

Sistem Pengontrol Tekanan Berbasis *Loadcell* pada Mesin CNC *Spot Welding*

Baso Nasrullah^{1,*}, Arman², Muh.Bintang Kemal³, Fatria Pangarungan⁴

^{1,2,3,4} Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Ujung Pandang, Makassar 90245, Indonesia

*basonasrullah@poliupg.ac.id

Abstract: Resistance spot welding is widely used for metal joining in automotive manufacturing and battery-pack assembly. Joint quality is strongly affected by the interaction among welding current, welding time, and electrode force. This study aims to develop a load-cell-based electrode-force control system for a three-axis CNC spot-welding machine and evaluate force stability and its effect on joint quality using a Statistical Quality Control (SQC) approach. The system employs a 10 kg load cell integrated with an Arduino controller to provide feedback on electrode force. Experiments were conducted at eight electrode-force levels of 0.69, 0.98, 1.274, 1.568, 1.862, 2.156, 2.45, and 2.744 N, with a welding current of 200 A and welding time of 10 s. The force data were analyzed using an Individual-Moving Range (I-MR) control chart to determine the mean, moving range, Upper Control Limit (UCL), and Lower Control Limit (LCL). Joint quality was evaluated using a peel test. The results showed that all measured force values remained within the statistical control limits. The maximum peel load of 59 N was obtained at an electrode force of 2.156 N, while the peel load decreased to 39 N at 2.45 N. At 2.744 N, the welded joint failed and no valid peel-load value was obtained. These results indicate the existence of an optimum electrode force of 2.156 N under the investigated welding conditions. The load-cell-based feedback system was able to maintain relatively stable electrode force and support quality control of the spot-welding process.

Keywords: Spot welding, load cell, electrode force, SQC, I-MR, peel test, battery pack.

Abstrak: Resistance spot welding merupakan metode penyambungan logam yang banyak digunakan pada manufaktur komponen otomotif dan perakitan *battery pack*. Kualitas sambungan sangat dipengaruhi oleh interaksi antara arus, waktu pengelasan, dan gaya tekan elektroda. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem pengontrol gaya tekan berbasis *load cell* pada mesin CNC *spot welding* tiga sumbu serta mengevaluasi kestabilan gaya tekan dan pengaruhnya terhadap kualitas sambungan menggunakan pendekatan *Statistical Quality Control* (SQC). Sistem menggunakan *load cell* berkapasitas 10 kg yang terintegrasi dengan Arduino sebagai sensor dan pengendali umpan balik gaya tekan. Pengujian dilakukan pada delapan variasi gaya tekan, yaitu 0,69; 0,98; 1,274; 1,568; 1,862; 2,156; 2,45; dan 2,744 N, dengan arus 200 A dan waktu pengelasan 10 s. Data gaya tekan dianalisis menggunakan *Individual-Moving Range* (I-MR) untuk menentukan rata-rata, *moving range*, *Upper Control Limit* (UCL), dan *Lower Control Limit* (LCL). Kualitas sambungan dievaluasi menggunakan *peel test*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh data gaya tekan berada dalam batas kendali statistik. Beban kupas maksimum sebesar 59 N diperoleh pada gaya tekan 2,156 N, sedangkan pada gaya tekan 2,45 N beban kupas menurun menjadi 39 N. Pada gaya tekan 2,744 N, sambungan mengalami kegagalan sehingga beban kupas tidak dapat diperoleh. Hasil tersebut menunjukkan adanya gaya tekan optimum, yaitu 2,156 N, pada kondisi pengujian yang digunakan. Sistem umpan balik berbasis *load cell* mampu mempertahankan gaya tekan secara relatif stabil dan mendukung pengendalian kualitas proses *spot welding*.

Kata Kunci: Spot welding, load cell, gaya tekan, SQC, I-MR, peel test, battery pack.

I. PENDAHULUAN

Resistance spot welding (RSW) merupakan salah satu metode penyambungan logam yang banyak digunakan pada industri manufaktur karena memiliki waktu siklus yang singkat, mudah diotomatisasi, dan sesuai untuk produksi dengan volume tinggi. Proses ini juga banyak diterapkan pada perakitan *battery pack* kendaraan listrik, termasuk penyambungan *nickel strip* dengan terminal sel baterai. Kualitas sambungan RSW dipengaruhi oleh interaksi beberapa parameter proses, terutama arus pengelasan, waktu pengelasan, dan gaya tekan elektroda. Oleh karena itu, pengendalian parameter tersebut diperlukan untuk memperoleh sambungan dengan kualitas yang konsisten [1]–[3].

Salah satu parameter mekanik yang sangat menentukan karakteristik RSW adalah gaya tekan elektroda. Gaya tekan memengaruhi kondisi kontak antara elektroda dan benda kerja, distribusi arus, serta resistansi kontak pada daerah sambungan. Gaya yang terlalu rendah dapat menghasilkan kontak

yang tidak stabil dan meningkatkan risiko pemanasan lokal atau expulsion, sedangkan gaya yang terlalu tinggi dapat memperbesar area kontak dan menurunkan resistansi kontak sehingga panas yang dihasilkan pada daerah sambungan berkurang. Perubahan tersebut selanjutnya memengaruhi pembentukan dan ukuran weld nugget serta kekuatan mekanik sambungan [4]–[6]. Hubungan antara gaya elektroda, resistansi kontak, dan pembentukan nugget juga telah ditunjukkan melalui kajian eksperimental dan pemodelan proses RSW.

Hubungan gaya tekan dengan kualitas sambungan tidak bersifat linier karena terdapat rentang gaya optimum yang bergantung pada material dan parameter pengelasan lainnya. Penelitian Sun et al. menunjukkan bahwa pengaturan gaya elektroda secara tepat dapat meningkatkan kualitas dan weldability sambungan, sedangkan Chang dan Zhou menunjukkan bahwa peningkatan gaya elektroda dapat memperbesar radius kontak dan menurunkan densitas arus sehingga memengaruhi inisiasi serta pertumbuhan weld nugget. Penelitian Wöhner et al. juga menunjukkan bahwa gaya elektroda berpengaruh terhadap resistivitas rangkaian dan pembentukan nugget, sehingga profil gaya perlu dikendalikan sesuai kondisi proses [4], [6], [7].

