

Kapabilitas Proses Nut Welding dengan Pendekatan Confidence Interval

Muhammad Romdhoni*¹, Paduloh²

¹Teknik Industri, Universitas Buana Perjuangan Karawang
Jl. HS. Ronggowaluyo, Telukjambe Timur, Karawang, Jawa Barat, Indonesia
e-mail: paduloh@dsn.ubharajaya.ac.id

ABSTRACT

Effective process control is critical in automotive manufacturing, particularly in processes with one-sided specification characteristics. Process control that focuses solely on the minimum torque limit may lead to visual defects due to excessive parameters. This study aims to determine an applicable statistical upper limit for the process by integrating torque performance and visual quality as decision-making criteria. An experimental case study approach was employed on a process using a stationary machine. The research consisted of two stages: parameter exploration through current variation and a confirmation stage using 30 samples at the selected parameter. Data were analyzed using line charts, mean torque values, one-sided process capability analysis, and a approach to establish an operational statistical upper limit. The results indicate that increasing current improves torque; however, excessive current causes visual defects despite meeting the minimum torque specification. The proposed framework enhances process stability and reduces visual defects, although it is limited by material scope and short-term data.

Keywords : *Process Capability Analysis, One-Sided Specification, Statistical Upper Limit, Confidence Interval*

ABSTRAK

Pengendalian proses yang efektif sangat penting pada proses di industri otomotif yang memiliki karakteristik spesifikasi satu sisi. Fokus pengendalian yang hanya mengacu pada batas minimum torsi berpotensi menimbulkan cacat visual akibat parameter pengelasan yang berlebihan. Penelitian ini bertujuan menentukan batas atas statistik proses yang aplikatif dengan mempertimbangkan kinerja torsi dan kualitas visual secara simultan. Penelitian dilakukan menggunakan pendekatan studi kasus eksperimental pada proses *nut welding* dengan mesin stationary. Metode penelitian terdiri atas fase eksplorasi parameter melalui variasi arus pengelasan dan fase konfirmasi menggunakan 30 sampel pada parameter terpilih. Data dianalisis menggunakan grafik garis, nilai rata-rata torsi, analisis kapabilitas proses satu sisi, serta pendekatan *confidence interval* untuk menetapkan batas atas statistik operasional. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan arus meningkatkan torsi, namun arus berlebih memicu cacat visual meskipun torsi memenuhi spesifikasi. Kerangka yang diusulkan mampu meningkatkan stabilitas proses dan meminimalkan cacat visual, dengan keterbatasan pada ruang lingkup material dan durasi data.

Kata Kunci: *Statistical Process Control, One-Sided Specification, Confidence Interval, Nut Welding, Torque, Capability*

PENDAHULUAN

Industri manufaktur modern menuntut proses produksi yang tidak hanya mampu memenuhi spesifikasi teknis, tetapi juga konsisten dan terkendali untuk menjamin kualitas produk secara berkelanjutan. Dalam industri otomotif, proses penyambungan logam

seperti *nut welding* memegang peranan penting karena berhubungan langsung dengan kekuatan struktural dan fungsi perakitan komponen. Ketidakstabilan proses *nut welding* dapat menyebabkan berbagai permasalahan kualitas, mulai dari kekuatan torsi yang tidak memenuhi persyaratan minimum hingga cacat visual seperti gosong, pelelehan material,

deformasi lokal, serta potensi korosi akibat perubahan sifat metalurgi. Pada perusahaan yang menjadi objek penelitian ini, permasalahan kualitas *nut welding* tidak hanya berdampak pada peningkatan rework dan scrap, tetapi juga berisiko menurunkan keandalan produk akhir. Kondisi tersebut menegaskan urgensi pengendalian proses yang lebih presisi, khususnya pada proses kritis dengan toleransi kualitas yang sempit.

Penerapan *Statistical Process Control* (SPC) secara luas telah digunakan untuk memonitor dan meningkatkan stabilitas proses manufaktur. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa peta kendali dan analisis kapabilitas proses efektif dalam mendeteksi variasi proses dan mencegah produk cacat. Namun, dalam praktik industri, implementasi SPC sering disesuaikan dengan keterbatasan data dan kebutuhan operasional perusahaan. Pada perusahaan yang diteliti, data produksi rutin dengan ukuran sampel besar belum tersedia secara konsisten, sehingga evaluasi statistik awal dilakukan dengan pengambilan 30 sampel (N30) yang digunakan terutama untuk memperoleh nilai rata-rata dan kecenderungan data, bukan untuk penentuan batas spesifikasi formal. Kondisi ini mencerminkan praktik umum di industri, di mana pendekatan statistik sering dikombinasikan dengan pertimbangan teknis dan pengalaman proses.

