

Peningkatan efisiensi mesin *wirecut* melalui *condition-based maintenance* berbasis data multisensor

Salman Abdurrahman¹, Rosehan¹, Sobron Y Lubis¹

¹Teknik Mesin, Universitas Tarumanagara

Letjen S. Parman, Tomang, Grogol Petamburan, Kota Jakarta Barat, Daerah Khusus Ibukota Jakarta 11440

Email korespondensi: salmanvmg2003@gmail.com

Received: 21 February 2025, Reviewed: 25 March 2025, Published: 30 April 2026

<https://doi.org/10.71452/jtmi2112026111>

Abstrak. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi parameter pemesinan terhadap kinerja dan stabilitas proses *Computer Numerical Control (CNC) Wire Electrical Discharge Machining (WEDM)* serta mengembangkan pendekatan *Condition-Based Maintenance (CBM)* berbasis multisensor. Metode yang digunakan adalah eksperimen dengan variasi arus, tegangan, dan kecepatan kawat, serta pemantauan kondisi mesin secara *real-time* menggunakan sensor getaran dan temperatur fluida dielektrik. Data dianalisis menggunakan pendekatan statistik dan tren untuk mengidentifikasi hubungan antara parameter pemesinan dan indikator kondisi mesin. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan arus dan tegangan yang disertai penurunan kecepatan kawat menyebabkan kenaikan energi pelepasan, yang berdampak pada peningkatan getaran dan temperatur fluida dielektrik serta penurunan signifikan waktu putus kawat dari 60 menit menjadi 6 menit. Transisi kondisi kritis teridentifikasi antara variasi ke-3 dan ke-4. Berdasarkan hasil tersebut, kondisi mesin diklasifikasikan menjadi tiga kategori, yaitu normal, peringatan, dan kritis. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi parameter pemesinan dan data multisensor untuk membangun kerangka klasifikasi kondisi dalam mendeteksi secara dini terjadinya putus kawat pada proses WEDM. Penelitian ini menyimpulkan bahwa getaran dan temperatur fluida dielektrik merupakan indikator yang efektif dalam mendeteksi degradasi mesin, serta pendekatan multisensor mampu meningkatkan akurasi pemantauan kondisi dan mendukung penerapan *predictive maintenance* untuk meningkatkan keandalan dan efisiensi proses manufaktur.

Kata kunci: WEDM, *Condition-Based Maintenance*, multisensor, getaran, temperatur, putus kawat

Abstract. This study aims to analyze the effect of machining parameter variations on the performance and stability of the *Computer Numerical Control (CNC) Wire Electrical Discharge Machining (WEDM)* process and to develop a multisensor-based *Condition-Based Maintenance (CBM)* approach. The research employs an experimental method by varying current, voltage, and wire speed, while monitoring machine conditions in real time using vibration and dielectric fluid temperature sensors. The collected data were analyzed using statistical and trend-based approaches to identify the relationship between machining parameters and machine condition indicators. The results show that increasing current and voltage combined with decreasing wire speed leads to higher discharge energy, resulting in increased vibration and temperature, as well as a significant reduction in wire break time from 60 minutes to 6 minutes. A critical transition is observed between the third and fourth parameter variations. Based on these findings, machine conditions are classified into three categories: normal, warning, and critical. The novelty of this study lies in the integration of machining parameters and multisensor data to establish a condition classification framework for early detection of wire break in WEDM processes. This study concludes that vibration and dielectric fluid temperature are reliable indicators for detecting machine degradation, and that the multisensor approach improves monitoring accuracy and supports the implementation of *predictive maintenance* to enhance reliability and operational efficiency in manufacturing processes.

