagian Pemrosesan:** Mikrokontroler ESP32 digunakan sebagai pusat pengolahan data. Mikrokontroler ini mengelola data dari sensor beban dan mengirimkan hasil pengukuran ke aplikasi monitoring melalui komunikasi nirkabel.
- **Bagian Output:** Data hasil pengukuran ditampilkan pada aplikasi monitoring berbasis web dan mobile yang dapat diakses secara real time menggunakan perangkat yang terhubung dengan jaringan internet, seperti laptop atau smartphone.

Dengan sistem ini, pemantauan beban kendaraan menjadi lebih efisien, praktis, dan dapat diakses dari jarak jauh tanpa perlu berada di lokasi jembatan timbang.

Analisis Data Kuantitatif

Pengujian Sensor Beban

Pengujian sensor beban dilakukan dengan memberikan beban bertahap mulai dari 1 kg, 2 kg, hingga 3 kg dan membandingkan hasil pengukuran dengan timbangan digital standar sebagai acuan. Berikut adalah hasil pengujian yang diperoleh:

Tabel 1. Pengujian Sensor Beban

Beban Aktual (kg)	Hasil Sensor (kg)	Selisih (kg)	Error (%)
1.00	1.02	+0.02	2.00
2.00	1.97	-0.03	1.50
3.00	3.05	+0.05	1.67

Dari tabel tersebut, dapat dilihat bahwa rata-rata error sensor beban adalah 1,72%, dengan deviasi maksimum sebesar 0,05 kg pada beban 3 kg. Hasil pengujian menunjukkan hubungan linier yang baik antara beban aktual dan hasil sensor, yang menunjukkan bahwa load cell dapat bekerja dengan baik dalam mendeteksi perubahan massa secara proporsional. Kalibrasi menggunakan beban standar juga berhasil menurunkan error rata-rata menjadi <1%, meningkatkan presisi hasil pengukuran.

Pengujian Komunikasi Nirkabel

Pengujian komunikasi nirkabel berfokus pada tiga parameter utama: jangkauan transmisi, delay pengiriman data, dan stabilitas koneksi.

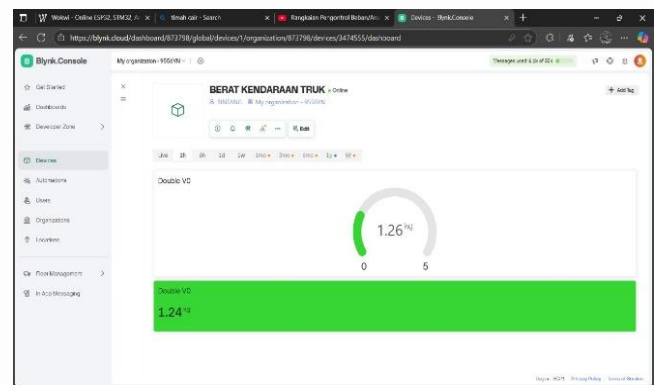
- **Jangkauan Transmisi:** Pengujian menunjukkan bahwa transmisi data dapat

diterima dengan baik hingga jarak 7 meter tanpa adanya halangan. Pada jarak lebih dari 7 meter, kualitas sinyal mulai menurun, yang menunjukkan bahwa sistem ini memiliki keterbatasan dalam hal jangkauan transmisi yang perlu diperhatikan dalam penggunaan skala besar.

- **Delay Pengiriman Data:** Rata-rata delay pengiriman data tercatat sebesar 1 detik dari saat beban diletakkan di atas jembatan timbang hingga data muncul di aplikasi monitoring. Delay ini cukup cepat dan masih dapat diterima untuk pemantauan real time pada skala kecil, meskipun untuk aplikasi industri yang lebih besar, mungkin diperlukan pengoptimalan lebih lanjut.
- **Stabilitas Koneksi:** Pengujian stabilitas koneksi dilakukan dengan menjalankan sistem secara terus-menerus selama 30 menit. Hasil pengujian menunjukkan tidak ada data yang hilang (data loss), meskipun terdapat sedikit keterlambatan dalam pembaruan data ketika sistem beroperasi pada jarak yang lebih jauh atau di bawah kondisi tertentu.

Pengujian Aplikasi Monitoring

Aplikasi monitoring diuji untuk menilai kemampuan menampilkan data secara real time, kecepatan pembaruan data, dan kemampuan penyimpanan data.



