Cylinder: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin
Volume 11, Nomor 02, Oktober 2026
ISSN 2252-925X (Online)

Rekayasa Perbaikan Cushion Rod SCM440/AISI 4140 melalui Penyambungan Las dan Post-Weld Heat Treatment: Studi Kasus pada Mesin Stamping Press 800 Ton FUKUI

Tri Murniati[1], Cahyo Wibowo[2], Djoko Setyanto[1]*
[1]Program Studi Program Profesi Insinyur, Fakultas Biosains, Teknologi, dan Inovasi, Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya
[2] Program Studi Teknik Mesin Universitas Mpu Tantular, Jakarta
E-mail: djoko.setyanto@atmajaya.ac.id

ABSTRAK

Cushion rod atau *shaft adjuster* merupakan salah satu komponen pada *stamping press* yang berfungsi mendukung mekanisme cushion selama proses pembentukan. Kerusakan berupa patah pada komponen tersebut dapat mengganggu keandalan dan kontinuitas operasional mesin, sehingga diperlukan metode perbaikan yang mampu mengembalikan fungsi komponen secara efektif. Penelitian ini membahas rekayasa perbaikan *cushion rod* pada mesin Fukui *stamping press* berkapasitas 800 ton menggunakan metode penyambungan las yang dilanjutkan dengan *post-weld heat treatment* (PWHT). Material komponen yang digunakan adalah baja paduan rendah SCM440. Metode penelitian dilakukan melalui tahapan pembongkaran komponen, pemotongan bagian yang mengalami kerusakan, persiapan permukaan, pembuatan bagian pengganti melalui proses pemesinan, penyambungan dengan pengelasan, PWHT, perakitan kembali, dan *running a test.* Parameter proses perbaikan disusun dengan mempertimbangkan temperatur *preheating*, temperatur *interpass*, temperatur PWHT, serta waktu penahanan. PWHT diterapkan untuk mengurangi tegangan sisa yang dihasilkan selama proses pengelasan. Hasil rekayasa menunjukkan bahwa metode penyambungan las yang dilanjutkan PWHT dapat diterapkan sebagai alternatif perbaikan *cushion rod* SCM440 yang mengalami patah pada *stamping press* 800 ton. Tahapan perbaikan yang sistematis memungkinkan komponen dikembalikan ke posisi perakitan dan dilakukan verifikasi melalui *running a test* untuk memastikan fungsi operasionalnya.

Kata kunci : Batang Bantalan; Mesin Pres *Stamping*; Pengelasan; Perbaikan; PWHT; SCM440.

ABSTRACT

The cushion rod or shaft adjuster is a critical component in a stamping press that supports the cushion mechanism during the forming process. A fracture failure in this component can disrupt machine reliability and operational continuity, making an effective repair method essential to restore component functionality. This study discusses the engineering repair of a cushion rod in an 800-ton Fukui stamping press using a welding-joining method followed by post-weld heat treatment (PWHT). The material used for the component is SCM440 low-alloy steel. The research methodology encompasses component disassembly, removal of the fractured section, surface preparation, fabrication of a replacement part via machining, welding joining, PWHT, reassembly, and running a test. Repair parameters were formulated by considering preheating temperature, interpass temperature, PWHT temperature, and holding time. PWHT was applied to reduce residual stresses induced during the welding process. The engineering results demonstrate that the welding method combined with PWHT can be effectively applied as a repair alternative for fractured SCM440 cushion rods in an 800-ton stamping press. This systematic repair sequence enables the component to be reinstated into its assembly position and verified through running a test to ensure its operational functionality.

Keywords **:** *Cushion Rod; Stamping Press ;Welding; Repair; PWHT; SCM440*

1. PENDAHULUAN

Keandalan komponen mesin merupakan salah satu faktor penting dalam menjaga kontinuitas proses produksi pada industri manufaktur. Kondisi tersebut menjadi semakin kritis pada mesin *stamping*

press yang bekerja dengan gaya pembentukan sangat besar dan menerima pembebanan siklik berulang selama proses produksi [1]. Komponen struktural yang bekerja pada sistem pres mekanis ini rentan mengalami berbagai bentuk kerusakan akibat kombinasi beban mekanis, konsentrasi tegangan, serta kondisi operasional yang berat [2]. Kegagalan pada komponen mesin tidak hanya menyebabkan penghentian lini produksi (*downtime*), tetapi juga meningkatkan biaya pemeliharaan. Oleh karena itu, penanganan kerusakan komponen melalui strategi pemeliharaan dan analisis perbaikan yang tepat menjadi aspek krusial dalam menjaga keandalan mesin [3].

Dalam manajemen pemeliharaan industri, identifikasi potensi kegagalan secara sistematis melalui pendekatan analisis risiko sangat penting untuk mengevaluasi akar permasalahan komponen sebelum tindakan rekayasa ditentukan [4]. Pada komponen mekanis mesin *stamping press*, mekanisme kegagalan fisik tersebut umumnya berkaitan dengan pembebanan mekanis berulang, konsentrasi tegangan, keausan, deformasi, serta perambatan retak akibat kelelahan (*fatigue*) yang pada akhirnya menyebabkan hilangnya fungsi komponen [2]. Penelitian sebelumnya menjelaskan bahwa kegagalan pada komponen struktural mesin pres berkembang akibat interaksi kompleks antara kondisi pembebanan siklik dan karakteristik material [5]. Kajian lain juga menunjukkan bahwa pemilihan metode perbaikan dan penanganan kerusakan harus mempertimbangkan jenis kerusakan, kondisi material, serta tuntutan operasional di lapangan [6]. Oleh karena itu, perbaikan komponen yang mengalami kerusakan perlu dirancang tidak hanya untuk mengembalikan bentuk geometrinya, tetapi juga untuk memperoleh kembali integritas struktural yang andal sesuai dengan kondisi operasionalnya.