Pada aplikasi battery pack, kebutuhan terhadap kestabilan proses menjadi semakin penting karena kualitas sambungan harus dipertahankan pada banyak titik pengelasan. Penelitian mengenai pengelasan otomatis battery pack menunjukkan bahwa evaluasi kualitas sambungan diperlukan untuk memastikan konsistensi hasil pengelasan, sedangkan penelitian eksperimental pada material logam menunjukkan bahwa variasi parameter proses dapat menghasilkan perbedaan karakteristik mekanik sambungan. Dengan demikian, pengendalian gaya tekan tidak cukup hanya dilakukan berdasarkan nilai set point, tetapi perlu disertai pengukuran gaya aktual selama proses berlangsung [8]–[10].

Untuk memperoleh pengukuran gaya secara langsung, load cell dapat digunakan sebagai sensor yang mengubah deformasi akibat pembebanan menjadi sinyal listrik yang dapat diproses oleh sistem kontrol. Pengukuran gaya secara langsung memungkinkan penyimpangan antara gaya aktual dan set point diketahui selama proses pengelasan sehingga dapat digunakan sebagai dasar pengendalian umpan balik. Selain pengukuran langsung, kestabilan proses juga perlu dievaluasi secara statistik untuk membedakan variasi normal dari variasi yang disebabkan oleh kondisi khusus. Pendekatan Statistical Quality Control (SQC), khususnya Individual-Moving Range (I-MR), sesuai digunakan untuk menganalisis data pengukuran individual yang diperoleh secara berurutan. Kajian mengenai pemantauan dan pengendalian RSW juga menunjukkan bahwa kombinasi sensor proses, analisis statistik, dan sistem kendali merupakan arah penting untuk meningkatkan kualitas proses secara online [1], [5], [7].

Penelitian sebelumnya di Politeknik Negeri Ujung Pandang telah menghasilkan mesin CNC spot welding tiga sumbu untuk perakitan battery pack. Namun, pengembangan mesin tersebut belum secara khusus mengintegrasikan pengukuran gaya tekan berbasis load cell, pengendalian gaya secara umpan balik, dan evaluasi kestabilan gaya menggunakan SQC dalam satu sistem. Penelitian terdahulu juga lebih banyak membahas pengaruh parameter pengelasan terhadap weldability, ukuran nugget, atau kekuatan sambungan secara terpisah. Dengan demikian, research gap penelitian ini terletak pada integrasi pengukuran gaya tekan secara langsung, pengendalian gaya berbasis umpan balik, analisis kestabilan menggunakan I-MR, dan evaluasi kualitas sambungan melalui peel test pada mesin CNC spot welding untuk aplikasi battery pack.

Berdasarkan research gap tersebut, penelitian ini bertujuan (1) mengembangkan sistem pengontrol gaya tekan berbasis load cell pada mesin CNC spot welding tiga sumbu, (2) mengevaluasi kestabilan gaya tekan menggunakan pendekatan SQC dengan metode I-MR, dan (3) menganalisis hubungan antara gaya tekan dan beban/gaya kupas sambungan untuk menentukan gaya tekan optimum pada kondisi pengelasan yang digunakan. Kontribusi penelitian ini adalah menghasilkan pendekatan terintegrasi antara pengukuran gaya aktual, pengendalian umpan balik, evaluasi kestabilan proses secara statistik, dan pengujian mekanik sambungan, sehingga penentuan kondisi optimum tidak hanya didasarkan pada kemampuan sistem mencapai set point, tetapi juga pada kestabilan proses dan performa sambungan.

II. METODE PENELITIAN

A. Lokasi Dan Waktu penelitian

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Komputer Jurusan Teknik Mesin, Kampus II Politeknik Negeri Ujung Pandang, Makassar. Kegiatan penelitian dilaksanakan pada September 2024–Agustus 2025. Penelitian meliputi modifikasi mesin CNC *spot welding* tiga sumbu, integrasi sensor *load cell*, pengembangan sistem pengendalian gaya tekan, kalibrasi sensor, pengambilan data gaya tekan, dan pengujian kualitas sambungan.

B. Alat dan Bahan

Peralatan dan bahan yang digunakan dalam penelitian terdiri atas a) mesin CNC *spot welding* tiga sumbu sebagai sistem utama pengelasan, b) Arduino Uno berbasis ATmega328P sebagai pengendali, c) *load cell* berkapasitas 10 kg sebagai sensor gaya tekan, d) modul penguat/pengolah sinyal *load cell*, e) motor NEMA 17 sebagai aktuator mekanisme penekan, f) laptop/PC sebagai perangkat pemrograman dan pengolahan data, g) avometer, solder, tang, kunci pas, kunci L, obeng, kikir, dan jangka sorong sebagai peralatan pendukung, serta h) strip nikel, sel baterai lithium-ion, kabel, baut, mur, dan bahan pendukung lainnya sebagai bahan pengujian. Spesifikasi utama komponen yang digunakan disajikan pada Tabel 1. Data tersebut berasal dari naskah awal dan telah dinarasikan sesuai permintaan reviewer.

Tabel 1. Alat dan Bahan yang digunakan

No	Alat	No	Bahan	Spesifikasi bahan
1	CNC 3D Printing	1	Arduino Uno	5v 14/6
2	Solder	2	Loadcell	10 Kg
3	Obeng	3	Modul Loadcell	10-80 SPS
4	Kikir	4	Filamen PLA	47,8 Mpa 1,24g/Cm ²
5	Avometer	5	Baut M5	M5
6	Laptop/PC	6	Mur M5	M5
7	Jangka Sorong	7	Kabel Dupont	1 meter
8	Tang	8	Baterai Litium-ion	3,7v 3000mAh
9	Kunci Pas	9	Timah solder	-
10	Kunci L	10	Strip nikel	Tebal 0,12mm

C. Sistem Pengukuran dan Pengendalian Gaya Tekan

Sistem pengendalian terdiri atas *set point*, *load cell*, Arduino, aktuator motor NEMA 17, mekanisme penekan, dan penyimpanan data. *Load cell* ditempatkan pada bagian mekanisme penekan untuk mengukur gaya aktual yang diterima elektroda. Sinyal dari sensor dibaca oleh Arduino dan dibandingkan dengan nilai *set point*. Selisih antara gaya aktual dan gaya target digunakan sebagai dasar pengendalian posisi aktuator.

Pada proses pengelasan, *load cell* berfungsi sebagai elemen umpan balik. Data gaya aktual direkam selama proses sehingga kestabilan gaya dapat dievaluasi menggunakan SQC. Penggunaan sensor gaya secara langsung pada sistem RSW relevan karena gaya elektroda merupakan salah satu parameter utama yang memengaruhi kondisi kontak, pembentukan *nugget*, dan kualitas sambungan.

