

## **ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING (EDM) UNTUK MANUFAKTUR PRESISI ORIFICE NOZZLE INJECTOR MESIN DIESEL: SISTEMATIK REVIEW KEMAJUAN, OPTIMALISASI, DAN KEBERLANJUTAN**

Irwan Sukma <sup>1</sup> ✉, Ghany Heryana <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Program Magister Terapan Teknik Mesin, Rekayasa Teknologi Manufaktur, Pascasarjana, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. G. A. Siwabessy, Kampus UI, Depok, 16425

<sup>2</sup> Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Mesin, Universitas Presiden, Jababeka Education Park, Cikarang Baru, Bekasi, Jawa Barat

✉ [irwan.sukma.tm24@stu.pnj.ac.id](mailto:irwan.sukma.tm24@stu.pnj.ac.id)

Received 04 December 2025, Revised 20 January 2026, Accepted 21 January 2026

### **ABSTRAK**

*Electrical Discharge Machining* (EDM) merupakan teknologi manufaktur presisi yang efektif untuk pemesinan material keras dan pembuatan fitur mikro. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji peran dan perkembangan EDM, khususnya *micro-EDM drilling*, dalam manufaktur presisi *orifice nozzle injector* mesin diesel yang berpengaruh terhadap atomisasi bahan bakar, efisiensi pembakaran, dan emisi mesin diesel alat berat. Metode yang digunakan adalah *Systematic Literature Review* (SLR) terhadap lebih dari 35 artikel internasional bereputasi. Hasil kajian menunjukkan bahwa *micro-EDM* mampu menghasilkan *micro-hole* dengan akurasi geometri tinggi, *roundness* yang baik, dan minim *burr*, sehingga berpotensi meningkatkan kualitas atomisasi dan kinerja sistem injeksi. Selain itu, penerapan optimasi proses berbasis *Response Surface Methodology*, *Artificial Neural Network*, dan algoritma evolusioner serta pendekatan *green EDM* melalui penggunaan dielektrik ramah lingkungan mendukung peningkatan kualitas proses dan keberlanjutan manufaktur. Disimpulkan bahwa EDM memiliki peran strategis sebagai *enabling technology* dalam manufaktur presisi *orifice nozzle injector* dan relevan untuk mendukung efisiensi energi serta pengurangan dampak lingkungan pada teknologi alat berat.

**Kata Kunci:** *Micro-EDM; Orifice Nozzle injector; Mesin Diesel; Keberlanjutan.*

### **1. PENDAHULUAN**

Mesin diesel masih menjadi penggerak utama pada alat berat karena keandalan dan efisiensinya dalam menghasilkan torsi besar pada kondisi kerja berat. Namun, tuntutan peningkatan efisiensi bahan bakar dan pengurangan emisi gas buang mendorong optimalisasi sistem pembakaran, khususnya pada komponen presisi yang berperan langsung dalam proses atomisasi bahan bakar [1], [2].

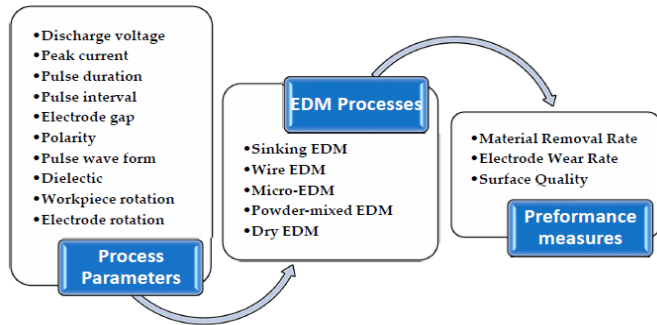
Salah satu komponen paling kritis dalam sistem pembakaran mesin diesel adalah *fuel injector nozzle*, terutama bagian *orifice nozzle* yang mengontrol aliran dan atomisasi bahan bakar.

Geometri *orifice*, seperti diameter dan kualitas permukaan internal, berpengaruh signifikan terhadap karakteristik semprotan, efisiensi pembakaran, serta emisi *particulate matter* dan nitrogen oksida [3], [4], [5]. Oleh karena itu, manufaktur presisi *orifice nozzle injector* menjadi faktor kunci dalam peningkatan kinerja dan keberlanjutan mesin diesel alat berat.

Manufaktur *orifice nozzle injector* menghadapi tantangan karena ukuran lubang berskala mikro, rasio panjang terhadap diameter yang tinggi, serta penggunaan material baja paduan keras. Metode pemesinan konvensional dan *laser drilling* memiliki keterbatasan dalam menjaga akurasi dan integritas permukaan pada skala mikro [6], [7]. Kondisi ini mendorong pengembangan teknologi pemesinan non-konvensional yang lebih stabil untuk pembuatan *micro-hole* presisi tinggi.

EDM berkembang sebagai solusi pemesinan material keras dan fitur mikro presisi tinggi tanpa gaya potong mekanik. Secara historis, perkembangan EDM didorong oleh kebutuhan industri akan pemesinan geometri kompleks dan lubang mikro dengan akurasi tinggi yang sulit dicapai melalui metode konvensional [8], [9], [10]. Varian *micro-EDM drilling* secara khusus telah dilaporkan mampu menghasilkan *micro-hole* dengan rasio panjang terhadap diameter tinggi dan kualitas geometri yang baik [11], [12].

Seiring perkembangan teknologi, berbagai penelitian melaporkan optimalisasi parameter EDM (Gambar 1), pengembangan proses hibrida, serta penerapan konsep *green EDM* melalui penggunaan dielektrik ramah lingkungan dan peningkatan efisiensi energi proses [13], [14], [15]. Meskipun demikian, kajian yang secara sistematis mengaitkan teknologi EDM dengan aplikasi manufaktur presisi *orifice nozzle injector* mesin diesel, serta implikasinya terhadap efisiensi pembakaran dan keberlanjutan alat berat, masih terbatas. Oleh karena itu, artikel ini menyajikan *systematic literature review* mengenai kemajuan, optimalisasi, dan tren keberlanjutan EDM dengan fokus pada manufaktur presisi *orifice nozzle injector* mesin diesel.



