

Identifikasi dan Evaluasi Parameter Pengelasan pada Mesin *Band Saw Blade Welding* terhadap Kualitas Sambungan *Band Saw Blade*

Ari Anggara Pratama, Ir. Benny Haddli Irawan, S.Tr., M.T., IPM., ASEAN Eng.

* Politeknik Negeri Batam

Program Studi Teknik Mesin

Jl. Ahmad Yani, Batam Centre, Batam 29461, Indonesia

E-mail: arianggarapra@gmail.com

Abstrak

Gergaji pita bimetal disambungkan menggunakan metode *Flash Butt Welding* untuk membentuk sabuk gergaji yang kontinu. Kualitas sambungan sangat bergantung pada kestabilan parameter temperatur, waktu, tekanan, dan proses *flashing*. Perbedaan kombinasi parameter dapat memengaruhi kualitas sambungan las, sedangkan siklus termal selama proses pengelasan secara teoritis berpotensi memicu terbentuknya struktur martensit getas pada area *Heat Affected Zone* (HAZ). Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi dan mengevaluasi pengaruh variasi kombinasi parameter tersebut terhadap kualitas sambungan *band saw blade*. Eksperimen dilakukan dengan menguji tiga kombinasi parameter berdasarkan kondisi aktual di lapangan, kemudian hasilnya dievaluasi melalui pemeriksaan visual dan *break test* berdasarkan kriteria inspeksi perusahaan, dengan pelaksanaan *break test* mengacu pada AWS B4.0. Hasil penelitian menunjukkan bahwa salah satu kombinasi parameter secara konsisten menghasilkan kualitas sambungan terbaik dan direkomendasikan pada kondisi proses yang sebanding dengan penelitian ini.

Kata kunci: *band saw blade, flash butt welding, parameter pengelasan, kualitas sambungan*

Abstract

Bimetallic band saw blades are joined using the Flash Butt Welding method to form a continuous saw belt. The quality of the joint is highly dependent on the stability of temperature, time, pressure, and flashing process parameters. Different parameter combinations can affect the quality of the welded joint, while thermal cycling during the welding process theoretically has the potential to trigger the formation of brittle martensite structures in the Heat Affected Zone (HAZ). This study aims to identify and evaluate the effect of variations in these parameter combinations on the quality of band saw blade joints. Experiments were conducted by testing three parameter combinations based on actual conditions in the field, then the results were evaluated through visual inspection and break tests based on company inspection criteria, with the implementation of the break test referring to AWS B4.0. The results showed that one of the parameter combinations consistently produced the best joint quality and was recommended under process conditions comparable to this study.

Keywords: *band saw blade, flash butt welding, welding parameters, joint quality*

1 Pendahuluan

Dalam industri manufaktur, gergaji pita bimetal banyak digunakan karena mampu menekan biaya penggunaan alat potong melalui kombinasi material baja pegas yang ulet pada bagian badan gergaji dan baja kecepatan tinggi seperti M42 atau M51 pada bagian ujung gigi[1]. Agar dapat membentuk sabuk gergaji yang menyatu secara kontinu, kedua ujung bilah harus disambungkan menggunakan proses

pengelasan hambatan listrik dengan metode *Flash Butt Welding*[2]. Keberhasilan proses penyambungan pada bilah gergaji berbahan baja karbon berkekuatan tinggi sangat bergantung pada tingkat kepresisian perakitan serta kerataan permukaan sambungan guna mencegah terjadinya deplanasi dan distribusi tekanan yang tidak merata[3]. Dalam praktik di industri, kualitas sambungan las juga sangat dipengaruhi oleh kestabilan parameter proses serta parameter setelah pengelasan. Penelitian ini menggunakan *band saw blade* bimetal berukuran 41 mm x 1,3 mm yang terdiri atas baja 75Cr1 sebagai *backing* material dan baja M42 sebagai material gigi pemotong. Kombinasi kedua material tersebut menghasilkan sifat mekanik yang saling melengkapi, yaitu fleksibilitas dan ketahanan lentur dari 75Cr1 serta kekerasan dan ketahanan aus yang tinggi dari M42[4]. Baja 75Cr1 merupakan baja karbon tinggi paduan kromium dengan kandungan karbon sekitar 0,70–0,80% dan kromium sekitar 0,30–0,50%. Material ini banyak digunakan sebagai badan gergaji karena memiliki kombinasi kekuatan dan elastisitas yang baik[5]. Sementara itu, M42 termasuk kelompok *High Speed Steel* (HSS) yang mengandung unsur paduan utama seperti molibdenum, kobalt, kromium, vanadium, dan tungsten sehingga mampu menghasilkan kekerasan yang tinggi[6]. Spesimen penelitian berupa *band saw blade* yang tersusun dari material 75Cr1 sebagai badan gergaji dan M42 sebagai mata gergaji, ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. *Band Saw Blade*

