

TREN DAN KETERBAHARUAN TEKNOLOGI ABRASIVE WATER JET (AWJ) TERHADAP ALAT BERAT DI TAMBANG BATU BARA DAN REKAYASA MANUFAKTUR MODERN

Abdullah Apa¹ ✉, Ghany Heryana².

¹ Program Studi Magister Terapan Rekayasa Teknologi Manufaktur, Politeknik Negeri Jakarta, Depok 16425, Indonesia

² Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Mesin, Universitas Presiden, Jababeka Education Park, Cikarang, Bekasi, Jawa Barat, Indonesia
✉ abdullah.apa.24@stu.pnj.ac.id

Received 4 December 2025, Revised 08 January 2026, Accepted 19 January 2026

ABSTRAK

Tinjauan dari review ini menganalisis tren dan keterbauruan (novelty) serta kesenjangan riset (*research gaps*) pada teknologi *Abrasive Water Jet* (AWJ) terhadap alat berat pada tambang batubara dan bidang rekayasa manufaktur modern terkait, berdasarkan sintesis dari kumpulan artikel ilmiah. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi tren dan keterbauruan teknologi Abrasive Water Jet (AWJ) terkini terhadap alat berat di sektor tambang batubara serta rekayasa manufaktur modern serit menganalisis dampak inovasi seperti nozzle 5-axis self-aligning, integrasi AI-CFD-DEM dan otomatisasi robotik terhadap efisiensi ekstraksi batubara, presisi fabrikasi alat berat, serta keberlanjutan operasional. Teknologi *Abrasive Water Jet* (AWJ) membawa tren keterbauruan krusial terhadap alat berat di tambang batubara melalui pemotongan presisi tanpa panas pada baja tebal dan inconel untuk *drill bit*, *bucket loader*, serta conveyor. Inovasi 2025-2026 seperti tekanan 90.000+ PSI, nozzle 5-axis self-aligning dan AI-driven nesting tingkatkan akurasi ± 0.001 inci, kurangi downtime 20-30% pada fabrikasi alat berat tambang.

Kata Kunci: Abrasive Water Jet (AWJ), teknologi AWJ, Inovasi material (Nozel dan abrasive)

1. PENDAHULUAN

Abrasive Water Jet (AWJ) adalah teknologi pemotongan inovatif yang mampu memproses beragam material secara efisien dan presisi [1][2]. Mesin waterjet abrasif (AWJ) adalah teknik canggih yang terbukti dapat digunakan untuk memproses berbagai bahan seperti paduan aluminium AA5083-H32, kuningan-360, superalloy berbasis nikel, stainless steel AISI 304, bahkan komposisi dan pada stainless Steel 316L [3].

Mesin AWJ berfungsi untuk menghilangkan atau membersihkan kotoran/kontaminan pada permukaan material [4]. Prinsip kerja AWJ yaitu dengan cara menembakkan partikel abrasif dengan campuran air dengan udara bertekanan tinggi pada sebuah permukaan material sehingga terjadi gaya tumbukan atau gesekan. Dengan demikian permukaan material akan menjadi bersih sekaligus kasar [4]. Teknologi ini telah menjadi fokus penelitian yang signifikan, bertujuan untuk menganalisis karakteristik dan performa AWJ dalam

pemotongan berbagai material, termasuk logam, polimer, dan komposit [5]. Studi-studi ini secara ekstensif mengkaji parameter operasi seperti tekanan air, jenis dan ukuran abrasif, serta kecepatan nozzle dan pengaruhnya terhadap kedalaman potong, kualitas permukaan, dan efisiensi proses secara keseluruhan [6][7]. Analisis dinamis interaksi multi-phase dalam abrasive water jet machining menunjukkan keterkaitan kecepatan partikel abrasif dan efisiensi energi pemotongan dengan keterbauruan dalam teknik simulasi CFD sesuai kondisi operasional nyata [8].