**Gambar 1.** Proses-proses pada EDM, beserta parameter proses dan ukuran performanya [11]

## 2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR) untuk mengkaji perkembangan teknologi EDM, khususnya *micro-EDM drilling*, serta aplikasinya dalam manufaktur presisi *orifice nozzle injector* mesin diesel. Pendekatan SLR dipilih untuk memastikan bahwa proses penelusuran, seleksi, dan analisis literatur dilakukan secara sistematis, transparan, dan reproduisibel, sehingga hasil kajian merepresentasikan kemajuan ilmiah yang telah dicapai oleh komunitas penelitian di bidang ini.

Penelusuran literatur dilakukan pada basis data ilmiah bereputasi, meliputi Scopus, Web of Science, ScienceDirect, dan SpringerLink. Kata kunci yang digunakan mencakup kombinasi “*Electrical Discharge Machining (EDM)*”, “*micro-EDM drilling*”, “*micro-hole machining*”, “*fuel injector nozzle*”, “*diesel engine*”, “*process optimization*”, dan “*green EDM*”. Strategi penelusuran ini dirancang untuk menjangkau artikel yang membahas baik aspek fundamental EDM maupun penerapannya pada manufaktur komponen presisi sistem injeksi mesin diesel.

Artikel yang dipertimbangkan dalam kajian ini dibatasi pada publikasi jurnal internasional bereputasi dan prosiding utama, mencakup karya foundational dan penelitian mutakhir. Kriteria inklusi meliputi artikel yang membahas prinsip dan varian EDM, *micro-EDM*, optimasi parameter proses, konsep *green EDM*, serta aplikasi EDM pada komponen presisi seperti *injector nozzle*. Artikel yang tidak relevan dengan topik EDM atau tidak menyajikan kontribusi teknis yang jelas terhadap manufaktur presisi dan kinerja proses dikecualikan dari analisis.

Proses penyaringan literatur dilakukan secara bertahap. Tahap awal melibatkan identifikasi artikel berdasarkan judul dan kata kunci, diikuti dengan penghapusan duplikasi. Selanjutnya dilakukan penyaringan abstrak untuk memastikan relevansi topik, sebelum akhirnya dilakukan penelaahan *full-text* untuk menilai kontribusi teknis artikel terhadap kualitas *micro-hole*, parameter proses EDM, dan implikasi fungsionalnya pada *injector nozzle*. Melalui tahapan ini, terpilih **40 artikel** yang dianalisis secara mendalam dalam kajian ini.

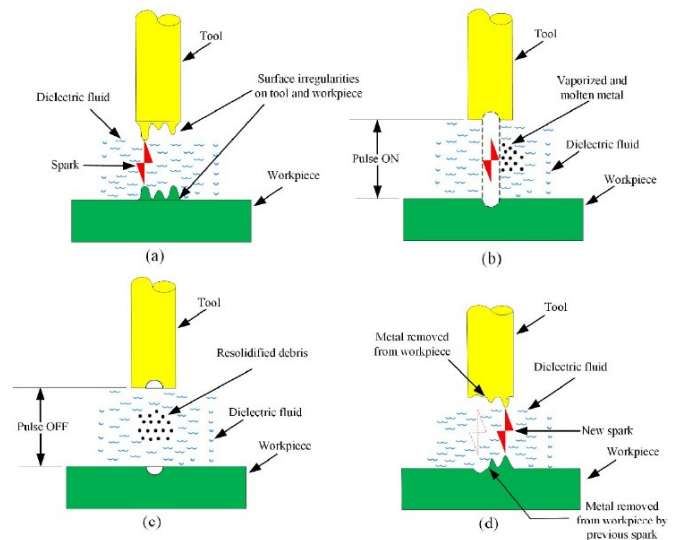
Analisis literatur dilakukan secara kualitatif dengan mengelompokkan artikel terpilih ke dalam tema utama, yaitu prinsip dan varian EDM, *micro-EDM* dan manufaktur *micro-hole*, aplikasi EDM pada *orifice nozzle injector* mesin diesel,

optimalisasi proses EDM menggunakan pendekatan statistik dan kecerdasan buatan, serta aspek keberlanjutan melalui konsep *green EDM*. Sintesis hasil kajian dilakukan dengan membandingkan temuan antar penelitian untuk mengidentifikasi tren perkembangan teknologi, kesenjangan penelitian, serta peluang riset lanjutan di bidang manufaktur presisi dan sistem injeksi mesin diesel.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1 Prinsip dan Varian EDM

EDM merupakan proses pemesinan non-konvensional yang menghilangkan material melalui energi termal hasil pelepasan listrik berulang (*electrical discharges*) antara elektroda dan benda kerja konduktif yang dipisahkan oleh celah sempit berisi cairan dielektrik. Ketika tegangan listrik melebihi kekuatan dielektrik medium, terjadi loncatan listrik yang menghasilkan suhu lokal sangat tinggi, sehingga material pada permukaan benda kerja mengalami pelelehan dan penguapan secara mikro. Material yang terlepas kemudian tersapu oleh aliran dielektrik dalam bentuk partikel halus (*debris*), sementara permukaan hasil pemesinan umumnya ditandai dengan terbentuknya lapisan *recast* dan perubahan mikrostruktur [11],[15].