D. Parameter Pengelasan

Pengujian dilakukan pada delapan variasi gaya tekan elektroda, yaitu:

0,69; 0,98; 1,274; 1,568; 1,862; 2,156; 2,45; 2,744 N

Parameter arus dan waktu pengelasan dijaga konstan, yaitu:

- arus pengelasan = 200 A;
- waktu pengelasan = 10.000 ms atau 10 s;
- material = strip nikel tebal 0,12 mm;
- diameter elektroda = sesuai kondisi aktual mesin.

Naskah awal mencantumkan diameter elektroda 0,5 mm. Namun, angka tekanan MPa pada Tabel 11 justru ekuivalen dengan luas kontak sekitar 0,503 mm², yang mendekati diameter 0,8 mm. Karena itu, diameter elektroda harus diverifikasi sebelum naskah final dikirim.

E. Prosedur Pengambilan Data

Prosedur pengambilan data dilakukan sebagai berikut:

1. Mesin CNC *spot welding* dipersiapkan dan seluruh komponen sistem kontrol diperiksa.
2. *Load cell* dikalibrasi menggunakan beban yang telah diketahui.
3. Nilai faktor kalibrasi dimasukkan ke program Arduino.
4. Sistem dijalankan tanpa beban untuk memastikan pembacaan awal berada pada kondisi stabil.
5. Nilai gaya tekan ditetapkan sesuai *set point* pengujian.
6. Sistem kontrol menggerakkan aktuator hingga gaya aktual mendekati nilai target.
7. Setiap variasi gaya tekan diuji sebanyak 10 pengamatan.
8. Setiap proses pengelasan dilakukan dengan arus 200 A dan waktu 10 s.
9. Data gaya aktual direkam untuk menentukan rata-rata, *moving range*, UCL, dan LCL.
10. Spesimen hasil pengelasan selanjutnya diuji menggunakan peel test.
11. Beban maksimum saat spesimen mengalami pengupasan dicatat sebagai beban kupas (N).
12. Hubungan antara gaya tekan dan beban kupas dianalisis untuk menentukan kondisi optimum.

F. Kalibrasi Load Cell

Sebelum digunakan untuk pengukuran gaya tekan, *load cell* dikalibrasi menggunakan beberapa beban yang telah diketahui massanya. Hasil perbandingan pembacaan sebelum dan sesudah proses kalibrasi ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil kalibrasi pembacaan load cell

Benda uji	Massa aktual (g)	Sebelum kalibrasi (g)	Setelah kalibrasi (g)	Error setelah kalibrasi (g)
1	290	66352	291,35	1,35
2	560	128128	561,21	1,21
3	602	137737	603,07	1,07

Tabel 2 menunjukkan bahwa pembacaan *load cell* setelah kalibrasi lebih mendekati massa aktual dibandingkan pembacaan sebelum kalibrasi. Selisih maksimum setelah kalibrasi sebesar 1,35 g, sehingga sensor dapat digunakan untuk pengukuran gaya tekan pada pengujian berikutnya.

G. Metode Analisis Data

1. Rata-rata gaya tekan

Nilai rata-rata gaya tekan dihitung menggunakan:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

dengan $\bar{x}$ adalah rata-rata gaya tekan, x_i adalah hasil pengukuran ke- i , dan n adalah jumlah pengamatan.

2. Moving Range

Moving range dihitung dari selisih absolut antara dua pengukuran berurutan:

$$MR_i = |x_i - x_{i-1}|$$

Rata-rata moving range dihitung dengan:

$$\overline{MR} = \frac{\sum MR_i}{n - 1}$$

3. Batas kendali I-MR

Batas kendali atas dan bawah untuk *Individual Chart* dihitung menggunakan:

$$UCL = \bar{x} + 2,66 \bar{MR}$$

$$LCL = \bar{x} - 2,66 \bar{MR}$$

Konstanta 2,66 digunakan untuk *Individuals Chart* berdasarkan pendekatan I-MR. Penggunaan *control chart* untuk mengevaluasi kestabilan proses sejalan dengan prinsip pengendalian statistik proses pada ISO 7870-2:2023.

4. Tekanan kontak elektroda

Jika tekanan kontak ingin dilaporkan dalam MPa, perhitungannya harus menggunakan:

$$P = \frac{F}{A}$$

dengan:

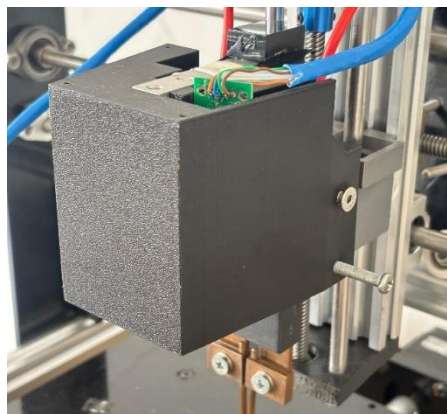
$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

P adalah tekanan kontak (MPa), F adalah gaya elektroda (N), dan A adalah luas kontak elektroda (mm²).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Modifikasi CNC Spot Welding 3-Axis

Hasil modifikasi mesin CNC spot welding menunjukkan bahwa sistem pengontrol gaya tekan telah berhasil diintegrasikan dengan mekanisme mesin. Sistem terdiri atasudukan load cell, sensor gaya, Arduino sebagai pengendali, dan motor NEMA 17 sebagai aktuator mekanisme penekan. Integrasi tersebut memungkinkan gaya tekan elektroda diukur secara langsung dan digunakan sebagai sinyal umpan balik selama proses pengelasan