Meninjau aplikasi abrasif waterjet pada polimer dan komposit berbasis polimer dengan analisis performa pemotongan, degradasi termal, dan kerusakan mikrostruktur dan menemukan optimasi parameter proses agar minim kerusakan dan kapabilitas komponen polimer tetap terjaga [9]. Mekanisme erosi abrasive waterjet dan pengaruhnya pada geometrik permukaan akhir, Integrasi model simulasi dengan eksperimen untuk memprediksi tingkat kerusakan permukaan dan Keterbauruan pada pemodelan numerik erosi mikro dengan partikel shell multi-skala [10].

Penggunaan AWJ slurry jet potong lapisan batubara hingga 100 kaki sekaligus fabrikasi komponen berat seperti excavator blade dari ASTM A36 dengan toleransi < 0.1 mm, gantikan plasma/laser pada ketebalan > 150 mm. Otomatisasi robotik remote integrasikan AWJ untuk perawatan alat berat bawah tanah, tingkatkan ROI < 2 tahun dengan daur ulang air 95% [11].

Nosel adalah perangkat yang dirancang untuk mengendalikan arah dan karakteristik aliran fluida (terutama untuk meningkatkan kecepatan) saat keluar dari ruang atau pipa tertutup. Dalam konteks dinamika fluida, nosel berperan penting dalam mengarahkan aliran fluida seperti gas atau cairan [12]. Kajiannya menemukan optimalisasi parameter desain nozzle dan tekanan untuk kebutuhan gaya dorong optimal seta keterbauruannya pada aplikasi metode statistik untuk optimasi performa thruster pada tribologi aliran air bertekanan [13]. Kajiannya tentang karakteristik fluida dan dinamika abrasive waterjet nozzle, Eksplorasi parameter kecepatan fluida dan distribusi abrasive dan menemukan pada desain nozzle dengan konfigurasi aliran multi-jet meningkatkan efisiensi dan akurasi

[14]. Analisis cutting force dan keausan nozzle pada abrasive waterjet dengan variasi abrasif dan tekanan air yang membahas tentang hubungan antara tekanan, laju aliran dan umur nozzle dan menemukan material nozzle yang meningkatkan umur pakai dan performa [15].

Penggunaan metode Taguchi untuk optimasi parameter thruster waterjet untuk dorongan maksimal dan efisiensi bahan bakar, menemukan pola optimal pada hubungan tekanan, sudut nozel dan dimensi thruster [16]. Untuk meningkatkan efisiensi pemotongan abrasive water jet (AWJ) bertekanan tinggi melalui optimasi struktur nozzle dan parameter hidrolis jet (tekanan pompa, debit fluida dan diameter nozzle) dan menemukan optimasi bentuk nozel, mengenalkan model SPH-FEM tak terbatas (Infinite SPH) yang berbeda dari model SPH terbatas konvensional, mengurangi waktu komputasi dan meningkatkan akurasi simulasi pemotongan baja dan memberikan persamaan baru untuk menghitung rugi tekanan dan hubungan energi jet dengan parameter hidrolis, yang sebelumnya tidak dijelaskan dalam studi AWJ [17]. Penelitiannya dalam mengembangkan sensor gaya khusus untuk mengukur gaya yang terjadi selama proses pemotongan logam menggunakan Abrasive Water Jet (AWJ) yang mengukur gaya AWJ secara real-time dalam tiga sumbu, bukan hanya mengamati hasil potongan akhir dan sistem pemantauan online untuk kendali kualitas proses AWJ, yang dapat mendeteksi gangguan sebelum kegagalan pemotongan [18].

Dalam penelitiannya [4] dengan menggunakan metode SDLC (System Development Life Cycle) yang meliputi: (1) Requirement analysis, (2) Perancangan (design) menggunakan software Computer Aided Design (CAD), (3) Proses pembuatan mesin (implementation), (4) Pengujian mesin menunjukkan mesin AWJ efektif dan efisien membersihkan komponen material kerak oli dan kontaminan cat.

Penelitian dengan mengoptimasi akurasi pemotongan AWJ pada baja 18CrNiMo7-6 menggunakan metode Taguchi. Variabel yang diuji adalah tekanan jet, kecepatan pemotongan, dan laju alir abrasif, dengan hasil pengukuran berupa kekasaran permukaan dan sudut taper dengan hasil penelitian meningkatkan efisiensi pemotongan dengan mengurangi kekasaran hingga 30% dibanding kondisi standar [4].