**Gambar 2.** Empat tahap dalam proses EDM (a) *spark beginning stage*, (b) *melting and vaporization stage*, (c) *removing debris stage*, and (d) *recovery stage* [13]

Mekanisme pelepasan material pada EDM sangat dipengaruhi oleh parameter proses, seperti arus puncak, durasi pulsa (*pulse on-time*), jeda pulsa (*pulse off-time*), tegangan, polaritas elektroda, serta sifat fisik dan kimia dielektrik. Kombinasi parameter tersebut menentukan karakteristik kawah (*crater*) yang terbentuk, yang secara langsung memengaruhi laju pelepasan material (*Material Removal Rate*), keausan elektroda (*Tool Wear Rate*), dan kualitas permukaan hasil pemesinan [7], [16]. Keunggulan utama EDM terletak pada kemampuannya memproses material keras dan sulit potong tanpa gaya mekanik,

sehingga deformasi plastis dan tegangan sisa pada benda kerja dapat diminimalkan.

Seiring perkembangan teknologi, EDM telah berevolusi menjadi berbagai varian yang disesuaikan dengan kebutuhan manufaktur presisi. *Die-sinking EDM* merupakan varian yang paling umum digunakan untuk menghasilkan rongga dan bentuk tiga dimensi kompleks pada cetakan (*mold and die*) dengan akurasi tinggi. Varian ini banyak diaplikasikan pada industri manufaktur presisi karena kemampuannya membentuk geometri rumit yang sulit dicapai dengan metode pemesinan konvensional [13], [17]. Sementara itu, *Wire Electrical Discharge Machining* (WEDM) menggunakan kawat elektroda kontinu untuk melakukan pemotongan kontur dua dimensi dengan presisi tinggi dan banyak digunakan pada pemotongan material keras serta pembuatan profil kompleks [18].

Untuk aplikasi lubang kecil dan dalam, *Electrical Discharge Drilling* (EDD) atau *fast hole EDM* dikembangkan sebagai solusi pemesinan lubang dengan rasio panjang terhadap diameter yang tinggi. Varian ini memungkinkan pembuatan lubang awal (*starter hole*) maupun lubang presisi pada material keras dengan stabilitas proses yang baik [7]. Perkembangan lebih lanjut dari EDD adalah *micro-EDM*, yang secara khusus ditujukan untuk pembuatan fitur mikro seperti *micro-hole*, *micro-slot*, dan *micro-cavity* dengan dimensi hingga puluhan mikrometer. *Micro-EDM* menjadi sangat relevan dalam manufaktur komponen presisi tinggi, termasuk *orifice nozzle injector* mesin diesel, yang menuntut akurasi geometri, kebulatan lubang, dan konsistensi kualitas permukaan [6], [8].

Dalam konteks manufaktur presisi, *micro-EDM* menawarkan keunggulan signifikan dibandingkan metode pemesinan mikro lainnya karena kemampuannya menghasilkan *micro-hole* pada material keras dengan *roundness* yang baik, minim burr, dan kontrol geometri yang tinggi. Namun demikian, tantangan seperti keausan elektroda, stabilitas percikan pada skala mikro, akumulasi debris pada lubang dalam, serta pengendalian lapisan *recast* masih menjadi fokus utama penelitian. Oleh karena itu, pemahaman menyeluruh terhadap prinsip dasar EDM dan karakteristik masing-masing variannya menjadi landasan penting dalam pemilihan dan pengembangan proses EDM yang optimal untuk aplikasi manufaktur presisi, khususnya pada komponen kritis sistem injeksi mesin diesel [7], [9], [19].

Pada skala mikro, pengembangan EDM menjadi *micro-EDM* memungkinkan pembuatan fitur presisi tinggi dengan rasio panjang terhadap diameter yang besar, yang merupakan bagian dari kemajuan teknologi *micromachining* modern dan manufaktur presisi tingkat lanjut [20], [21], [22].

### 3.2 *Micro-EDM* dan Manufaktur *Micro-Hole*

*Micro-EDM* merupakan pengembangan dari proses EDM konvensional yang dirancang khusus untuk pembuatan fitur berskala mikro, seperti *micro-hole*, *micro-slot*, dan *micro-cavity*, dengan dimensi hingga puluhan mikrometer. Proses ini memanfaatkan prinsip pelepasan listrik yang sama dengan EDM konvensional, namun menggunakan elektroda berdiameter sangat kecil, energi pulsa rendah, serta kontrol celah yang lebih

presisi untuk menjaga stabilitas percikan pada skala mikro [7] [8].

Dalam konteks manufaktur *micro-hole*, *micro-EDM drilling* telah banyak dilaporkan sebagai teknologi unggulan untuk menghasilkan lubang dengan rasio panjang terhadap diameter (*L/D*) tinggi pada material keras dan sulit dipotong. Dibandingkan metode pemesinan konvensional dan *laser drilling*, *micro-EDM* mampu menghasilkan geometri lubang yang lebih stabil, *roundness* yang lebih baik, serta minim *burr* dan deformasi termal makro, meskipun tetap menghasilkan lapisan *recast* pada permukaan internal lubang [6], [17], [18].

Karakteristik kualitas *micro-hole* hasil *micro-EDM* sangat dipengaruhi oleh parameter proses, seperti arus puncak, durasi pulsa, polaritas elektroda, kecepatan umpan, serta sifat elektroda dan dielektrik. Studi-studi sebelumnya menunjukkan bahwa pengaturan parameter yang tidak optimal dapat menyebabkan peningkatan keausan elektroda, ketidakteraturan diameter lubang, dan ketebalan *recast layer* yang berlebihan, terutama pada pemesinan lubang dalam dengan diameter kecil [12], [23]. Selain itu, akumulasi *debris* di dalam lubang menjadi tantangan utama yang dapat mengganggu stabilitas percikan dan menurunkan kualitas permukaan internal pada proses *deep micro-hole drilling* [19].

Seiring perkembangan teknologi, berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk meningkatkan performa *micro-EDM drilling*, termasuk penggunaan elektroda berputar, modifikasi dielektrik, serta penerapan metode prediktif berbasis data untuk memodelkan *Material Removal Rate* (MRR) dan *Tool Wear Rate* (TWR). Pendekatan ini terbukti mampu meningkatkan konsistensi kualitas *micro-hole* serta efisiensi proses secara keseluruhan [23], [24]. Dalam aplikasi industri, *micro-EDM* juga telah diterapkan secara langsung maupun sebagai bagian dari proses hibrida, seperti kombinasi *laser pre-drilling* dan EDM finishing, untuk pembuatan *injector nozzle* generasi lanjut dengan tuntutan presisi tinggi [9].