Salah satu metode yang banyak digunakan untuk memperpanjang umur pakai komponen yang mengalami kerusakan adalah *repair welding*. Metode ini memungkinkan bagian yang rusak atau patah dipotong dan digantikan dengan material baru melalui proses penyambungan, sehingga komponen tidak selalu harus dibuat kembali secara keseluruhan. Penerapan *repair welding* pada komponen baja paduan telah dilaporkan dapat menjadi alternatif yang efektif untuk memperpanjang masa penggunaan komponen dan mengurangi kebutuhan penggantian secara menyeluruh [7]. Pendekatan perbaikan ini juga berkaitan erat dengan pengendalian sifat metalurgi material, di mana evaluasi proses pengelasan dan perlakuan termal pascapengelasan (*post-weld heat treatment*) memegang peranan penting dalam menjaga integritas struktural sambungan [8].

Meskipun demikian, proses pengelasan pada baja paduan dapat menghasilkan perubahan metalurgi dan tegangan sisa pada daerah sambungan. Siklus pemanasan dan pendinginan selama pengelasan menyebabkan terbentuknya *heat-affected zone* (HAZ) dan dapat menghasilkan distribusi sifat material yang berbeda antara logam induk, daerah HAZ, dan logam las. Kondisi tersebut menjadi perhatian khusus pada baja paduan seperti SCM440 yang digunakan untuk komponen dengan tuntutan kekuatan mekanis tinggi. SCM440 memiliki karakteristik yang sebanding dengan kelompok baja paduan Cr-Mo yang banyak digunakan pada aplikasi komponen mekanis, sehingga pengendalian kondisi pengelasan menjadi penting untuk mempertahankan performa komponen. Penelitian mengenai baja paduan SCM440 menunjukkan bahwa proses pengelasan dan pelapisan dapat memengaruhi karakteristik permukaan serta materialnya [9], dan perlakuan pascapengelasan perlu dipertimbangkan untuk meningkatkan performa struktural sambungannya [10].

Salah satu pendekatan untuk mengendalikan pengaruh proses pengelasan adalah *post-weld heat treatment* (PWHT). PWHT digunakan untuk membantu mengurangi tegangan sisa serta mengendalikan perubahan mikrostruktur dan sifat mekanis yang terbentuk akibat siklus termal pengelasan. Dewan *et al*. [8] menunjukkan bahwa PWHT dapat

memengaruhi kondisi material pada baja paduan AISI 4140 yang dilas, sedangkan Aung *et al*. [10] menunjukkan hubungan antara PWHT dan peningkatan performa kelelahan pada sambungan hasil perbaikan. Pada material AISI 4140, Silva *et al*. [7] juga menunjukkan pentingnya mempertimbangkan kondisi pasca pengelasan dalam evaluasi hasil *repair*. Temuan tersebut memberikan dasar bahwa pengelasan dan PWHT perlu dipandang sebagai satu rangkaian proses dalam perbaikan komponen baja paduan yang menerima pembebanan mekanis.

Relevansi proses tersebut juga terlihat pada aplikasi SCM440. Thongsong *et al*. [9] melaporkan penerapan proses GTAW pada permukaan baja SCM440, yang menunjukkan bahwa material tersebut dapat diproses menggunakan teknologi pengelasan dengan mempertimbangkan karakteristik permukaan dan kondisi sambungan. Dengan demikian, penerapan *repair welding* pada komponen SCM440 memerlukan pengendalian parameter proses dan perlakuan pascapengelasan agar integritas sambungan dapat dipertahankan.

Pada kasus yang dikaji dalam penelitian ini, komponen *cushion rod*/*shaft adjuster* yang digunakan pada mesin *stamping press* berkapasitas 800 ton mengalami patah sehingga diperlukan tindakan rekayasa perbaikan untuk mengembalikan fungsi komponen. Komponen tersebut menggunakan material SCM440 dan bekerja sebagai bagian dari sistem *press* yang menerima beban mekanis selama pengoperasian. Kondisi kerusakan tersebut memberikan permasalahan praktis berupa kebutuhan untuk menentukan metode perbaikan yang mampu mengembalikan fungsi komponen tanpa melakukan penggantian keseluruhan sistem. Pemanfaatan material SCM440 sebagai material pengganti dan penerapan *repair welding* dengan *PWHT* menjadi pendekatan yang perlu dievaluasi dari perspektif proses manufaktur dan keandalan komponen.