Penelitian lain tentang proses pemesinan keramik alumina (Al₂O₃) dengan abrasive waterjet machining (AWJM) menggunakan metode response surface methodology untuk mengkaji pengaruh parameter proses seperti tekanan air, laju alir abrasif, dan kecepatan pemindahan kepala nozzle terhadap laju penghilangan material (material removal rate/MRR), kekasaran permukaan dan sudut taper hasil potongan. Keterbaruan utamanya pada parametris pertama yang komprehensif menggunakan *Response Surface Methodology* (RSM) dengan *Box-Behnken design* untuk mengoptimalkan pemesinan abrasive waterjet (AWJM) pada keramik alumina (Al₂O₃) [19].

Pengaruh tekanan suplai pada nozzle kabut air (mist nozzle) terhadap efisiensi penyerapan gas ammonia menemukan efisiensi maksimum dicapai pada tekanan 0.3–0.4 MPa, Nozzle dengan sudut semprot besar meningkatkan area

kontak udara-air dengan riset ini untuk mendesain sistem mitigasi kebocoran gas beracun berbasis air spray [20]. Peninjaunya dalam perkembangan material konduktor transparan fleksibel (Flexible Transparent Conductors/FTCs) berbasis nanomaterial menemukan nanowire logam menunjukkan performa terbaik (resistansi <100 Ω/sq pada regangan 60–90%), graphene, MXene, dan polimer konduktif sedangkan Nanostruktur memungkinkan konduktor fleksibel untuk elektronik wearable dan implantable [21].

Seiring berkembangnya teknologi, penelitian AWJ tidak lagi hanya berfokus pada parameter dasar, tetapi telah meluas ke pengembangan metode optimasi proses menggunakan statistik dan kecerdasan buatan (AI), studi tentang keausan nozzle dan inovasi material baru untuk meningkatkan daya tahannya, serta aplikasi industri yang semakin presisi [10]. Penelitiannya dengan memperkenalkan konsep *Multi-Robot Coordinated Wire-Arc Directed Energy Deposition* (MRC-WA-DED), yaitu sistem pencetakan logam aditif dengan beberapa sumber panas asinkron untuk mengurangi tegangan sisa dan distorsi [22]. Tinjauan ini disusun untuk mensintesis temuan, keterbaruan, dan kesimpulan utama dari sekumpulan artikel ilmiah terkait AWJ dan teknologi manufaktur canggih lainnya. Tujuannya adalah untuk memetakan tren teknologi terkini, mengidentifikasi keterbaruan (*novelty*) yang signifikan dan menyoroti kesenjangan riset (*research gaps*) yang telah dibuat oleh para peneliti di bidangnya.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Studi ini merupakan tinjauan sistematis yang menganalisis dan mensintesis konten, fokus penelitian, keterbaruan dan kesimpulan dari sejumlah jurnal yang telah dirangkum. Analisis difokuskan pada identifikasi tema-tema utama yang berulang, terobosan teknologi (keterbaruan) dan tantangan atau area yang sebelumnya kurang dieksplorasi (kesenjangan riset) dalam literatur-literatur yang ada. Data diekstraksi (review) dari artikel serta kesimpulan umum yang ada dalam jurnal-jurnal.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis terhadap kumpulan jurnal menunjukkan beberapa tren utama dan keterbaruan dalam teknologi AWJ dan manufaktur modern.

3.1 Optimasi Proses Dan Kontrol Kualitas Real-Time

Optimalisasi parameter pemrosesan adalah tema dominan untuk meningkatkan efisiensi dan kualitas potongan.

Keterbaruan (*Novelty*) :

Metode Optimasi Statistik : Terdapat pergeseran dari metode trial-and-error ke penggunaan metode statistik dan AI. Sebagai contoh, penelitian oleh Perek (2023) menerapkan metode Taguchi untuk mengoptimasi akurasi pemotongan AWJ pada baja, dengan fokus pada kekasaran permukaan dan sudut taper. Keterbaruan dari pendekatan ini adalah penggunaan orthogonal array Taguchi untuk meminimalkan variasi hasil potong secara efisien, yang berhasil mengurangi kekasaran secara signifikan.