Permasalahan utama yang dihadapi perusahaan terletak pada karakteristik spesifikasi *nut welding* yang bersifat satu sisi, yaitu hanya memiliki batas spesifikasi minimum untuk kekuatan torsi, tanpa batas atas yang didefinisikan secara eksplisit. Untuk memastikan kekuatan sambungan terpenuhi, parameter proses khususnya arus pengelasan sering dinaikkan hingga menghasilkan nilai torsi yang tinggi. Namun, hasil observasi trial menunjukkan bahwa peningkatan parameter yang berlebihan justru memicu cacat visual seperti *nut gosong* atau ulir yang seret. Hal ini menunjukkan bahwa pemenuhan kekuatan mekanik saja tidak cukup dijadikan indikator kualitas proses, dan diperlukan batas operasional atas yang mampu membatasi risiko cacat tanpa mengorbankan fungsi.

Dalam konteks tersebut, perusahaan selama ini mengandalkan data trial parameter sebagai dasar pengambilan keputusan proses. Evaluasi dilakukan dengan menganalisis

hubungan antara variasi arus pengelasan dan nilai torsi yang dihasilkan, yang kemudian divisualisasikan dalam bentuk grafik garis (trend) untuk mengidentifikasi kecenderungan peningkatan torsi terhadap kenaikan arus. Penentuan kondisi proses yang dapat diterima dilakukan melalui *judgement* kualitas, yaitu kombinasi antara pemenuhan torsi minimum dan hasil inspeksi visual. Nilai torsi tertinggi yang masih dinyatakan OK secara visual dan fungsional digunakan sebagai referensi operasional untuk membatasi parameter proses.

Meskipun pendekatan berbasis trial dan *judgement* ini efektif secara praktis, belum terdapat justifikasi statistik yang kuat untuk mendefinisikan batas atas proses (*Upper Specification Limit/USL*) secara sistematis. Literatur menunjukkan bahwa penggunaan indeks Cp dan Cpk konvensional kurang tepat diterapkan pada proses dengan spesifikasi satu sisi. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang lebih adaptif, di mana data trial aktual perusahaan dimanfaatkan untuk membentuk batas atas statistik yang realistis dan aplikatif. Integrasi antara nilai torsi tertinggi yang masih dinilai OK dengan pendekatan statistik seperti *confidence interval* berbasis data trial diharapkan mampu menjembatani kebutuhan ilmiah dan praktik industri.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini difokuskan pada penentuan batas atas statistik proses *nut welding* dengan memanfaatkan data trial parameter dan nilai torsi tertinggi yang masih memenuhi kriteria kualitas berdasarkan *judgement* perusahaan. Pertanyaan penelitian yang diajukan meliputi: (1) bagaimana kecenderungan hubungan antara parameter arus pengelasan dan nilai torsi berdasarkan grafik garis data trial; (2) bagaimana menentukan batas atas proses yang representatif menggunakan pendekatan statistik berbasis data trial dan *judgement* OK; serta (3) bagaimana implikasi penentuan batas tersebut terhadap pengendalian kualitas dan potensi pencegahan cacat visual. Tujuan penelitian ini adalah memberikan kerangka pengendalian proses yang lebih terstruktur dan aplikatif, yang mampu meningkatkan konsistensi kualitas *nut welding* sesuai dengan kondisi nyata perusahaan..

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dirancang sebagai studi kasus eksperimental dengan pendekatan kuantitatif yang diterapkan pada proses *nut welding* di lingkungan industri manufaktur otomotif. Pendekatan penelitian disusun dalam dua fase utama, yaitu fase eksplorasi batas parameter dan fase konfirmasi kapabilitas proses. Desain dua fase ini dipilih untuk menjawab permasalahan utama penelitian, yaitu ketiadaan batas spesifikasi atas (*Upper Specification Limit/USL*) pada karakteristik kualitas torsi *nut welding*, yang dalam praktik industri sering diatasi melalui *judgement* visual tanpa dasar statistik yang jelas.