Dengan kemampuannya menghasilkan *micro-hole* berpresisi tinggi pada material keras, *micro-EDM* menjadi teknologi yang sangat relevan untuk manufaktur *orifice nozzle injector* mesin diesel. Presisi geometri lubang, kualitas permukaan internal, dan konsistensi antar lubang yang dihasilkan oleh *micro-EDM* berpotensi memberikan dampak signifikan terhadap karakteristik atomisasi bahan bakar dan performa sistem injeksi. Oleh karena itu, pemahaman mendalam terhadap mekanisme, tantangan, dan pengembangan *micro-EDM drilling* menjadi landasan penting bagi penerapan teknologi ini pada komponen kritis mesin diesel alat berat.

### 3.3 Aplikasi EDM pada *Orifice Nozzle injector* Mesin Diesel

*Orifice nozzle injector* merupakan komponen kunci dalam sistem injeksi bahan bakar mesin diesel karena berfungsi mengatur laju aliran, arah semprotan, dan karakteristik atomisasi bahan bakar sebelum proses pembakaran. Kualitas atomisasi yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh geometri orifice, termasuk diameter lubang, rasio panjang terhadap diameter, kebulatan, serta kualitas permukaan internal. Berbagai penelitian

menunjukkan bahwa variasi kecil pada parameter geometrik orifice *nozzle* dapat menyebabkan perubahan signifikan pada penetrasi semprotan, sudut semprot, efisiensi pembakaran, dan pembentukan emisi gas buang seperti *particulate matter* dan nitrogen oksida [2]-[5], [25].

Dalam manufaktur orifice *nozzle injector*, tantangan utama terletak pada pembuatan lubang berskala mikro dengan toleransi ketat dan konsistensi tinggi antar lubang, khususnya pada injector modern dengan banyak lubang (*multi-hole injector*). Metode pemesinan konvensional dan *laser drilling* sering menghadapi keterbatasan dalam menjaga kebulatan lubang dan kualitas permukaan internal, terutama pada material baja paduan keras yang umum digunakan pada injektor mesin diesel [6], [7]. Kondisi ini mendorong adopsi teknologi pemesinan non-konvensional yang lebih presisi dan stabil.

*Micro-EDM drilling* telah diaplikasikan secara luas dalam manufaktur orifice *nozzle injector* karena kemampuannya menghasilkan *micro-hole* dengan geometri presisi tinggi, *roundness* yang baik, serta minim deformasi mekanik. Studi-studi sebelumnya melaporkan bahwa orifice *nozzle* yang diproduksi menggunakan EDM menunjukkan karakteristik aliran internal yang lebih seragam, yang berkontribusi pada peningkatan kualitas atomisasi bahan bakar dan kestabilan proses pembakaran [9], [25]. Selain itu, penggunaan EDM memungkinkan pemesinan lubang dengan rasio panjang terhadap diameter yang tinggi, yang sulit dicapai secara konsisten dengan metode pemesinan lainnya.

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa geometri *nozzle* dan ukuran *micro-orifice* memiliki pengaruh langsung terhadap penetrasi semprotan, kualitas atomisasi, serta pembentukan emisi pada mesin diesel [26][27] [28].

Kualitas orifice hasil EDM juga berpengaruh terhadap fenomena aliran di dalam *nozzle (in-nozzle flow)*, seperti pembentukan kavitasi dan distribusi kecepatan aliran, yang selanjutnya memengaruhi karakteristik semprotan di ruang bakar. Penelitian eksperimental dan numerik menunjukkan bahwa optimasi geometri orifice injector dapat mengurangi ketidakaturan aliran dan meningkatkan efisiensi atomisasi, sehingga berdampak positif pada efisiensi pembakaran dan penurunan emisi.

Dalam konteks pengembangan mesin diesel alat berat yang lebih efisien dan ramah lingkungan, penerapan EDM pada manufaktur orifice *nozzle injector* menjadi semakin relevan. Integrasi antara teknologi micro-EDM, desain *nozzle* yang teroptimasi, dan pemahaman karakteristik semprotan bahan bakar membuka peluang peningkatan kinerja sistem injeksi secara menyeluruh. Oleh karena itu, EDM tidak hanya berperan sebagai teknologi manufaktur presisi, tetapi juga sebagai *enabling technology* dalam pengembangan sistem pembakaran mesin diesel yang lebih efisien dan berkelanjutan.

### 3.4 Optimalisasi Proses EDM

Optimalisasi proses (EDM) menjadi aspek krusial dalam manufaktur presisi, khususnya pada aplikasi *micro-EDM drilling* untuk pembuatan orifice *nozzle injector* mesin diesel.

Kompleksitas mekanisme pelepasan material pada EDM, yang melibatkan interaksi nonlinier antara parameter listrik, elektroda, dan dielektrik, menyebabkan kualitas hasil pemesinan sangat sensitif terhadap pengaturan parameter proses. Oleh karena itu, berbagai pendekatan optimasi telah dikembangkan untuk meningkatkan *Material Removal Rate* (MRR), menekan *Tool Wear Rate* (TWR), serta memperbaiki kualitas permukaan dan akurasi geometri *micro-hole* [7], [13].

Pendekatan optimasi berbasis metode statistik, seperti *Response Surface Methodology* (RSM), banyak digunakan untuk memodelkan hubungan antara parameter proses EDM dan respon kualitas pemesinan. Metode ini memungkinkan identifikasi kombinasi parameter optimal melalui eksperimen terkontrol dengan jumlah percobaan yang relatif efisien. Sejumlah penelitian melaporkan bahwa RSM efektif dalam mengoptimalkan MRR dan kekasaran permukaan pada proses EDM dan micro-EDM, termasuk pada material paduan keras dan titanium [24], [29], [30].