Gambar 2. Hasil Modifikasi Sistem Pengontrol Tekanan

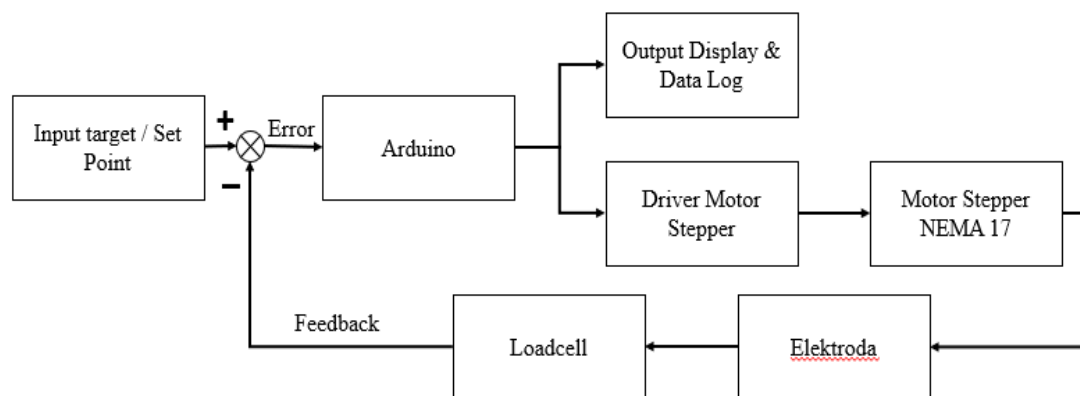
Pada sistem ini, nilai set point gaya tekan dibandingkan dengan gaya aktual yang diukur oleh load cell. Selisih antara kedua nilai tersebut diproses oleh Arduino untuk mengendalikan posisi mekanisme penekan melalui motor NEMA 17. Selama proses pengelasan, load cell terus memberikan umpan balik sehingga perubahan gaya dapat dipantau dan dikoreksi. Data pengukuran juga ditampilkan secara real-time dan disimpan sebagai data pengujian untuk analisis kestabilan proses.

Tabel 3. Spesifikasi alat dan fungsi

No	Komponen alat utama	Spesifikasi	Fungsi
1	<i>Bracket</i>	900 x 800 x 850 mm	Sebagai dudukan untuk <i>Loadcell</i>
2	<i>Loadcell</i>	Kapasitas maks 10 Kg / 98 N	Mengubah tekanan menjadi sinyal listrik
3	Motor NEMA 17	Torsi 44 N.cm	Sebagai penggerak dan sumber gaya tekan pengelasan
4	<i>Arduino</i>	ATPMega328P	Sebagai mikrokontroler atau pengendali proses pengelasan

Berdasarkan Tabel 3, load cell merupakan elemen pengukuran utama karena menghasilkan data gaya aktual yang digunakan sebagai umpan balik. Arduino berfungsi sebagai pengendali, sedangkan motor NEMA 17 menggerakkan mekanisme penekan. Dengan konfigurasi tersebut, sistem dapat mengevaluasi kestabilan gaya tekan selama proses pengelasan.

Hubungan antara set point, pengukuran load cell, pengendali Arduino, aktuator, dan penyimpanan data ditunjukkan pada Gambar 3.

**Gambar 3. Diagram blok sistem pengendalian**

Proses dimulai dari set point gaya tekan yang ditentukan pengguna. Nilai tersebut dibandingkan dengan gaya aktual hasil pembacaan load cell. Selisihnya diproses Arduino untuk menghasilkan sinyal kendali motor NEMA 17. Data gaya aktual kemudian dikirim kembali sebagai umpan balik dan direkam sebagai data pengujian. Konfigurasi ini memungkinkan sistem dievaluasi berdasarkan kestabilan dan kedekatan gaya aktual terhadap set point. Parameter pengelasan yang digunakan dalam seluruh pengujian disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Parameter pengelasan dan variasi gaya tekan.

Parameter	Nilai
Gaya tekan target	0,69; 0,98; 1,274; 1,568; 1,862; 2,156; 2,45; 2,744 N
Waktu pengelasan	10.000 ms (10 s)
Arus listrik	200 A
Diameter elektroda	0,5 mm

Delapan variasi gaya tekan digunakan untuk mengevaluasi kestabilan sistem dan hubungan gaya tekan dengan kualitas sambungan. Arus, waktu pengelasan, dan diameter elektroda dijaga tetap sehingga pembahasan perubahan hasil sambungan difokuskan pada variasi gaya tekan.

B. Hasil Pengujian Kestabilan Daya Tekan

Data gaya tekan hasil pengukuran dianalisis menggunakan metode Individual-Moving Range (I-MR) untuk memperoleh rata-rata, moving range (MR), nilai minimum dan maksimum, range, serta

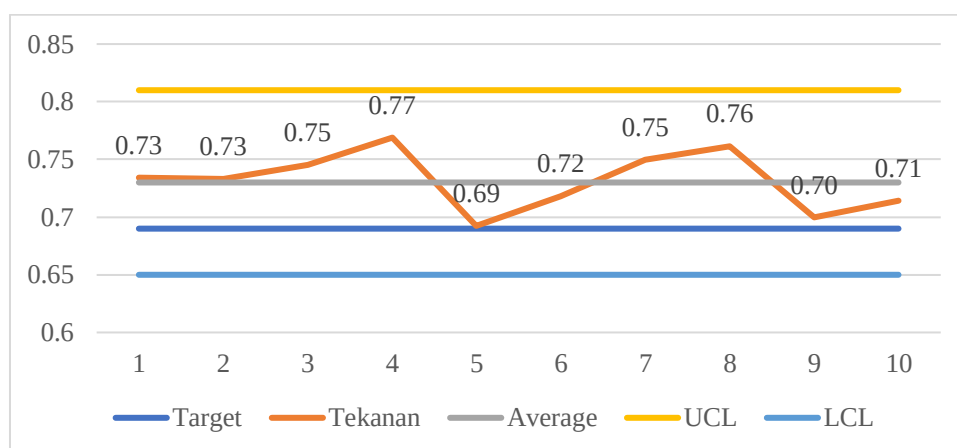
batas kendali atas (UCL) dan batas kendali bawah (LCL). Hasil perhitungan pada setiap variasi gaya tekan disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil analisis kestabilan gaya tekan menggunakan I-MR.

Gaya target (N)	Rata-rata (N)	Rata-rata MR (N)	Minimum (N)	Maksimum (N)	Range (N)	UCL (N)	LCL (N)	Status
0,690	0,731	0,029	0,69	0,77	0,08	0,808	0,654	Terkendali
0,980	1,049	0,044	0,98	1,10	0,12	1,167	0,931	Terkendali
1,274	1,361	0,042	1,28	1,42	0,14	1,473	1,249	Terkendali
1,568	1,666	0,087	1,57	1,80	0,23	1,897	1,435	Terkendali
1,862	2,039	0,130	1,89	2,20	0,31	2,385	1,693	Terkendali
2,156	2,287	0,122	2,16	2,45	0,29	2,612	1,962	Terkendali
2,450	2,513	0,069	2,45	2,60	0,15	2,696	2,330	Terkendali
2,744	2,914	0,091	2,82	3,04	0,22	3,156	2,672	Terkendali

