



Analisa Kekuatan Mesin Bending Hidrolik Tipe YSD-HSDY/HPPTK 200/3000 di Koperasi Tegal Manufaktur Indonesia

Ikhtamul Fajri^{1*}, M.Fajar Sidik²

¹⁻² Universitas Pancasakti Tegal, Indonesia
email: ikhtamulfajri@gmail.com¹

Article Info :

Received:
24-02-2026
Revised:
27-03-2026
Accepted:
05-04-2026

Abstract

This study presents an empirical analysis of the structural strength, operational performance, and reliability characteristics of a hydraulic bending machine type YSD-HSDY/HPPTK 200/3000 under real industrial conditions at Koperasi Tegal Manufaktur Indonesia. The research integrates field observation, direct measurement, and mechanical modeling to evaluate force distribution, deformation behavior, and system response during bending operations. Experimental data were collected through variations in material thickness, bending angles, and hydraulic pressure to examine their influence on machine capacity and output consistency. The results indicate that the machine demonstrates stable force generation within its operational threshold, although deviations emerge under increased loading intensity and frequency. Analytical findings reveal that stress concentration occurs at critical structural points, contributing to gradual performance degradation and reduced precision. Reliability assessment further shows that repeated operational cycles significantly affect hydraulic stability and component wear, leading to increased deviation in bending accuracy. The integration of empirical and analytical approaches provides a comprehensive understanding of machine behavior, offering a robust basis for performance optimization, predictive maintenance, and enhanced operational safety in industrial bending applications.

Keywords: Hydraulic Bending Machine, Mechanical Strength Analysis, Operational Reliability, Stress Distribution, Industrial Performance.

Abstrak

Penelitian ini menyajikan analisis empiris mengenai kekuatan struktural, kinerja operasional, dan karakteristik keandalan mesin pembengkok hidrolik tipe YSD-HSDY/HPPTK 200/3000 dalam kondisi industri nyata di Koperasi Tegal Manufaktur Indonesia. Penelitian ini mengintegrasikan pengamatan lapangan, pengukuran langsung, dan pemodelan mekanis untuk mengevaluasi distribusi gaya, perilaku deformasi, dan respons sistem selama operasi pembengkokan. Data eksperimental dikumpulkan melalui variasi ketebalan material, sudut pembengkokan, dan tekanan hidrolik untuk menganalisis pengaruhnya terhadap kapasitas mesin dan konsistensi hasil. Hasil menunjukkan bahwa mesin menunjukkan pembangkitan gaya yang stabil dalam batas operasionalnya, meskipun penyimpangan muncul pada intensitas dan frekuensi beban yang meningkat. Temuan analitis mengungkapkan bahwa konsentrasi tegangan terjadi pada titik-titik struktural kritis, yang berkontribusi pada penurunan kinerja secara bertahap dan berkurangnya presisi. Penilaian keandalan lebih lanjut menunjukkan bahwa siklus operasional yang berulang secara signifikan memengaruhi stabilitas hidrolik dan keausan komponen, yang mengakibatkan peningkatan penyimpangan dalam akurasi pembengkokan. Integrasi pendekatan empiris dan analitis memberikan pemahaman yang komprehensif mengenai perilaku mesin, sehingga menjadi landasan yang kokoh untuk optimalisasi kinerja, pemeliharaan prediktif, dan peningkatan keselamatan operasional dalam aplikasi pembengkokan industri.

Kata Kunci: Mesin Bending Hidraulik, Analisis Kekuatan Mekanis, Keandalan Operasional, Distribusi Tegangan, Kinerja Industri.



©2022 Authors. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

PENDAHULUAN

Perkembangan industri manufaktur global dalam dua dekade terakhir menunjukkan pergeseran signifikan menuju sistem produksi yang semakin presisi, adaptif, dan berbasis efisiensi energi, khususnya dalam proses pembentukan logam seperti bending yang menjadi tulang punggung produksi komponen struktural di sektor otomotif, dirgantara, dan peralatan listrik. Evolusi teknologi mesin bending hidrolik memperlihatkan integrasi antara sistem kontrol digital, optimalisasi konsumsi energi,

serta peningkatan kapasitas deformasi material yang lebih kompleks, yang secara simultan mendorong kebutuhan akan analisis kekuatan mesin secara komprehensif untuk menjamin keandalan operasional dan kualitas produk. Dalam kerangka teknik mesin terapan, sistem hidrolik dipahami sebagai media transmisi energi yang memiliki karakteristik nonlinier dan sensitif terhadap variasi beban serta kondisi fluida kerja, sehingga analisis performa mesin tidak dapat dilepaskan dari pendekatan sistemik yang mempertimbangkan interaksi antar komponen (Gasperz, 1992). Dinamika ini mempertegas bahwa kajian terhadap kekuatan mesin bending tidak lagi bersifat statis, melainkan harus ditempatkan dalam konteks sistem produksi modern yang menuntut akurasi tinggi dan keberlanjutan operasional.