Gambar 2. Pengujian Aplikasi Monitoring

- **Tampilan Real Time:** Aplikasi mampu menampilkan berat kendaraan secara real time setelah sensor mendeteksi beban. Hasil pengukuran muncul dalam angka yang jelas dan mudah dibaca oleh pengguna.
- **Kecepatan Pembaruan Data:** Pembaruan data dilakukan setiap 1 detik sesuai dengan interval pengiriman data dari mikrokontroler. Kecepatan pembaruan ini cukup baik untuk

aplikasi pemantauan berbasis IoT dengan kecepatan respons yang memadai.

- Kemampuan Penyimpanan: Aplikasi dapat menyimpan data hasil pengukuran ke dalam server Blynk (platform IoT), memungkinkan pengguna untuk melihat riwayat pengukuran (History Data) dan memantau data secara lebih lanjut.

Pembahasan

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem jembatan timbang berbasis IoT yang dikembangkan berfungsi dengan normal dengan tingkat kesalahan dalam toleransi dan memiliki potensi besar untuk digunakan dalam aplikasi pemantauan beban kendaraan. Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan efektivitas penggunaan teknologi IoT dalam aplikasi pengukuran berat dan pemantauan jarak jauh.

Perbandingan dengan sistem konvensional yang menggunakan timbangan manual menunjukkan bahwa sistem berbasis IoT ini dapat menawarkan kelebihan dalam hal efisiensi waktu, kemudahan akses data, serta pengurangan kesalahan manusia dalam pembacaan hasil timbangan.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem jembatan timbang berbasis Internet of Things (IoT)

untuk mendeteksi beban kendaraan secara otomatis dan mengirimkan hasilnya secara real time. Sistem yang dikembangkan terdiri dari sensor beban, mikrokontroler ESP32, dan aplikasi monitoring berbasis web/mobile, yang terbukti efektif dalam mengukur dan mengirimkan data beban dengan tingkat akurasi yang baik (error rata-rata 1,72%, dengan kalibrasi mencapai <1%).

Penelitian ini berkontribusi pada pengembangan teknologi IoT dalam aplikasi pemantauan beban kendaraan, menawarkan solusi yang lebih efisien dan praktis dibandingkan dengan metode konvensional. Implikasi praktis dari temuan ini menunjukkan potensi besar untuk meningkatkan efisiensi operasional dalam sektor transportasi dan industri yang memerlukan pemantauan beban secara real time.

Namun, ada keterbatasan terkait jangkauan transmisi dan ketergantungan pada koneksi Wi-Fi. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengeksplorasi teknologi komunikasi alternatif dan pengoptimalan akurasi sensor untuk aplikasi industri besar. Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan wawasan penting tentang penerapan IoT dalam sistem pemantauan beban kendaraan dan membuka peluang untuk pengembangan aplikasi IoT lebih lanjut di sektor industri

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ruktiningsih and Prakoso, 'Evaluasi Keberlanjutan Jembatan Timbang Di Jawa Barat', *Universitas Soegijapranata Semarang*, vol. 4, no. 1, Mar. 2017.
- [2] S. Stawska, J. Chmielewski, M. Bacharz, K. Bacharz, and A. Nowak, 'Comparative accuracy analysis of truck weight measurement techniques', *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 2, pp. 1–20, Jan. 2021, doi: 10.3390/app11020745.
- [3] F. Alifiyah Safitri, D. Erwanto, and dan Dian Efytra Yuliana, 'Analisis Pengaruh Jumlah Load Cell Timbangan Jembatan Elektronik pada Pengujian Eksentrisitas sesuai Rekomendasi OIML R76', 2025.
- [4] T. Septiana and Z. Zaini, 'Perancangan dan Implementasi Sistem Monitoring Beban dan Kecepatan Kendaraan Menggunakan Teknologi Weigh in Motion', *JURNAL NASIONAL TEKNIK ELEKTRO*, vol. 7, no. 1, p. 60, Mar. 2018, doi: 10.25077/jnte.v7n1.512.2018.
- [5] W. Nugraha, I. D. Sidi, M. Suarjana, and E. Zulkifli, 'Pengukuran Faktor Beban Dinamis Struktur Jembatan menggunakan Bridge WIM pada jembatan bentang pendek di Indonesia', *Jurnal Teknik Sipil*, vol. 30, no. 2, pp. 209–216, Aug. 2023, doi: 10.5614/jts.2023.30.2.8.
- [6] H. Xiong and Y. Zhang, 'Feasibility study for using piezoelectric-based weigh-in-motion (WIM) system on public roadway', *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 9, no. 15, Aug. 2019, doi: 10.3390/app9153098.
- [7] T. Kawakatsu, K. Aihara, A. Takasu, T. Nagayama, and J. Adachi, 'Data-Driven Bridge Weigh-in-Motion', *IEEE Sens J*, vol. 23, no. 15, pp. 17064–17077, Aug. 2023, doi: 10.1109/JSEN.2023.3283849.
- [8] P. C. Tsai, Y. R. Jeng, and C. W. Tseng, 'A robust embedded load cell sensor for tool life prognosis and smart sawing of medium carbon steel', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 121, no. 1–2, pp. 1353–1364, Jul. 2022, doi: 10.1007/s00170-022-09377-9.