Keywords: WEDM, *Condition-Based Maintenance*, multisensor, vibration, temperature, wire break

PENDAHULUAN

Wire Electrical Discharge Machining (WEDM) merupakan proses pemesinan non-konvensional yang banyak digunakan dalam manufaktur presisi karena kemampuannya menghasilkan bentuk kompleks dengan akurasi tinggi serta kualitas permukaan yang baik. Proses ini memanfaatkan pelepasan energi listrik antara elektroda kawat dan benda kerja, sehingga material tererosi melalui mekanisme termal akibat energi panas yang dihasilkan [1].

Namun demikian, salah satu kendala utama dalam proses WEDM adalah terjadinya putus kawat, yang dapat menurunkan stabilitas proses, meningkatkan waktu henti, serta mengurangi produktivitas secara keseluruhan [2]. Kinerja proses ini sangat dipengaruhi oleh parameter operasional seperti arus, tegangan, kecepatan kawat, serta kondisi fluida dielektrik yang menentukan besarnya energi pelepasan dan tingkat keausan elektroda [3].

Dalam praktik industri, strategi pemeliharaan yang umum diterapkan masih berbasis waktu, yaitu dilakukan secara periodik tanpa mempertimbangkan kondisi aktual mesin. Pendekatan ini relatif sederhana, namun kurang efektif dalam mencegah kegagalan mendadak karena tidak mencerminkan kondisi riil peralatan [4]. Oleh sebab itu, *Condition-Based Maintenance (CBM)* berkembang sebagai pendekatan yang lebih adaptif dengan memanfaatkan data kondisi mesin secara aktual untuk mendukung pengambilan keputusan perawatan [5].

Perkembangan Industri 4.0 semakin mendorong implementasi CBM melalui pemanfaatan data sensor secara *real-time* untuk memantau kondisi mesin serta memprediksi potensi kerusakan sebelum terjadi kegagalan [6]. Integrasi multisensor seperti getaran, temperatur, dan parameter proses memungkinkan analisis kondisi mesin yang lebih komprehensif serta meningkatkan akurasi deteksi kerusakan [7].

Dalam proses WEDM, parameter seperti arus *discharge*, tegangan, kecepatan kawat, dan tekanan fluida dielektrik berpengaruh signifikan terhadap stabilitas proses dan umur pakai kawat. Energi *discharge* yang tinggi tanpa diimbangi kecepatan kawat yang memadai dapat menyebabkan *overheating* lokal dan kelelahan termal yang berujung pada *wire break* [8]. Oleh karena itu, pemantauan berkelanjutan terhadap parameter operasi dan kondisi mesin menjadi sangat penting untuk menjaga efisiensi dan kestabilan proses.

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian sebelumnya masih berfokus pada optimasi parameter atau pemantauan berbasis satu sensor, sehingga belum mampu menggambarkan kondisi sistem secara menyeluruh. Pendekatan tersebut memiliki keterbatasan dalam menangkap interaksi kompleks antara parameter proses dan kondisi dinamis mesin [7-9]. Selain itu, penerapan CBM pada WEDM yang mengintegrasikan data multisensor untuk memprediksi putus kawat masih relatif terbatas.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini mengusulkan pendekatan terintegrasi berbasis multisensor dengan mengombinasikan parameter pemesinan, sinyal getaran, dan temperatur untuk menganalisis kondisi mesin secara real-time. Kebaruan penelitian ini terletak pada identifikasi hubungan antara parameter operasi dan indikator kondisi mesin dalam mendeteksi pola terjadinya putus kawat. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar pengembangan sistem *predictive maintenance* yang lebih akurat dan adaptif pada mesin *computer numerical control (CNC) Wirecut*.

Selain kontribusi teknis, penelitian ini juga mendukung pencapaian *Sustainable Development Goals (SDGs)*, khususnya SDG 9 (*Industry, Innovation and Infrastructure*) melalui peningkatan efisiensi dan keandalan sistem manufaktur, serta SDG 12 (*Responsible Consumption and Production*) melalui pengurangan waktu henti, limbah produksi, dan penggunaan sumber daya yang lebih efisien.