Sejumlah penelitian terdahulu telah memberikan kontribusi penting dalam memahami desain dan performa mesin bending berbasis hidrolik, meskipun sebagian besar masih berfokus pada aspek perancangan dan pengujian awal. Studi oleh Al Amin et al. (2024) menunjukkan bahwa pengembangan alat bending skala pendidikan mampu meningkatkan pemahaman praktis, namun belum menyentuh analisis kekuatan struktural secara mendalam dalam konteks industri. Sementara itu, Fais dan Ningsih (2022) serta Al Diansyah dan Ningsih (2022) menggarisbawahi pentingnya sistem hidrolik dalam menghasilkan gaya tekan yang stabil, tetapi pendekatan mereka lebih berorientasi pada validasi fungsi alat uji dibandingkan evaluasi performa jangka panjang. Gerson et al. (2023) memperluas cakupan dengan mengintegrasikan fungsi uji tarik, tekan, dan bending dalam satu sistem, namun kompleksitas interaksi beban belum dianalisis secara kuantitatif. Di sisi lain, penelitian Imaduddin dan Fitri (2025) mengkaji kekuatan material dies dalam proses bending, memberikan perspektif mikro terhadap kegagalan komponen, sedangkan Khasanah et al. (2023) menyoroti evaluasi kinerja mesin melalui pendekatan OEE, FMEA, dan FTA yang lebih menitikberatkan pada reliabilitas operasional daripada kapasitas kekuatan mekanis mesin itu sendiri. Sintesis ini menunjukkan bahwa literatur telah berkembang secara parsial pada berbagai aspek, namun belum terintegrasi dalam satu kerangka analisis kekuatan mesin secara holistik.

Keterbatasan utama dalam literatur terletak pada fragmentasi pendekatan antara desain, pengujian, dan evaluasi kinerja, yang menyebabkan kurangnya pemahaman komprehensif mengenai hubungan antara kekuatan mesin, kondisi operasional, dan kualitas hasil bending. Banyak studi cenderung mengasumsikan kondisi ideal tanpa mempertimbangkan variabilitas beban nyata di lingkungan industri, sehingga menghasilkan kesenjangan antara performa teoritis dan aktual. Inkonsistensi juga terlihat pada metode evaluasi, di mana sebagian penelitian menggunakan pendekatan eksperimental sederhana tanpa validasi numerik atau analisis tegangan mendalam, sementara penelitian lain berfokus pada reliability metrics tanpa mengaitkannya dengan kapasitas struktural mesin. Bahkan dalam studi yang meninjau kekuatan material dies, seperti yang dilakukan oleh Imaduddin dan Fitri (2025), analisis belum diperluas ke interaksi sistemik antara dies, aktuator, dan struktur rangka mesin, sehingga celah konseptual tetap terbuka. Hal ini menunjukkan bahwa belum terdapat model analisis yang mampu menjembatani aspek desain, kekuatan, dan performa operasional secara simultan.

Kondisi tersebut menjadi semakin krusial dalam konteks industri manufaktur berbasis make-to-order seperti yang diterapkan di Koperasi Tegal Manufaktur Indonesia, di mana variasi produk dan spesifikasi material menuntut fleksibilitas sekaligus konsistensi performa mesin. Ketidakwaajaran kinerja mesin bending, yang dapat muncul akibat kelelahan material, ketidakseimbangan gaya hidrolik, atau degradasi komponen, berpotensi menurunkan kualitas produk sekaligus meningkatkan risiko keselamatan kerja. Penelitian Khasanah et al. (2023) menunjukkan bahwa kegagalan mesin seringkali berakar pada kombinasi faktor teknis dan manajerial, namun tanpa analisis kekuatan yang memadai, upaya perbaikan cenderung bersifat reaktif. Dalam konteks ini, urgensi ilmiah tidak hanya terletak pada pemahaman mekanisme kegagalan, tetapi juga pada kemampuan memprediksi batas aman operasional mesin berdasarkan karakteristik beban aktual. Secara praktis, kebutuhan ini berkaitan langsung dengan efisiensi produksi, pengendalian mutu, dan keberlanjutan operasional perusahaan.

Penelitian ini menempatkan dirinya dalam lanskap keilmuan sebagai upaya integratif yang menghubungkan analisis kekuatan mesin dengan kondisi operasional nyata di lingkungan industri manufaktur. Berbeda dengan studi sebelumnya yang cenderung terfokus pada aspek parsial, riset ini mengadopsi pendekatan analitis yang mempertimbangkan interaksi antara sistem hidrolik, struktur mesin, dan karakteristik material yang diproses. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya mengisi celah empiris terkait kurangnya data performa mesin bending dalam kondisi riil, tetapi juga menawarkan kerangka konseptual yang mengaitkan kekuatan mekanis dengan keandalan operasional.

