

Kuantifikasi Digital dan Analisis Morfologi *Spatter* pada Pengelasan MAG dengan Variasi Posisi Menggunakan Metode Pemrosesan Citra

Muhammad Aqdar Fitrah^{1*}, Al Amin², Haslinda³, Andi Baso Palinrungi⁴, Epafroditus Pakiding⁵, A. Aswin Salam⁶

¹Teknik Perawatan Mesin, Akademi Komunitas Industri Manufaktur Bantaeng, Nipa-nipa, Pa'jukukang, Sulawesi Selatan 92461

²Teknik Alat Berat, Politeknik Negeri Nunukan, Jl. Ujung Dewa, Kab. Nunukan, Kalimantan Utara 77482

³Teknik Mesin, Universitas Pejuang Republik Indonesia, Jl. Raya Baruga No. Raya, Antang, Kec. Manggala, Kota Makassar, Sulawesi Selatan 90234

^{4,5}Jurusan Teknik Pengelasan, Balai Besar Pelatihan Vokasi dan Produktivitas Makassar,

Jl. Taman Makam Pahlawan No.4, Paropo, Kec. Panakkukang, Kota Makassar, Sulawesi Selatan 90233

⁶Perawatan dan Perbaikan Mesin, Politeknik Bosowa, Kapasa Raya No.23, Kecamatan Biringkanaya, Kota Makassar, Sulawesi Selatan 90245

*muhammad.aqdarfitrah@akom-bantaeng.ac.id

Diterima: 03 03 2026

Direvisi: 26 07 2026

Disetujui: 31 07 2027

ABSTRAK

Pembentukan *Spatter* Pada Proses Pengelasan *Metal Active Gas* (Mag) Memengaruhi Efisiensi Deposisi Logam, Kualitas Hasil Las, Dan Kebutuhan Pembersihan Pascapengelasan. Penelitian Ini Bertujuan Mengkuantifikasi Karakteristik *Spatter* Secara Digital Menggunakan Pemrosesan Citra Serta Menganalisis Pengaruh Posisi Pengelasan Terhadap Morfologi Percikan Yang Dihasilkan. Eksperimen Dilakukan Pada Baja Astm A36 Menggunakan Gas Pelindung CO₂ Dengan Variasi Posisi Pengelasan 1f (*Flat*), 2f (*Horizontal*), Dan 3f (*Vertical Up*). Proses Pengelasan Dilakukan Dengan Parameter Yang Dijaga Konstan, Meliputi Arus, Tegangan, Dan Kecepatan Pengelasan, Sedangkan Sistem Kuantifikasi Digital Dikembangkan Menggunakan Algoritma *Connected Component Labeling* (Ccl) Untuk Mendeteksi Jumlah Butiran Dan Luas Area Cakupan *Spatter*. Hasil Penelitian Menunjukkan Bahwa Posisi 1f Menghasilkan Jumlah Butiran *Spatter* Tertinggi, Yaitu 228 Butir (100%), Diikuti Posisi 2f Sebanyak 217 Butir (95,17%), Dan Posisi 3f Sebanyak 73 Butir (32,01%). Meskipun Jumlah Butiran Pada Posisi 3f Paling Sedikit, Analisis Citra Menunjukkan Terjadinya Fenomena *Coalescence* (Penggabungan Beberapa Tetesan Logam Cair Menjadi *Spatter* Berukuran Lebih Besar) Akibat Pengaruh Gaya Gravitasi Yang Berlawanan Arah Terhadap Perpindahan Logam. Kondisi Ini Mengindikasikan Bahwa Jumlah *Spatter* Yang Lebih Sedikit Tidak Selalu Mencerminkan Kualitas Hasil Pengelasan Yang Lebih Baik Karena Ukuran Percikan Cenderung Lebih Besar. Keandalan Sistem Kuantifikasi Digital Divalidasi Melalui Perbandingan Dengan Metode Penimbangan Manual Massa *Spatter*, Yang Menghasilkan Koefisien Determinasi (R²) Sebesar 0,965, Menunjukkan Tingkat Kesesuaian Yang Sangat Tinggi. Penelitian Ini Menawarkan Pendekatan Baru Dalam Karakterisasi *Spatter* Berbasis Pemrosesan Citra Yang Tidak Hanya Mampu Menghitung Jumlah *Spatter*, Tetapi Juga Mengevaluasi Distribusi Morfologinya Secara Kuantitatif, Sehingga Berpotensi Mendukung Optimasi Parameter Pengelasan Dan Pengembangan Sistem Inspeksi Kualitas Otomatis Pada Industri Manufaktur.