- [9] S. S. Harun, M. Y. Jinca, and A. Saleng, 'Vehicle Traffic with Over Dimensions and Over Loads in Improving Transportation Safety', *Civil Engineering and Architecture*, vol. 12, no. 6, pp. 3933–3943, Nov. 2024, doi: 10.13189/cea.2024.120613.
- [10] N. L. Darmayanti and A. D. Dwipayana, 'Ni Luh Darmayanti, Arif Devi Dwipayana Logistics Industry Readiness in Application Policy Over Dimension Overloading (ODOL) Logistics Industry Readiness in Application Policy Over Dimension Overloading (ODOL)', doi: 10.32832/astonjadro.v12i2.
- [11] J. woo Kim *et al.*, 'HIGH-PERFORMANCE HIGH-SPEED WIM FOR SUSTAINABLE ROAD LOAD MONITORING USING GIS TECHNOLOGY', *Transport Problems*, vol. 16, no. 4, pp. 149–162, 2021, doi: 10.21307/TP-2021-067.
- [12] R. Muttaqin *et al.*, 'Analysis of Law Enforcement Against Over Dimension Over Load (ODOL) Violations According to the Road Traffic and Transportation Law under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)', vol. 2, no. 02, p. 2024, 2023, [Online]. Available: <https://seaninstitute.or.id/bersinar/index.php/restorasi>
- [13] A. Mulasari, Y. Karyanto, D. Rama Insiyanda, and R. Marlia, 'Potensi Kecelakaan Kendaraan Over Dimension/Overloading (ODOL) Pada Area Tikungan Berdasarkan Persentase Berat Muatan dan Kondisi Alinyemen Horizontal Suatu Area Jalan', 2022.
- [14] Badan Pusat Statistik, *Jumlah kecelakaan, korban mati, luka berat, luka ringan, dan kerugian materi*. 2024. Accessed: Jun. 13, 2025. [Online]. Available: <https://www.bps.go.id/id/statistics-table/2/NTEzIzI=/jumlah-kecelakaan--korban-mati--luka-berat--luka-ringan--dan-kerugian-materi.html>
- [15] Kementerian Perhubungan Republik Indonesia, 'Indonesia Menuju Zero Over Dimension dan Over Load (ODOL)', Jakarta, Jun. 2024.
- [16] Edison Leo and Timotilus, 'ANALISIS PERBANDINGAN JEMBATAN PELAT CONTINUOUS SPAN BENTANG PENDEK DENGAN SISTEM KONVENSIIONAL DAN PRATEGANG', *Jurnal Mitra Teknik Sipil*, vol. 2, no. 1, pp. 115–124, 2019.
- [17] J. Montalvo, A. A. Fuentes, A. Trevino, and C. M. Tarawneh, 'Structural integrity of conventional and modified railroad bearing adapters for onboard monitoring', in *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)*, American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2014. doi: 10.1115/IMECE2014-37492.
- [18] W. Nugraha, S. Ramadhani, and G. Sukmara, 'Assessment of the accuracy of Bridge Weigh-In-Motion (B-WIM) system in Indonesia', in *Bridge Maintenance, Safety, Management, Digitalization and Sustainability - Proceedings of the 12th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS 2024*, CRC Press/Balkema, 2024, pp. 1388–1396. doi: 10.1201/9781003483755-162.
- [19] V. Kwizile, J.-S. Oh, F. Alkhatni, R. Jorge, A. Ceifetz, and J. Yassin, 'Evaluating Michigan Commercial Vehicle Enforcement Strategies and Facilities FINAL REPORT', Michigan University, 2015.
- [20] Dirlantas Polri, 'STRATEGI KORLANTAS POLRI DALAM PENEGAKAN HUKUM PELANGGARAN OVER LOAD DAN KEJAHATAN OVER DIMENSI', 2022.
- [21] Raden Roro Annisa Raisti Rahmatika, M. Sc. , Ph. D. , IPU. , ASEAN. Eng. Prof. Ir. Siti Malkhamah, and Prof. Ir. Sigit Priyant, 'Evaluasi Efektivitas Penerapan Teknologi Weigh In Motion (WIM) pada Pengawasan Truk ODOL di UPPKB', *Universitas Gadjah Mada*, 2024, Accessed: Jul. 17, 2025. [Online]. Available: <http://etd.repository.ugm.ac.id/>
- [22] A. Socha and J. Izydorczyk, 'Strain Gauge Calibration for High Speed Weight-in-Motion Station', *Sensors*, vol. 24, no. 15, Aug. 2024, doi: 10.3390/s24154845.
- [23] M. Bisták, Š. Medvecký, and S. Hrček, 'The Above-ground Weighbridge', in *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, 2017, pp. 52–57. doi: 10.1016/j.proeng.2017.06.009.
- [24] S. Das, A. Karmakar, P. Das, and B. Koley, 'Manufacture of Electronic Weighing Machine Using Load Cell', *Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE)*, vol. 14, pp. 32–37, 2019, doi: 10.9790/1676-1404013237.
- [25] V. A. Kamble, V. D. Shinde, and J. K. Kittur, 'Review on optimization of load cells', 2020, [Online]. Available: www.matjournals.com
- [26] P. Sulistyanto, O. Wahyunggoro, A. Imam, C. Jurusan, T. Elektro, and T. Informasi, 'E-31 Pengolahan Isyarat Load cell Menggunakan Metode Simple Moving Average Tingkat Dua dan Weighted Moving Average Tingkat Dua untuk Pencarian Titik Referensi', 2015.