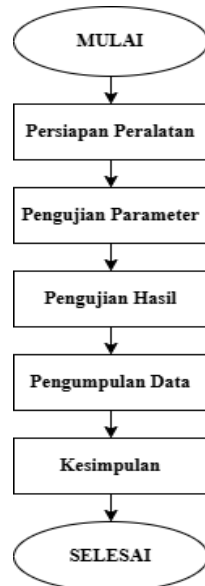
Penyimpangan kecil pada parameter temperatur maupun siklus pendinginan dapat menyebabkan distribusi partikel karbida menjadi tidak merata, sehingga material sabuk gergaji lebih rentan mengalami kegagalan akibat patah lelah atau *fatigue*[7]. Oleh sebab itu, penerapan pengujian mekanis destruktif pada sampel hasil pengelasan menjadi langkah yang sangat penting untuk mendeteksi sejak dini adanya cacat maupun kerapuhan internal pada area sambungan las[8]. Berdasarkan permasalahan ketidakstabilan parameter proses tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi serta mengevaluasi pengaruh variasi kombinasi parameter temperatur, waktu, tekanan, dan proses *flashing* terhadap kualitas sambungan las sehingga dapat mendukung upaya peningkatan efisiensi produksi di lapangan[9].

Tingkat kekerasan berlebih pada area *Heat Affected Zone* (HAZ) merupakan salah satu karakteristik yang sering muncul akibat pengaruh siklus termal dan gaya tekan selama proses *Flash Butt Welding*. Kondisi ini menjadi perhatian karena dapat memengaruhi sifat mekanik dan kualitas sambungan las yang dihasilkan[10]. Secara teoritis, pendinginan yang berlangsung setelah proses pengelasan dapat menyebabkan terbentuknya struktur martensit yang bersifat getas pada daerah sambungan. Kondisi tersebut dapat menurunkan keuletan material sehingga diperlukan perlakuan panas pascapengelasan untuk memperbaiki sifat mekaniknya[11]. Pada prinsip kerjanya, metode penyambungan ini memanaskan kedua ujung logam melalui percikan busur listrik hingga mencapai kondisi mencair, kemudian dilanjutkan dengan proses penempaan cepat menggunakan tekanan kompresi[12]. Dalam berbagai literatur, penggunaan mesin las otomatis berteknologi tinggi, seperti perangkat seri BAS produksi Ideal-Werk, direkomendasikan karena telah dilengkapi sistem kontrol multi-tahap yang mampu mengatur fase pendinginan secara lebih stabil dan terkontrol. Untuk memastikan kualitas sambungan las, diperlukan pengujian mekanik yang mampu mengevaluasi kondisi sambungan secara langsung. Salah satu metode yang umum digunakan adalah *break test* yang mengacu pada standar American Welding Society (AWS) B4.0[13].

2 Metodologi Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen komparatif untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi beberapa kombinasi parameter pengelasan yang digunakan pada mesin *band saw blade welding* terhadap kualitas sambungan yang dihasilkan[14]. Kualitas sambungan las sangat dipengaruhi oleh kestabilan parameter proses. Penurunan performa mesin dapat menyebabkan terjadinya deviasi parameter pengelasan terhadap kondisi yang telah ditetapkan sehingga diperlukan identifikasi serta evaluasi terhadap beberapa

kombinasi parameter untuk menentukan kondisi proses yang menghasilkan kualitas sambungan terbaik[15]. Penelitian ini dilaksanakan secara sistematis dengan mengikuti tahapan penelitian yang telah direncanakan sebelumnya. Penggunaan diagram alir membantu proses penelitian menjadi lebih terarah dan terorganisir karena setiap tahapan kerja telah disusun secara runtut sejak awal. Selain mempermudah pelaksanaan penelitian, diagram alir juga mendukung validitas serta pertanggungjawaban ilmiah terhadap proses penelitian yang dilakukan. Untuk mempermudah pemahaman terhadap tahapan penelitian, alur pelaksanaan disajikan dalam bentuk diagram alir sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alir

2.1 Persiapan Peralatan

Tahap ini mencakup persiapan mesin las *band saw blade* yang menggunakan metode *Flash Butt Welding* serta persiapan material *band saw blade* yang akan digunakan. Sebelum proses pengelasan dilakukan, permukaan ujung pita gergaji harus dibersihkan dari kotoran maupun kontaminasi lainnya, kemudian diposisikan sejajar pada klem pengecam. Hal ini bertujuan untuk memastikan kontak yang merata dan mencegah terjadinya *misalignment* atau ketidaksejajaran selama proses pengelasan berlangsung[3]. Mesin *band saw blade welding* yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Mesin Band Saw Blade Flash Butt Welding

2.2 Pengujian Parameter

Dalam praktik di perusahaan, penentuan parameter pengelasan dilakukan melalui proses *trial and error*, yaitu serangkaian percobaan dan evaluasi hingga diperoleh kombinasi parameter yang memenuhi kriteria yang ditetapkan. Kombinasi parameter tersebut kemudian digunakan sebagai objek penelitian dan dievaluasi menggunakan metode eksperimen komparatif.

Penelitian ini dikategorikan sebagai studi eksperimental komparatif karena membandingkan tiga kombinasi parameter pengelasan untuk menentukan kombinasi parameter yang memberikan hasil terbaik. Pemilihan

tiga kombinasi parameter didasarkan pada keterbatasan material dan waktu produksi di lapangan, sehingga eksperimen difokuskan pada kombinasi parameter yang paling representatif.