Sensorik dan Pemantauan Real-time: Integrasi sensor cerdas adalah kemajuan besar. Studi oleh Hlaváč et al. (2021) berfokus pada pengembangan sensor gaya khusus untuk mengukur gaya pemotongan AWJ secara real-time dalam tiga sumbu. Keterbaruannya terletak pada penggunaan rasio antara gaya pemotongan dan gaya deformasi sebagai indikator langsung kualitas pemotongan dan deteksi gangguan sistem. Ini membuka potensi untuk sistem pemantauan dan kendali kualitas online.

3.2 Pemodelan Dan Simulasi Tingkat Lanjut

Model simulasi dan CFD telah menjadi alat penting untuk memprediksi hasil dan merancang proses.

Keterbaruan (*Novelty*) Model simulasi baru : Penelitian tidak hanya menggunakan CFD konvensional, tetapi juga mengembangkan model yang lebih canggih. Studi oleh Zhu et al. (2025) menggunakan model numerik AWJ berbasis SPH-FEM coupling. Keterbaruan utamanya adalah pengenalan model SPH tak terbatas (Infinite SPH), yang terbukti mengurangi waktu komputasi dan meningkatkan akurasi simulasi pemotongan dibandingkan model SPH terbatas konvensional.

Optimasi desain berbasis simulasi : Simulasi ini digunakan untuk optimasi desain. Zhu et al. (2025) juga menemukan bahwa nozzle konikal dengan sudut taper 40° menghasilkan efisiensi tertinggi. Selain itu, model ini berhasil menunjukkan hubungan non-linear yang kompleks antara tekanan, debit, dan diameter nozzle, serta memberikan persamaan baru untuk menghitung rugi tekanan.

3.3 Inovasi Material (Nozzle Dan Abrasif)

Keausan nozzle dan pengelolaan abrasif adalah tantangan operasional yang signifikan. Penelitian berfokus pada pengembangan material baru untuk mengatasi ini. Untuk mengatasi erosi nosel, beberapa strategi diterapkan serta membutuhkan tim multidimensi seperti pada Gambar 1 dibawah ini :



Gambar 1. Pengembangan nosel membutuhkan tim multidisiplin [10].

- Pemilihan material dan pelapis : Menggunakan material tahan erosi seperti keramik dan logam tahan api dapat meningkatkan umur pakai nosel. Pelapis pelindung (misalnya, pelapis penghalang termal) dapat melindungi material di bawahnya dari suhu tinggi dan serangan kimia.

- Peningkatan desain : Mengoptimalkan geometri nosel untuk mengurangi gradien termal dan tekanan mekanis dapat mengurangi erosi. Ini termasuk penggunaan material ablatif yang terkikis secara pengorbanan untuk melindungi struktur di bawahnya.

- Teknik manufaktur canggih : Teknik seperti manufaktur aditif memungkinkan geometri kompleks dan komposisi material yang dapat meningkatkan ketahanan erosi.

Dari ketujuh komponen nozzle development seperti pada gambar 1. sebagai berikut :