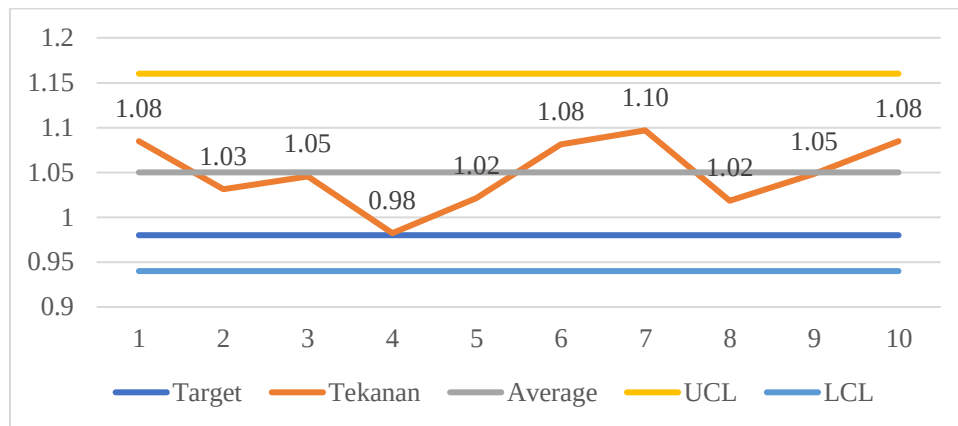
Berdasarkan Tabel 5, seluruh kelompok pengujian memiliki status terkendali karena nilai pengamatan berada dalam rentang UCL dan LCL. Hasil ini menunjukkan bahwa variasi gaya tekan yang muncul selama pengujian tidak menunjukkan penyimpangan statistik di luar batas kendali yang telah dihitung. Dengan demikian, sistem pengukuran dan pengendalian mampu mempertahankan gaya tekan pada rentang yang relatif stabil.

Meskipun seluruh proses terkendali, nilai rata-rata aktual cenderung sedikit lebih tinggi daripada set point. Perbedaan terbesar terjadi pada target 1,862 N dengan rata-rata aktual 2,039 N, atau sekitar 9,51% di atas target. Temuan ini penting karena kestabilan statistik tidak identik dengan akurasi terhadap nilai target. Oleh sebab itu, evaluasi sistem perlu mempertimbangkan kestabilan proses sekaligus deviasi rata-rata terhadap set point.



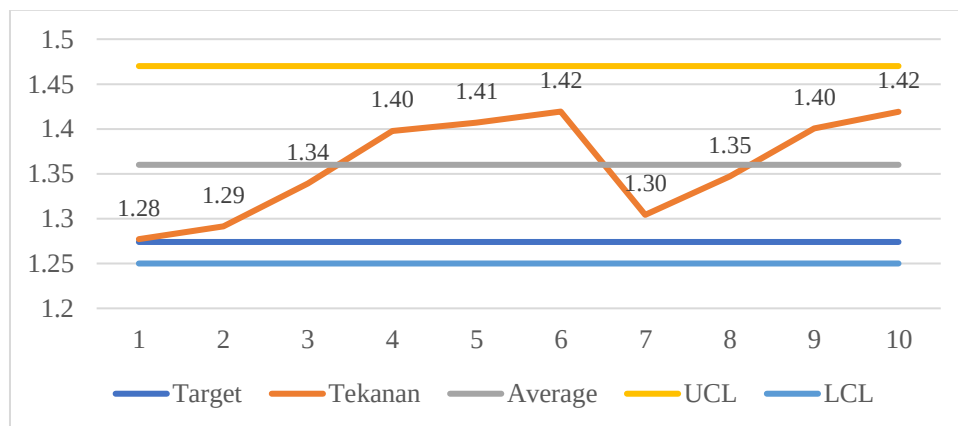
Gambar 4. Individual chart pengujian gaya tekan pada target 0,69 N.

Individual chart pada Gambar 4 menunjukkan pola pengukuran gaya tekan pada target 0,69 N. Seluruh titik pengamatan berada di dalam batas kendali yang ditentukan, sehingga tidak terlihat indikasi titik yang keluar dari batas kendali pada kondisi tersebut.



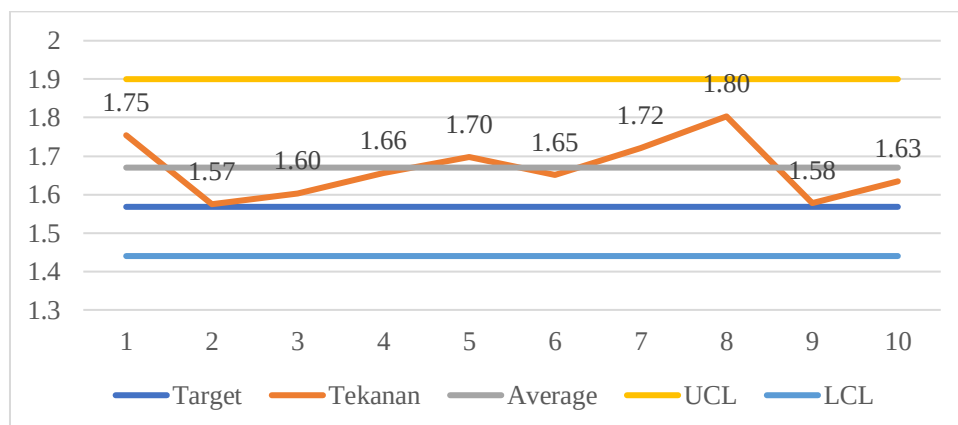
Gambar 5. Individual chart pengujian gaya tekan pada target 0,98 N.

Individual chart pada Gambar 5 menunjukkan pola pengukuran gaya tekan pada target 0,98 N. Seluruh titik pengamatan berada di dalam batas kendali yang ditentukan, sehingga tidak terlihat indikasi titik yang keluar dari batas kendali pada kondisi tersebut.