Fase pertama bertujuan untuk mengeksplorasi hubungan antara parameter proses (arus pengelasan) dengan respon kualitas, baik secara mekanik (nilai torsi) maupun visual (kondisi *nut*). Fase kedua bertujuan untuk mengonfirmasi kinerja parameter terpilih melalui analisis kapabilitas proses berbasis data produksi aktual ($N = 30$), dengan pendekatan statistik satu sisi dan penentuan batas atas operasional berbasis *confidence interval*. Dengan demikian, metodologi penelitian ini selaras dengan tujuan untuk mengintegrasikan pendekatan statistik dengan kebutuhan praktis pengendalian kualitas di industri.

Objek penelitian adalah proses *nut welding* pada satu part number spesifik yang memiliki riwayat masalah kualitas berupa *nut* seret dan indikasi cacat visual akibat *over-welding*. Penelitian difokuskan pada material JSC980C dengan ketebalan 1,6 mm yang dipasangkan dengan *square nut* M6, karena kombinasi material dan desain ini tergolong sensitif terhadap variasi parameter panas pengelasan.

Penelitian dilaksanakan di area produksi perusahaan manufaktur komponen otomotif yang telah menerapkan sistem pengendalian mutu berbasis inspeksi torsi dan visual. Pemilihan satu part number dilakukan untuk memastikan kondisi proses yang homogen, sehingga variasi data yang dihasilkan dapat merepresentasikan karakteristik proses *nut welding* secara lebih akurat. Proses *nut welding* dalam penelitian ini dilakukan menggunakan mesin Stationary *Spot Welding* (SSW) Dengsha dengan kapasitas

daya 15 kVA. Mesin ini merupakan mesin las resistansi yang umum digunakan pada industri otomotif untuk aplikasi pengelasan *nut* dan bolt pada panel baja berkekuatan tinggi.

Selain mesin utama, peralatan pendukung yang digunakan dalam penelitian ini meliputi: Torque wrench digital untuk pengukuran nilai torsi hasil pengelasan. Alat inspeksi visual untuk evaluasi kondisi *nut* (gosong, deformasi, kematangan). Form inspeksi internal perusahaan sebagai acuan *judgement* OK/NG. Berdasarkan standar internal perusahaan dan hasil observasi awal, parameter proses *nut welding* yang dikendalikan dalam penelitian ini meliputi: Arus pengelasan (I), Waktu pengelasan (T), Tekanan elektroda (P).

Namun, penelitian ini memfokuskan analisis utama pada parameter arus pengelasan, karena parameter ini memiliki pengaruh paling signifikan terhadap energi panas, kekuatan sambungan, dan potensi cacat visual. Parameter waktu dan tekanan dijaga konstan pada kondisi waktu pengelasan 4 cycle dan tekanan elektroda : 0,2 Mpa. Pemfokusan ini dilakukan untuk memastikan bahwa perubahan respon kualitas yang diamati benar-benar disebabkan oleh variasi arus pengelasan.

Pengumpulan data dilakukan melalui dua tahap eksperimen berurutan yaitu Fase 1 – Trial Eksplorasi Batas Parameter. Pada fase pertama, dilakukan trial bertahap dengan variasi arus pengelasan mulai dari kondisi rendah hingga tinggi. Setiap level arus diuji terhadap dua karakteristik kualitas utama yaitu nilai torsi hasil pengelasan, Kualitas visual *nut* yang meliputi kondisi gosong, kematangan las, dan kemudahan penguliran.

Hasil trial dievaluasi menggunakan *judgement* OK/NG berdasarkan standar inspeksi internal perusahaan. Data trial ini digunakan untuk mengidentifikasi arus minimum yang memenuhi spesifikasi torsi, menentukan arus maksimum yang masih dapat diterima secara visual dan menetapkan batas atas operasional empiris sebagai dasar pengendalian proses.

Fase 2 – Pengambilan Data Konfirmasi ($N = 30$). Setelah parameter utama ditetapkan berdasarkan fase trial, dilakukan pengambilan data konfirmasi sebanyak 30 sampel ($N = 30$) pada satu setting parameter terpilih. Untuk setiap sampel, dilakukan

pengukuran nilai torsi, kemudian dihitung nilai rata-rata (mean) sebagai representasi kinerja proses. Pendekatan ini dipilih karena penelitian berfokus pada stabilitas dan kecenderungan pusat proses, bukan variasi antar subgrup. Data hasil pengukuran selanjutnya divisualisasikan menggunakan grafik garis (line chart) yang menampilkan hubungan antara nilai torsi aktual dengan batas minimum spesifikasi torsi, guna menunjukkan konsistensi proses terhadap persyaratan kualitas.