METODE

Penelitian ini menerapkan pendekatan eksperimental untuk menganalisis pengaruh parameter pemesinan terhadap kinerja dan keandalan sistem *CNC Wire Electrical Discharge Machining (WEDM)*. Fokus penelitian diarahkan pada hubungan antara parameter operasional dan indikator kondisi mesin melalui sistem pemantauan berbasis multisensor.

Eksperimen dilakukan dengan memvariasikan parameter pemesinan utama serta mengamati pengaruhnya terhadap kejadian putus kawat, getaran, dan temperatur. Metode penelitian mengacu pada kerangka *Condition-Based Maintenance (CBM)* berbasis data, yang mengintegrasikan data sensor untuk mengevaluasi kondisi mesin dan memprediksi potensi kegagalan.

Pengaturan dan Parameter Eksperimental

Eksperimen dilakukan pada mesin *CNC Wirecut* tipe Makino DUO 64 dalam kondisi terkontrol. Parameter pemesinan divariasikan secara sistematis sebagaimana disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Variasi Parameter Permesinan

Variasi Parameter Percobaan	Arus (A)	Tegangan (V)	Kecepatan kawat (m/min)	Tekanan Cairan Pendingin (bar)
1	3	60	9	10
2	4	70	8	9
3	5	80	7	8
4	6	90	6	7
5	7	100	5	6

Setiap kondisi eksperimen dilakukan sebanyak tiga kali, dan hasil yang ditampilkan merupakan nilai rata-rata dari ketiga pengujian untuk memastikan konsistensi dan keandalan data.

Sistem Akuisisi Data

Sistem akuisisi data dirancang untuk mengumpulkan dan menyinkronkan data multisensor selama proses pemesinan. Sistem ini memungkinkan pemantauan secara *real-time* serta memastikan seluruh sinyal sensor terekam secara simultan. Data yang termasuk sebagai berikut:

1. Waktu Putus Kawat (menit)
2. Getaran Motor Servo (mm/s)
3. Getaran *Wire Guide* (mm/s)
4. Suhu Cairan Pendingin (°C)

Data getaran diperoleh menggunakan sensor yang dipasang pada motor servo dan komponen *wire guide*, sedangkan pengukuran suhu dilakukan di area dekat zona pemesinan. Parameter-parameter ini dipilih karena memiliki korelasi yang kuat terhadap degradasi mesin dan perilaku kegagalan pada proses WEDM [10, 11]

Pengolahan dan Analisis Data

Data yang diperoleh dianalisis menggunakan metode statistik dan analisis tren. Analisis meliputi perhitungan nilai rata-rata untuk merepresentasikan setiap parameter, standar deviasi untuk mengevaluasi konsistensi data, analisis tren untuk mengidentifikasi hubungan antara parameter pemesinan dan kinerja mesin, serta analisis korelasi antara sinyal getaran dan waktu terjadinya *wire break*.

Pemanfaatan data multisensor memungkinkan deteksi kondisi mesin yang lebih akurat dibandingkan dengan pendekatan sensor tunggal, karena mampu merepresentasikan perilaku mekanis dan termal secara simultan [7-12].

Klasifikasi Kondisi (CBM Framework)

Kerangka *Condition-Based Maintenance (CBM)* pada penelitian ini menggunakan data multisensor untuk menilai kondisi mesin sekaligus mengidentifikasi gejala awal kegagalan. Penentuan klasifikasi dilakukan berdasarkan nilai ambang yang ditetapkan pada parameter getaran dan temperatur.

Selanjutnya, kondisi mesin dikelompokkan ke dalam tiga kategori:

1. Kondisi Normal Getaran < 2 mm/s dan Suhu < 30°C

- 2. Kondisi Peringatan Getaran 2–3.8 mm/s dan Suhu 30–38°C
- 3. Kondisi Kritis Getaran > 3.8 mm/s dan Suhu > 38°C

Pendekatan klasifikasi ini memungkinkan deteksi dini terhadap kondisi abnormal serta mendukung pengambilan keputusan dalam *predictive maintenance*. Integrasi data multisensor mampu meningkatkan keandalan sistem dan menurunkan risiko kegagalan mesin yang tidak terduga [7].