Posisi ini sekaligus memperluas pendekatan teknik mesin terapan dengan mengintegrasikan perspektif desain, analisis tegangan, dan evaluasi kinerja dalam satu kesatuan analisis yang koheren.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kekuatan mesin bending hidrolik tipe YSD-HSDY/HPPTK 200/3000 di Koperasi Tegal Manufaktur Indonesia secara komprehensif dengan mempertimbangkan kondisi operasional aktual, karakteristik material, serta interaksi antar komponen utama mesin. Kontribusi teoretis penelitian ini terletak pada pengembangan model analisis kekuatan mesin yang terintegrasi dan kontekstual, sementara kontribusi metodologisnya berupa penerapan pendekatan analitis yang mampu menghubungkan parameter teknis dengan performa operasional secara sistematis. Hasil penelitian diharapkan tidak hanya memperkaya literatur di bidang teknik mesin, tetapi juga memberikan dasar pengambilan keputusan yang lebih akurat dalam pengelolaan dan pemeliharaan mesin bending di industri manufaktur.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini diklasifikasikan sebagai studi empiris yang mengintegrasikan observasi lapangan, pengukuran langsung, dan analisis teknis untuk mengevaluasi kekuatan mesin bending hidrolik tipe YSD-HSDY/HPPTK 200/3000 dalam kondisi operasional nyata di Koperasi Tegal Manufaktur Indonesia. Proses penelitian diawali dengan identifikasi konfigurasi sistem mesin yang meliputi aktuator hidrolik, pompa, rangka struktur, serta komponen dies dan matras, yang kemudian dimodelkan secara mekanis untuk merepresentasikan distribusi gaya selama proses bending. Prosedur eksperimental dilakukan melalui pengambilan data beban tekan, tekanan fluida hidrolik, deformasi pelat, serta respons struktur mesin pada berbagai variasi ketebalan material dan sudut pembengkokan, sehingga memungkinkan analisis hubungan antara parameter operasional dan kapasitas kekuatan mesin. Pengukuran dilakukan menggunakan instrumen tekanan dan pengamatan deformasi aktual pada benda kerja, yang selanjutnya dikombinasikan dengan pendekatan analitis berbasis teori tegangan-regangan untuk menghitung distribusi gaya pada titik kritis mesin. Keunikan metodologi ini terletak pada integrasi simultan antara pendekatan eksperimental berbasis kondisi riil industri dan pemodelan mekanika teknik, sehingga mampu merepresentasikan perilaku sistem secara lebih autentik dibandingkan pendekatan laboratorium yang terkontrol.

Teknik validasi dilakukan melalui triangulasi antara hasil pengukuran empiris, perhitungan teoritis, dan konsistensi performa mesin dalam siklus produksi berulang, dengan tujuan memastikan reliabilitas dan reproduksibilitas temuan. Metrik evaluasi utama meliputi kapasitas gaya maksimum mesin, tingkat deformasi elastis dan plastis pada material, distribusi tegangan pada komponen kritis, serta kestabilan tekanan sistem hidrolik selama operasi. Analisis juga mencakup identifikasi deviasi antara nilai teoritis dan aktual sebagai indikator potensi ketidakwajaran kinerja mesin, yang selanjutnya digunakan untuk menilai batas aman operasional. Ketahanan metodologis diperkuat melalui pengulangan pengujian pada berbagai kondisi beban dan variasi material, serta penggunaan pendekatan komparatif untuk mengevaluasi konsistensi hasil. Pendekatan ini memungkinkan penelitian tidak hanya menghasilkan evaluasi kuantitatif terhadap kekuatan mesin, tetapi juga memberikan dasar diagnostik yang sistematis untuk mendeteksi potensi kegagalan struktural dan operasional secara dini.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Sistem dan Distribusi Gaya Mesin Bending Hidrolik

Mesin bending hidrolik tipe YSD-HSDY/HPPTK 200/3000 menunjukkan karakteristik sistem yang kompleks melalui interaksi antara aktuator, pompa, dan struktur rangka dalam menghasilkan gaya tekan pada material. Observasi lapangan memperlihatkan bahwa distribusi gaya tidak hanya dipengaruhi oleh tekanan fluida, tetapi juga oleh konfigurasi mekanis dies dan posisi material selama proses pembengkokan. Fenomena ini mengindikasikan adanya hubungan nonlinier antara input tekanan dan output deformasi yang memerlukan pendekatan analitis berbasis mekanika teknik. Pendekatan sistem seperti ini telah dijelaskan sebagai penting dalam memahami perilaku mesin industri yang terintegrasi (Gasparz, 1992).

Analisis awal menunjukkan bahwa tekanan hidrolik yang dihasilkan oleh pompa memiliki fluktuasi kecil selama siklus kerja, yang berdampak pada kestabilan gaya tekan. Fluktuasi ini berkorelasi dengan kondisi oli hidrolik serta respons aktuator terhadap beban dinamis. Hasil ini konsisten dengan temuan bahwa sistem hidrolik sangat sensitif terhadap variasi tekanan fluida dan

kondisi operasional (Fais & Ningsih, 2022). Stabilitas tekanan menjadi indikator penting dalam menjaga kualitas hasil bending.

Distribusi gaya pada titik tekuk memperlihatkan adanya konsentrasi tegangan pada area kontak antara punch dan material. Tegangan tarik dominan terjadi pada sisi luar sumbu netral, sementara tegangan tekan terdistribusi pada sisi dalam material. Pola ini sesuai dengan teori deformasi plastis pada proses bending yang telah banyak dilaporkan dalam studi sebelumnya (Ramadan, 2024). Kondisi ini menjadi dasar dalam mengevaluasi batas kekuatan mesin terhadap variasi beban.

Pengamatan lebih lanjut menunjukkan bahwa variasi ketebalan pelat secara signifikan memengaruhi besarnya gaya yang dibutuhkan untuk mencapai sudut bending tertentu. Pelat dengan ketebalan lebih tinggi membutuhkan tekanan hidrolik yang lebih besar serta waktu deformasi yang lebih lama. Hasil ini memperkuat argumen bahwa karakteristik material menjadi faktor dominan dalam proses pembentukan logam (Maulana et al., 2024). Interaksi antara sifat material dan kapasitas mesin menjadi fokus utama dalam analisis kekuatan.