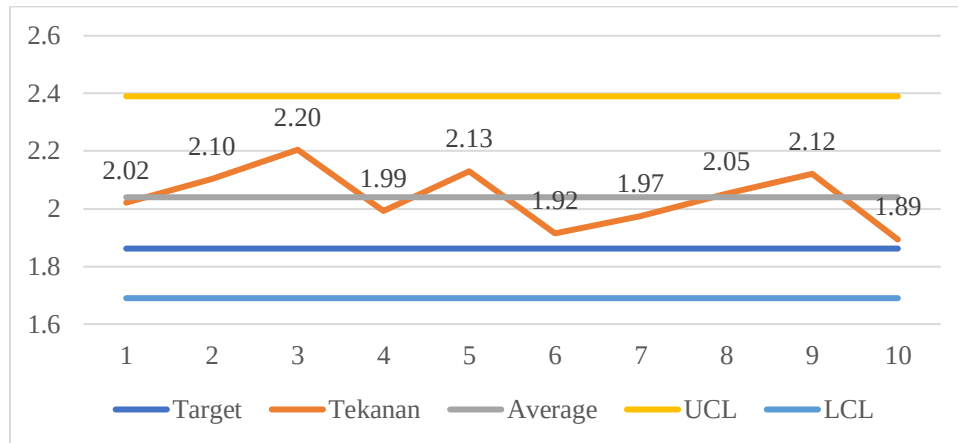
Gambar 6. Individual chart pengujian gaya tekan pada target 1,274 N.

Individual chart pada Gambar 6 menunjukkan pola pengukuran gaya tekan pada target 1,274 N. Seluruh titik pengamatan berada di dalam batas kendali yang ditentukan, sehingga tidak terlihat indikasi titik yang keluar dari batas kendali pada kondisi tersebut.



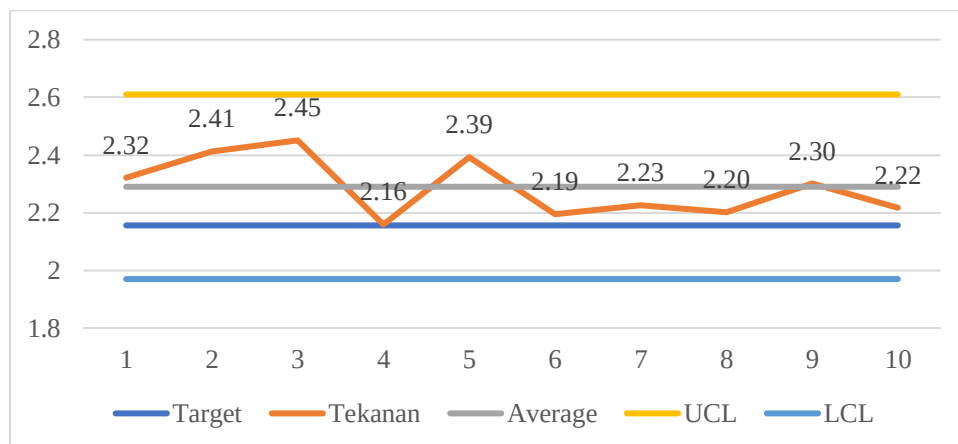
Gambar 7. Individual chart pengujian gaya tekan pada target 1,568 N.

Individual chart pada Gambar 7 menunjukkan pola pengukuran gaya tekan pada target 1,568 N. Seluruh titik pengamatan berada di dalam batas kendali yang ditentukan, sehingga tidak terlihat indikasi titik yang keluar dari batas kendali pada kondisi tersebut.



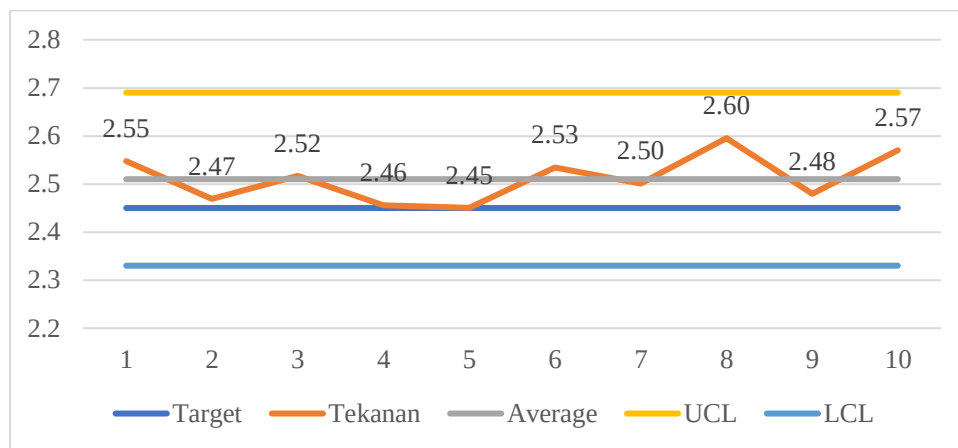
Gambar 8. Individual chart pengujian gaya tekan pada target 1,862 N.

Individual chart pada Gambar 8 menunjukkan pola pengukuran gaya tekan pada target 1,862 N. Seluruh titik pengamatan berada di dalam batas kendali yang ditentukan, sehingga tidak terlihat indikasi titik yang keluar dari batas kendali pada kondisi tersebut.



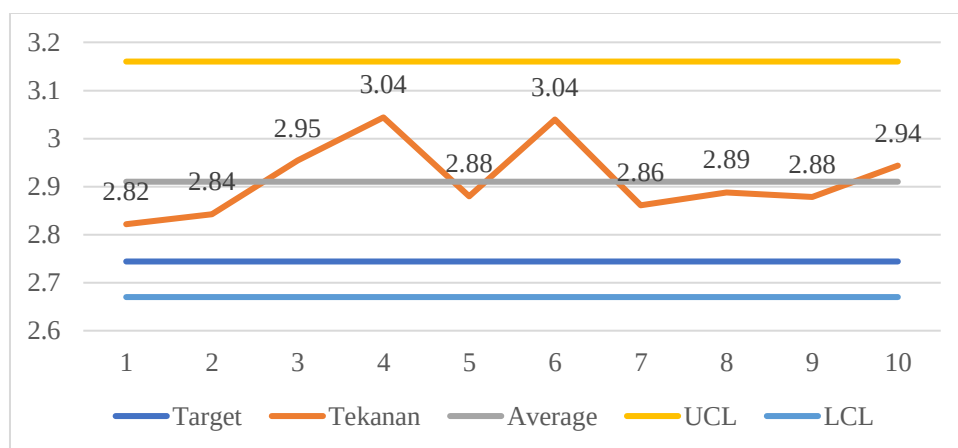
Gambar 9. Individual chart pengujian gaya tekan pada target 2,156 N.

Individual chart pada Gambar 9 menunjukkan pola pengukuran gaya tekan pada target 2,156 N. Seluruh titik pengamatan berada di dalam batas kendali yang ditentukan, sehingga tidak terlihat indikasi titik yang keluar dari batas kendali pada kondisi tersebut.



Gambar 10. Individual chart pengujian gaya tekan pada target 2,45 N.