Parameter yang digunakan dalam setiap kombinasi meliputi:

- Parameter temperatur, direpresentasikan oleh *annealing temperature*, yaitu temperatur yang digunakan pada proses *annealing* setelah pengelasan (*post-weld annealing*).
- Parameter waktu, direpresentasikan oleh *annealing time*, yaitu lama waktu perlakuan panas setelah pengelasan yang bertujuan mengurangi tegangan sisa.
- Parameter tekanan, direpresentasikan oleh *upset pressure*, yaitu tekanan tempa yang diberikan setelah proses *flashing* untuk menyatukan kedua ujung material.
- Parameter proses *flashing*, direpresentasikan oleh *flashing speed*, yaitu parameter yang mengatur proses *flashing* sebelum tahap upset. Nilai *flashing speed* dalam penelitian ini mengacu pada nilai yang ditetapkan melalui pengatur *flashing speed* pada mesin dan dinyatakan tanpa satuan.

Selama proses *Flash Butt Welding* terjadi beberapa tahapan yang dapat memengaruhi sifat mekanik sambungan, yaitu sebagai berikut:

1. Flashing

Pada tahap flashing, panas dibangkitkan melalui resistansi listrik dan percikan api logam di kedua ujung material sehingga temperatur daerah sambungan meningkat hingga melampaui temperatur kritis bawah sekitar 727–740 °C sehingga transformasi austenit mulai terjadi. Dengan bertambahnya panas, temperatur dapat mencapai kisaran 790–830 °C yang memungkinkan terbentuknya austenit penuh. Kondisi tersebut menyebabkan material di zona sambungan melunak dan bersifat plastis sehingga siap dideformasi pada tahap upset[10].

2. Upset

Setelah temperatur yang diperlukan tercapai, kedua ujung material ditekan menggunakan gaya kompresi sehingga terbentuk sambungan permanen yang berfungsi untuk menyatukan kedua material[14].

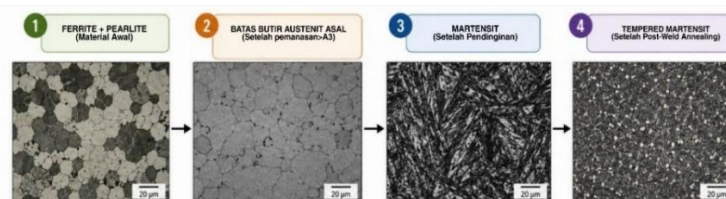
3. Pendinginan (*Forced Air Cooling*)

Setelah proses upset selesai, area sambungan didinginkan dengan hembusan udara dari nozzle (*forced air cooling*) sehingga temperatur daerah las menurun. Laju pendinginan yang relatif tinggi, ditambah dimensi *band saw blade* yang relatif tipis, dapat mempercepat pelepasan panas. Kondisi tersebut secara teoritis berpotensi menyebabkan transformasi austenit menjadi martensit ketika temperatur melewati Martensite Start (Ms) yang diperkirakan berada pada kisaran 190–220 °C dan berlanjut hingga Martensite Finish (Mf) pada kisaran 50–100 °C. Transformasi ini diperkirakan terjadi terutama pada daerah las dan sebagian *Heat Affected Zone* (HAZ)[5][6].

4. Annealing Pascapengelasan (*Post-Weld Annealing*)

Setelah pendinginan awal, area sambungan dipanaskan kembali secara lokal pada temperatur sekitar 550–650 °C untuk mengurangi kekerasan dan tegangan sisa yang timbul akibat siklus termal selama proses pengelasan dan pendinginan. Tahap ini bertujuan meningkatkan keuletan dan ketangguhan sambungan serta membantu menstabilkan struktur mikro pada daerah las dan *Heat Affected Zone* (HAZ)[11].

Secara teoritis, siklus termal selama proses *Flash Butt Welding* dan perlakuan *annealing* pascapengelasan dapat menyebabkan perubahan struktur mikro pada daerah sambungan dan *Heat Affected Zone* (HAZ)[9]. Ilustrasi transformasi struktur mikro yang terjadi selama proses tersebut ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Ilustrasi Skematis Transformasi Struktur Mikro pada Proses *Flash Butt Welding*

Penentuan kondisi parameter terbaik dilakukan berdasarkan hasil pengujian yang menunjukkan bahwa salah satu kombinasi parameter secara konsisten memberikan hasil terbaik pada seluruh indikator yang diamati. Oleh karena itu, kombinasi parameter tersebut direkomendasikan pada kondisi proses yang sebanding dengan penelitian ini.

2.3 Pengujian Hasil

Tahap ini meliputi pemeriksaan visual dan pengujian mekanik pada hasil pengelasan. Pemeriksaan visual dilakukan untuk memastikan tidak terdapat cacat seperti retakan atau ketidaksejajaran (*misalignment*)[13]. Selanjutnya, pengujian sambungan dilakukan menggunakan metode *break test* dengan mengacu pada AWS B4.0. Pengujian destruktif ini dilakukan dengan mematahkan spesimen untuk mengevaluasi kualitas sambungan berdasarkan lokasi patahan dan kondisi hasil patahan[8]. Metode *break test* banyak digunakan dalam quality control industri karena praktis, cepat, serta efektif dalam mendeteksi cacat internal tanpa memerlukan peralatan laboratorium yang kompleks.