- [27] O. S. Al-Dahiree *et al.*, 'Design and Shape Optimization of Strain Gauge Load Cell for Axial Force Measurement for Test Benches', *Sensors*, vol. 22, no. 19, Oct. 2022, doi: 10.3390/s22197508.
- [28] J. Gajda, R. Sroka, P. Burnos, and M. Daniol, 'Long-Term Assessment of the Properties of Load Sensors Applied in Weigh-in-Motion Systems', *Sensors*, vol. 25, no. 8, Apr. 2025, doi: 10.3390/s25082421.
- [29] F. Ferryanto, M. M. Akbar, S. Wicaksono, and A. I. Mahyuddin, 'Design, Manufacture, and Testing of a Low-Cost Force Platform with 3-Axis Load Cell', *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 1109, no. 1, p. 012021, Mar. 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1109/1/012021.
- [30] M. C. Agarana and E. T. Akinlabi, 'Modelling of A36 Steel Plate Dynamic Response to Uniform Partially Distributed Moving Iron Load using Differential Transform Method', in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, Sep. 2018. doi: 10.1088/1757-899X/413/1/012011.
- [31] P. Dilla Atos, 'ANALYSIS AND MODELING OF WEIGHBRIDGE CONSTRUCTION REINFORCEMENT AT PT BUKIT ASAM', 2022.
- [32] J. Aldazabal, A. Martín-Meizoso, A. Klimpel, A. Bannister, and S. Cicero, 'Mechanical and microstructural features of plasma cut edges in a 15 mm thick S460M steel plate', *Metals (Basel)*, vol. 8, no. 6, Jun. 2018, doi: 10.3390/met8060447.
- [33] N. Khalid, P. Zirwatul, N. M. Zamanhuri, F. Ahmad, and S. Baharin, 'A STUDY OF WELD DEFECTS OF GAS METAL ARC WELDING WITH DIFFERENT SHIELDING GASSES', vol. 12, no. 6, 2017, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/372992246>
- [34] Jatmoko, A. Hanifah, M. A. Pratama, and F. M. Rohimsyah, 'Study of the Effect GMAW and SMAW Welding Combination with WAAM Method', *SPECTA Journal of Technology*, vol. 7, no. 2, pp. 549–555, Aug. 2023, doi: 10.35718/specta.v7i2.938.
- [35] C. Chikwendu Okpala, 'The Design and Need for Jigs and Fixtures in Manufacturing', *Science Research*, vol. 3, no. 4, p. 213, 2015, doi: 10.11648/j.sr.20150304.19.