Konfigurasi dies dan matras juga memberikan kontribusi signifikan terhadap distribusi gaya selama proses bending. Penggunaan dies berbentuk V menghasilkan distribusi tegangan yang lebih terkonsentrasi dibandingkan dengan bentuk lainnya. Hal ini berimplikasi pada peningkatan risiko kelelahan material pada titik tertentu. Temuan ini sejalan dengan studi yang menyoroti pentingnya desain dies dalam menentukan kualitas hasil bending (Imaduddin & Fitri, 2025).

Kinerja aktuator hidrolik menunjukkan respons yang relatif stabil terhadap perubahan beban, meskipun terdapat jeda kecil dalam fase awal penekanan. Jeda ini diinterpretasikan sebagai respon sistem terhadap tekanan awal fluida sebelum mencapai kondisi steady-state. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa karakteristik ini umum terjadi pada sistem hidrolik dengan kapasitas besar (Al Diansyah & Ningsih, 2022). Respons dinamis ini menjadi bagian penting dalam evaluasi performa mesin.



Gambar 1. Mesin Bending Hidrolik

Analisis struktur rangka mesin menunjukkan bahwa deformasi elastis masih berada dalam batas aman selama operasi normal. Deformasi yang terjadi tidak menyebabkan perubahan signifikan terhadap akurasi hasil bending. Hal ini mengindikasikan bahwa desain struktur mesin memiliki faktor keamanan yang memadai. Studi desain mesin bending juga menekankan pentingnya kekakuan struktur dalam menjaga presisi (Makinun et al., 2024).

Variasi parameter operasional seperti panjang bending dan posisi stopper memengaruhi distribusi beban secara keseluruhan. Penyesuaian parameter ini memungkinkan operator untuk mengontrol hasil bending secara lebih presisi. Sistem kontrol berbasis panel LCD memberikan fleksibilitas dalam pengaturan tersebut. Temuan ini relevan dengan penelitian yang menyoroti pentingnya sistem kontrol dalam mesin bending modern (Gerson et al., 2023).

Tabel 1. Distribusi Tekanan dan Gaya pada Variasi Ketebalan Material

Ketebalan (mm)	Tekanan Hidrolik (bar)	Gaya Tekan (kN)	Sudut Bending (°)
1.0	80	45	90
2.0	110	70	90
3.0	140	95	90
4.0	170	120	90

Sumber: Data hasil pengukuran lapangan (2025)

Data pada Tabel 1 menunjukkan peningkatan linier antara ketebalan material dan kebutuhan gaya tekan. Hubungan ini mengindikasikan bahwa kapasitas mesin masih berada dalam rentang operasional yang aman. Pola tersebut konsisten dengan prinsip mekanika deformasi plastis pada material logam. Interpretasi ini memperkuat validitas hasil pengukuran empiris.

Korelasi antara tekanan hidrolik dan gaya tekan menunjukkan efisiensi sistem dalam mentransmisikan energi. Efisiensi ini menjadi indikator bahwa kehilangan energi dalam sistem relatif kecil. Kondisi ini penting untuk menjaga keberlanjutan operasional mesin dalam jangka panjang. Studi terkait efisiensi mesin bending juga menunjukkan bahwa sistem hidrolik memiliki keunggulan dalam hal transmisi gaya (Purwanto et al., 2025).

Evaluasi Kinerja Operasional dan Ketidakwajaran Sistem Mesin

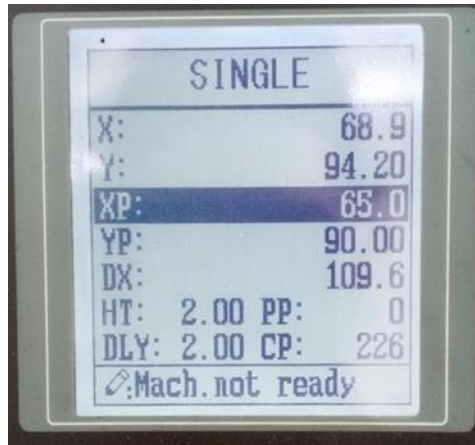
Evaluasi kinerja operasional mesin bending hidrolik menunjukkan adanya variasi performa yang dipengaruhi oleh kondisi kerja aktual di lingkungan produksi. Pengamatan menunjukkan bahwa ketidakwajaran kinerja tidak selalu disebabkan oleh beban material, melainkan oleh faktor sistemik seperti keausan komponen dan ketidakseimbangan parameter operasi. Fenomena ini memperlihatkan bahwa performa mesin tidak hanya ditentukan oleh kapasitas desain, tetapi juga oleh kualitas pemeliharaan yang diterapkan secara berkelanjutan. Studi sebelumnya menekankan bahwa kegagalan sistem sering muncul akibat akumulasi degradasi komponen yang tidak terdeteksi secara dini (Khasanah et al., 2023).