Dalam penelitian ini, digunakan beberapa persamaan dasar untuk menjelaskan hubungan antara parameter pemesinan dan indikator kondisi mesin pada proses *Wire Electrical Discharge Machining* (WEDM). Hubungan tersebut menjadi dasar dalam menganalisis perilaku sistem serta mendukung penentuan klasifikasi kondisi mesin secara terukur.

Energi *discharge* yang dihasilkan selama proses pemesinan dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$E = V \cdot I \cdot t \tag{1}$$

Dimana,

- E : Energi *discharge* (J)
- V : Tegangan (V)
- I : Arus (A)
- t : Waktu *discharge* (s)

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan arus dan tegangan akan meningkatkan energi pelepasan, yang berkontribusi terhadap akumulasi panas selama proses pemesinan [15].

Waktu terjadinya putus kawat berbanding terbalik dengan energi pelepasan (*discharge*), dan dapat diperkirakan sebagai berikut:

$$T_{wb} = \frac{k}{V \cdot I} \tag{2}$$

Dimana,

- T_{wb} : Waktu putus kawat (menit)
- k : Konstanta bergantung pada proses permesinan
- V : Tegangan (V)
- I : Arus (A)

Hubungan ini menunjukkan bahwa peningkatan energi pelepasan menyebabkan penurunan umur pakai kawat. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya efek termal dan keausan yang mempercepat kegagalan kawat selama proses pemesinan [8].

Getaran digunakan sebagai indikator kondisi mesin dan dapat dinyatakan sebagai fungsi dari tingkat degradasi kawat:

$$v_{vib} = a \cdot \frac{1}{T_{vib}} + b \tag{3}$$

Dimana,

- v_{vib} : Tingkat getaran (mm/s)
- a dan b : Konstanta

Persamaan ini menunjukkan bahwa tingkat getaran akan meningkat seiring dengan semakin singkatnya waktu terjadinya putus kawat. Kondisi ini mencerminkan bahwa

peningkatan getaran berkaitan erat dengan degradasi kawat dan mendekatnya kondisi kegagalan pada proses WEDM [13].

Kenaikan suhu selama proses pemesinan dipengaruhi oleh energi *discharge* dan dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$T = T_0 + \alpha(V \cdot I) \tag{4}$$

Dimana,

- T : Suhu (°C)
- T_0 : Suhu awal (°C)
- α : koefisien termal
- V : Tegangan (V)
- I : Arus (A)

Model ini menjelaskan bahwa peningkatan energi pemesinan akan menyebabkan kenaikan suhu yang teramati selama proses berlangsung [15].

Untuk mengintegrasikan data multisensor, suatu indeks kondisi didefinisikan sebagai berikut:

$$CI = w_1 V_{servo} + w_2 V_{guide} + w_3 T \tag{5}$$

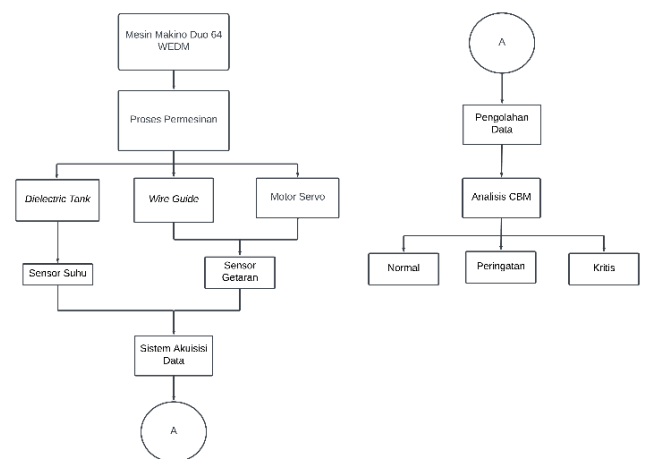
Dimana,

- CI : *Condition index*
- T : Suhu (°C)
- w_1, w_2, w_3 : *Weighting factors*
- V_{servo} : Getaran motor servo (mm/s)
- V_{guide} : Getaran *wire guide* (mm/s)

Model ini menunjukkan bahwa peningkatan energi pemesinan berbanding lurus dengan kenaikan temperatur yang terjadi selama proses berlangsung [15].