Analisis kapabilitas proses dilakukan dengan menyesuaikan kondisi spesifikasi satu sisi, yaitu hanya memiliki *Lower Specification Limit* (LSL) tanpa batas atas yang pasti yang

didefinisikan secara formal. Perhitungan Cp Cpk satu sisi, dengan menggunakan LSL sebagai acuan utama evaluasi kapabilitas proses. Penentuan batas atas statistik (USL operasional) menggunakan pendekatan *confidence interval* (CI) berbasis data hasil trial dan data konfirmasi. Evaluasi perubahan nilai Cpk setelah penerapan batas atas statistik tersebut sebagai referensi pengendalian proses. Pendekatan ini memungkinkan penilaian kapabilitas proses yang lebih realistis dan aplikatif, karena mempertimbangkan tidak hanya pemenuhan kekuatan minimum, tetapi juga pencegahan cacat visual akibat *over-welding*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Penentuan Batas Atas Statistik pada Proses *Nut Welding* dengan Spesifikasi Satu Sisi

Hasil penelitian pada fase eksplorasi parameter menunjukkan bahwa proses *nut welding* pada material JSC980C menggunakan mesin SSW Dengensha 15 kVA memiliki karakteristik spesifikasi satu sisi, di mana hanya batas minimum torsi (*Lower Specification Limit / LSL*) sebesar 34,3 Nm yang didefinisikan secara formal oleh standar kualitas. Tidak adanya batas atas spesifikasi menyebabkan potensi risiko cacat visual akibat energi pengelasan berlebih apabila parameter hanya ditentukan berdasarkan kekuatan mekanik.

Table 1. Result Trial Parameter

Trial	Parameter Ampere	Visual Nut		Torque Min.34.3Nm	
		Result	Judgement	Result	Judgement
1	6,5	Ulir masuk lancar, Tidak Matang	OK	30	NG
2	7	Ulir masuk lancar, Tidak Matang	OK	36	OK
3	7,5	Ulir masuk lancar, Tidak Gosong	OK	44	OK
4	8	Ulir masuk lancar, Tidak Gosong	OK	52	OK
5	8,5	Ulir masuk lancar, Tidak Gosong	OK	64	OK
6	9	Ulir masuk lancar, Tidak Gosong	OK	78	OK
7	9,5	Ulir masuk lancar, Agak Gosong	OK	80	OK
8	10	Ulir masuk lancar, Agak Gosong	OK	82	OK
9	10,5	Ulir masuk lancar, Agak Gosong	OK	86	OK
10	11	Ulir masuk agak berat, Gosong	OK	88	OK
11	11,5	Ulir masuk agak berat, Gosong	OK	88	OK
12	12	Ulir masuk berat, Gosong	OK	90	OK
13	12.5	Ulir masuk berat, Gosong	OK	92	OK
14	13	Ulir seret, Gosong	NG	92	OK

Sumber : Data Trial Internal Perusahaan

Berdasarkan data trial pada Tabel 1, dapat diamati bahwa pada arus 6,5 kA, nilai torsi yang dihasilkan (30 Nm) belum memenuhi spesifikasi minimum sehingga dikategorikan NG, meskipun secara visual masih terlihat dapat diterima. Nilai torsi mulai memenuhi spesifikasi minimum pada arus 7,0 kA dan selanjutnya meningkat secara konsisten seiring dengan peningkatan arus pengelasan

hingga mencapai 92 Nm pada arus 12,5–13,0 kA. Namun demikian, hasil evaluasi visual menunjukkan bahwa peningkatan arus tidak selalu berbanding lurus dengan kualitas visual sambungan. Indikasi cacat berupa *nut* agak gosong mulai muncul pada arus 9,5 kA, kemudian berkembang menjadi kondisi gosong dan ulir masuk berat pada arus $\geq 11,0$ kA, hingga akhirnya menghasilkan cacat visual NG (ulir seret) pada arus 13,0 kA, meskipun nilai torsi masih berada jauh di atas batas minimum

spesifikasi. Hal ini menunjukkan bahwa pemenuhan kekuatan mekanik semata tidak cukup untuk menjamin kualitas proses *nut welding*.