2.4 Pengumpulan Data

Data hasil pemeriksaan visual dan *break test* dari ketiga *trial* dikumpulkan dan dievaluasi untuk menentukan kombinasi parameter yang menghasilkan kualitas sambungan terbaik berdasarkan kriteria yang digunakan dalam penelitian. Kesimpulan kemudian ditarik untuk menentukan kombinasi parameter proses yang memberikan hasil terbaik, meliputi parameter temperatur, waktu, tekanan, dan proses *flashing*, untuk digunakan sebagai acuan parameter proses pengelasan *band saw blade* pada kondisi yang sebanding dengan penelitian ini.

3 Hasil dan Pembahasan

3.1 Data Hasil Pengujian

Pengujian dilakukan terhadap tiga kombinasi parameter yang berbeda, yaitu Parameter 1 (P1), Parameter 2 (P2), dan Parameter 3 (P3). Masing-masing kombinasi parameter diulang sebanyak tiga kali sehingga diperoleh sembilan spesimen pengujian yang digunakan sebagai data penelitian[15]. Parameter yang digunakan dalam setiap kombinasi meliputi *upset pressure*, yaitu tekanan tempa yang diberikan setelah proses *flashing* untuk menyatukan kedua ujung material, *flashing speed*, yaitu parameter yang mengatur proses *flashing* sebelum tahap *upset*, *annealing time*, yaitu lama waktu perlakuan panas setelah pengelasan yang bertujuan mengurangi tegangan sisa, serta *annealing temperature*, yaitu temperatur perlakuan panas yang memengaruhi perubahan struktur mikro dan sifat mekanik sambungan hasil las[2]. Ketiga kombinasi parameter beserta nilai proses yang digunakan pada setiap pengujian ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Kombinasi Parameter Penelitian

Parameter	Upset Pressure (bar)	Flashing Speed	Annealing Time (min)	Annealing Temperature (°C)
Parameter 1 (P1)	2,6	480	0,4	590
Parameter 2 (P2)	2,8	500	0,3	610
Parameter 3 (P3)	3,0	520	0,3	620

Selain kombinasi parameter proses, penelitian ini juga mengacu pada kriteria penerimaan (*acceptance criteria*) yang berlaku di perusahaan sebagai acuan dalam menentukan status *accept* atau *reject* pada spesimen hasil pengelasan. Kriteria tersebut digunakan sebagai acuan dalam pemeriksaan visual dan *break test* untuk menentukan status *accept* dan *reject* spesimen secara konsisten berdasarkan standar inspeksi perusahaan. Kriteria penerimaan dan penolakan yang berlaku di perusahaan disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. *Acceptance / Rejection Criteria* Hasil Pengelasan *Flash Butt Welding*

No	Kriteria
1	Sambungan las dinyatakan <i>reject</i> apabila tidak terjadi penyatuan sempurna pada seluruh bidang sambungan.
2	Sambungan las dinyatakan <i>reject</i> apabila nilai <i>misalignment</i> melebihi batas maksimum yang ditetapkan, yaitu 10% dari ketebalan material.
3	Sambungan las dinyatakan <i>reject</i> apabila ditemukan <i>surface crack</i> pada daerah las atau area di sekitarnya.
4	Sambungan las dinyatakan <i>reject</i> apabila pada <i>break test</i> terjadi patahan pada <i>weld line</i> .

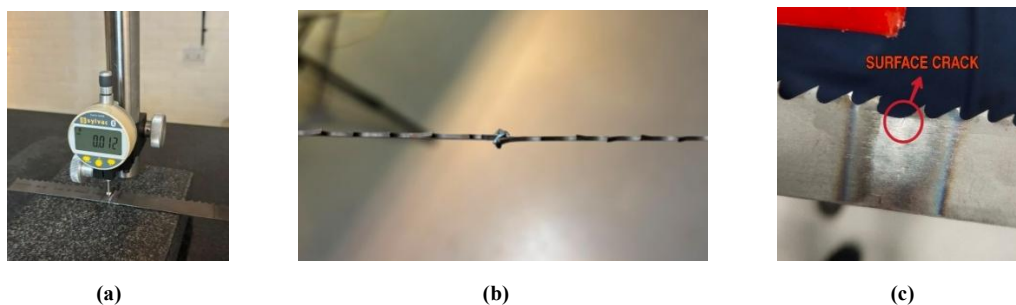
Berdasarkan Tabel 2, kriteria penolakan mencakup ketidaksempurnaan penyatuan pada bidang sambungan, nilai *misalignment* yang melebihi batas maksimum, adanya *surface crack*, serta patahan pada *weld line* saat dilakukan *break test*[3].