Penelitian terdahulu telah banyak membahas kegagalan komponen mekanis, teknologi *repair welding*, serta pengaruh PWHT terhadap material baja paduan. Namun, sebagian besar kajian tersebut berfokus pada spesimen sambungan las atau material baja paduan dalam kondisi pengujian laboratorium. Kajian yang mendokumentasikan penerapan langsung rangkaian pemotongan bagian yang patah, pembuatan bagian pengganti, *machining*, penyambungan las, PWHT, *assembly*, dan *running test* pada *cushion rod*/*shaft adjuster* SCM440 dari mesin stamping press 800 ton masih terbatas. Dengan demikian, terdapat kebutuhan untuk mendokumentasikan dan menganalisis penerapan metode perbaikan tersebut pada komponen aktual dalam kondisi aplikasi industri.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji proses rekayasa perbaikan *cushion rod*/*shaft adjuster* berbahan SCM440 yang mengalami patah pada mesin stamping press 800 ton melalui metode penyambungan las dan *post-weld heat treatment*. Kajian mencakup tahapan identifikasi kerusakan, penggantian bagian yang patah, persiapan dan pemesinan komponen, proses pengelasan, penerapan PWHT, perakitan kembali, serta *running test*. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan dokumentasi teknis dan dasar evaluasi terhadap penerapan metode *repair welding* dan PWHT sebagai alternatif perbaikan komponen SCM440 pada aplikasi mesin stamping press.

Adapun material awal atau orisinil dari komponen cushion rod tersebut adalah baja paduan rendah SCM440. Pemilihan material pengganti dengan jenis yang sama (SCM440) memastikan terjadinya ikatan metalurgi yang sangat baik dan kohesif dengan material orisinil, sehingga karakteristik mekanis sambungan las dapat dipertahankan secara optimal sesuai dengan tuntutan beban operasional mesin stamping press.

2. METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan pendekatan *engineering case study* pada proses perbaikan komponen *cushion rod*/*shaft adjuster* yang digunakan pada mesin stamping press berkapasitas 800 ton.

Komponen mengalami kerusakan berupa patah pada bagian *rod*, sehingga diperlukan proses perbaikan untuk mengembalikan fungsi komponen pada kondisi operasi mesin. Material yang digunakan untuk komponen pengganti adalah baja paduan SCM440. Objek penelitian dan posisi *cushion rod*/*shaft adjuster* pada sistem stamping press ditunjukkan pada Gambar 1. Informasi mengenai komponen, material, dan aplikasinya disajikan pada Tabel 1.



Gambar 1. Mesin Fukui 800 ton + cushion rod/shaft adjuster

Tabel 1. Informasi material dan komponen

Parameter	Informasi
Komponen	Cushion rod / shaft adjuster
Material	SCM440
Aplikasi	Stamping press 800 ton
Kondisi perbaikan	Komponen mengalami patah
Metode perbaikan	Penyambungan las + PWHT
Material pengganti	SCM440

Tahap awal dilakukan melalui pemeriksaan visual terhadap kondisi *cushion rod* setelah terjadi patah. Pemeriksaan bertujuan mengidentifikasi bagian yang mengalami kerusakan dan menentukan bagian komponen yang masih dapat dipertahankan. Hasil pemeriksaan menunjukkan adanya patahan pada bagian *cushion rod* yang memerlukan penggantian bagian yang rusak. Kondisi komponen yang mengalami patah serta identifikasi material SCM440 ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Kondisi cushion rod yang patah + hasil identifikasi material SCM440

Setelah lokasi kerusakan ditentukan, bagian yang patah dipotong untuk memperoleh permukaan yang dapat dipersiapkan sebagai daerah sambungan. Permukaan hasil pemotongan kemudian dibersihkan dan dipersiapkan melalui proses *machining*. Tahapan pemotongan dan persiapan ujung sambungan ditunjukkan pada Gambar 3.

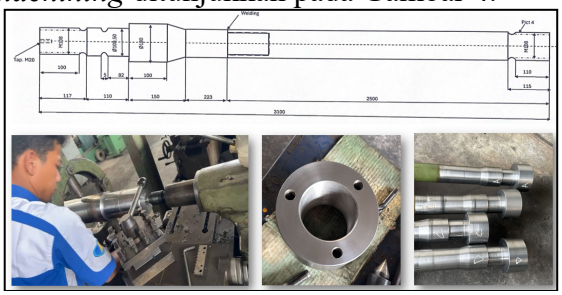


Gambar 3. Proses pemotongan bagian cushion rod yang patah + persiapan ujung untuk penyambungan

Persiapan permukaan dilakukan untuk memperoleh kondisi sambungan yang sesuai sebelum proses penyambungan. Pengendalian kondisi permukaan sambungan merupakan salah satu aspek penting dalam *repair welding*, khususnya pada baja paduan berkeandalan tinggi yang mengalami siklus termal berulang selama pengelasan [9], [11]. Bagian pengganti dibuat menggunakan material SCM440 dengan dimensi yang disesuaikan dengan desain *cushion rod* pada mesin. Proses pembuatan meliputi pembentukan bagian pengganti dan *machining* untuk memperoleh dimensi serta geometri yang presisi [12], dengan tetap memperhatikan karakteristik integritas material terhadap respons perlakuan termal [13]. Pendekatan perbaikan ini sejalan dengan perkembangan teknologi *remanufacturing* komponen industri berat yang mengombinasikan proses mekanis dan termal secara efektif [14], sehingga potensi kegagalan operasional akibat cacat sambungan dapat diminimalkan sejak tahap persiapan awal [15].

Setelah bagian pengganti selesai dibuat, dilakukan penyesuaian terhadap bagian komponen yang akan disambungkan. Proses tersebut meliputi pemeriksaan

kesesuaian dimensi dan penyelarasan posisi antara bagian lama dengan bagian pengganti. Desain bagian pengganti dan proses *machining* ditunjukkan pada Gambar 4.