Kata kunci: Pengelasan MAG, *Spatter*, Pemrosesan Citra, Posisi Pengelasan, Gravitasi, *Connected Component Labeling*.

ABSTRACT

Spatter formation in the *Metal Active Gas* (MAG) welding process significantly affects metal deposition efficiency, weld quality, and post-weld cleaning requirements. This study aims to digitally quantify *spatter* characteristics using image processing and to analyze the effect of welding position on the morphology of the resulting *spatter*. The experiments were conducted on ASTM A36 low-carbon steel using pure CO₂ shielding gas under three welding positions: 1F (*flat*), 2F (*horizontal*), and 3F (*vertical-up*). The welding process was performed under constant operating parameters, including welding current, voltage, and travel speed, while the digital quantification system was developed using the *Connected Component Labeling* (CCL) algorithm to detect the number of *spatter* particles and their coverage area. The results showed that the 1F position produced the highest number of *spatter* particles, with 228 particles (100%), followed by the 2F position with 217 particles (95.17%) and the 3F position with 73 particles (32.01%). Although the 3F position generated the fewest *spatter* particles, image analysis revealed the occurrence of *coalescence*, in which multiple molten metal droplets merged into larger *spatter* particles due to the opposing effect of gravity on metal transfer. This finding indicates that a lower number of *spatter* particles does not necessarily represent better welding quality, as the resulting *spatter* tends to be larger in size. The reliability of the digital quantification system was validated by comparison with the conventional manual *spatter* mass measurement method, yielding a coefficient of determination (R²) of 0.965, which indicates excellent agreement between the two methods. This study proposes a novel image processing-based approach for *spatter* characterization that not only quantifies the number of *spatter* particles but also evaluates their morphological distribution quantitatively. The proposed method has the potential to support welding parameter optimization and the development of automated weld quality inspection systems in the manufacturing industry.

Keywords: *Metal Active Gas* (MAG) welding, *spatter*, image processing, welding position, gravity, *Connected Component Labeling*.

PENDAHULUAN

Pengelasan *Metal Active Gas* (MAG) atau *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) merupakan salah satu proses penyambungan logam yang banyak digunakan dalam industri manufaktur karena memiliki efisiensi deposisi tinggi, produktivitas yang baik, serta mampu menghasilkan penetrasi las yang dalam, terutama dengan penggunaan gas pelindung CO₂ [3], [5], [9]. Karakteristik tersebut menjadikan proses MAG banyak diaplikasikan pada industri otomotif, konstruksi baja, pembuatan alat berat, dan fabrikasi logam [9], [11]. Meskipun demikian, salah satu kendala utama pada proses ini adalah terbentuknya *spatter*, yaitu percikan logam cair yang terlempar keluar dari kolam las. Pembentukan *spatter* menyebabkan kehilangan logam pengisi, menurunkan efisiensi deposisi, meningkatkan kebutuhan pembersihan pascapengelasan, mempercepat keausan nozzle, serta berdampak pada meningkatnya biaya produksi [3], [5].

Pembentukan *spatter* berkaitan erat dengan stabilitas perpindahan tetesan logam (*droplet transfer*) selama proses pengelasan. Mekanisme perpindahan logam dipengaruhi oleh interaksi antara gaya elektromagnetik, tegangan permukaan logam cair, tekanan busur, dan karakteristik gas pelindung [10], [13]. Ketidakseimbangan gaya-gaya tersebut dapat mengubah mode perpindahan logam dari *spray transfer* atau *globular transfer* menjadi *short-circuit transfer* yang kurang stabil sehingga meningkatkan pembentukan *spatter* [4], [10]. Selain itu, komposisi dan laju alir gas pelindung berpengaruh terhadap karakteristik plasma dan kestabilan busur listrik. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa modifikasi komposisi gas pelindung mampu meningkatkan kestabilan transfer logam dan mengurangi pembentukan *spatter* [1], [2], [5].