1. Fiber development (pengembangan serat)
 - o Ini merujuk pada pemilihan, formulasi dan optimasi serat material yang digunakan dalam nozzle seperti serat karbon, gelas atau organik untuk mendapatkan sifat mekanik, termal atau durabilitas yang diinginkan dalam struktur nozzle.
 - o Pemilihan serat penting karena akan mempengaruhi kekuatan, kekakuan dan ketahanan terhadap lingkungan dari produk akhir.
2. Fabrication process (3D)
 - o Tahap ini mencakup proses pembuatan nozzle menggunakan metode manufaktur seperti 3D printing, filament winding, pultrusion atau resin transfer moulding.
 - o Proses ini sangat menentukan kualitas, resolusi geometri dan konsistensi material nozzle.
3. Structural analysis (Analisis struktural)
 - o Merupakan evaluasi teknis mengenai perilaku nozzle di bawah beban : analisis tegangan, deformasi atau karakteristik dinamis.
 - o Teknik ini biasanya dilakukan dengan simulasi seperti finite element method (FEM) atau pengujian laboratorium untuk memastikan nozzle tak mudah patah atau berubah bentuk saat beroperasi.
4. Non-destructive evaluation (Evaluasi tanpa merusak)
 - o Uji yang dilakukan untuk memeriksa cacat internal atau ketidaksesuaian material tanpa merusak nozzle.
 - o Teknik NDE seperti ultrasonik, sinar-X, acoustic emission, atau infrared thermography digunakan untuk menemukan retakan, void, atau delaminasi pada bahan komposit nozzle.
5. Environmental durability (Daya tahan lingkungan)
 - o Menilai bagaimana nozzle bertahan terhadap kondisi lingkungan misalnya panas tinggi, korosi, degradasi material, atau siklus termal selama umur pakai.

- Ini penting apabila nozzle dipakai di kondisi ekstrem seperti mesin roket, jet engine, atau aplikasi industri berat.
6. Nozzle/acoustic technology (Teknologi nozzle/akustik)
- Bagian ini bisa mencakup penelitian tentang desain akustik dan dinamika fluida dalam nozzle misalnya untuk mengontrol kebisingan, vibrasi atau performa aliran fluida melalui nozzle.
 - Teknologi nozzle modern sering juga berhubungan dengan pengurangan gangguan akustik atau efektivitas aliran.
7. Mechanical testing (Pengujian mekanis)
- Serangkaian pengujian untuk mengukur sifat mekanik nozzle: tarik, tekan, lentur, lelah, impak dan sebagainya.
 - Pengujian ini memastikan produk memenuhi spesifikasi performa yang telah ditetapkan sebelum digunakan di aplikasi nyata.

Keterbaruan (Novelty) Material nozzle tahan aus : Terdapat pengembangan material nozzle baru yang bertujuan meningkatkan umur pakai dan performa. Abrasif alternatif dan daur ulang : Untuk mengurangi biaya dan dampak lingkungan, penelitian mengeksplorasi abrasif alternatif. Keterbaruan di area ini adalah pengembangan abrasif berbasis limbah dan bahan ramah lingkungan, serta teknik daur ulang abrasif (*abrasive recycling*) untuk mengurangi limbah.

3.4 Tren Terkait Dalam Rekayasa Manufaktur Alat Berat

AWJ slurry jet potong lapisan batubara hingga 100 kaki sekaligus fabrikasi komponen berat seperti excavator blade dari ASTM A36 dengan toleransi <0.1 mm, gantikan plasma/laser pada ketebalan >150 mm. Otomatisasi robotik remote integrasikan AWJ untuk perawatan alat berat bawah tanah, tingkatkan ROI <2 tahun dengan daur ulang air 95%. Di Kalimantan, restorasi kerak oli/cat pada heavy equipment capai 48 mm²/s. Jurnal terkait menunjukkan optimasi SOD 3-4 mm pada ASTM A36 tingkatkan akurasi profil potong,

Studi-studi lain dalam dokumen sumber, meskipun tidak semuanya tentang AWJ (seperti : sand casting, laser sealing, dan additive manufacturing), menunjukkan tren paralel yang memperkuat visi manufaktur modern. Dampaknya pada manufaktur moderen adalah Fabrikasi alat berat tambang manfaatkan 3D cutting head ±0.5° untuk desain kompleks, dan mengurangi limbah 10-15% via predictive maintenance.

Keterbaruan (Novelty) Manufaktur aditif multi-robot : Studi oleh Li et al. (2025) tentang Multi-Robot Coordinated Wire-Arc Directed Energy Deposition (MRC-WA-DED) memperkenalkan konsep penggunaan beberapa sumber panas asinkron. Keterbaruannya adalah penggunaan sistem multi-robot ini untuk mengurangi distorsi (hingga 49.1%) dan tegangan sisa (hingga 6.5%), sebuah terobosan untuk additive manufacturing skala besar.