Rancangan Percobaan

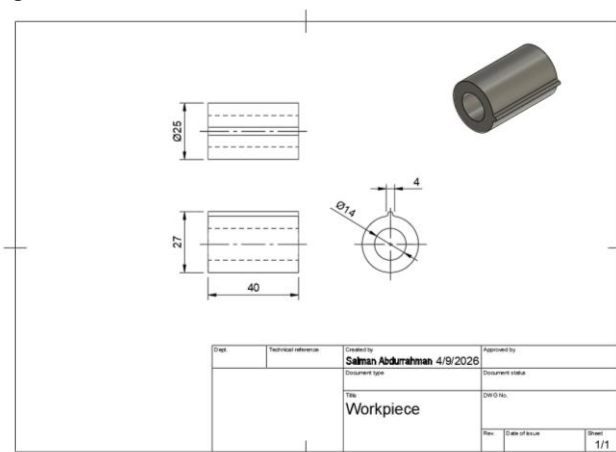
Rancangan percobaan mengintegrasikan data multisensor yang diperoleh dari sensor getaran dan suhu, yang selanjutnya diolah dan dianalisis menggunakan pendekatan *Condition-Based Maintenance* (CBM). Hasil akhir analisis CBM digunakan untuk mengklasifikasikan kondisi mesin ke dalam tiga kategori, yaitu normal, peringatan, dan kritis. Klasifikasi ini memberikan representasi kondisi mesin yang sederhana namun efektif sebagai dasar pengambilan keputusan.



Gambar 1. Rancangan Percobaan

Percobaan

Eksperimen dilakukan menggunakan sistem *computer numerical control (CNC) Wire Electrical Discharge Machining (WEDM)* dalam kondisi operasi yang terkontrol. Pada penelitian ini digunakan benda kerja berbahan baja dengan geometri silinder berongga (berbentuk cincin) untuk mengevaluasi kinerja proses pemesinan. Dimensi benda kerja meliputi diameter luar 25 mm, diameter lubang dalam 12 mm, dan tinggi 40 mm. Proses pemesinan dilakukan menggunakan mesin CNC *Wirecut* tipe Makino DUO 64. Kawat elektroda yang digunakan pada mesin *wirecut* berbahan kuningan dengan diameter 0,25 mm, yang dipilih karena yang paling umum digunakan.



Gambar 2. Computer-Aided Design (CAD) benda kerja

Hasil penelitian menunjukkan bahwa permukaan benda kerja memiliki tampilan menyerupai kuningan, disertai perubahan warna setelah proses pemesinan. Fenomena ini terjadi akibat proses *Wire Electrical Discharge Machining (WEDM)*, di mana benda kerja terendam dalam fluida dielektrik yang berfungsi sebagai media pendingin sekaligus isolator. Interaksi antara energi termal yang tinggi selama pelepasan listrik dengan fluida dielektrik dapat memicu terbentuknya lapisan oksida tipis serta endapan residu pada permukaan benda kerja.



Gambar 3. Benda kerja

Untuk mengembalikan kondisi permukaan, perubahan warna tersebut dapat dihilangkan melalui pembersihan menggunakan cairan antirarat (*anti-rust*).