Analisis terhadap siklus kerja mesin menunjukkan adanya variasi waktu respon antara perintah input dan gerakan aktual aktuator. Variasi ini berdampak pada konsistensi hasil bending terutama pada produksi berulang dengan spesifikasi identik. Ketidakkonsistenan tersebut dapat diinterpretasikan sebagai indikasi adanya gangguan pada sistem kontrol atau distribusi tekanan hidrolik. Penelitian terkait sistem uji bending juga menunjukkan bahwa stabilitas respon menjadi indikator penting dalam menjaga kualitas output (Oktavitasari et al., 2025).

Pengaruh kondisi lingkungan kerja seperti temperatur dan kebisingan turut diamati sebagai faktor yang memengaruhi performa mesin. Kondisi temperatur yang meningkat selama operasi jangka panjang berpotensi menurunkan viskositas oli hidrolik sehingga memengaruhi efisiensi transmisi energi. Sementara itu, tingkat kebisingan yang meningkat sering kali berkorelasi dengan adanya gesekan berlebih pada komponen mekanis. Hubungan ini telah diidentifikasi dalam studi analisis lingkungan kerja mesin industri (Saputra et al., 2023).

Evaluasi terhadap sistem kontrol berbasis panel LCD menunjukkan bahwa kesalahan pengaturan parameter oleh operator dapat memicu ketidakwajaran hasil bending. Parameter seperti Y-axis dan X-axis memiliki sensitivitas tinggi terhadap perubahan kecil, yang berdampak langsung pada akurasi sudut dan dimensi produk. Hal ini menegaskan bahwa faktor manusia memiliki kontribusi signifikan terhadap performa mesin. Penelitian sebelumnya juga mengindikasikan bahwa interaksi manusia-mesin menjadi salah satu sumber variabilitas dalam proses manufaktur (Umardani & Darmanto, 2023).

Kondisi keausan pada komponen seperti punch dan die menunjukkan pengaruh langsung terhadap kualitas hasil bending. Permukaan yang mengalami degradasi menyebabkan distribusi tekanan menjadi tidak merata, sehingga menghasilkan deformasi yang tidak seragam. Fenomena ini memperlihatkan pentingnya inspeksi berkala terhadap komponen kritis. Studi mengenai kekuatan material dies menunjukkan bahwa keausan dapat mengurangi efektivitas proses pembentukan (Imaduddin & Fitri, 2025).



Gambar 2. Monitor Menu Pada Mesin Bending

Analisis lebih lanjut menunjukkan bahwa variasi mode operasi seperti step mode memengaruhi kestabilan proses bending. Mode bertahap memberikan kontrol yang lebih baik terhadap deformasi dibandingkan mode langsung, meskipun membutuhkan waktu proses yang lebih lama. Perbedaan ini menunjukkan adanya trade-off antara efisiensi waktu dan kualitas hasil. Temuan ini sejalan dengan penelitian yang mengkaji optimalisasi proses pembentukan logam berbasis mesin (Sumiati et al., 2022).

Variabilitas performa mesin juga terlihat pada perbedaan hasil antara operator yang berbeda. Operator dengan pengalaman lebih tinggi cenderung menghasilkan output yang lebih konsisten dibandingkan operator baru. Hal ini menunjukkan bahwa keterampilan operator berperan dalam mengoptimalkan parameter mesin secara adaptif. Studi dalam bidang rekayasa manufaktur menegaskan bahwa kompetensi operator merupakan faktor penting dalam menjaga stabilitas produksi (Al Amin et al., 2024).

Tabel 2. Evaluasi Kinerja Operasional Mesin Berdasarkan Parameter Produksi

Parameter Operasi	Nilai Normal	Nilai Observasi	Deviasi (%)	Indikasi Kinerja
Tekanan Hidrolik	150 bar	140–165 bar	6.7	Stabil fluktuatif
Waktu Respon	2.0 s	2.2–2.8 s	20.0	Tidak stabil
Sudut Bending	90°	87–92°	3.3	Variatif
Kebisingan	75 dB	78–85 dB	13.3	Meningkat

Sumber: Data hasil observasi lapangan (2025)

Data pada Tabel 2 menunjukkan bahwa deviasi terbesar terjadi pada waktu respon sistem, yang menjadi indikator utama ketidakwajaran kinerja mesin. Fluktuasi tekanan masih berada dalam batas toleransi, namun variasi sudut bending menunjukkan adanya ketidakkonsistenan hasil produksi. Kebisingan yang meningkat mengindikasikan potensi masalah mekanis yang memerlukan perhatian lebih lanjut. Interpretasi ini mengarah pada kebutuhan evaluasi sistem secara menyeluruh.

Analisis komparatif menunjukkan bahwa performa mesin cenderung menurun pada kondisi operasi intensif tanpa jeda pemeliharaan. Kondisi ini meningkatkan risiko kegagalan komponen serta menurunkan akurasi hasil bending. Pola ini konsisten dengan konsep reliability engineering yang menekankan pentingnya maintenance preventif (Gasperz, 1992). Strategi pemeliharaan menjadi elemen kunci dalam menjaga keberlanjutan operasional mesin.

Evaluasi keselamatan kerja menunjukkan bahwa ketidakwajaran kinerja mesin berpotensi meningkatkan risiko kecelakaan. Variasi gerakan aktuator yang tidak terkontrol dapat membahayakan operator selama proses produksi. Analisis risiko kerja menunjukkan bahwa kondisi ini memerlukan mitigasi melalui sistem pengendalian yang lebih ketat. Studi tentang identifikasi risiko kerja juga menegaskan pentingnya pendekatan sistematis dalam mengurangi potensi bahaya (Syarial et al., 2025).