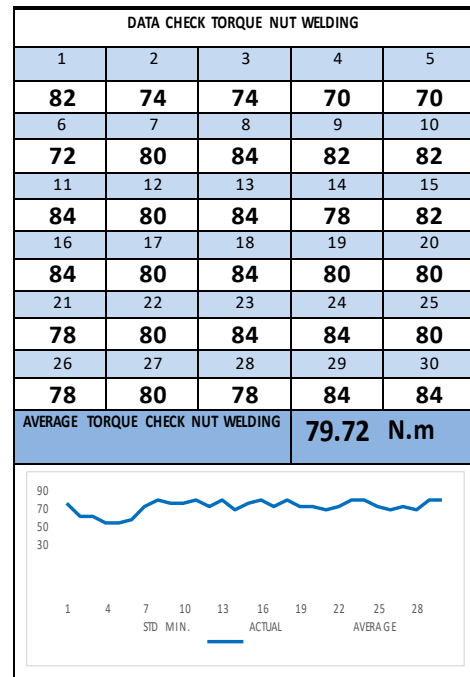
Berdasarkan kombinasi kriteria torsi minimum terpenuhi dan *judgement* visual OK, zona proses yang dapat diterima berada pada rentang arus 7,0–9,5 kA. Nilai torsi tertinggi yang masih memenuhi kriteria visual OK adalah 80 Nm pada arus 9,5 kA, sehingga nilai tersebut ditetapkan sebagai batas atas statistik (USL operasional). Penetapan USL ini tidak bersifat desain, melainkan operasional, dan selanjutnya diperkuat menggunakan pendekatan *confidence* interval pada fase konfirmasi.

Pendekatan ini sejalan dengan temuan García et al. (2023) dan Zhang & Wang (2024) yang menyatakan bahwa penggunaan indeks Cp dan Cpk konvensional tanpa batas atas pada proses spesifikasi satu sisi berpotensi menghasilkan keputusan proses yang bias. Studi Nakamura et al. (2023) juga menunjukkan bahwa ketiadaan batas atas operasional meningkatkan risiko cacat visual akibat fenomena *over-welding*, meskipun karakteristik kekuatan masih memenuhi spesifikasi. Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi baru berupa kerangka praktis penentuan batas atas statistik yang relevan dan aplikatif untuk proses *nut welding* dengan spesifikasi asimetris

B. Analisis Kapabilitas Proses Nut Welding Berdasarkan Nilai Rata-Rata Torsi dan Grafik Garis

Analisis kapabilitas proses dilakukan pada fase konfirmasi menggunakan 30 sampel (N = 30) yang diambil pada parameter arus terpilih, yaitu 9,0 kA, yang berada di dalam zona aman hasil eksplorasi. Data torsi hasil pengujian ditampilkan pada Gambar 1, yang menunjukkan distribusi nilai torsi individual serta nilai rata-rata proses.

Berdasarkan hasil pengukuran, diperoleh nilai rata-rata torsi sebesar 79,72 Nm, dengan variasi yang relatif kecil dan seluruh nilai berada di atas batas minimum spesifikasi LSL = 34,3 Nm.



Gambar 1. Result N30 Torque

Sumber : Data Trial Internal Perusahaan

Visualisasi menggunakan grafik garis menunjukkan bahwa seluruh titik data berada di atas LSL tanpa adanya pola ekstrem, lonjakan tajam, maupun tren penurunan yang signifikan. Pola ini mengindikasikan bahwa proses berada dalam kondisi stabil dan terkendali secara statistik.

Penggunaan nilai rata-rata sebagai representasi pusat proses pada penelitian ini dipilih karena tujuan utama analisis adalah mengevaluasi kestabilan proses terhadap batas minimum spesifikasi dalam konteks spesifikasi satu sisi. Pada kondisi ini, fokus utama bukan pada simetri distribusi terhadap dua batas spesifikasi, melainkan pada kemampuan proses untuk secara konsisten menghasilkan output di atas LSL.



Gambar 2 . Nut Tidak Gosong

Sumber : Data Trial Internal Perusahaan

Kondisi visual hasil pengelasan pada parameter ini diperlihatkan pada Gambar 2,

yang menunjukkan bahwa *nut* tidak mengalami gosong dan ulir masih dapat dimasuki dengan lancar. Hal ini mengonfirmasi bahwa parameter proses tidak hanya stabil secara statistik, tetapi juga memenuhi persyaratan kualitas visual dan fungsional.