Selama proses pemesinan, digunakan sistem multisensor untuk mengakuisisi data secara *real-time*, meliputi getaran motor servo, getaran *wire guide*, temperatur fluida dielektrik, serta waktu terjadinya *wire break*. Fluida dielektrik yang digunakan dalam penelitian

ini adalah air hasil kondensasi dari sistem pendingin udara (AC), yang berfungsi sebagai media isolator sekaligus pendingin di dalam tangki dielektrik. Data yang diperoleh kemudian diolah dan dianalisis untuk mengkaji hubungan antara parameter pemesinan dan kondisi mesin.

Spesifikasi Sensor

Sistem pemantauan multisensor diterapkan untuk mengakuisisi data kondisi mesin secara *real-time* dengan menggunakan sensor getaran dan sensor suhu fluida dielektrik. Sensor getaran memiliki rentang pengukuran 0–10 mm/s dan berfungsi untuk mendeteksi ketidakstabilan mekanis serta getaran abnormal, yang dipasang pada motor servo dan komponen *wire guide*. Sementara itu, sensor suhu fluida dielektrik memiliki rentang pengukuran 0–100 °C dan digunakan untuk memantau kondisi termal pada area pemesinan, dengan pemasangan pada tangki fluida dielektrik. Parameter pemesinan yang digunakan berdasarkan pengaruhnya yang signifikan terhadap kinerja proses dan kestabilan kawat. Parameter tersebut meliputi:

Arus : 3–7 A
Tegangan : 60–100 V
Kecepatan Kawat : 5–9 m/min
Tekanan Fluida Dielektrik : 6–10 bar

Parameter-parameter tersebut berpengaruh langsung terhadap energi *discharge*, akumulasi panas, serta kestabilan proses pemesinan, yang merupakan faktor penting dalam terjadinya putus kawat.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil eksperimen diperoleh dari lima variasi parameter pemesinan, di mana setiap kondisi diuji sebanyak tiga kali dan nilai yang digunakan merupakan rata-rata dari seluruh pengujian. Parameter yang diamati meliputi waktu terjadinya putus kawat, getaran motor servo, getaran *wire guide*, serta suhu fluida dielektrik. Didapatkan hasil sebagai berikut:

Tabel 2. Hasil percobaan

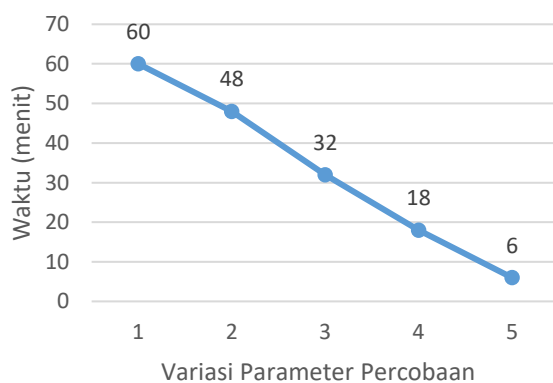
Variasi Parameter Percobaan	Waktu Putus Kawat (menit)	Getaran Servo (mm/s)	Getaran Wire Guide (mm/s)	Suhu Fluida Dielektrik (°C)
1	60	0.8	0.6	27
2	48	1.5	1.2	30
3	32	2.6	2.2	34
4	18	4	3.5	40
5	6	5.5	4.8	47

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa peningkatan signifikan pada getaran dan suhu fluida dielektrik, yang disertai penurunan cepat waktu terjadinya putus kawat, terutama disebabkan oleh meningkatnya energi pelepasan (*discharge*) akibat kenaikan arus dan tegangan serta penurunan kecepatan kawat. Kondisi ini memicu pembangkitan panas yang berlebih dan pendinginan yang tidak optimal, sehingga terjadi akumulasi panas di zona pemesinan. Temperatur yang tinggi menyebabkan pelunakan termal dan kelelahan pada kawat, sementara

kondisi pelepasan listrik yang tidak stabil meningkatkan getaran mekanis. Kombinasi tegangan termal dan mekanis tersebut mempercepat degradasi kawat dan mengakibatkan penurunan drastis waktu putus kawat. Selain itu, teridentifikasi adanya transisi kritis antara variasi percobaan ke-3 dan ke-4, yang ditandai dengan perubahan kondisi sistem dari stabil menjadi kritis, disertai lonjakan tajam pada getaran dan temperatur.