Selain parameter pengelasan, orientasi atau posisi pengelasan juga memengaruhi perilaku kolam las dan mekanisme perpindahan logam. Pada posisi datar (1F), gaya gravitasi bekerja searah dengan perpindahan logam sehingga transfer tetesan berlangsung relatif stabil. Sebaliknya, pada posisi horizontal (2F) dan *vertical-up* (3F), gaya gravitasi membentuk komponen gaya yang berbeda terhadap arah perpindahan logam sehingga memengaruhi trajektori tetesan, stabilitas busur, serta perilaku kolam las [11], [12]. Kondisi tersebut berpotensi meningkatkan ketidakstabilan proses dan menghasilkan karakteristik *spatter* yang berbeda pada setiap posisi pengelasan.

Sebagian besar penelitian terdahulu berfokus pada pengaruh komposisi gas pelindung, parameter arus, atau stabilitas busur terhadap pembentukan *spatter* [1], [2], [5], [10]. Penelitian lain mengkaji pengaruh posisi pengelasan terhadap distribusi panas dan kualitas sambungan [11], [12]. Namun demikian, kedua aspek tersebut umumnya masih dikaji secara terpisah. Di sisi lain, kuantifikasi *spatter* pada sebagian besar penelitian masih dilakukan menggunakan metode penimbangan massa secara manual. Pendekatan ini hanya memberikan informasi kuantitatif mengenai massa *spatter* dan belum mampu menggambarkan jumlah, ukuran, maupun distribusi spasial *spatter* yang terbentuk [3].

Perkembangan teknologi *computer vision* dan pemrosesan citra digital memberikan peluang untuk melakukan karakterisasi *spatter* secara lebih objektif dan komprehensif. Sistem berbasis visi telah banyak diterapkan untuk memantau kolam las, mendeteksi kestabilan busur, serta mengendalikan kualitas proses pengelasan secara *real-time* [7]. Pendekatan tersebut sejalan dengan perkembangan Industri 4.0 yang mendorong penerapan sistem inspeksi cerdas, otomatis, dan berbasis data dalam proses manufaktur [8]. Oleh karena itu, pemanfaatan pemrosesan citra digital untuk karakterisasi *spatter* menjadi alternatif yang menjanjikan dibandingkan metode konvensional. Meskipun demikian, kajian yang mengintegrasikan pengaruh posisi pengelasan terhadap karakteristik *spatter* dengan metode kuantifikasi berbasis pemrosesan citra masih sangat terbatas. Sebagian besar penelitian belum mengevaluasi karakteristik morfologi *spatter*, seperti jumlah butiran dan luas area sebaran, secara kuantitatif pada berbagai posisi pengelasan. Selain itu, validasi hasil kuantifikasi digital terhadap metode konvensional juga masih jarang dilaporkan sehingga tingkat keandalannya belum banyak dibahas dalam literatur.

Berdasarkan celah penelitian tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh posisi pengelasan 1F (*flat*), 2F (*horizontal*), dan 3F (*vertical-up*) terhadap karakteristik *spatter* pada proses pengelasan MAG menggunakan gas pelindung CO₂. Karakterisasi dilakukan melalui metode pemrosesan citra digital menggunakan algoritma *Connected Component Labeling* (CCL) untuk mengidentifikasi jumlah butiran dan luas area *spatter*. Hasil kuantifikasi digital selanjutnya divalidasi menggunakan metode penimbangan manual untuk mengevaluasi tingkat keandalannya. Kebaruan penelitian ini terletak pada penerapan metode kuantifikasi *spatter* berbasis pemrosesan citra yang mampu mengevaluasi jumlah, luas area, dan karakteristik morfologi *spatter* secara kuantitatif pada berbagai posisi pengelasan, sehingga memberikan informasi yang lebih komprehensif dibandingkan metode konvensional serta berpotensi mendukung pengembangan sistem inspeksi kualitas pengelasan secara otomatis di industri manufaktur.

METODE PENELITIAN

Rancangan Eksperimen dan Material

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental laboratorium dengan desain faktorial. Material induk yang digunakan adalah baja karbon rendah (ASTM A36) berukuran 200 x 100 x 6 mm. Pengelasan dilakukan menggunakan mesin las MAG semi-otomatis untuk menjaga konsistensi kecepatan pengelasan (*welding speed*).