Optimasi antarmuka material : Dalam studi laser sealing oleh Chen et al. (2025), keterbaruan ditemukan pada penggunaan perlakuan laser surface melting pada baja sebelum disambungkan dengan kaca. Perlakuan ini terbukti meningkatkan kekuatan mekanik sambungan hingga 40% dengan menciptakan interlocking microstructure.

3.5 Kesenjangan Riset (Research Gaps)

Pompa ultra-tinggi efisiensi energi 20% kombinasikan CFD-DEM real-time untuk umur nozzle 150 jam dari SLM 316L, minimalkan taper pada batuan abrasif alat tambang. Hybrid AWJ-laser ultrafast percepat prototipe bucket dan conveyor, pasar tumbuh 7.43% CAGR hingga 2035. Pasar global AWJ capai \$1.8 miliar di 2025, dorong manufaktur berkelanjutan alat berat.

Dokumen yang ditinjau tidak hanya menyajikan kemajuan (novelty) tetapi juga secara implisit menyoroti kesenjangan riset (gaps) yang coba diisi oleh penelitian ini antara lain, kesenjangan pemantauan kualitas :

Gap : Kurangnya kemampuan untuk memantau dan mengontrol kualitas pemotongan AWJ secara real-time. Sebagian besar evaluasi bersifat post-process (mengukur kekasaran atau taper setelah pemotongan selesai).

Solusi (Novelty) : Pengembangan sensor gaya tiga sumbu yang dapat mendeteksi gaya secara online dan menggunakan data ini sebagai indikator kualitas. Kesenjangan efisiensi optimasi :

Gap : Proses optimasi parameter AWJ (tekanan, laju alir, kecepatan) secara tradisional memakan waktu dan tidak efisien jika mengandalkan eksperimen konvensional. Solusi (Novelty) : Penerapan metode optimasi statistik seperti Taguchi dan algoritma AI untuk menentukan parameter optimal secara efisien dan sistematis. Kesenjangan akurasi simulasi :

Gap : Model simulasi CFD atau SPH konvensional memiliki keterbatasan dalam akurasi atau membutuhkan waktu komputasi yang sangat lama untuk memprediksi interaksi fluida-partikel-material secara akurat. Solusi (Novelty) : Pengenalan model simulasi yang lebih canggih seperti Infinite SPH dan model erosi mikro multi-skala untuk prediksi yang lebih akurat dan efisien. Kesenjangan desain komponen :

Gap : Pemahaman yang tidak lengkap tentang hubungan kompleks antara geometri nozzle (sudut konikal, diameter) dan parameter hidrolis (tekanan, debit). Solusi (Novelty) : Penggunaan simulasi terkopel (SPH-FEM) untuk memetakan hubungan non-linear ini dan mengidentifikasi desain optimal secara teoritis (misalnya, nozzle konikal 40°). Kesenjangan keberlanjutan dan biaya operasional :

Gap : Tingginya biaya operasional akibat keausan nozzle dan dampak lingkungan dari limbah abrasif. Solusi (Novelty) : Penelitian yang berfokus pada pengembangan material nozzle baru yang lebih tahan aus dan eksplorasi abrasif alternatif yang ramah lingkungan atau dapat didaur ulang. Kesenjangan cacat pada manufaktur aditif :

Gap : Distorsi dan tegangan sisa yang tinggi merupakan masalah umum dalam proses Wire-Arc Directed Energy Deposition (WA-DED) skala besar. Solusi (Novelty) :

Penggunaan sistem multi-robot dengan sumber panas asinkron (MRC-WA-DED) untuk mengelola gradien termal dan mengurangi cacat secara signifikan.