Seiring berkembangnya kompleksitas kebutuhan optimasi, pendekatan berbasis kecerdasan buatan mulai banyak diterapkan dalam optimasi proses EDM. *Artificial Neural Network* (ANN) digunakan untuk memodelkan hubungan nonlinier antara parameter proses dan karakteristik keluaran pemesinan, seperti diameter lubang, kekasaran permukaan, dan keausan elektroda. Model ANN terbukti mampu memberikan prediksi yang lebih akurat dibandingkan metode statistik konvensional, terutama pada proses micro-EDM dengan banyak variabel saling terkait [14], [31].

Selain ANN, algoritma optimasi evolusioner, seperti *Genetic Algorithm* (GA), *Particle Swarm Optimization* (PSO), dan *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm* (NSGA-II), telah diterapkan untuk menyelesaikan permasalahan optimasi multiobjektif pada EDM. Pendekatan ini memungkinkan optimasi simultan beberapa respon yang saling bertentangan, seperti peningkatan MRR dan penurunan TWR atau kekasaran permukaan. Penerapan algoritma evolusioner dilaporkan mampu menghasilkan solusi Pareto-optimal yang lebih komprehensif dibandingkan optimasi satu-objektif [13], [24],[32].

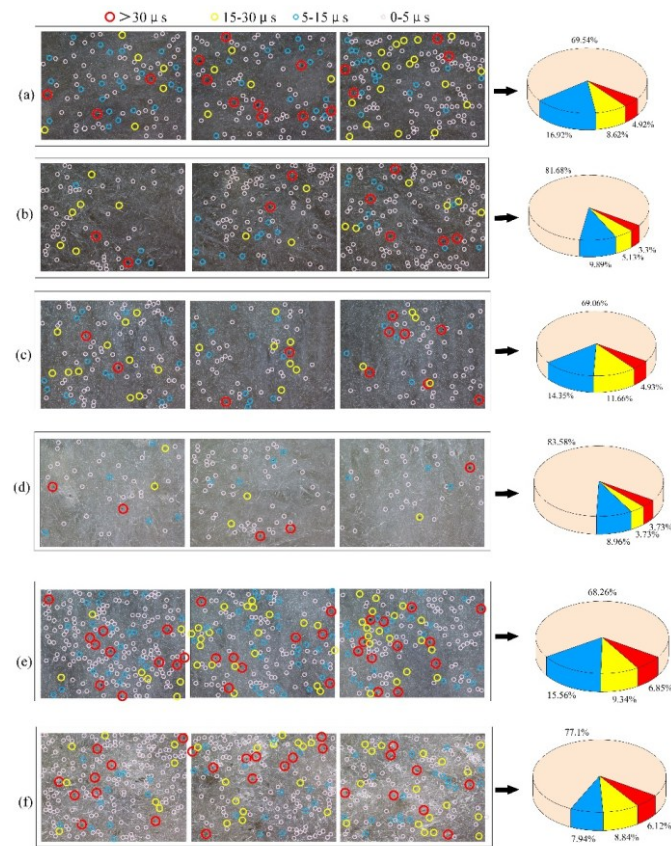
Dalam konteks manufaktur orifice *nozzle injector* mesin diesel, optimalisasi proses EDM berperan penting dalam menjamin konsistensi diameter lubang, kebulatan, dan kualitas permukaan internal *micro-hole*, yang secara langsung memengaruhi karakteristik aliran bahan bakar dan atomisasi. Integrasi metode optimasi statistik, kecerdasan buatan, dan algoritma evolusioner membuka peluang pengembangan strategi optimasi adaptif untuk micro-EDM, yang tidak hanya meningkatkan kualitas produk tetapi juga efisiensi dan stabilitas proses manufaktur presisi.

### 3.5 Keberlanjutan dan Green EDM

Seiring meningkatnya perhatian global terhadap keberlanjutan manufaktur dan pengurangan dampak lingkungan, proses EDM juga menghadapi tuntutan untuk bertransformasi menuju konsep *green manufacturing*. Secara konvensional, EDM dikenal sebagai proses dengan konsumsi energi relatif tinggi serta penggunaan cairan dielektrik berbasis hidrokarbon yang berpotensi menimbulkan dampak lingkungan dan

kesehatan. Oleh karena itu, pengembangan *green EDM* menjadi fokus penting dalam penelitian terkini, khususnya untuk aplikasi manufaktur presisi pada komponen kritis seperti orifice *nozzle injector* mesin diesel [33], [34].

Salah satu pendekatan utama dalam *green EDM* adalah penggunaan dielektrik ramah lingkungan sebagai pengganti cairan berbasis minyak mineral. Berbagai penelitian melaporkan penggunaan dielektrik berbasis air, minyak nabati, maupun cairan terbarukan yang mampu menurunkan emisi berbahaya dan meningkatkan keselamatan kerja tanpa mengorbankan kualitas pemesinan secara signifikan. Selain itu, kombinasi antara dielektrik ramah lingkungan dan material elektroda yang sesuai dapat berkontribusi pada pengurangan keausan elektroda serta ketebalan lapisan *recast* pada permukaan benda kerja [23], [34].



Gambar 3. Debris distribution on different process parameters; (a) SSO, 3A, 0.7, 350 μs, W; (b) kerosene, 3A, 0.7, 350 μs, W; (c) SSO, 4A, 0.5, 250 μs, Cu-W; (d) kerosene, 4A, 0.5, 250 μs, Cu-W; (e) SSO, 5A, 0.4, 150 μs, Graphite; (f) kerosene, 5A, 0.4, 1 [34]

Aspek keberlanjutan juga berkaitan erat dengan efisiensi energi proses EDM. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa modifikasi parameter listrik, penggunaan aditif seperti nanopartikel konduktif, serta pengembangan sistem kontrol cerdas dapat meningkatkan efisiensi energi dan stabilitas percikan selama proses pemesinan. Pendekatan ini tidak hanya menurunkan konsumsi energi spesifik, tetapi juga berpotensi

meningkatkan *Material Removal Rate* (MRR) dan kualitas permukaan secara simultan [35], [36]. Peningkatan efisiensi energi pada EDM menjadi semakin relevan dalam konteks manufaktur massal komponen presisi, termasuk *injector nozzle* pada mesin diesel alat berat.