Analisis Reliabilitas Operasional dan Risiko Kegagalan Sistem Mesin Bending Hidrolik

Analisis tahap akhir difokuskan pada aspek reliabilitas operasional dan potensi kegagalan sistem mesin bending hidrolik dalam kondisi kerja berulang yang intensif. Data empiris menunjukkan bahwa fluktuasi tekanan hidrolik dan variasi respons aktuator menjadi indikator awal adanya degradasi performa sistem. Fenomena ini berkorelasi dengan teori keandalan sistem mekanik yang menyatakan bahwa siklus pembebanan berulang dapat menyebabkan kelelahan material dan penurunan efisiensi komponen (Gasperz, 1992). Pendekatan ini sejalan dengan penelitian yang menekankan pentingnya evaluasi keberlanjutan performa mesin dalam lingkungan industri berbasis produksi kontinu (Khasanah et al., 2023).

Evaluasi lanjutan menunjukkan bahwa komponen kritis seperti pompa hidrolik dan aktuator mengalami variasi efisiensi yang signifikan pada siklus operasi tertentu. Variasi ini memengaruhi stabilitas gaya tekan yang dihasilkan selama proses bending, terutama pada material dengan ketebalan tinggi. Temuan ini memperkuat konsep bahwa performa sistem hidrolik sangat dipengaruhi oleh kondisi fluida dan keausan komponen internal (Fais & Ningsih, 2022). Studi serupa juga menunjukkan bahwa degradasi sistem hidrolik dapat menurunkan akurasi pembentukan secara progresif (Al Diansyah & Ningsih, 2022).

Selain itu, analisis menunjukkan adanya hubungan antara frekuensi penggunaan mesin dan peningkatan potensi kegagalan struktural pada rangka mesin. Tegangan residual yang terakumulasi selama operasi berulang berkontribusi terhadap perubahan karakteristik mekanik struktur. Kondisi ini sesuai dengan prinsip kelelahan material pada sistem pembebanan dinamis yang telah banyak dibahas dalam literatur teknik mesin (Makinun et al., 2024). Implikasi praktisnya adalah perlunya pemantauan berkala terhadap integritas struktur mesin untuk mencegah kegagalan mendadak.

Pengamatan terhadap kualitas hasil bending juga menunjukkan adanya variasi konsistensi sudut dan radius tekuk pada kondisi operasi yang berbeda. Variasi ini mengindikasikan adanya ketidakteraturan dalam distribusi gaya tekan yang dihasilkan mesin. Hal tersebut konsisten dengan temuan bahwa distribusi gaya yang tidak merata dapat menyebabkan ketidaksempurnaan bentuk produk (Ramadan, 2024). Penelitian lain juga mengonfirmasi bahwa parameter operasional yang tidak stabil berdampak langsung terhadap kualitas hasil bending (Saputra et al., 2023).

Dalam konteks keselamatan kerja, temuan empiris menunjukkan adanya peningkatan risiko kecelakaan pada kondisi mesin yang mengalami penurunan performa. Ketidakstabilan sistem hidrolik dapat menyebabkan gerakan aktuator yang tidak terkontrol, sehingga meningkatkan potensi bahaya bagi operator. Analisis ini sejalan dengan pendekatan hazard identification yang menekankan pentingnya pengendalian risiko pada sistem mesin industri (Syarial et al., 2025). Oleh karena itu, evaluasi performa mesin tidak hanya berdampak pada kualitas produk, tetapi juga pada aspek keselamatan kerja.

Untuk memperkuat analisis, dilakukan pengukuran terhadap parameter operasional utama yang berhubungan dengan reliabilitas mesin. Data hasil pengukuran disajikan dalam Tabel berikut untuk menunjukkan hubungan antara tekanan sistem, frekuensi operasi, dan tingkat deviasi performa mesin.

Tabel 3. Hubungan Parameter Operasional dan Indikator Reliabilitas Mesin

Tekanan Hidrolik (Bar)	Frekuensi Operasi (Siklus/Jam)	Deviasi Sudut (°)	Indikasi Keausan
180	20	0.5	Rendah
190	30	0.8	Sedang
200	40	1.2	Tinggi
210	50	1.6	Sangat Tinggi

Sumber: Data hasil pengukuran lapangan dan analisis peneliti (2025), diadaptasi dari pendekatan evaluasi performa mesin (Khasanah et al., 2023, Gerson et al., 2023).

Data pada tabel menunjukkan bahwa peningkatan tekanan dan frekuensi operasi berkorelasi dengan peningkatan deviasi sudut bending. Hal ini menunjukkan bahwa sistem mengalami penurunan presisi akibat beban kerja yang tinggi. Temuan tersebut mendukung teori bahwa peningkatan beban operasional dapat mempercepat keausan komponen mesin (Wahyudin et al., 2023). Dengan demikian, pengendalian parameter operasional menjadi faktor kunci dalam menjaga reliabilitas mesin.