Pendekatan ini sejalan dengan Montgomery (2020) dan Oliveira et al. (2024) yang menekankan pentingnya evaluasi kecenderungan pusat proses pada analisis kapabilitas satu sisi. Berbeda dengan penelitian Chen et al. (2022) dan Putri & Santoso (2024) yang mengintegrasikan SPC dengan sistem real-time dan machine learning, penelitian ini menekankan kesederhanaan metodologis yang tetap aplikatif dan mudah diimplementasikan pada fase trial maupun early mass production.

C. Dampak Penerapan Batas Atas Statistik terhadap Pencegahan Cacat Visual dan Stabilitas Proses

Penerapan batas atas statistik (USL operasional) yang ditetapkan berdasarkan hasil eksplorasi parameter menunjukkan dampak signifikan terhadap pencegahan cacat visual tanpa mengorbankan kekuatan sambungan. Rentang parameter optimal yang diperoleh, yaitu 8,0–10,0 kA, menghasilkan nilai torsi yang secara konsisten berada jauh di atas batas minimum spesifikasi, sekaligus mempertahankan kualitas visual *nut* pada kategori tidak gosong dan ulir masuk lancar.

DATA CHECK TORQUE NUT WELDING				
1	2	3	4	5
82	80	84	84	80
6	7	8	9	10
74	82	82	78	76
11	12	13	14	15
76	70	74	78	82
16	17	18	19	20
80	80	80	78	78
21	22	23	24	25
76	82	84	78	78
26	27	28	29	30
82	80	76	84	80
LSL	USL	MEAN	MIN	MAX
34.32	85.90	79.27	70	84
Std Dev (σ)	Cp		Cpk L	Cpk U
3.383	2.54		4.43	0.65

Gambar 3. Cp Cpk Torque

Sumber : Data Trial Internal Perusahaan

Analisis kapabilitas proses yang dirangkum pada Gambar 3 menunjukkan

bahwa dengan LSL = 34,32 Nm dan USL operasional = 85,90 Nm, proses memiliki nilai Cp sebesar 2,54, yang mengindikasikan variasi proses relatif kecil dibandingkan lebar spesifikasi operasional. Nilai Cpk L = 4,43 menunjukkan bahwa pusat proses berada sangat jauh di atas batas minimum spesifikasi, sementara nilai Cpk U = 0,65 mengonfirmasi bahwa batas atas operasional memang relevan sebagai pembatas risiko cacat visual akibat *over-welding*. Standar deviasi proses sebesar 3,383 Nm menunjukkan kestabilan variasi yang baik.

Temuan ini memperkuat hasil penelitian Schmidt et al. (2024) dan Lee & Kim (2023) yang menyatakan bahwa energi panas berlebih pada proses pengelasan dapat menyebabkan degradasi mikrostruktur dan cacat visual meskipun kekuatan mekanik meningkat. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang berfokus pada karakterisasi fenomena fisik semata, penelitian ini mengintegrasikan temuan tersebut ke dalam kerangka pengendalian proses berbasis SPC dan batas statistik operasional.

Patel et al. (2024) mencatat bahwa banyak industri masih mengandalkan *judgement* subjektif dalam menentukan parameter aman. Penelitian ini menunjukkan bahwa *judgement* visual dapat diformalisasi menjadi batas statistik yang terukur, sehingga keputusan proses menjadi lebih objektif, konsisten, dan mudah direplikasi. Dengan demikian, penerapan batas atas statistik tidak hanya meningkatkan kapabilitas proses secara statistik, tetapi juga berkontribusi langsung terhadap peningkatan kualitas produk dan pengurangan potensi cacat pada proses *nut welding*.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa proses *nut welding* memiliki karakteristik spesifikasi satu sisi, di mana pengendalian kualitas yang hanya berfokus pada pemenuhan batas minimum torsi belum cukup untuk menjamin kestabilan dan kualitas proses secara menyeluruh. Hasil trial eksplorasi parameter memperlihatkan adanya hubungan positif yang kuat antara peningkatan arus pengelasan dan nilai torsi yang dihasilkan, yang menegaskan bahwa energi panas berperan signifikan dalam

meningkatkan kekuatan sambungan. Namun demikian, temuan penelitian juga menunjukkan bahwa peningkatan arus yang berlebihan memicu munculnya cacat visual seperti *nut* gosong dan ulir seret, meskipun nilai torsi masih berada jauh di atas batas minimum spesifikasi. Melalui kombinasi analisis data trial, grafik garis kecenderungan torsi, dan *judgement* visual, penelitian ini berhasil menetapkan batas atas statistik (USL operasional) yang representatif, serta membuktikan bahwa parameter terpilih menghasilkan proses yang stabil dengan nilai rata-rata torsi yang konsisten dan variasi yang relatif kecil. Hasil ini secara langsung menjawab tujuan penelitian dalam mengidentifikasi hubungan parameter proses, menentukan batas atas yang aplikatif, dan mengevaluasi implikasinya terhadap pengendalian kualitas.