Tahap *machining* presisi diperlukan untuk memastikan bahwa komponen hasil perbaikan dapat dirakit kembali dengan bagian *shaft adjuster* dan *nut lock*, sekaligus memulihkan toleransi geometris yang akurat. Pendekatan rekayasa perbaikan dengan mempertahankan bagian komponen yang masih layak dan mengganti bagian yang rusak merupakan strategi *remanufacturing* yang efektif untuk memperpanjang masa layanan komponen industri [7], [14]. Lebih lanjut, keberhasilan pemulihan fungsional komponen ini sangat bergantung pada mitigasi tegangan sisa [16], [17] serta optimalisasi respons material terhadap siklus termal dan mekanis pasca-pemesinan [18].

Setelah persiapan permukaan dan penyesuaian bagian pengganti selesai, dilakukan proses penyambungan menggunakan pengelasan. Sebelum pengelasan, daerah sambungan diberikan pemanasan awal (*preheating*). *Preheating* dilakukan untuk mengendalikan kondisi termal selama proses pengelasan dan mengurangi risiko terbentuknya kondisi mikrostruktur yang tidak diinginkan pada daerah sambungan [9], [16].

Selama pengelasan, temperatur antarlapis (*interpass temperature*) dikendalikan sesuai dengan parameter proses yang digunakan. Pengendalian temperatur diperlukan karena siklus termal pengelasan dapat memengaruhi mikrostruktur, kekerasan, dan tegangan sisa pada daerah sambungan [9], [16]. Setelah proses pengelasan selesai, komponen diberikan perlakuan panas pascapengelasan atau *post-weld heat treatment* (PWHT). PWHT diterapkan untuk mengendalikan kondisi material setelah pengelasan, khususnya berkaitan dengan pereduksian tegangan sisa dan homogenisasi perubahan mikrostruktur akibat siklus termal pengelasan [12], [18]. Proses pengelasan, *preheating*, dan PWHT pada komponen ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Proses welding/preheating + PWHT shaft adjuster cushion rod

PWHT dilakukan pada rentang temperatur 540-650 °C dengan waktu penahanan (*holding time*) sebesar 1 jam untuk setiap 25 mm ketebalan material. Parameter tersebut digunakan sebagai kondisi perlakuan panas pada proses perbaikan komponen. Parameter pengelasan dan PWHT yang digunakan dalam proses perbaikan dirangkum pada Tabel 2.

Tabel 2. Rekomendasi parameter pengelasan dan PWHT

Parameter	Rentang rekomendasi
Pemanasan awal, <12 mm	150 - 250 °C
Pemanasan awal, 12–50 mm	250 - 350 °C
Pemanasan awal, >50 mm	350 - 450 °C
Temperatur antar-lapis (*interpass*)	200 - 350 °C
PWHT	540 - 650 °C
Waktu penahanan	1 jam/25 mm

Penggunaan PWHT pada sambungan baja paduan berkaitan dengan pengendalian tegangan sisa dan perubahan mikrostruktur setelah pengelasan. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa PWHT dapat memengaruhi relaksasi tegangan sisa serta evolusi mikrostruktur pada material dan sambungan hasil pengelasan [15]-[18]. Secara keseluruhan, tahapan perbaikan terdiri atas pembongkaran komponen, pemotongan bagian yang patah, persiapan permukaan, pembuatan dan *machining* bagian pengganti, penyambungan las, PWHT, perakitan kembali, dan *running test*.

Urutan proses tersebut disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Tahapan proses perbaikan

Tahap	Proses	Tujuan
1	Pembongkaran (*disassembly*)	Melepas komponen yang mengalami kerusakan
2	Pemotongan (*cutting*)	Menghilangkan bagian yang mengalami patah
3	Persiapan permukaan (*surface preparation*)	Menyiapkan permukaan untuk penyambungan
4	Pemesinan (*machining*)	Membuat bagian pengganti
5	Pengelasan (*welding*)	Menyambungkan bagian pengganti
6	PWHT	Mengurangi tegangan sisa akibat pengelasan
7	Perakitan (*assembly*)	Memasang kembali komponen
8	*Running test*	Memverifikasi fungsi operasional komponen

Tahapan tersebut menjadi dasar evaluasi pada bagian hasil dan pembahasan, khususnya untuk menilai kondisi komponen setelah proses perbaikan dan penerapannya kembali pada sistem stamping press.

Proses penyambungan komponen menggunakan metode las *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) / *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) yang dipilih karena kemampuannya menghasilkan penetrasi yang dalam serta kontrol panas yang baik untuk material paduan tinggi. *Filler metal* yang digunakan adalah kawat las berpaduan rendah yang memiliki komposisi kimia dan kekuatan tarik selaras dengan baja SCM440 (seperti spesifikasi ER80S-B2 atau setara), guna memastikan tingkat kompatibilitas dan keuletan sambungan las yang optimal terhadap beban siklik mesin stamping press.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pemeriksaan terhadap *cushion rod/shaft adjuster* menunjukkan adanya patah pada bagian *rod* yang menyebabkan komponen tidak dapat menjalankan fungsinya pada sistem *stamping press* 800 ton. Kondisi tersebut memerlukan tindakan perbaikan agar fungsi komponen dapat dikembalikan tanpa harus mengganti keseluruhan rangkaian komponen.