Tabel 1. Parameter Prosedur Pengelasan

Parameter	Spesifikasi / Nilai
Metode Pengelasan	MAG (<i>Metal Active Gas</i>) / GMAW
Gas Pelindung	CO ₂ murni (99.9%)
Laju Alir	10 L/min
Posisi Pengelasan	1F (<i>Flat</i>), 2F (<i>Horizontal</i>), 3F (<i>Vertical Up</i>)
Material Induk	Baja Karbon Rendah (ASTM A36)
Diameter Kawat Las	0.8 mm (ER70S-6)

Untuk diameter kawat 0.8 mm dengan gas pelindung CO₂ murni pada material ASTM A36, berikut adalah parameter operasional yang digunakan.

Tabel 2. Parameter Operasional

Posisi Pengelasan	Arus (Ampere)	Tegangan (Volt)	Kecepatan Kawat (WFS)
1F (<i>Flat</i>)	100 – 150 A	19 – 23 V	5.0 – 9.0 m/min
2F (<i>Horizontal</i>)	90 – 130 A	18 – 21 V	4.5 – 7.5 m/min
3F (<i>Vertical Up</i>)	70 – 100 A	17 – 19 V	3.5 – 5.5 m/min

Akuisisi dan Pemrosesan Citra

Sistem kuantifikasi *spatter* dikembangkan menggunakan pendekatan *computer vision*. Setelah proses pengelasan selesai, setiap spesimen difoto menggunakan kamera [tipe kamera] dengan resolusi [misalnya 12 MP atau 4000 × 3000 piksel]. Pengambilan citra dilakukan pada jarak [misalnya 300 mm] dari permukaan spesimen menggunakan tripod agar posisi kamera tetap konstan. Sistem pencahayaan menggunakan [LED/light box] dengan intensitas [misalnya 800 lux] sehingga bayangan dan variasi pencahayaan dapat diminimalkan.

Citra hasil pengambilan kemudian diproses menggunakan aplikasi yang dikembangkan. Tahapan pertama adalah konversi citra RGB menjadi *grayscale*, kemudian dilakukan penyaringan derau menggunakan *Gaussian Blur* dengan ukuran kernel [misalnya 5 × 5]. Tahap berikutnya adalah segmentasi citra menggunakan metode *thresholding* dengan nilai ambang [misalnya threshold = 120] untuk memisahkan objek *spatter* dari latar belakang.

Setelah proses segmentasi menghasilkan citra biner, dilakukan analisis objek menggunakan algoritma *Connected Component Labeling* (CCL). Algoritma ini mengidentifikasi setiap kelompok piksel yang saling terhubung sebagai satu objek *spatter*. Dari setiap objek diperoleh parameter jumlah *spatter*, luas area, koordinat pusat (*centroid*), dan dimensi objek sehingga karakteristik morfologi *spatter* dapat dianalisis secara kuantitatif.

Validasi Metode

Keandalan sistem kuantifikasi digital divalidasi dengan membandingkan hasil analisis citra terhadap hasil penimbangan manual massa *spatter* pada setiap spesimen. Hubungan antara kedua metode dianalisis menggunakan regresi linier sederhana dengan menghitung koefisien determinasi (R^2). Nilai R^2 digunakan untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian antara metode digital dan metode konvensional sebagai dasar penilaian akurasi sistem yang dikembangkan.

Hubungan Metode dengan Tujuan Penelitian

Metode ini dirancang untuk mengevaluasi pengaruh posisi pengelasan terhadap karakteristik *spatter*. Perbedaan orientasi pengelasan (1F, 2F, dan 3F) menghasilkan perubahan arah kerja gaya gravitasi terhadap perpindahan tetesan logam selama proses pengelasan. Melalui kuantifikasi digital menggunakan algoritma CCL, penelitian ini mampu mengidentifikasi perbedaan jumlah, luas area, dan morfologi *spatter* pada setiap posisi pengelasan secara objektif. Hasil analisis tersebut digunakan untuk menjelaskan pengaruh gravitasi terhadap pembentukan *spatter* serta memberikan dasar dalam optimasi parameter proses pengelasan MAG.