4. KESIMPULAN

Tinjauan terhadap kumpulan jurnal-jurnal tersebut menegaskan bahwa teknologi Abrasive Water Jet (AWJ) untuk alat berat pada daerah tambang batubara terus berkembang pesat, didorong oleh integrasi teknologi digital dan metode cerdas. Keterbaharuan (novelty) utama tidak lagi hanya pada penyesuaian parameter dasar, tetapi telah bergeser ke area yang lebih canggih meliputi :

1. Integrasi sensorik : Pengembangan sensor baru (misalnya sensor gaya 3-sumbu) untuk pemantauan proses real-time dan kontrol kualitas online.
2. Optimasi cerdas : Pemanfaatan metode statistik (Taguchi) dan kecerdasan buatan (AI) untuk optimasi proses yang efisien.
3. Simulasi lanjut : Penggunaan model simulasi canggih (CFD, SPH-FEM, Infinite SPH) untuk memprediksi performa dan mengoptimalkan desain komponen seperti nozzle.
4. Inovasi material Berkelanjutan : Fokus pada pengembangan material nozzle yang lebih tahan lama dan abrasif yang ramah lingkungan serta dapat didaur ulang.
5. Otomatisasi dan sistem hibrida : Perluasan ke aplikasi mikro-AWJ, proses hibrida dan otomatisasi robotik.
6. Kesenjangan riset terkait kontrol real-time, efisiensi simulasi dan keberlanjutan secara aktif sedang diatasi melalui inovasi-inovasi ini.
7. Tren dalam otomatisasi (multi-robot DED) dan simulasi (FEM pada laser sealing) yang terlihat di bidang manufaktur menuju visi smart manufacturing yang lebih presisi, efisien, otomatis dan berkelanjutan.
8. Tren AWJ terhadap alat berat tambang menekankan high-flow jet untuk coal-breaking efisien dengan optimasi parameter jet krusial untuk produktivitas dan keselamatan

UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam penelitian ini banyak pihak yang terlibat karena itu saya ucapkan limpah terimakasih yang mendalam kepada Pak Ghani Heryana yang telah dengan sabar membimbing dan mengarahkan saya atas penulisan artikel ini dan teman-teman MTRTM yang selalu berdiskusi atas penulisan artikel ini.

REFERENSI

- [1] K. Gupta, "Developments In Abrasive Water Jet Machining Of Nonmetals," *J. Poli-Teknologi*, Vol. 23, No. 2, Pp. 73–82, 2024, Doi: 10.32722/Pt.V23i2.6910.
- [2] X. Liu And M. Chen, "Model Reconstruction Of Awj Separation Speed Driven By Cutting Mechanisms And Cutting Data," 2025.
- [3] W. Jet And C. Awj, "Dengan Proses Abrasive," No. May, Pp. 291–296, 2022.
- [4] R. Tri Indrawati *Et Al.*, "Efektifitas Abrasive Water Jet Machine Pada Proses Restorasi Komponen Otomotif,"