Kerusakan pada komponen yang bekerja pada sistem *stamping* perlu dipertimbangkan karena komponen menerima pembebanan mekanis selama pengoperasian mesin. Literatur mengenai kegagalan *stamping tools* menunjukkan bahwa kerusakan dapat berkembang akibat kombinasi pembebanan mekanis, kondisi termal, konsentrasi tegangan, keausan, dan perkembangan retak [19], [20]. Oleh karena itu, pemilihan metode perbaikan harus mempertimbangkan kondisi kerusakan dan tuntutan operasional komponen.

Pada kasus ini, bagian yang mengalami patah tidak diganti seluruhnya. Bagian yang rusak dipotong, sedangkan bagian komponen yang masih dapat digunakan dipertahankan. Pendekatan tersebut memungkinkan proses pemulihan komponen dilakukan secara lokal melalui pembuatan bagian pengganti dan penyambungan, sebagaimana prinsip *repair* yang telah diterapkan pada berbagai komponen [7], [19].

Setelah bagian yang patah dipotong, permukaan sambungan dipersiapkan melalui proses pembersihan dan *machining*. Bagian pengganti kemudian dibuat menggunakan material SCM440 dengan dimensi yang disesuaikan terhadap desain dan konfigurasi komponen. Hasil persiapan tersebut memungkinkan bagian pengganti ditempatkan pada posisi yang sesuai sebelum dilakukan proses pengelasan. Keselarasan geometri menjadi faktor penting karena komponen harus dapat dirakit kembali dengan *shaft adjuster* dan *nut lock* setelah proses perbaikan selesai.

Proses pengelasan dilakukan setelah permukaan sambungan dipersiapkan dan diberikan *preheating*. Pengendalian temperatur selama pengelasan diperlukan karena siklus pemanasan dan pendinginan dapat menghasilkan perubahan mikrostruktur serta tegangan sisa pada daerah sambungan. Pada baja paduan yang sekelompok dengan SCM440, pengaruh proses pengelasan dan perlakuan pascapengelasan terhadap kondisi material

telah dilaporkan dalam penelitian sebelumnya [9], [10].

Penerapan *repair welding* pada komponen *stamping* juga telah digunakan sebagai salah satu metode untuk mengembalikan fungsi dan memperpanjang masa penggunaan komponen. Penelitian sebelumnya menunjukkan penerapan *repair welding* pada *stamping dies* [7], sedangkan penelitian lain membahas karakteristik material dan antarmuka pada aplikasi perbaikan *forming die* [20].

Setelah proses pengelasan selesai, dilakukan *post-weld heat treatment* (PWHT). Tahap ini merupakan bagian penting dari rangkaian perbaikan karena proses pengelasan dapat menghasilkan tegangan sisa dan perubahan mikrostruktur akibat siklus termal. PWHT pada penelitian ini dilakukan menggunakan rentang temperatur 540-650 °C dengan waktu penahanan 1 jam untuk setiap 25 mm ketebalan material. Parameter tersebut digunakan sebagai kondisi perlakuan panas pada proses perbaikan komponen.

Parameter Post-Weld Heat Treatment (PWHT) yang dipilih, yaitu pada rentang temperatur 540–650 °C dengan waktu penahanan (*holding time*) 1 jam per 25 mm ketebalan, ditentukan dengan mempertimbangkan karakteristik metalurgi material SCM440 baik pada bagian awal maupun bagian pengganti, serta kompatibilitas dengan *filler* las. Baja paduan rendah SCM440 mengandung unsur Kromium dan Molibdenum (Cr-Mo) yang sensitif terhadap pembentukan struktur martensit getas pada zona pengaruh panas (*Heat-Affected Zone* / HAZ) akibat siklus pendinginan cepat setelah pengelasan. Oleh karena itu, rentang temperatur PWHT tersebut dirancang secara spesifik untuk memfasilitasi proses *tempering*, mereduksi tegangan sisa (*residual stress*) secara optimal, memulihkan keuletan material, serta menyeragamkan struktur mikro secara menyeluruh baik pada logam induk (material awal dan pengganti) maupun pada logam las (*weld metal*).

Secara metalurgi, penerapan PWHT memberikan pengaruh yang signifikan dan menyeluruh pada seluruh zona sambungan, baik pada material awal dan pengganti (logam induk) maupun pada material penyambung (filler las) beserta daerah Heat-Affected Zone (HAZ). Pada bagian logam las (filler), PWHT sangat krusial untuk melunakkan struktur mikro getas akibat pembentukan fasa non-ekuilibrium selama pembekuan las. Sementara itu, pada material awal dan pengganti berbahan SCM440, PWHT berfungsi untuk merelaksasi tegangan sisa termal yang timbul akibat perbedaan gradien suhu yang tinggi selama proses pengelasan. Oleh karena itu, pengaruh PWHT tidak berdiri sendiri pada salah satu bagian saja, melainkan bekerja secara sinergis untuk menyetarakan sifat mekanis di sepanjang daerah sambungan las dan meminimalkan risiko kegagalan struktural.