Dalam perspektif sistem, penerapan *green EDM* pada manufaktur orifice *nozzle injector* berkontribusi secara tidak langsung terhadap keberlanjutan mesin diesel. Presisi geometri dan kualitas permukaan orifice yang lebih baik mendukung atomisasi bahan bakar yang lebih efisien, sehingga membantu peningkatan efisiensi pembakaran dan pengurangan emisi gas buang selama fase operasi mesin. Dengan demikian, *green EDM* tidak hanya berdampak pada tahap manufaktur, tetapi juga berkontribusi pada keberlanjutan siklus hidup (*life-cycle sustainability*) sistem mesin diesel secara keseluruhan [33], [34].

Meskipun berbagai kemajuan telah dicapai, tantangan masih tetap ada dalam implementasi *green EDM*, termasuk kestabilan proses pada penggunaan dielektrik alternatif, optimasi parameter untuk menjaga kualitas *micro-hole*, serta integrasi konsep keberlanjutan ke dalam lingkungan industri nyata. Oleh karena itu, penelitian lanjutan diperlukan untuk mengembangkan pendekatan *green EDM* yang tidak hanya ramah lingkungan, tetapi juga layak secara teknis dan ekonomis untuk aplikasi manufaktur presisi pada komponen sistem injeksi mesin diesel.

### 3.6 Research Gap dan Arah Penelitian Masa Depan

Berdasarkan kajian literatur yang telah dilakukan, terlihat bahwa teknologi EDM, khususnya *micro-EDM drilling*, telah berkembang pesat baik dari sisi pemahaman fundamental, varian proses, maupun metode optimalisasi parameter. Berbagai penelitian telah membahas pengaruh parameter proses EDM terhadap *MRR*, *TWR*, kekasaran permukaan, dan akurasi geometri lubang mikro, serta pengembangan pendekatan optimasi berbasis statistik, kecerdasan buatan, dan algoritma evolusioner [7], [13], [14]. Namun demikian, sebagian besar penelitian masih berfokus pada karakteristik proses dan material secara umum, tanpa mengaitkan secara langsung hasil pemesinan dengan kinerja fungsional komponen dalam sistem nyata.

Pada konteks aplikasi orifice *nozzle injector* mesin diesel, sejumlah studi telah menegaskan pentingnya geometri dan kualitas permukaan orifice terhadap karakteristik atomisasi bahan bakar, efisiensi pembakaran, dan pembentukan emisi gas buang [2]–[5], [25]. Meskipun demikian, keterkaitan kuantitatif antara parameter proses *micro-EDM*, kualitas *micro-hole* yang dihasilkan, dan performa sistem injeksi mesin diesel masih jarang dibahas secara komprehensif. Hal ini menunjukkan adanya *research gap* pada integrasi antara aspek manufaktur presisi dan performa termofluida sistem injeksi bahan bakar.

Selain itu, kajian terkait *green EDM* dan keberlanjutan sebagian besar masih menitikberatkan pada penggunaan dielektrik ramah lingkungan dan efisiensi energi proses EDM [33], [34], [35]. Dampak penerapan *green EDM* terhadap kualitas orifice *nozzle* dan implikasinya terhadap efisiensi pembakaran serta pengurangan emisi mesin diesel pada level sistem belum banyak dieksplorasi. Padahal, pendekatan berbasis

*life-cycle perspective* berpotensi memberikan kontribusi signifikan dalam menilai manfaat keberlanjutan EDM secara menyeluruh.

Research gap lainnya teridentifikasi pada keterbatasan studi yang mengintegrasikan desain geometri orifice injector, optimasi parameter *micro-EDM*, dan validasi eksperimental terhadap karakteristik semprotan serta emisi mesin diesel. Sebagian besar penelitian masih dilakukan secara terpisah antara bidang manufaktur dan bidang pembakaran, sehingga peluang sinergi antar disiplin belum dimanfaatkan secara optimal [9], [25]. Selain itu, penerapan strategi optimasi adaptif dan *data-driven* pada *micro-EDM* untuk manufaktur injector *nozzle* secara industri juga masih terbatas.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, arah penelitian masa depan dapat difokuskan pada pengembangan kerangka kerja terintegrasi yang menghubungkan parameter proses *micro-EDM*, kualitas *micro-hole* orifice *nozzle*, dan performa sistem injeksi mesin diesel. Penelitian lanjutan juga perlu mengeksplorasi penerapan metode optimasi berbasis kecerdasan buatan yang dikombinasikan dengan konsep *green EDM*, serta validasi eksperimental pada komponen injector aktual. Pendekatan ini diharapkan mampu memperkuat peran EDM tidak hanya sebagai teknologi manufaktur presisi, tetapi juga sebagai *enabling technology* dalam pengembangan mesin diesel alat berat yang lebih efisien dan berkelanjutan.

#### 4. KESIMPULAN

Artikel ini menyajikan *systematic literature review* mengenai peran EDM dalam manufaktur presisi orifice *nozzle* injector mesin diesel, dengan fokus pada kemajuan teknologi, strategi optimalisasi proses, dan aspek keberlanjutan. Hasil kajian menunjukkan bahwa EDM, khususnya *micro-EDM drilling*, merupakan teknologi yang sangat relevan untuk pembuatan *micro-hole* pada material keras dengan rasio panjang terhadap diameter tinggi, akurasi geometri yang baik, serta minim deformasi mekanik. Keunggulan ini menjadikan EDM sebagai solusi manufaktur yang efektif untuk komponen kritis sistem injeksi mesin diesel alat berat.