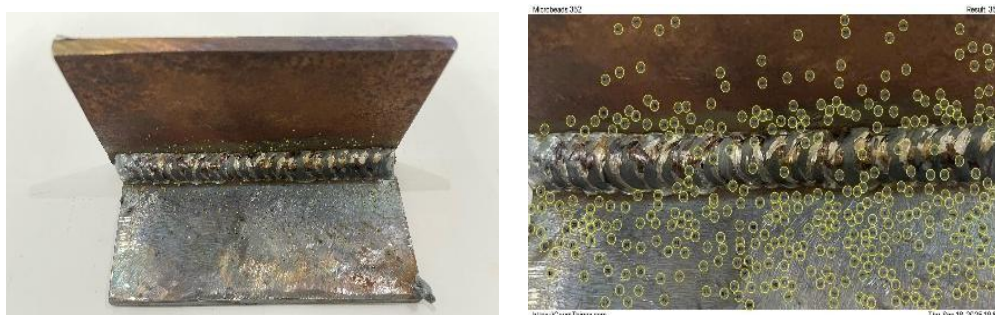
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pemrosesan citra menunjukkan bahwa aplikasi berbasis algoritma *Connected Component Labeling* (CCL) mampu mengidentifikasi setiap objek *spatter* secara otomatis dengan tingkat akurasi yang tinggi. Tahapan pemrosesan meliputi konversi citra ke *grayscale*, segmentasi citra biner, dan pelabelan setiap objek *spatter*. Proses ini memungkinkan sistem membedakan *spatter* mikro (diameter < 0,5 mm) dan *spatter* makro (diameter > 1,0 mm), yang sulit diidentifikasi secara konsisten menggunakan metode penimbangan manual.

Analisis Karakteristik Spatter Berdasarkan Posisi Pengelasan

Pengujian pada tiga orientasi berbeda menunjukkan bahwa posisi fisik benda kerja memberikan pengaruh yang signifikan terhadap stabilitas transfer logam dan distribusi *spatter*. Hal ini disebabkan oleh interaksi antara gaya busur (elektromagnetik) dan vektor gaya gravitasi yang berubah di setiap posisi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa perubahan posisi pengelasan memberikan pengaruh terhadap karakteristik *spatter*. Perbedaan orientasi pengelasan mengubah arah kerja gaya gravitasi terhadap perpindahan tetesan logam (*droplet transfer*), sehingga memengaruhi stabilitas busur, distribusi *spatter*, serta morfologi percikan yang terbentuk.

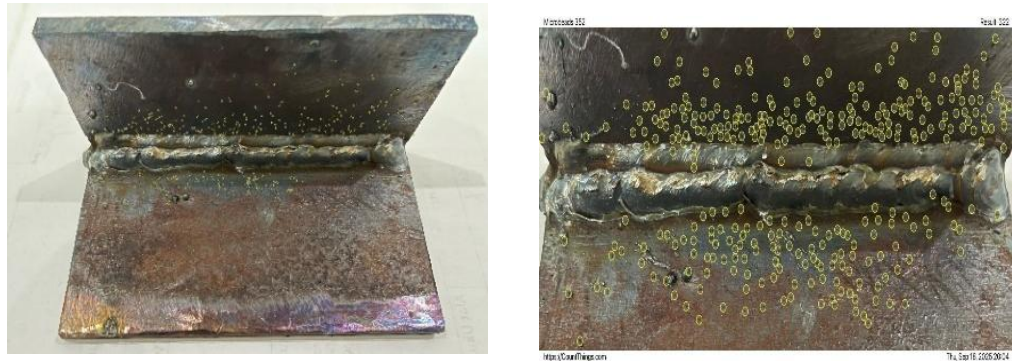
1. Pada posisi 1F (*flat*), gaya gravitasi bekerja searah dengan perpindahan tetesan logam menuju kolom las sehingga proses transfer logam berlangsung relatif stabil. Hasil analisis menggunakan algoritma CCL menunjukkan bahwa posisi ini menghasilkan jumlah butiran *spatter* terbanyak, yaitu sebanyak 228 butir, yang digunakan sebagai kondisi acuan (*baseline*) sebesar 100%. Meskipun jumlah butiran paling tinggi, sebagian besar *spatter* yang terbentuk merupakan *spatter* mikro dengan ukuran relatif kecil dan tersebar merata di sekitar jalur las. Kondisi ini menunjukkan bahwa kestabilan transfer logam masih terjaga sehingga energi yang dilepaskan selama proses pengelasan lebih banyak menghasilkan percikan berukuran kecil dibandingkan gumpalan logam berukuran besar.