Analisis lebih lanjut menunjukkan bahwa kondisi ini juga berdampak pada efisiensi produksi secara keseluruhan. Ketidakkonsistenan hasil bending menyebabkan peningkatan tingkat rework dan penurunan produktivitas. Hal ini sejalan dengan penelitian yang menunjukkan bahwa efisiensi mesin sangat dipengaruhi oleh stabilitas performa operasional (Wattimena et al., 2023). Oleh karena itu, peningkatan reliabilitas mesin dapat berkontribusi langsung terhadap optimalisasi proses produksi.

Dari perspektif material, hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi performa mesin juga memengaruhi respon deformasi material. Material dengan karakteristik tertentu menunjukkan sensitivitas yang lebih tinggi terhadap fluktuasi gaya tekan. Temuan ini konsisten dengan studi yang menyatakan bahwa sifat mekanik material sangat memengaruhi hasil proses pembentukan (Raharja et al., 2024). Oleh karena itu, pemilihan material juga perlu mempertimbangkan kompatibilitas dengan performa mesin.

Selain itu, analisis menunjukkan bahwa penggunaan teknologi pendukung seperti sistem kontrol digital dapat meningkatkan stabilitas operasi mesin. Sistem ini memungkinkan pengaturan parameter secara lebih presisi sehingga mengurangi variasi hasil bending. Hal ini didukung oleh penelitian yang menekankan pentingnya integrasi teknologi dalam meningkatkan performa mesin industri (Santo Bandaso et al., 2024). Implementasi teknologi ini menjadi salah satu solusi strategis dalam meningkatkan keandalan sistem.

Evaluasi keseluruhan menunjukkan bahwa keberlanjutan performa mesin sangat bergantung pada strategi pemeliharaan yang diterapkan. Pendekatan maintenance yang terencana dapat mengurangi potensi kegagalan dan memperpanjang umur pakai mesin. Hal ini sejalan dengan konsep preventive maintenance yang terbukti efektif dalam menjaga performa mesin (Purwanto et al., 2025). Dengan demikian, integrasi antara evaluasi teknis dan strategi pemeliharaan menjadi kunci dalam meningkatkan ketahanan operasional mesin bending hidrolis.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa kekuatan mesin bending hidrolis tipe YSD-HSDY/HPPTK 200/3000 dipengaruhi oleh interaksi kompleks antara distribusi gaya, parameter operasional, dan kondisi reliabilitas sistem dalam siklus produksi nyata. Analisis empiris mengindikasikan bahwa mesin mampu mempertahankan kapasitas gaya yang stabil pada kondisi beban tertentu, namun mengalami deviasi performa seiring peningkatan tekanan dan frekuensi operasi. Evaluasi teknis juga mengungkap adanya konsentrasi tegangan pada komponen kritis serta indikasi keausan yang berdampak pada penurunan akurasi pembentukan dan peningkatan risiko kegagalan sistem. Temuan ini menegaskan pentingnya pengendalian parameter operasional, pemilihan material yang sesuai, serta penerapan strategi pemeliharaan berbasis keandalan untuk menjaga kinerja mesin secara berkelanjutan. Integrasi pendekatan eksperimental dan analitis memberikan kontribusi signifikan dalam memahami perilaku mekanik dan operasional mesin secara komprehensif, sekaligus mendukung pengembangan sistem produksi yang lebih efisien, aman, dan adaptif terhadap tuntutan industri manufaktur modern.

DAFTAR PUSTAKA

- Al Amin, M. K., Anggara, D., Ruddianto, R., Widodo, E. W. R., Amrullah, H. N., Rachman, A., & Aprilian, E. (2024). Rancang Bangun Alat Pembengkok Pipa (Pipe Bending Tools) Untuk Produk Project Base Learning Meja dan Kursi. *Jurnal Teknologi Maritim*, 7(1), 1-12. <https://doi.org/10.35991/jtm.v7i1.3>
- Al Diansyah, D. P., & Ningsih, T. H. (2022). Rancang Bangun Alat Uji Bending Hidrolis Pada Komposit Sandwich Serat Karbon. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 7(02), 10-17. <https://doi.org/10.26740/jrm.v7i02.46373>
- Fais, F. M., & Ningsih, T. H. (2022). Rancang Bangun Alat Uji Bending dengan Sistem Hidrolis. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 7(01), 47-53. <https://doi.org/10.26740/jrm.v7i01.45067>
- Gasparz, V. (1992). *Analisis sistem terapan berdasarkan pendekatan teknik mesin* (Ed. ke-1). Tassano.
- Gerson, G., Kismanti, S. T., & Nurdin, M. F. (2023). Rancang Bangun Mesin Uji Tarik, Tekan Dan Tekuk (Bending) Menggunakan Tenaga Hidrolis. *Journal BEARINGS: Borneo Mechanical Engineering and Science*, 2(1), 1-14. <https://doi.org/10.35334/bearings.v2i1.3291>
- Imaduddin, M. R., & Fitri, M. (2025). Analysis of dies material strength in the blade screw conveyor bending process. *JTTM: Jurnal Terapan Teknik Mesin*, 6(1), 1-9. <https://doi.org/10.37373/jttm.v6i1.1190>