PWHT dapat menyebabkan relaksasi sebagian tegangan sisa yang terbentuk selama pengelasan. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa PWHT berpengaruh terhadap distribusi tegangan sisa pada sambungan las [21]. Parameter proses PWHT juga berperan dalam proses relaksasi tegangan sisa dan perlu dipertimbangkan dalam optimasi perlakuan pascapengelasan [22]. Selain itu, pelepasan tegangan sisa selama PWHT berkaitan dengan mekanisme yang berlangsung selama pemanasan dan penahanan [23].

Selain tegangan sisa, PWHT dapat memengaruhi kondisi mikrostruktur dan kekerasan material. Penelitian mengenai material yang digunakan untuk perbaikan *stamping equipment* menunjukkan adanya perubahan mikrostruktur dan kekerasan setelah PWHT [18]. Dengan demikian, penerapan PWHT pada komponen hasil *repair welding* merupakan tahapan yang relevan untuk membantu mengendalikan kondisi sambungan sebelum komponen digunakan kembali.

Namun, pada penelitian ini tidak dilakukan pengukuran tegangan sisa, kekerasan, atau karakterisasi mikrostruktur setelah PWHT. Oleh karena itu, pengaruh PWHT terhadap parameter tersebut tidak dinyatakan secara kuantitatif, melainkan

dibahas berdasarkan fungsi dan dasar ilmiah proses PWHT yang telah dilaporkan dalam penelitian terdahulu. Setelah proses pengelasan dan PWHT selesai, komponen hasil perbaikan dirakit kembali pada sistem *stamping press*. Perakitan meliputi pemasangan *nut lock*, *shaft adjuster*, dan *cover cushion*. Kondisi komponen setelah perakitan dan pelaksanaan *running test* ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Assembly nut lock/shaft adjuster/cover cushion + *running test*

Hasil perakitan menunjukkan bahwa komponen hasil perbaikan dapat ditempatkan kembali pada sistem *cushion* dan diintegrasikan dengan komponen pendukungnya. Selanjutnya, *running test* dilakukan untuk mengetahui fungsi komponen setelah seluruh proses perbaikan selesai. Berdasarkan hasil *running test*, mesin dapat dioperasikan kembali setelah komponen dipasang. Dengan demikian, rangkaian perbaikan yang meliputi penggantian bagian yang patah, *machining*, penyambungan las, PWHT, dan *assembly* mampu mengembalikan fungsi operasional komponen pada kondisi penggunaan yang diamati.

Keberhasilan fungsional komponen hasil perbaikan didasarkan pada beberapa parameter kuantitatif yang ketat, meliputi: (1) Akurasi dimensi dan toleransi pemesinan (*machining tolerance*), di mana diameter poros dan ulir (*nut lock*) disesuaikan kembali dengan deviasi dimensi dalam batas izin presisi (toleransi ±0,05 mm) agar dapat terpasang secara mulus pada rumahan (*housing*) mesin; (2) Keselarasan sumbu geometris (*runout/alignment*), yang memastikan komponen bebas dari deviasi kemiringan atau puntiran untuk mencegah keausan tidak merata; serta (3) Stabilitas operasional mekanis pada *running test* di mana sistem *cushion* mampu menerima beban tekan operasional mesin *stamping press* tanpa mengalami deformasi permanen, kebocoran, atau hambatan mekanis selama siklus pengoperasian awal.

Hasil tersebut perlu dibedakan antara keberhasilan fungsional dan keberhasilan mekanis jangka panjang. *Running test* menunjukkan bahwa komponen dapat berfungsi ketika dipasang kembali pada sistem mesin, tetapi belum memberikan data kuantitatif mengenai kekuatan sambungan, ketahanan terhadap *fatigue*, tegangan sisa, atau umur layanan. Hal ini penting karena penelitian mengenai perbaikan komponen melalui pengelasan menunjukkan bahwa tegangan sisa dan kondisi mikrostruktur dapat berpengaruh signifikan terhadap performa komponen selama pembebanan [24], [25]. Selain itu, evaluasi terhadap integritas struktural komponen mesin *press* yang diperbaiki memerlukan analisis kegagalan yang mendalam guna mengantisipasi risiko kerusakan berulang pada area kritis selama masa operasional [26].

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa proses perbaikan dilakukan sebagai suatu rangkaian yang saling berkaitan, bukan hanya sebagai proses pengelasan. Pemotongan bagian yang patah menghilangkan daerah kerusakan, pembuatan dan *machining* menghasilkan bagian pengganti dengan geometri yang diperlukan, sedangkan pengelasan menyatukan bagian pengganti dengan komponen yang masih dipertahankan. Selanjutnya, PWHT diterapkan sebagai perlakuan pascapengelasan sebelum komponen dirakit kembali.

Pendekatan tersebut sejalan dengan penelitian mengenai perbaikan komponen *stamping equipment* yang menunjukkan pentingnya integrasi antara proses perbaikan, karakteristik material, dan perlakuan pascapengelasan [24]. Studi lain juga menekankan pentingnya manajemen pemeliharaan dan kondisi perlakuan permukaan dalam kaitannya dengan keandalan komponen pengerjaan logam [26], [27].