Gambar 1. Posisi 1F (*Flat*)

Analisis objek menggunakan algoritma *Connected Component Labeling* (CCL) memberikan data numerik yang presisi mengenai frekuensi ejeksi material pada setiap posisi pengelasan. Berdasarkan hasil pemrosesan citra, posisi 1F (*Flat*) menghasilkan jumlah *spatter* tertinggi secara numerik, yaitu sebanyak 228 butir, yang dalam penelitian ini ditetapkan sebagai *baseline* kontrol (100%). Secara morfologi, tingginya jumlah butiran pada posisi 1F ini didominasi oleh percikan halus (mikro) yang tersebar secara merata, menunjukkan bahwa busur las relatif stabil namun aliran gas tetap melepaskan partikel-partikel kecil dari kolom busur.

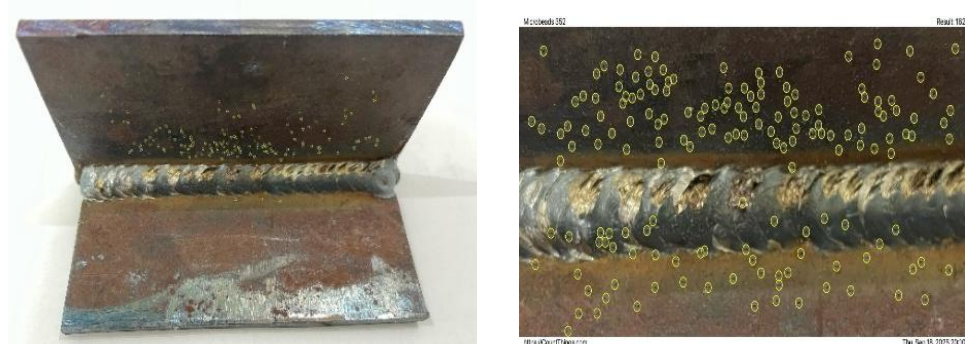
2. Pada pengelasan Posisi (2F) horizontal, ditemukan fenomena asimetri pada distribusi *spatter*. Aplikasi pemrosesan citra mendeteksi bahwa densitas percikan jauh lebih tinggi pada area di bawah garis sumbu las. Hal ini terjadi karena gaya gravitasi bekerja tegak lurus terhadap arah busur, menarik tetesan logam yang tidak stabil ke arah bawah sebelum sempat menyatu sempurna dengan kawah las (*weld pool*).



Gambar 2. Posisi 2F (Horizontal)

Pada posisi 2F (Horizontal), sistem mengidentifikasi jumlah *spatter* sebanyak 217 butir. Jika dibandingkan dengan posisi *flat*, jumlah ini setara dengan 95,17%, atau mengalami penurunan tipis sebesar 4,83%. Secara visual, aplikasi menangkap bahwa meskipun jumlah butirannya hampir setara dengan posisi 1F, persebaran *spatter* pada posisi 2F mulai menunjukkan pola asimetris di mana butiran terkonsentrasi di area bawah jalur las akibat pengaruh gaya gravitasi yang bekerja tegak lurus terhadap arah busur.

3. Posisi 3F (*Vertical Up*) mencatatkan jumlah *spatter* tertinggi dibandingkan posisi lainnya. Pada orientasi *vertical up*, gaya gravitasi bekerja secara antagonis (berlawanan arah) dengan gaya dorong busur dan arah pengelasan. Analisis objek menggunakan algoritma CCL mengidentifikasi adanya peningkatan *spatter* berukuran makro. Fenomena ini disebabkan oleh tetesan logam yang cenderung melorot (*sagging*) akibat tarikan beban gravitasi, yang kemudian pecah menjadi percikan saat bertabrakan dengan aliran gas pelindung CO₂ yang turbulen.



Gambar 3. Posisi 3F (*Vertical Up*)

Perubahan paling drastis ditemukan pada posisi 3F (*Vertical Up*), di mana aplikasi hanya mendeteksi sebanyak 73 butir *spatter*. Angka ini menunjukkan penurunan jumlah butiran yang sangat signifikan, yakni hanya sebesar 32,01% dari kondisi *baseline*, atau menyusut sebesar 67,99% dibandingkan posisi 1F. Namun, penurunan jumlah butiran secara numerik ini tidak mengindikasikan proses pengelasan yang lebih bersih. Sebaliknya, analisis citra digital menunjukkan bahwa pada posisi 3F, terjadi penggabungan (*coalescence*) tetesan logam menjadi *spatter* berukuran makro. Gaya gravitasi yang bekerja secara antagonis (berlawanan arah) menyebabkan tetesan logam melorot (*sagging*) dan menyatu menjadi gumpalan yang lebih besar dan berat sebelum terlontar keluar.