Pada penelitian ini, evaluasi difokuskan pada tiga indikator, yaitu nilai *misalignment*, keberadaan *surface crack*, dan lokasi patahan hasil *break test*. Penentuan status *accept* atau *reject* didasarkan pada kriteria inspeksi perusahaan, yaitu nilai *misalignment* tidak melebihi 0,13 mm, tidak terdapat *surface crack*, dan patahan tidak terjadi pada *weld line*. Jika salah satu dari kriteria tersebut tidak terpenuhi, spesimen dikategorikan sebagai *reject*. Berdasarkan kriteria tersebut, hasil pemeriksaan visual seluruh spesimen ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian Visual Seluruh Spesimen

Spesimen	Upset Pressure (bar)	Flashing Speed	Annealing Time (min)	Annealing Temperature (°C)	Misalignment (mm)	Surface Crack
P1 – 1	2,6	480	0,4	590	0,04	Ya
P1 – 2	2,6	480	0,4	590	0,03	Tidak
P1 – 3	2,6	480	0,4	590	0,05	Ya
P2 – 1	2,8	500	0,3	610	0,01	Tidak
P2 – 2	2,8	500	0,3	610	0,04	Tidak
P2 – 3	2,8	500	0,3	610	0,03	Tidak
P3 – 1	3,0	520	0,3	620	0,40	Tidak
P3 – 2	3,0	520	0,3	620	0,31	Tidak
P3 – 3	3,0	520	0,3	620	0,23	Tidak

Hasil pemeriksaan visual pada Tabel 3 menunjukkan bahwa Parameter 2 (P2) menghasilkan kualitas sambungan terbaik karena seluruh spesimen bebas dari *surface crack* dan memiliki nilai *misalignment* yang rendah, yaitu berkisar antara 0,01–0,04 mm. Sebaliknya, pada Parameter 1 (P1) masih ditemukan *surface crack* pada dua dari tiga spesimen, sedangkan Parameter 3 (P3) tidak menunjukkan adanya *surface crack*, tetapi menghasilkan nilai *misalignment* yang relatif tinggi, yaitu 0,23–0,40 mm sehingga melebihi batas toleransi yang ditetapkan perusahaan. Hasil pengukuran *misalignment* menggunakan *dial gauge* serta cacat visual yang ditemukan pada sambungan hasil pengelasan ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Hasil Pengukuran *Misalignment* dan Cacat Visual pada Sambungan Hasil Pengelasan *Flash Butt Welding* (a) Hasil pengukuran *misalignment* menggunakan *dial gauge*, (b) Tampilan *misalignment* pada sambungan, (c) Tampilan *Surface Crack* pada sambungan

Pada Gambar 5 ditunjukkan proses pengukuran *misalignment* menggunakan *dial gauge*, kondisi *misalignment* pada sambungan hasil pengelasan, serta contoh cacat berupa *surface crack*. Pengukuran *misalignment* dilakukan untuk mengetahui tingkat ketidaksejajaran kedua sisi sambungan setelah proses *Flash Butt Welding*, sedangkan pemeriksaan *surface crack* bertujuan mengidentifikasi adanya cacat permukaan yang berpotensi menurunkan kualitas sambungan. Nilai *misalignment* yang melebihi batas toleransi menunjukkan bahwa proses penyambungan belum menghasilkan keselarasan yang baik, sementara keberadaan *surface crack* mengindikasikan adanya konsentrasi tegangan yang dapat menjadi titik awal terjadinya kegagalan saat sambungan menerima pembebanan[2]. Oleh karena itu, hasil pemeriksaan visual pada penelitian ini menjadi tahapan awal yang penting dalam mengevaluasi kualitas sambungan sebelum dilakukan pengujian mekanik menggunakan metode *break test*.

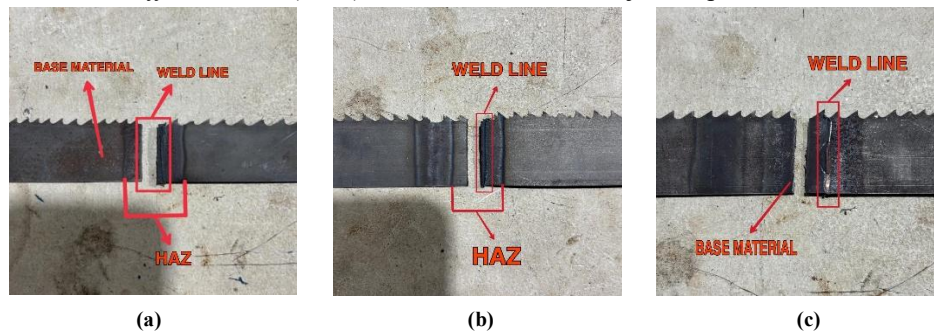
Hasil pemeriksaan visual memberikan gambaran awal mengenai kualitas sambungan. Namun, untuk mengevaluasi kualitas sambungan lebih lanjut, setiap spesimen selanjutnya diuji menggunakan metode *break test*. Hasil pengujian *break test* pada seluruh spesimen ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Pengujian *Break Test* Seluruh Spesimen

Spesimen	Upset Pressure (bar)	Flashing Speed	Annealing Time (min)	Annealing Temperature (°C)	Lokasi Patahan
P1 – 1	2,6	480	0,4	590	HAZ
P1 – 2	2,6	480	0,4	590	Weld Line
P1 – 3	2,6	480	0,4	590	Weld Line
P2 – 1	2,8	500	0,3	610	Base Material
P2 – 2	2,8	500	0,3	610	HAZ
P2 – 3	2,8	500	0,3	610	HAZ
P3 – 1	3,0	520	0,3	620	Weld Line
P3 – 2	3,0	520	0,3	620	HAZ
P3 – 3	3,0	520	0,3	620	HAZ