Individual chart pada Gambar 10 menunjukkan pola pengukuran gaya tekan pada target 2,45 N. Seluruh titik pengamatan berada di dalam batas kendali yang ditentukan, sehingga tidak terlihat indikasi titik yang keluar dari batas kendali pada kondisi tersebut.



Gambar 11. Individual chart pengujian gaya tekan pada target 2,744 N.

Individual chart pada Gambar 11 menunjukkan pola pengukuran gaya tekan pada target 2,744 N. Seluruh titik pengamatan berada di dalam batas kendali yang ditentukan, sehingga tidak terlihat indikasi titik yang keluar dari batas kendali pada kondisi tersebut.

Pada pengujian target 2,744 N, nilai maksimum sebesar 3,04 N diperoleh pada pengamatan ke-4 dan ke-6, sedangkan nilai minimum sebesar 2,82 N diperoleh pada pengamatan pertama. Range sebesar 0,22 N menunjukkan variasi yang relatif kecil dibandingkan nilai rata-ratanya sebesar 2,914 N. Seluruh pengamatan tetap berada antara UCL 3,156 N dan LCL 2,672 N. Hasil tersebut memperkuat bahwa sistem dapat mempertahankan kestabilan gaya meskipun rata-rata aktual berada di atas target.

C. Hasil Uji Kupas Sambungan Las

Untuk mengevaluasi kualitas mekanik sambungan pada setiap variasi gaya tekan, dilakukan pengujian kupas (peel test). Istilah yang digunakan pada bagian ini adalah beban/gaya kupas karena parameter eksperimen yang tersedia berupa gaya maksimum yang diterima sambungan, bukan uji tarik konvensional. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil uji kupas sambungan las pada variasi gaya tekan.

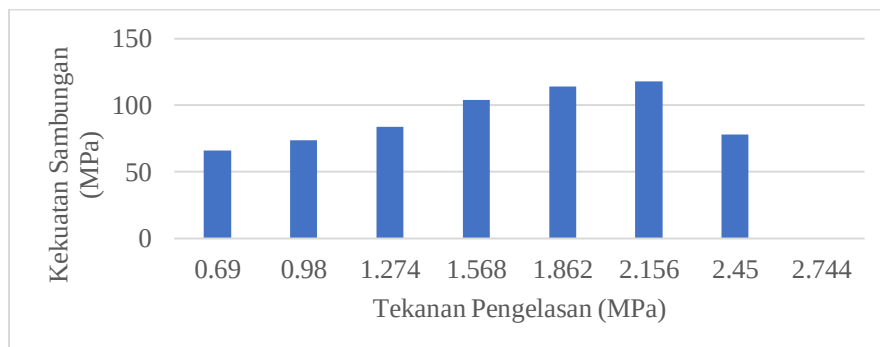
Gaya tekan target (N)	Tekanan pengelasan (MPa)	Beban/Gaya kupas maksimum (N)	Kekuatan sambungan uji kupas (MPa)
0,69	1,37	33	66
0,98	1,96	37	74
1,274	2,55	42	84
1,568	3,14	52	104
1,862	3,72	57	114
2,156	4,31	59	118
2,45	4,90	39	78
2,744	5,49	—	—

Berdasarkan Tabel 6, beban/gaya kupas meningkat dari 33 N pada gaya tekan 0,69 N menjadi 59 N pada 2,156 N. Setelah melewati kondisi tersebut, beban kupas menurun menjadi 39 N pada 2,45 N, sedangkan pada 2,744 N sambungan mengalami kegagalan sehingga beban kupas tidak diperoleh. Pola ini menunjukkan bahwa peningkatan gaya tekan tidak menghasilkan peningkatan kualitas sambungan secara linier dan terdapat kondisi optimum pada rentang pengujian.

Nilai tekanan pengelasan dan kekuatan sambungan dalam MPa pada Tabel 6 dipertahankan sesuai data pada naskah sumber. Namun, dasar perhitungan luas kontak yang digunakan untuk mengonversi gaya menjadi MPa perlu dijelaskan pada bagian Metode agar nilai 4,31 MPa dan 118 MPa dapat direplikasi. Oleh karena itu, indikator eksperimen yang paling langsung digunakan untuk menentukan kondisi optimum adalah beban/gaya kupas maksimum sebesar 59 N.

D. Hubungan Gaya Tekan terhadap Beban/Gaya Kupas

Hubungan antara gaya tekan elektroda dan beban/gaya kupas maksimum disajikan pada Gambar 12. Grafik ini digunakan untuk memperlihatkan kecenderungan perubahan kualitas mekanik sambungan terhadap variasi gaya tekan.



Gambar 12. Hubungan gaya tekan elektroda terhadap beban/gaya kupas maksimum sambungan las.

Sumbu X pada grafik harus diberi label Gaya Tekan Elektroda (N), sedangkan sumbu Y diberi label Beban/Gaya Kupas Maksimum (N). Berdasarkan data pengujian, beban kupas meningkat dari 33 N pada 0,69 N hingga mencapai 59 N pada 2,156 N. Setelah itu, beban kupas turun menjadi 39 N pada 2,45 N dan tidak diperoleh nilai pada 2,744 N karena sambungan mengalami kegagalan.

Kecenderungan tersebut menunjukkan adanya rentang gaya tekan optimum. Pada gaya tekan yang lebih rendah, kondisi kontak elektroda dan benda kerja belum menghasilkan kondisi proses yang optimal. Peningkatan gaya tekan sampai 2,156 N menghasilkan peningkatan beban kupas. Namun, gaya tekan yang lebih tinggi dapat memperbesar area kontak dan menurunkan resistansi kontak, sehingga panas yang dihasilkan pada zona sambungan dapat berkurang ketika arus dan waktu pengelasan dipertahankan konstan. Mekanisme ini dapat menjelaskan penurunan beban kupas setelah titik optimum.

E. Analisis Dampak Gaya Tekan terhadap Proses Pengelasan

Pada resistance spot welding, energi panas dapat dinyatakan secara konseptual dengan hubungan $Q = I^2Rt$, dengan Q sebagai energi panas, I sebagai arus, R sebagai resistansi, dan t sebagai waktu pengelasan. Dalam penelitian ini arus 200 A dan waktu pengelasan 10 s dipertahankan konstan. Oleh karena itu, perubahan gaya tekan terutama dibahas melalui pengaruhnya terhadap kondisi kontak dan resistansi kontak pada daerah elektroda dan benda kerja.