Data ini mempertegas bahwa pada posisi vertikal, jumlah *spatter* menurun secara kuantitas (73 butir) tetapi meningkat secara kualitas ukuran (morfologi makro). Hal ini membuktikan bahwa aplikasi pemrosesan citra mampu mengungkap anomali fisik yang tidak dapat dijelaskan hanya melalui metode penimbangan berat, di mana efisiensi pengelasan pada posisi 3F terganggu oleh pembentukan gumpalan logam yang masif akibat interaksi negatif antara gravitasi dan laju alir gas CO₂.

Tabel 3. Hasil Jumlah *spatter* pada hasil pengelasan

Posisi Pengelasan	Jumlah Butiran (Count)	Persentase terhadap 1F	Keterangan Morfologi
1F (Flat)	228	100%	Dominasi <i>spatter</i> mikro, distribusi merata.
2F (Horizontal)	217	95,17%	Distribusi asimetris (condong ke bawah).
3F (Vertical Up)	73	32,01%	Dominasi <i>spatter</i> makro, busur tidak stabil.

Berdasarkan analisis data yang dilakukan, posisi 1F (Flat) menghasilkan jumlah *spatter* tertinggi sebanyak 228 butir yang ditetapkan sebagai *baseline* (100%), diikuti oleh posisi 2F (Horizontal) sebanyak 217 butir (95,17%), dan posisi 3F (Vertical Up) yang hanya menghasilkan 73 butir atau setara dengan 32,01% dari kondisi *flat*. Meskipun secara numerik jumlah butiran pada posisi 3F mengalami penurunan drastis sebesar 67,99%, analisis morfologi citra mengungkapkan bahwa fenomena ini bukan menunjukkan proses yang lebih bersih, melainkan adanya penggabungan (*coalescence*) percikan menjadi butiran makro akibat interaksi antagonis antara gaya gravitasi dan tekanan gas pelindung CO₂. Hal ini membuktikan bahwa posisi vertikal menghasilkan *spatter* yang lebih sedikit secara kuantitas namun jauh lebih masif secara ukuran, yang pada akhirnya memvalidasi kemampuan aplikasi pemrosesan citra dalam mendeteksi anomali transfer logam yang tidak dapat ditangkap oleh metode penimbangan massa konvensional.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa posisi pengelasan memengaruhi karakteristik *spatter* pada proses pengelasan Metal Active Gas (MAG). Hasil kuantifikasi menggunakan algoritma *Connected Component Labeling* (CCL) menunjukkan bahwa posisi 1F (*flat*) menghasilkan jumlah *spatter* terbanyak, yaitu 228 butir, diikuti posisi 2F (*horizontal*) sebanyak 217 butir, dan posisi 3F (*vertical up*) sebanyak 73 butir. Meskipun jumlah *spatter* pada posisi 3F paling sedikit, hasil analisis morfologi menunjukkan terbentuknya *spatter* berukuran lebih besar akibat fenomena *coalescence* (penggabungan tetesan logam), sehingga jumlah *spatter* yang rendah tidak selalu menunjukkan kualitas proses pengelasan yang lebih baik.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa perubahan orientasi pengelasan memengaruhi mekanisme perpindahan logam melalui pengaruh gaya gravitasi, sehingga menghasilkan karakteristik *spatter* yang berbeda pada setiap posisi pengelasan. Oleh karena itu, pemilihan parameter proses, khususnya pengaturan gas pelindung CO₂, perlu disesuaikan dengan posisi pengelasan untuk meminimalkan pembentukan *spatter* dan meningkatkan efisiensi proses. Kontribusi utama penelitian ini adalah pengembangan metode kuantifikasi *spatter* berbasis pemrosesan citra menggunakan algoritma CCL yang mampu mengidentifikasi jumlah, distribusi, dan karakteristik morfologi *spatter* secara lebih objektif dibandingkan metode penimbangan konvensional. Pendekatan ini berpotensi diterapkan sebagai sistem inspeksi kualitas pengelasan berbasis digital untuk mendukung optimasi proses dan pengendalian mutu pada industri manufaktur.