Berdasarkan hasil pengujian *break test*, lokasi patahan bervariasi pada tiap kombinasi parameter proses. Pada Parameter 1 (P1), satu spesimen patah di daerah *Heat Affected Zone* (HAZ) dan dua spesimen lainnya di *weld line*. Parameter 2 (P2) menunjukkan satu spesimen yang patah di *base material*, sedangkan dua spesimen sisanya di HAZ. Sementara itu, pada Parameter 3 (P3), satu spesimen mengalami patahan di *weld line* dan dua spesimen lainnya di HAZ. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa Parameter 2 menghasilkan kualitas sambungan paling baik karena tidak ditemukan patahan di *weld line*. Patahan yang terjadi pada daerah HAZ dan *base material* mengindikasikan bahwa *weld line* tidak menjadi lokasi kegagalan pada spesimen tersebut[15].

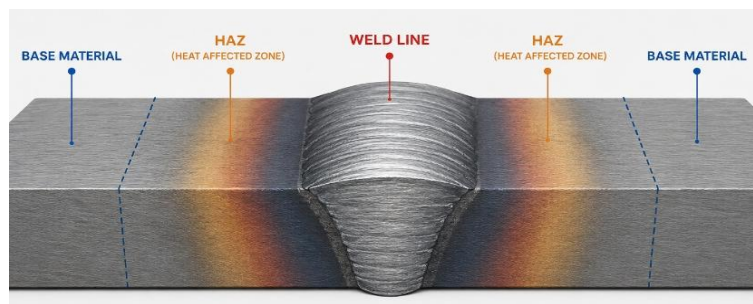
Untuk memberi gambaran visual mengenai lokasi patahan setelah pengujian *break test*, contoh patahan pada *weld line*, *Heat Affected Zone* (HAZ), dan *base material* ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Lokasi Patahan Hasil Pengujian Break Test pada Sambungan Las (a) Patahan pada Weld Line, (b) Patahan pada Heat Affected Zone (HAZ), (c) Patahan pada Base Material

Pada Gambar 6 ditunjukkan contoh lokasi patahan pada sambungan hasil pengelasan *Flash Butt Welding* setelah uji *break test*, meliputi patahan di *weld line*, HAZ, dan *base material*. Patahan di *weld line* menunjukkan bahwa kegagalan terjadi pada sambungan las. Sebaliknya, patahan yang terjadi di HAZ mengindikasikan bahwa *weld line* tidak menjadi lokasi kegagalan pada spesimen tersebut. Adapun patahan di *base material* mengindikasikan bahwa kegagalan terjadi di luar daerah sambungan las. Dengan demikian, lokasi patahan dapat dijadikan indikator untuk menilai kualitas sambungan maupun efektivitas kombinasi parameter proses pengelasan *Flash Butt Welding* yang digunakan.

Untuk memberikan pemahaman yang lebih jelas mengenai lokasi patahan yang telah dibahas, perlu diketahui pembagian daerah sambungan hasil *Flash Butt Welding*. Sambungan las terdiri atas *weld line*, *Heat Affected Zone* (HAZ), dan *base material*, yang masing-masing memiliki karakteristik yang berbeda pada hasil sambungan[10]. Ilustrasi pembagian daerah tersebut ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Ilustrasi Area Sambungan Hasil Pengelasan Flash Butt Welding

Area sambungan hasil *Flash Butt Welding* terbagi menjadi tiga bagian, yaitu *weld line*, *Heat Affected Zone* (HAZ), dan *base material*. *Weld line* merupakan daerah tempat kedua material menyatu selama proses pengelasan sehingga menjadi daerah utama tempat terbentuknya ikatan hasil pengelasan sekaligus menerima beban selama pengujian. Di sekitar *weld line* terdapat HAZ, yaitu daerah yang mengalami siklus pemanasan selama proses pengelasan sehingga terjadi perubahan struktur mikro dan sifat mekanik tanpa mengalami peleburan. Sementara itu, *base material* merupakan material induk yang tidak terpengaruh secara langsung oleh panas pengelasan sehingga sifat mekaniknya relatif tetap. Pada penelitian ini, identifikasi lokasi patahan terhadap ketiga daerah tersebut dapat digunakan sebagai indikator untuk mengevaluasi kualitas sambungan yang dihasilkan oleh setiap kombinasi parameter.