Kajian literatur juga menegaskan bahwa kualitas orifice *nozzle* hasil EDM—meliputi diameter lubang, kebulatan, dan kualitas permukaan internal—memiliki keterkaitan langsung dengan karakteristik atomisasi bahan bakar, efisiensi pembakaran, dan pembentukan emisi gas buang. Dengan demikian, EDM tidak hanya berperan sebagai proses manufaktur presisi, tetapi juga berkontribusi secara tidak langsung terhadap peningkatan kinerja dan keberlanjutan mesin diesel. Berbagai pendekatan optimalisasi proses, seperti *Response Surface Methodology* (RSM), *Artificial Neural Network* (ANN), dan algoritma evolusioner, telah terbukti mampu meningkatkan kualitas hasil pemesinan dan produktivitas proses EDM, meskipun penerapannya pada konteks injector *nozzle* masih relatif terbatas.

Dari perspektif keberlanjutan, konsep *green EDM* melalui penggunaan dielektrik ramah lingkungan dan peningkatan efisiensi energi proses menunjukkan potensi besar untuk mengurangi dampak lingkungan manufaktur. Namun, kajian ini

juga mengidentifikasi bahwa integrasi antara *green EDM*, kualitas orifice *nozzle*, dan performa sistem injeksi mesin diesel pada level sistem masih jarang dieksplorasi secara komprehensif. Hal ini menandakan adanya kesenjangan penelitian yang perlu ditindaklanjuti.

Sebagai tindak lanjut dari hasil kajian ini, penelitian selanjutnya direncanakan untuk mengembangkan kerangka kerja terintegrasi yang menghubungkan parameter proses *micro-EDM*, kualitas *micro-hole* orifice *nozzle*, dan karakteristik atomisasi serta emisi mesin diesel. Penelitian eksperimental pada komponen injector aktual, dikombinasikan dengan metode optimasi berbasis kecerdasan buatan dan konsep *green EDM*, diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata dalam pengembangan teknologi manufaktur presisi yang mendukung sistem mesin diesel alat berat yang lebih efisien dan berkelanjutan.

#### REFERENSI

- [1] J. B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill Publishing Company, 2018.
- [2] J. Xia, Q. Zhang, Z. Huang, D. Ju, and X. Lu, "Experimental study of injection characteristics under diesel's sub/trans/supercritical conditions with various nozzle diameters and injection pressures," *Energy Convers. Manag.*, vol. 215, no. May, p. 112949, 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.112949.
- [3] M. Vijay Kumar, A. Veeresh babu, P. Ravi Kumar, and T. Manoj Kumar Dundi, "Influence of different nozzle hole orifice diameter on performance, combustion and emissions in a diesel engine," *Aust. J. Mech. Eng.*, vol. 18, no. 2, pp. 179–184, 2020, doi: 10.1080/14484846.2018.1453975.
- [4] R. Balz, B. von Rotz, and D. Sedarsky, "In-nozzle flow and spray characteristics of large two-stroke marine diesel fuel injectors," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 180, p. 115809, 2020, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115809.
- [5] O. Klyus, M. Szczepanek, G. Kidacki, P. Krause, S. Olszowski, and L. Chybowski, "The Effect of Internal Combustion Engine Nozzle Needle Profile on Fuel Atomization Quality," *Energies*, vol. 17, no. 1, 2024, doi: 10.3390/en17010266.
- [6] M. S. Rasheed, "Comparison of Micro-Holes Produced By Micro-EDM with Laser Machining," *Int. J. Sci. Mod. Eng.*, vol. 1, no. 3, pp. 14–18, 2013.
- [7] X. Mao, S. Almeida, J. Mo, and S. Ding, "The state of the art of electrical discharge drilling: a review," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 121, no. 5–6, pp. 2947–2969, 2022, doi: 10.1007/s00170-022-09549-7.
- [8] D. T. Pham, S. S. Dimov, S. Bigot, A. Ivanov, and K. Popov, "Micro-EDM - Recent developments and research issues," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 149, no. 1–3, pp. 50–57, 2004, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2004.02.008.
- [9] L. Li, C. Diver, J. Atkinson, R. Giedl-Wagner, and H. J. Helml, "Sequential laser and EDM micro-drilling for next generation fuel injection nozzle manufacture," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 55, no. 1, pp. 179–182, 2006, doi:

- 10.1016/S0007-8506(07)60393-X.
- [10] F. K. Thomas Bergs, *Manufacturing Processes 3: Electrical Discharge Machining, Electrochemical Manufacturing and Beam Processes*. Springer Berlin, Heidelberg, 2025.
- [11] M. H. A. and A. E. Jaber E. Abu Qudeiri, Aiman Zaiout, Abdel-Hamid I. Mourad, "Principles and Characteristics of Different EDM Processes in Machining Tool and Die Steels," *Appl. Sci.*, vol. Appl. Sci., pp. 1–46, 2020.
- [12] A. Bin Rashid, T. Saba, S. Das Sourav, M. T. Ilhum, M. K. Bappy, and A. Tomal, "Investigation of the effect of micromachining parameters on the accuracy of micro-holes drilled by electric discharge machine," *Results in Surfaces and Interfaces*, vol. 20, no. March, p. 100603, 2025, doi: 10.1016/j.rsufi.2025.100603.
- [13] Y. Chen, S. Hu, A. Li, Y. Cao, Y. Zhao, and W. Ming, "Parameters Optimization of Electrical Discharge Machining Process Using Swarm Intelligence: A Review," *Metals (Basel)*, vol. 13, no. 5, 2023, doi: 10.3390/met13050839.
- [14] M. Sana, M. Asad, M. U. Farooq, S. Anwar, and M. Talha, "Machine learning for multi-dimensional performance optimization and predictive modelling of nanopowder-mixed electric discharge machining (EDM)," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 130, no. 11–12, pp. 5641–5664, 2024, doi: 10.1007/s00170-024-13023-x.
- [15] Jagadish, D. Zindani, A. Selvam, G. G. Tejani, and A. J. Santhosh, "Optimization of process parameter for green die sinking electrical discharge machining: a novel hybrid decision-making approach," *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, pp. 1–19, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-92713-2.
- [16] M. S. Sisodiya and P. Agarwal, "Short review on the development of electrical discharge machine," *Eng. Res. Express*, vol. 6, no. 1, 2024, doi: 10.1088/2631-8695/ad2be3.
- [17] M. S. Tufail, J. Giri, E. Makki, T. Sathish, R. Chadge, and N. Sunheriya, "Machinability of different cutting tool materials for electric discharge machining: A review and future prospects," *AIP Adv.*, vol. 14, no. 4, 2024, doi: 10.1063/5.0201614.
- [18] C. Sarala Rubi *et al.*, "Comprehensive review on wire electrical discharge machining: a non-traditional material removal process," *Front. Mech. Eng.*, vol. 10, no. January, pp. 1–16, 2024, doi: 10.3389/fmech.2024.1322605.
- [19] G. Li, W. Natsu, and Z. Yu, "Study on Debris Behavior and Its Influence on EDM Characteristics in Deep Micro-hole Machining," *Procedia CIRP*, vol. 68, no. April, pp. 578–581, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2017.12.117.
- [20] M. Machno, A. Matras, and M. Szkoda, "Modelling and Analysis of the Effect of EDM-Drilling Parameters on the Machining Performance of Inconel 718 Using the RSM and ANNs Methods," *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 3, 2022, doi: 10.3390/ma15031152.
- [21] D. Popa and C.-O. Morariu, "Modern Technologies for Micro-drilling of the Fuel Injector Nozzle used in Motor Vehicles - A Review of the Literature," *MATEC Web Conf.*, vol. 343, p. 03007, 2021, doi: 10.1051/mateconf/202134303007.
- [22] S. Kalpakjian and S. R. Schmid, *Manufacturing engineering and technology*, vol. 25, no. 1. 2013. doi: 10.1016/0924-0136(91)90107-p.
- [23] S. Ahmed, A. Speidel, J. W. Murray, N. Ahmed, M. Cuttell, and A. T. Clare, "Electrolytic-dielectrics: A route to zero recast electrical discharge machining," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 181, no. September, p. 103941, 2022, doi: 10.1016/j.ijmactools.2022.103941.
- [24] M. K. Dikshit *et al.*, "Surface characteristics optimization of biocompatible Ti6Al4V with RCCD and NSGA II using die sinking EDM," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 24, pp. 223–235, 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.03.005.
- [25] R. Balz, G. Bernardasci, B. von Rotz, and D. Sedarsky, "Influence of nozzle geometry on spray and combustion characteristics related to large two-stroke engine fuel injection systems," *Fuel*, vol. 294, p. 120455, 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2021.120455.
- [26] R. Payri, F. J. Salvador, J. Gimeno, and L. D. Zapata, "Diesel nozzle geometry influence on spray liquid-phase fuel penetration in evaporative conditions," *Fuel*, vol. 87, no. 7, pp. 1165–1176, 2008, doi: 10.1016/j.fuel.2007.05.058.
- [27] V. C. Pham, V. V. Le, S. Yeo, J. H. Choi, and W. J. Lee, "Effects of the Injector Spray Angle on Combustion and Emissions of a 4-Stroke Natural Gas-Diesel DF Marine Engine," *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 23, 2022, doi: 10.3390/app122311886.
- [28] J. Yan, S. Gao, W. Zhao, and T. H. Lee, "Study of combustion and emission characteristics of a diesel engine fueled with diesel, butanol-diesel and hexanol-diesel mixtures under low intake pressure conditions," *Energy Convers. Manag.*, vol. 243, p. 114273, 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2021.114273.
- [29] D. N. M. Kumar and M. P. C. Rao, "Optimization of EDM Process Parameters using Response Surface Methodology for AISI D3 Steel," *Int. J. Trend Sci. Res. Dev.*, vol. Volume-3, no. Issue-3, pp. 1651–1656, 2019, doi: 10.31142/ijtsrd23535.
- [30] V. Mohankumar *et al.*, "Optimizing EDM process parameters with the use of GRA-based RSM for machining titanium alloy," *Results Eng.*, vol. 26, no. March, p. 104903, 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2025.104903.
- [31] R. Das and M. K. Pradhan, "ANN modelling for surface roughness in electrical discharge machining: a comparative study," *Int. J. Serv. Comput. Oriented Manuf.*, vol. 1, no. 2, p. 124, 2013, doi: 10.1504/ijscm.2013.058674.
- [32] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 6, no. 2, pp. 182–197, 2002, doi: 10.1109/4235.996017.
- [33] A. Y. Fatatit and A. Kalyon, "The Environmental Impact

- of Electric Discharge Machining,” *Int. J. Eng. Sci. Appl.*, vol. 3, no. 3, pp. 123–129, 2019.
- [34] W. Ming *et al.*, “Research on EDM Performance of Renewable Dielectrics under Different Electrodes for Machining SKD11,” *Crystals*, vol. 12, no. 2, 2022, doi: 10.3390/cryst12020291.
- [35] A. A. Abbas, R. R. Shwaish, S. H. Aghdeab, and W. Ahmed, “Energy efficiency and sustainability enhancement of electric discharge machines by incorporating nano-graphite,” *Mater. Res. Proc.*, vol. 43, pp. 124–131, 2024, doi: 10.21741/9781644903216-17.
- [36] D. Song *et al.*, “Highly energy-efficient and safe-environment-friendly ultra short electrical arc machining for titanium alloy: Mechanism, characteristics, and parameter estimation,” *J. Clean. Prod.*, vol. 417, no. March, p. 137842, 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.137842.