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Workshop Fabrikasi AK-Manufaktur Bantaeng atas dukungan sarana, fasilitas laboratorium, serta bantuan teknis selama proses pengambilan data penelitian ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih yang tulus kepada Workshop Las BBPVP Makassar atas kerja sama instruktur, dan penyediaan material serta peralatan pengelasan yang sangat mendukung kelancaran eksperimen ini. Kontribusi dari kedua institusi ini telah menjadi bagian krusial dalam keberhasilan penyelesaian penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] O. Masahiro, M. Takashi, M. Kanto, T. Tadahisa, and F. Kohei, "A New Approach to Controlling Metal Transfer by Dynamic Modification in Gas Composition of Arc Atmosphere -Studies on Pulsed Gas MAG Welding. Proceedings of the Japan Welding Society, Vol. 38, No. 4, pp. 363-378 (2020), doi: 10.2207/qjwjs.38.363
- [2] F. Kohei, T. Tadahisa, O. Masahiro, M. Takashi, M. Naoki, and I. Yoshihide, Experimental study on the metal transfer control by using pulsed Ar addition in CO₂ arc welding process, Proceedings of the Japan Welding Society, Vol. 38, No. 4, pp. 379-391 (2020), doi: 10.1080/09507116.2021.1936924
- [3] P. Kah, G. O. Edigbe, B. Ndiwe, and R. Kubicek, "Assessment of arc stability features for selected gas metal arc welding conditions," *SN Appl. Sci.*, vol. 4, no. 10, Oct. 2022, doi: 10.1007/s42452-022-05150-5.
- [4] C. Shi, H. Sun, and J. Lu, "Short Circuiting Transfer, Formation, and Microstructure of Ti-6Al-4V Alloy by External Longitudinal Magnetic Field Hybrid Metal Inert Gas Welding Additive Manufacturing," *Materials*, vol. 15, no. 21, Nov. 2022, doi: 10.3390/ma15217500
- [5] M. Lohse, M. Trautmann, U. Füssel, and S. Rose, "Influence of the CO₂ content in shielding gas on the temperature of the shielding gas nozzle during GMAW welding," *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 4, no. 4, Dec. 2020, doi: 10.3390/jmmp4040113.
- [6] X. Tao, H. Yang, X. Ba, and L. Liu, "Influence of Heat Source Arrangement on Coupling Characteristics of Low Power Pulsed Laser-MAG Hybrid Welding," Jun. 15, 2022. doi: 10.21203/rs.3.rs-1733031/v1.
- [7] C. Xia, Z. Pan, Y. Li, and H. Li, "Vision-Based Melt Pool Monitoring for Wire-Arc Additive Manufacturing Using Deep Learning Method," Dec. 13, 2021. doi: 10.21203/rs.3.rs-1126853/v1.
- [8] O. F. Benaouda, B. Babes, M. Bouchakour, and A. Bendiabdellah, "Contribution Of The Two Rectifiers Reconfiguration To Fault Tolerance Connected To The Grid Network To Feed The GMAW Through Processor-In-The-Loop," *Engineering Review*, vol. 43, no. 1, pp. 105–125, Mar. 2023, doi: 10.30765/er.1884.
- [9] G. Irene Huka *et al.*, "Pengaruh Variasi Arus Pengelasan Gas Metal Arc Welding (GWAM) Terhadap Sifat Mekanis Pada Pipa Seamless," *Journal Mechanical Engineering (JME)*, vol. 1, no. 3, p. 2023.
- [10] L. Xiao, D. Fan, and J. Huang, "Three-dimensional Numerical Study on the Metal Rotating Spray Transfer Process of High-current GMAW," Oct. 14, 2020. doi: 10.21203/rs.3.rs-51276/v2.
- [11] A. Ikram, A. Raza, and H. Chung, "Investigation of Single Pass Welding of Thick AH36 Steel Plates in a Square Groove Butt Joint Configuration During AC-GMAW," *Journal of Welding and Joining*, vol. 38, no. 3, pp. 254–262, Jun. 2020, doi: 10.5781/jwj.2020.38.3.4.
- [12] S. Chantavit, S. Jaitalawanich, M. Phabsimma, A. Kongrunchok, and S. Kritwattanakorn, "Appropriate Parameter of a Pipe Welding Positioner for Butt Weld by MAG Process," in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics, 2025. doi: 10.1088/1742-6596/3160/1/012007.
- [13] L. Wang, J. Chen, S. Zhang, and C. Wu, "Numerical simulation of coupled arc-droplet-weld pool behaviors during compound magnetic field assisted gas metal arc welding," *AIP Adv.*, vol. 11, no. 6, Jun. 2021, doi: 10.1063/5.0049461.