Berdasarkan hasil pemeriksaan visual, pengujian *break test*, serta identifikasi lokasi patahan pada setiap spesimen, selanjutnya dilakukan rekapitulasi hasil pengujian untuk masing-masing kombinasi parameter. Rekapitulasi ini bertujuan memberikan gambaran menyeluruh mengenai hasil setiap kombinasi parameter berdasarkan seluruh kriteria evaluasi yang digunakan dalam penelitian ini. Hasil rekapitulasi tersebut ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Rekapitulasi Hasil Pengujian per Kombinasi Parameter

Parameter	Rata-rata Misalignment (mm)	Surface Crack	Patah di Weld Line	Patah di HAZ	Patah di Base Material	Dasar Keputusan	Status
P1	0,040	2	2	1	0	Surface crack & terdapat patah di weld line	<i>Reject</i>
P2	0,027	0	0	2	1	Memenuhi seluruh kriteria yang dievaluasi	<i>Accept</i>
P3	0,313	0	1	2	0	Misalignment melebihi toleransi & terdapat patah di weld line	<i>Reject</i>

Rekapitulasi pada Tabel 5 menunjukkan bahwa Parameter 2 (P2) adalah satu-satunya kombinasi parameter yang memenuhi seluruh kriteria yang dievaluasi, yaitu nilai *misalignment* di bawah toleransi, tidak adanya *surface crack*, dan tidak ditemukannya patahan pada *weld line*. Sementara itu, Parameter 1 (P1) dan Parameter 3 (P3) masih gagal memenuhi kriteria tersebut sehingga dinyatakan tidak lolos. Dengan demikian, rekapitulasi ini mengindikasikan bahwa variasi kombinasi parameter proses berpengaruh terhadap kualitas sambungan las yang dihasilkan.

3.2 Pembahasan Hasil Pengujian

Pembahasan ini bertujuan mengevaluasi pengaruh variasi kombinasi parameter terhadap kualitas sambungan hasil pengelasan *Flash Butt Welding*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa setiap kombinasi parameter menghasilkan karakteristik sambungan yang berbeda sehingga perlu dibahas lebih lanjut.

Parameter 1 (P1) memiliki rata-rata misalignment 0,040 mm yang masih di bawah batas toleransi perusahaan. Namun, pada P1 ditemukan *surface crack* pada dua spesimen dan patahan di *weld line* pada dua spesimen sehingga kombinasi P1 dinyatakan *reject*. Hasil ini menandakan bahwa meskipun misalignment memenuhi kriteria, kombinasi parameter P1 belum mampu menghasilkan sambungan dengan integritas yang baik.

Parameter 2 (P2) memberikan hasil terbaik dengan rata-rata misalignment 0,027 mm, bebas dari surface crack, serta tidak ada patahan di weld line. Pada *break test*, patahan terjadi di HAZ dan base material, yang mengindikasikan bahwa *weld line* tidak menjadi lokasi kegagalan pada seluruh spesimen P2. Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi parameter pada P2 menghasilkan keseimbangan proses yang baik, sehingga mampu menghasilkan kualitas sambungan paling konsisten[1].

Sebaliknya, Parameter 3 (P3) menghasilkan rata-rata misalignment 0,313 mm yang telah melebihi batas toleransi perusahaan. Meskipun tidak ditemukan surface crack, satu spesimen masih patah di weld line. Temuan tersebut mengindikasikan bahwa peningkatan parameter proses tidak selalu menghasilkan kualitas sambungan yang lebih baik karena dapat meningkatkan deformasi sambungan, yang ditunjukkan oleh tingginya nilai *misalignment*[12].

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa kualitas sambungan dipengaruhi oleh kombinasi seluruh parameter proses, bukan hanya satu parameter saja[8]. Dari ketiga kombinasi yang diuji, Parameter 2 merupakan kombinasi terbaik karena memenuhi seluruh kriteria penerimaan yang digunakan pada penelitian ini, yaitu *misalignment* tidak melebihi 0,13 mm, tidak terdapat *surface crack*, dan tidak terjadi patahan di *weld line*. Oleh karena itu, Parameter 2 direkomendasikan sebagai kombinasi parameter proses pada mesin *band saw blade welding* yang digunakan dalam penelitian ini.

4 Kesimpulan

Berdasarkan hasil identifikasi dan evaluasi terhadap tiga kombinasi parameter pengelasan, diperoleh bahwa variasi kombinasi parameter temperatur, waktu, tekanan, dan proses *flashing* pada proses *Flash Butt Welding* berpengaruh terhadap kualitas sambungan *band saw blade*. Dari ketiga kombinasi parameter yang diuji, Parameter 2 dengan *upset pressure* 2,8 bar, *flashing speed* 500, *annealing time* 0,3 menit, dan *annealing temperature* 610 °C menghasilkan kualitas sambungan terbaik karena memenuhi seluruh kriteria penerimaan yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu memiliki rata-rata *misalignment* 0,027 mm, tidak ditemukan *surface crack*, dan tidak terjadi patahan pada *weld line*.

Hasil penelitian ini berhasil mengidentifikasi bahwa kualitas sambungan tidak ditentukan oleh satu parameter proses saja, melainkan oleh kombinasi *upset pressure*, *flashing speed*, *annealing time*, dan *annealing temperature* yang saling memengaruhi selama proses *Flash Butt Welding*. Pada kondisi penelitian ini, seluruh spesimen pada Parameter 2 memenuhi kriteria penerimaan yang digunakan (3 dari 3 spesimen atau 100%), sedangkan Parameter 1 dan Parameter 3 tidak memenuhi kriteria penerimaan (0 dari 3 spesimen atau 0%). Temuan tersebut menunjukkan bahwa kombinasi parameter yang memenuhi kriteria penerimaan dapat dijadikan sebagai acuan dalam penentuan parameter proses *Flash Butt Welding* pada kondisi yang sebanding dengan penelitian ini. Penerapan kombinasi parameter tersebut berpotensi meningkatkan penerimaan hasil pengelasan serta mengurangi produk *reject* dan kebutuhan *rework* sehingga dapat mendukung peningkatan efisiensi proses produksi.