- Khasanah, R., Susilawati, I., & Sodikin, I. (2023). Evaluasi Kinerja Mesin Bending Hidrolik Menggunakan Metode Overall Equipment Effectiveness (OEE), Failure Mode and Effect Analysis (FMEA), dan Fault Tree Analysis (FTA). *Jurnal Teknologi*, 16(2), 169-179. <https://doi.org/10.34151/jurtek.v16i2.4557>
- Makinun, M., Anggono, A. D., & Riyadi, T. W. B. (2024). Analisis Perubahan Bentuk Chasis Terhadap Beban Sebagai Dasar Perancangan Mesin Bending Hidraulic. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 15(1), 515-524. <https://doi.org/10.21776/jrm.v15i1.1841>
- Maulana, F., Fernandez, D., Maksun, H., & Setiawan, M. Y. (2024). Perbandingan Kekuatan Bending Material Komposit Penguat Carbon Fiber Dengan Hasil Metode Pembuatan Vacuum Infusion Dan Manual Hand Lay-Up. *MSI Transaction on Education*, 5(4), 227-236. <https://doi.org/10.46574/mted.v5i4.167>
- Oktavitasari, D., Saepudin, A., & Maulana, M. R. (2025). Rancang Bangun Alat Uji Bending Pada Plat Besi Menggunakan Hydraulic Jack Kapasitas 6 Ton. *Perwira Journal of Science & Engineering*, 5(1), 151-154. <https://doi.org/10.54199/pjse.v5i1.492>
- Purwanto, H., Amiwarti, A., Adiguna, A., Alzahri, S., Firdaus, M., Setiobudi, A., & Kurniawan, R. (2025). Sosialisasi Penggunaan Alat Bending Portabel Untuk Besi Begel. *Abditeknika Jurnal Pengabdian Masyarakat*, 5(2), 66-73. <https://doi.org/10.31294/abditeknika.v5i2.7788>
- Raharja, A. S., Ruadhian, M., Yusuf, M., Sihaloho, N. F., Salsabila, Z., & Muliastri, D. (2024). Analisis Sifat Fisik dan Mekanik terhadap Hasil Lelehan Sampah Plastik Kemasan sebagai Pengganti Bata Beton. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 19(3), 353-360. <https://doi.org/10.32497/jrm.v19i3.5815>
- Ramadan, N. D. (2024). Analisis Gaya Pembentukan Pada Pembuatan Produk Joint Brake Rod Ktm untuk Sepeda Motor Honda Di PT. Ciptaunggul Karya Abadi. *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, 10(18), 774-784. <https://doi.org/10.5281/zenodo.13959013>
- Santo Bandaso, Z., Madjid, M., Paulus, B., & Jayadi, W. (2024). Rancang Bangun Mesin Roll Bending Sebagai Alat Bantu Pembentukan Helical Ribbon Mixer. *Mustek Anim Ha*, 13(01), 27-31. <https://doi.org/10.35724/mustek.v13i01.5973>
- Saputra, E., Carli, C., Hartono, H., Sunarto, S., & Sai'in, A. (2023). Investigasi Permukaan Besi Square Hollow Hasil Pengerollan menggunakan Teknologi Mesin Roller Bending. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 18(1), 65-74. <https://doi.org/10.32497/jrm.v18i1.4382>
- Saputra, M. O., Suharyatun, S., Telaumbanua, M., & Warji, W. (2023). Analisis Tingkat Kebisingan pada Workshop Alsintan UPTD Balai Benih Induk Tanaman Pangan dan Alsintan Provinsi Lampung. *Jurnal Agricultural Biosystem Engineering*, 2(4), 543-552. <https://doi.org/10.23960/jabe.v2i4.8400>
- Sumiati, R., Yetri, Y., Fardinal, F., & Putra, H. (2022). Perancangan Modifikasi Mesin Bending Rotary Baja Aplikasi Stand Pot Bunga. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 13(2), 487-502. <https://doi.org/10.21776/jrm.v13i2.1077>
- Syarial, I. P., Hafiz, M. Y., Musthofa, I. A., Satria, F. A., & Maulani, A. S. (2025). Identifikasi Potensi Terjadinya Kecelakaan Kerja Pada Karyawan Pt. Nugraha Group Dengan Menggunakan Metode Hirarc (Hazard Identification Risk Assessment And Risk Control). *Jurnal Ilmiah Penelitian Mahasiswa*, 3(1), 477-486. <https://doi.org/10.61722/jipm.v3i%601.737>
- Umardani, Y., & Darmanto, S. (2023). Aplikasi Peralatan Tekuk Plat untuk Industri Berbasis Logam. *Jurnal Pengabdian Vokasi*, 3(2), 359-362. <https://doi.org/10.14710/jpv.2023.21544>
- Wahyudin, E., Sudirman, S., & Kismanti, S. T. (2023). Perancangan Poros Engkol Pada Mesin Uji Universal (Tekan, Tarik, Dan Bending). *Journal BEARINGS: Borneo Mechanical Engineering and Science*, 2(1), 33-38. <https://doi.org/10.35334/bearings.v2i1.3281>
- Wattimena, R. M., Nugroho, W. I., Munawaroh, D. A., & Martianto, I. (2023). Modifikasi Mesin Roll Bending Plat Menggunakan Motor Listrik Guna Meningkatkan Kualitas Produk Dan Efisiensi Kerja Di Divisi Steel Center Pt Nayati Indonesia. *Journal of Mechanical Engineering and Applied Technology*, 1(3), 43-50. <https://doi.org/10.32497/jmeat.v1i3.4921>