Dari perspektif penerapan di lapangan, metode yang digunakan memberikan alternatif untuk mengembalikan fungsi komponen tanpa mengganti keseluruhan komponen. Hasil *running test* memberikan indikasi bahwa komponen hasil perbaikan dapat digunakan kembali dalam sistem *stamping press* 800 ton. Meskipun demikian, validasi lebih lanjut melalui pengujian mekanis dan metalurgi tetap diperlukan apabila tujuan penelitian diarahkan pada penentuan kekuatan sambungan, ketahanan *fatigue*, atau prediksi umur layanan [28], [29]. Oleh karena itu, penerapan praktik perbaikan yang terdokumentasi dengan baik dapat menjadi acuan dalam strategi pemeliharaan preventif dan korektif pada industri komponen logam [30].

Pengujian keberhasilan fungsi pada tahap ini dilakukan melalui uji coba operasional awal (*running test* atau *trial run* fungsional) setelah proses perakitan, di mana komponen diverifikasi untuk memastikan dapat terpasang dengan presisi dan menggerakkan mekanisme sistem *cushion* pada mesin *stamping press* 800 ton. Pengujian ini baru mencakup verifikasi fungsional tahap awal (*initial stroke*) dan belum diuji dalam jumlah siklus operasional penuh (*cyclic testing*). Terkait pemakaian secara berkelanjutan (*continuous operation*), pengoperasian jangka panjang tentu akan berpengaruh signifikan terhadap keandalan fungsi komponen. Akumulasi pembebanan siklik berulang selama proses *stamping* berkapasitas besar berpotensi memicu fenomena kelelahan material (*fatigue*), perambatan retak mikro, atau relaksasi tegangan lanjutan pada area sambungan las. Oleh karena itu, meskipun uji coba awal mengonfirmasi pemulihan fungsi secara fungsional, pemantauan berkala (*preventive maintenance*) dan pengujian siklik lanjutan tetap diperlukan untuk memastikan keandalan jangka panjang komponen hasil perbaikan.

Secara keseluruhan, kontribusi utama kasus ini adalah dokumentasi penerapan metode *repair welding* yang dilanjutkan dengan PWHT pada komponen aktual SCM440 yang digunakan pada *stamping press* 800 ton. Hasil yang diperoleh menunjukkan pemulihan fungsi operasional komponen, sedangkan karakteristik mekanis dan metalurgi setelah perbaikan menjadi aspek yang dapat dikaji lebih lanjut pada penelitian berikutnya.

DAFTAR PUSTAKA

[1] C. H. Chang, B. J. Liao, and C. C. Kuo, "Structural design for open gap stamping press," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 134, no. 1, pp. 853–870, 2024. https://doi.org/10.1007/s00170-024-14146-x

[2] P. R. da Costa, V. Infante, and M. Freitas, "Investigation of a premature failure axle from a road-rail truck under rotary bending fatigue," *Engineering Failure Analysis*, vol. 173, p. 109464 2025. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2025.109464

[3] R. M. Tadjikuziyev, "Technology of repair of press molds for production of machine parts from steel coils, aluminum alloys," *American Journal Of Applied Science And Technology*, vol. 2, no. 04, pp. 1–11, 2022. DOI:10.37547/ajast/Volume02Issue04-01

[4] A. S. Relkar, "Risk analysis of equipment failure through failure mode and effect analysis and fault tree analysis," *Journal of Failure Analysis and Prevention*, vol. 21, no. 3, pp. 793–805, 2021. https://doi.org/10.1007/s11668-021-01117-7

[5] S. Barzegar-Mohammadi, M. Haghpanahi, M. Zeinoddini, and R. Miresmaeili, "Cooling rate effects on fatigue life prediction using hardness measurements for in-service steel patch-welds with and without TIG dressing treatment," *Structures*, vol. 50, pp. 1285–1302, 2023,

doi:10.1016/j.istruc.2023.02.019.

[6] Z. D. Odanović, "Some advanced welding technologies applied for repair welding in power plants," *Metallurgical and Materials Engineering*, vol. 27, no. 4, pp. 473–487, 2021. https://doi.org/10.30544/631

[7] C. C. Silva, V. H. C. de Albuquerque, C. R. O. Moura, W. M. Aguiar, and J. P. Farias, "Evaluation of AISI 4140 steel repair without post-weld heat treatment," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 18, no. 3, pp. 324–331, 2009. https://doi.org/10.1007/s11665-008-9294-5

[8] M. W. Dewan, J. Liang, M. A. Wahab, and A. M. Okeil, "Effect of post-weld heat treatment and electrolytic plasma processing on tungsten inert gas welded AISI 4140 alloy steel," *Materials & Design*, vol. 54, pp. 6–13, 2014. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.08.035

[9] P. Thongsong, P. Toonangkul, S. Triwanapong, and K. Kimapong, "Single-pass GTAW cladding of aluminum clad metal on SCM440 low-alloy steel surface," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 38, no. 7, pp. 3577–3583, 2024. https://doi.org/10.1007/s12206-024-0631-x

[10] M. P. Aung, H. Katsuda, and M. Hirohata, "Fatigue-performance improvement of patch-plate welding via PWHT with induction heating," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 160, pp. 280–288, 2019. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.05.047

[11] X. Lyu, C. Tian, L. Shi, C. Wu, J. Chen, and P. Yu, "Multi-scale modelling of the microstructure evolution during friction stir welding of 2195 Al–Li alloy," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 28, pp. 1318–1329, 2024. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.12.045

[12] J. A. Daniel Susai, S. Babu, A. Karpagaraj, and A. Dhilip, "Experimental investigation of the effect of post-weld heat treatment on the mechanical properties and microstructure of thick AISI 4140 steel TIG-welded joints using a Gleeble 3500," *Sādhanā*, vol. 50, no. 2, p. 78, 2025. https://doi.org/10.1007/s12046-025-02734-w

[13] M. R. N. M. Yusof, S. Abdullah, and M. Z. Nuawi, "A review on repair welding procedures and post-weld heat treatment evaluation for industrial machinery components", *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, vol. 36, no. 5, pp. 312–325, 2024.