5 Daftar Pustaka

- [1] G. Zhao *et al.*, “Effect of tempering process on the structure and properties of M51/X32 bimetal band saw blade,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2879, no. 1, 2024, doi: 10.1088/1742-6596/2879/1/012006.
- [2] A. Kubit, Ł. Lenart, T. Trzepieciński, A. Krzysiak, and W. Łabuński, “Effect of sandblasting on static and fatigue strength of flash butt welded 75cr4 bandsaw blades,” *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 22, 2021, doi: 10.3390/ma14226831.
- [3] D. Nosov, V. Peremitko, Y. Nosova, and I. Kolomoys, “Ensuring the uniform strength of welded joints obtained by butt contact welding in the production of band saws from 65G steel,” *Procedia Struct. Integr.*, vol. 59, no. 2023, pp. 656–663, 2024, doi: 10.1016/j.prostr.2024.04.093.
- [4] Omar Gomes Filho, “INFLUÊNCIA DA CORRENTE ELÉTRICA, DA FORÇA DE RECALQUE E DO TRATAMENTO TÉRMICO DE REVENIMENTO NA SOLDAGEM TOPO-A-TOPO POR CENTELHAMENTO DE SERRAS DE FITA BIMETÁLICA,” 2007. doi: 10.2320/materia.46.171.
- [5] A. Bajželj and J. Burja, “Influence of Austenitisation Time and Temperature on Grain Size and Martensite Start of 51CrV4 Spring Steel,” *Crystals*, vol. 12, no. 10, 2022, doi: 10.3390/cryst12101449.
- [6] Y. Luo, H. Guo, X. Sun, M. Mao, and J. Guo, “Effects of austenitizing conditions on the microstructure of AISI M42 high-speed steel,” *Metals (Basel)*, vol. 7, no. 1, pp. 4–6, 2017, doi: 10.3390/met7010027.
- [7] V. Mattos Ferreira, M. G. Mecozzi, R. H. Petrov, and J. Sietsma, “Details of pearlite to austenite transformation in steel: Experiments and phase-field modeling,” *Comput. Mater. Sci.*, vol. 228, no. April, p. 112368, 2023, doi: 10.1016/j.commatsci.2023.112368.
- [8] A. Micheletto, J. Cookson, Y. Pang, B. Chen, and P. Mutton, “The structural integrity of flash-butt welded premium rail steel – Evaluation of strength, microstructure and defects,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, vol. 235, no. 8, pp. 1006–1012, 2021, doi: 10.1177/0954409720973138.
- [9] J. Wang *et al.*, “Study on microstructure evolution and mechanical properties of high-strength low-alloy steel welds realized by flash butt welding thermomechanical simulation,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 122, no. 2, pp. 639–658, 2022, doi: 10.1007/s00170-022-09859-w.
- [10] P. Lu *et al.*, “Inhomogeneous mechanical properties in flash butt welded high-strength low-alloy steel joints via nanoindentation and reverse analysis,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 41, no. January, pp. 1898–1909, 2026, doi: 10.1016/j.jmrt.2026.01.090.

- [11] V. K. Euser, D. L. Williamson, K. O. Findley, A. J. Clarke, and J. G. Speer, "The role of retained austenite in tempered martensite embrittlement of 4340 and 300-m steels investigated through rapid tempering," *Metals (Basel)*., vol. 11, no. 9, 2021, doi: 10.3390/met11091349.
- [12] Y. Zhao, T. Liu, Q. Ji, H. Yang, and H. Zhao, "Study on the Microstructure and Properties of Flash-Butt Welding Joints of High Nitrogen Steel," *Metals (Basel)*., vol. 13, no. 7, 2023, doi: 10.3390/met13071200.
- [13] American Welding Society, *ANSI-AWS B4.0-92, Standard Methods for Mechanical Testing of Welds*. American Welding Society: American Welding Society, 1992. [Online]. Available: https://pubs.aws.org/Download_PDFS/B4.0-2016-PV.pdf?srsId=AfmBOortKAtFdf801oh0JbGM1eyYN78KPUEng23n1kTHrMrrbvZjTfSE
- [14] H. Wang, X. Gao, C. Yu, W. Li, T. Li, and L. Du, "Flash butt welding on microstructures and mechanical properties of joints for high strength acid resistant steel," *E3S Web Conf.*, vol. 385, pp. 1–5, 2023, doi: 10.1051/e3sconf/202338502012.
- [15] S. C. Shi, W. C. Wang, and D. K. Ko, "Influence of Inclusions on Mechanical Properties in Flash Butt Welding Joint of High-Strength Low-Alloy Steel," *Metals (Basel)*., vol. 12, no. 2, 2022, doi: 10.3390/met12020242.