J. Rekayasa Mesin, Vol. 17, No. 2, Pp. 315–324, 2022, [Online]. Available:

<https://jurnal.polines.ac.id/index.php/rekayasa>

- [5] A. Perc, "Optimization Of Abrasive Water Jet (Awj) Cutting Process Accuracy," *Procedia Comput. Sci.*, Vol. 225, Pp. 1045–1052, 2023, Doi: 10.1016/J.Procs.2023.10.092.
- [6] "4805-Article Text-16669-1-10-20170515."
- [7] A. Perc, A. Radomska-Zalas, And A. Fajdek-Bieda, "Experimental Research Into Marble Cutting By Abrasive Water Jet," *Facta Univ. Ser. Mech. Eng.*, Vol. 20, No. 1, Pp. 145–156, 2022, Doi: 10.22190/Fume210203037p.
- [8] M. Szada-Borzyszkowska *Et Al.*, "Assessment Of The Effectiveness Of High-Pressure Water Jet Machining Generated Using Self-Excited Pulsating Heads," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 133, No. 9–10, Pp. 5029–5051, 2024, Doi: 10.1007/S00170-024-14040-6.
- [9] F. Kartal, "Abrasive Water Jet Machining Of Carbon Fiber-Reinforced Pla Composites: Optimization Of Machinability And Surface Integrity For High-Precision Applications," *Polymers (Basel)*, Vol. 17, No. 4, 2025, Doi: 10.3390/Polym17040445.
- [10] M. Hashish, "Abrasive Waterjet Machining," *Materials (Basel)*, Vol. 17, No. 13, 2024, Doi: 10.3390/Ma17133273.
- [11] "No Title," 2025.
- [12] Mansha, Jahanvi Sharma, Mayur Ramkumar Hatwate, Asha, And Gourav Sardana, "The Cutting-Edge Nozzle Materials Used In Modern Aviation," *Acceleron Aersp. J.*, Vol. 3, No. 6, Pp. 721–727, 2024, Doi: 10.61359/11.2106-2471.
- [13] S.- Suheri, N. Fadillah, N. Nazaruddin, And Z. Arif, "Perancangan Dan Pembuatan Mesin Water Jet Cutting (Wjc) Sebagai Alat Pemotong Lembaran Karet," *J. Mech. Eng. Manuf. Mater. Energy*, Vol. 3, No. 2, P. 100, 2019, Doi: 10.31289/Jmemme.V3i2.3020.
- [14] K. Fuse *Et Al.*, "Abrasive Waterjet Machining Of Titanium Alloy Using An Integrated Approach Of Taguchi-Based Passing Vehicle Search Algorithm," *Int. J. Interact. Des. Manuf.*, Vol. 19, No. 3, Pp. 2249–2263, 2025, Doi: 10.1007/S12008-024-01831-0.
- [15] M. Murugan, M. A. Gebremariam, Z. Hamedon, And A. Azhari, "Performance Analysis Of Abrasive Waterjet Machining Process At Low Pressure," *Iop Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, Vol. 319, No. 1, 2018, Doi: 10.1088/1757-899x/319/1/012051.
- [16] M. Seva, Z. Kurniawan, And H. Hasdiansah, "Optimasi Karakteristik Komponen Waterjet Thruster Terhadap Gaya Dorong Menggunakan Metode Taguchi," *J. Inov. Teknol. Terap.*, Vol. 2, No. 2, 2024, Doi: 10.33504/Jitt.V2i2.145.
- [17] X. Zhu, Z. Luo, Y. Luo, C. Shi, And L. Wang, "Analysis Of The Influence Of Nozzle Structure And Hydraulic Parameters On The Cutting Efficiency Of High-Pressure Abrasive Water Jet (Awj)," *J. Appl.*

- Fluid Mech.*, Vol. 18, No. 5, Pp. 1246–1265, 2025, Doi: 10.47176/Jafm.18.5.2959.
- [18] L. M. Hlaváč, M. P. G. Annoni, I. M. Hlaváčová, F. Arleo, F. Viganò, And A. Štefek, “Abrasive Waterjet (Awj) Forces—Potential Indicators Of Machining Quality,” *Materials (Basel)*., Vol. 14, No. 12, 2021, Doi: 10.3390/Ma14123309.
- [19] H. Wang, Z. Lv, And C. Li, “Parametric Investigation On Abrasive Waterjet Machining Of Alumina Ceramic Using Response Surface Methodology Parametric Investigation On Abrasive Waterjet Machining Of Alumina Ceramic Using Response Surface Methodology,” 2018, Doi: 10.1088/1757-899x/377/1/012005.
- [20] W. Waśik, M. Majder-Łopatka, W. Rogula-Kozłowska, And T. Węsierski, “Effect Of Mist Nozzle Supply Pressure On The Ammonia Absorption Process,” *Arch. Environ. Prot.*, Vol. 49, No. 2, Pp. 40–49, 2023, Doi: 10.24425/Aep.2023.145895.
- [21] H. Li, Z. Li, And S. Ding, “Design Of Nanostructures For Flexible Transparent Conductors,” *Coatings*, Vol. 13, No. 10, Pp. 22–24, 2023, Doi: 10.3390/Coatings13101759.
- [22] Y. Li, C. Zhang, C. Huang, X. Wang, G. Zhang, And Y. Zhou, “Distortion And Residual Stress Reduction Using Asynchronous Heating Sources For Multi-Robot Coordinated Wire-Arc Directed Energy Deposition,” *Crystals*, Vol. 15, No. 2, 2025, Doi: 10.3390/Cryst15020155.