[14] M. J. Khan, A. S. Khan, and H. Ahmad, "Evaluation of residual stresses and microstructural changes in repair welding of structural steels," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 312, Art. no. 117824, 2023. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117824.

[15] L. Anggraini, "The effect of post weld heat treatment and its efficiency on the axle housing of 440 steel automotive press hot,"in *Proceedings of the 4th International Conference on Materials Engineering and Functional Materials (ICMFM 2025)*, Da Nang, Vietnam, 2026, pp. 3–12.

[16] O. Falodun, S. Oke, and M. Bodunrin, "A comprehensive review of residual stresses in carbon steel welding: Formation mechanisms, mitigation strategies, and advanced post-weld heat treatment techniques," *The International Journal of Advanced*

Manufacturing Technology, vol. 136, pp. 4107–4140, 2025. https://doi.org/10.1007/s00170-025-15088-8.

[17] Q. Jin, W. Jiang, J. Ma, C. Jia, A. Wu, and C. Wu, "Experimental and numerical analysis of residual stress relief mechanisms of local postweld heat treatment in pressure vessels," *Thin-Walled Structures*, vol. 211, Art. no. 112487, 2025. https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.112487.

[18] I. A. Savin, V. Z. Movlazade, N. D. Yusubov, U. M. Nadirov, I. A. Khankishiyev, and H. M. Abbasova, "Innovative robotic solutions for stamping equipment repair using advanced laser cleaning and hardening techniques," *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE)*, vol. 17, no. 1, pp. 253–261, 2025.

[19] D. Luqyana, A. M. Muhamad, and C. N. Rosyidi, "Application of quality function deployment (QFD) in die redesign to lowering rework of stamping parts," *International Journal of Industrial Engineering and Management*, vol. 14, no. 3, pp. 257–270, 2023. https://doi.org/10.24867/IJIEM-2023-3-337.

[20] A. Kolhatkar and A. Pandey, "Predictive maintenance methodology in sheet metal progressive tooling: a case study," *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, vol. 14, Suppl. 4, pp. 980–989, 2023. https://doi.org/10.1007/s13198-021-01564-3.

[21] B. Qiang, Y. Xie, Q. Xie, J. Shi, X. Liu, C. Yao, and Y. Li, "Influence of post-weld heat treatment on welding residual stress in U-rib-to-deck joint," *Thin-Walled Structures*, vol. 196, Art. no. 111550, 2024. https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111550.

[22] X. Li, Z. Fu, J. Cui, and B. Ji, "Effect of post-weld heat treatment on residual stress in deck-rib double-side welded joints and process optimization," *Engineering Failure Analysis*, vol. 164, Art. no. 108731, 2024. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108731.

[23] B. Wang, L. Zhou, Y. Cao, P. Xue, and L. Wu, "Analysis of residual stress relief for Ti62A alloy welded joints by post weld heat treatment considering creep effect," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 24, pp. 7462–7474, 2023. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.057

[24] J. S. Pinto, R. Casais, G. Bakam, T. Pereira, and G. F. Pinto, "Maintenance management and application of lean tools in a metalworking industry: A case study," in *Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange*, Cham: Springer Nature Switzerland, 2025, pp. 26–40, https://doi.org/10.1007/978-3-031-77840-7_3.

[25] B. Yu, P. Wang, X. Song, and S. Huo, "The residual stress relief of post weld heat treatment in SMA490BW welded joints: Simulation and experiment," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 197, Art. no. 104852, 2022. https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2022.104852.

[26] R. Vasiljević and D. Pantelić, "Analysis of The fracture and the repair of the screw spindle of a friction screw press,"*Machines*, vol. 13, no. 4, Art. no. 309, 2025. https://doi.org/10.3390/machines13040309.

[27] P. Thongsong and K. Kimapong, "Microstructural evolution and

mechanical enhancement in SCM440 steel through gas tungsten arc welding cladding," *Journal of Engineering*, vol. 2025, no. 1, p. 3874006, 2025. https://doi.org/10.1155/2025/3874006.

[28] Y. L. Sun, G. Obasi, C. J. Hamelin, A. N. Vasileiou, T. F. Flint, J. A. Francis, and M. C. Smith, "Characterisation and modelling of tempering during multi-pass welding,"*Journal of Materials Processing Technology*, vol. 270, pp. 118–131, 2019. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.02.022.

[29] S. Hu and G. Huang, "Residual stress relief in metallic materials: Traditional methods, emerging techniques, and multi-field synergies," *Materials*, vol. 19, no. 12, p. 2431, 2026. https://doi.org/10.3390/ma19122431.

[30] Y. Huang, T. Huang, S. Zhang, Z. Yang, Q. Liu, Y. Zhan, and Q. Zhou, "Effect of post weld heat treatment on microstructural and mechanical properties of martensitic heat-resistant steel weldments," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 212, Art. no. 105323, 2024. https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2024.105323.