Gaya tekan yang terlalu rendah dapat menghasilkan kontak yang kurang stabil dan resistansi kontak yang relatif tinggi. Kondisi tersebut dapat meningkatkan pemanasan lokal pada daerah kontak dan berpotensi menimbulkan percikan atau pembentukan weld nugget yang tidak optimal. Sebaliknya, gaya tekan yang terlalu tinggi meningkatkan luas kontak dan dapat menurunkan resistansi kontak. Jika panas yang terbentuk di zona sambungan menjadi tidak mencukupi, pembentukan nugget dapat berkurang dan kualitas sambungan menurun. Dengan demikian, hubungan gaya tekan dan kualitas sambungan memiliki karakteristik optimum, bukan hubungan linier.

Hasil penelitian memperlihatkan bahwa kondisi optimum terjadi pada gaya tekan 2,156 N dengan beban/gaya kupas maksimum 59 N. Pada kondisi tersebut proses berada dalam batas kendali statistik dan sambungan menghasilkan nilai beban kupas tertinggi dari seluruh variasi yang diuji. Hasil ini memperkuat pentingnya pengendalian gaya tekan karena kestabilan gaya tidak hanya berkaitan dengan konsistensi mekanisme, tetapi juga dengan kemampuan mempertahankan kondisi proses yang mendukung pembentukan sambungan.

F. Pembahasan dan Keterkaitan dengan Penelitian Sebelumnya

Kecenderungan peningkatan kekuatan sambungan hingga suatu gaya tekan optimum kemudian menurun pada gaya yang lebih tinggi sejalan dengan penelitian terdahulu yang dilaporkan dalam naskah, yaitu penelitian Mohammad Hossein dkk. yang menunjukkan bahwa gaya tarik geser meningkat hingga tekanan optimum dan kemudian menurun setelah tekanan tersebut terlampaui akibat perubahan ukuran weld nugget. Temuan penelitian ini memperlihatkan pola yang serupa, yaitu beban/gaya kupas meningkat sampai 2,156 N kemudian menurun pada 2,45 N.

Hasil penelitian juga konsisten dengan penelitian M. Wöhner dkk. yang membahas sinking displacement elektroda dan kaitannya dengan kondisi proses pengelasan serta potensi terbentuknya spatter ketika perpindahan elektroda melebihi batas tertentu. Dalam konteks penelitian ini, hasil tersebut mendukung perlunya pengendalian gaya tekan agar kondisi kontak elektroda tetap berada pada rentang yang sesuai.

Dengan demikian, kontribusi utama penelitian ini bukan sekadar menunjukkan bahwa gaya tekan dapat dikendalikan, tetapi juga memperlihatkan keterkaitan antara kestabilan gaya tekan berbasis load cell, evaluasi statistik I-MR, dan kualitas sambungan yang dinilai melalui beban/gaya kupas. Pada kondisi eksperimen yang digunakan, 2,156 N merupakan titik yang memberikan beban kupas maksimum sekaligus tetap berada dalam kondisi proses yang terkendali.

Catatan penyuntingan reviewer: seluruh istilah 'uji tarik pengelasan', 'hasil uji tarik', dan 'Grafik 9' perlu diganti secara konsisten menjadi 'uji kupas (peel test)', 'beban/gaya kupas maksimum', dan 'Gambar 12' atau nomor gambar sesuai urutan akhir naskah. Penamaan grafik harus menggunakan judul gambar dan sumbu X-Y yang lengkap. Jika nomor gambar asli berbeda setelah layout jurnal, penomoran harus disesuaikan secara otomatis pada naskah final.

IV. KESIMPULAN

Sistem pengontrol gaya tekan berbasis *load cell*, Arduino, dan motor NEMA 17 berhasil diimplementasikan pada mesin CNC *spot welding* tiga sumbu. Hasil analisis *Individual-Moving Range* (I-MR) menunjukkan bahwa seluruh data pengukuran berada dalam batas kendali statistik, sehingga proses pengendalian gaya tekan dapat dinyatakan stabil.

Hasil uji kupas (*peel test*) menunjukkan bahwa beban/gaya kupas meningkat hingga maksimum 59 N pada gaya tekan 2,156 N, kemudian menurun pada gaya tekan yang lebih tinggi. Dengan demikian,

2,156 N ditetapkan sebagai gaya tekan optimum pada parameter pengelasan yang digunakan dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. Zhou and P. Yao, "Overview of recent advances in process analysis and quality control in resistance spot welding," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 124, pp. 170–198, 2019.
- [2] N. T. Williams and J. D. Parker, "Review of resistance spot welding of steel sheets Part 1: Modelling and control of weld nugget formation," *Materials Science and Technology*, vol. 20, no. 7, 2004.
- [3] H. T. Sun, X. M. Lai, Y. S. Zhang, and J. Shen, "Effect of variable electrode force on weld quality in resistance spot welding," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 12, no. 8, pp. 718–724, 2007.
- [4] B. H. Chang and Y. Zhou, "Numerical study on the effect of electrode force in small-scale resistance spot welding," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 139, no. 1–3, pp. 635–641, 2003.
- [5] H. Ma, G. Qin, Y. Geng, F. Li, B. Wang, and X. Meng, "Review on techniques for on-line monitoring of resistance spot welding process," *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013.
- [6] M. Hossein *et al.*, "Resistance spot weldability of Fe66Cr16.5Ni14.1Si3.4 advanced high strength steel using D-optimal design of experiment method," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 25, pp. 5615–5632, 2023. Data bibliografis ini berasal dari daftar pustaka artikel Anda.
- [7] M. Wöhner *et al.*, "Resistance spot welding with variable electrode force—development and benefit of a force profile to extend the weldability of 22MnB5+AS150," *Welding in the World*, vol. 65, pp. 105–117, 2021.
- [8] R. Szymon and F. Robert, "Quality Analysis of Welds Made with an Automatic Battery Pack Spot Welding," *Elektronika ir Elektrotechnika*, vol. 29, no. 3, 2023.
- [9] P. D. Setyawan *et al.*, "Karakterisasi Kekuatan Geser dan Struktur Mikro Hasil Spot Welding Pelat Baja Karbon Rendah," *Energy, Materials and Product Design*, vol. 3, no. 2, pp. 198–206, 2024.
- [10] F. Nurul *et al.*, "Pengaruh Tekanan Terhadap Umur Elektroda Pada Proses Las Titik Untuk Material Flow Through Heater," *VOCATECH: Vocational Education and Technology Journal*, vol. 7, no. 2, pp. 202–211, 2025.