Kontribusi utama penelitian ini terletak pada penyediaan kerangka pengendalian proses yang praktis dan aplikatif untuk proses *nut welding* dengan spesifikasi asimetris, khususnya dalam memformalkan *judgement* visual menjadi batas statistik yang terukur. Secara metodologis, penelitian ini mengintegrasikan konsep *Statistical Process Control* dengan kondisi nyata di industri, sehingga dapat mengurangi ketergantungan pada keputusan subjektif semata dalam penentuan parameter aman. Meskipun demikian, penelitian ini memiliki keterbatasan, antara lain hanya menggunakan satu part number, satu jenis material, serta memfokuskan analisis pada parameter arus pengelasan dengan ukuran sampel yang relatif terbatas pada fase konfirmasi awal. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk melibatkan variasi produk dan material yang lebih luas, menggunakan data produksi jangka panjang, serta mengintegrasikan metode SPC lanjutan atau sistem pemantauan real-time guna meningkatkan keandalan dan generalisasi hasil penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

AIAG, *Statistical Process Control (SPC)*, 2nd ed. Southfield, MI: Automotive Industry Action Group, 2019.
AIAG, *Measurement Systems Analysis (MSA)*, 4th ed. Southfield, MI: AIAG,

- 2020.
- Chen, J., Liu, Y., & Zhou, X. (2022). Integration of *Statistical Process Control* and machine learning for *welding* quality prediction. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 33(5), 1501–1516.
<https://doi.org/10.1007/s10845-021-01856-4>
- García, R., Martínez, L., & Torres, J. (2023). Limitations of C_p and C_{pk} in one-sided specification processes. *Journal of Manufacturing Systems*, 67, 210–221.
<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.02.004>
- Watanabe, K. and Y. Mori, “Torque performance evaluation of welded *nuts* in automotive panels,” *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, vol. 15, no. 2, pp. 233–241, 2022
- Karlsson, B., & Svensson, M. (2023). *Confidence* interval-based control limits for short production runs. *Quality Engineering*, 35(4), 512–525.
<https://doi.org/10.1080/08982112.2023.2174981>
- Lee, S., & Kim, H. (2023). Effect of excessive *welding* current on joint performance and surface quality. *Journal of Materials Processing Technology*, 315, 117129.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2023.117129>
- Montgomery, D. C. (2020). *Introduction to statistical quality control* (8th ed.). Hoboken, NJ: Wiley.
- Nakamura, K., Sato, H., & Ishikawa, T. (2023). Over-*welding* effects on visual defects and mechanical strength in resistance *welding*. *Welding Journal*, 102(4), 98–107.
- Oliveira, R., Costa, M., & Teixeira, P. (2024). Mean-based process capability evaluation for short-run production. *Production Engineering*, 18(1), 65–76.
<https://doi.org/10.1007/s11740-023-01234-5>
- Patel, A., Shah, R., & Desai, M. (2024). Formalizing operator judgment into statistical limits in manufacturing processes. *International Journal of*

Muhammad Romdhoni, Paduloh

Submitted: 20/12/2025; Revised: 20/12/2025; Accepted: 30/12/2025; Published: 30/12/2025

- Quality & Reliability Management, 41(2), 389–405.
<https://doi.org/10.1108/IJQRM-06-2023-0194>
- Putri, N., & Santoso, B. (2024). Real-time *Statistical Process Control* for welding defect detection. *International Journal of Industrial Engineering*, 31(3), 245–256.
- Schmidt, W., Müller, P., & Klein, A. (2024). Heat input and microstructural degradation in resistance *spot welding*. *Materials & Design*, 240, 112124.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.112124>
- Zhang, J., & Wang, Z. (2024). Capability indices for asymmetric and one-sided quality characteristics. *Quality Engineering*, 36(1), 45–58.