Pengaruh Permesinan Terhadap Waktu Putus Kawat

Hasil penelitian menunjukkan bahwa waktu terjadinya kawat putus mengalami penurunan yang signifikan seiring dengan peningkatan arus dan tegangan serta penurunan kecepatan kawat. Waktu putus kawat menurun dari sekitar 60 menit pada kondisi parameter terendah menjadi sekitar 6 menit pada kondisi parameter tertinggi.



Gambar 4. Grafik pengaruh permesinan terhadap waktu putus kawat

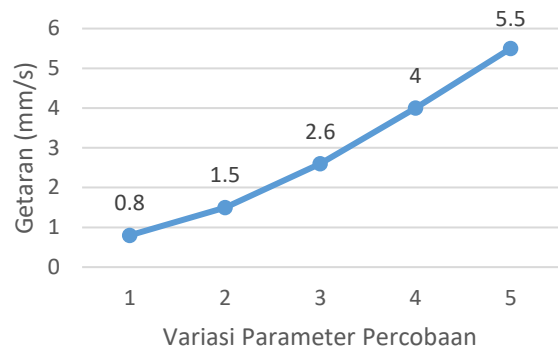
Hasil penelitian menunjukkan bahwa waktu terjadinya *wire break* mengalami penurunan yang konsisten seiring dengan peningkatan variasi parameter pemesinan. Pada variasi pertama, waktu *wire break* tercatat sebesar 60 menit, kemudian menurun bertahap menjadi 48 menit, 32 menit, 18 menit, hingga mencapai 6 menit pada variasi kelima. Penurunan drastis ini menunjukkan bahwa peningkatan arus dan tegangan yang diiringi dengan penurunan kecepatan kawat secara signifikan mempercepat terjadinya kegagalan kawat.

Secara teoritis, fenomena ini berkaitan dengan peningkatan energi pelepasan (*discharge energy*) yang menghasilkan akumulasi panas lebih tinggi di zona pemesinan. Energi termal yang berlebih menyebabkan terjadinya pelunakan material kawat serta mempercepat kelelahan termal, sehingga umur pakai kawat menjadi lebih pendek [2]. Hal ini mendukung hipotesis bahwa peningkatan parameter pemesinan berbanding lurus dengan laju degradasi kawat.

Selain itu, penurunan yang relatif tajam mulai terlihat dari variasi percobaan ke-3 hingga ke-5 (32 menit menjadi 6 menit), yang mengindikasikan adanya transisi dari kondisi operasi stabil menuju kondisi kritis. Pada kondisi ini, sistem tidak lagi mampu menjaga keseimbangan antara pembangkitan panas dan proses pendinginan oleh fluida dielektrik, sehingga mempercepat kegagalan kawat.

Analisis Getaran pada Motor Servo

Hasil eksperimen menunjukkan adanya peningkatan signifikan pada getaran servo seiring dengan meningkatnya parameter pemesinan.



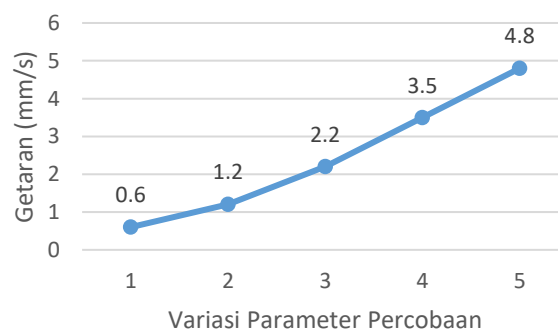
Gambar 5. Getaran motor servo terhadap variasi parameter percobaan

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa getaran motor servo meningkat secara signifikan dari 0,8 mm/s menjadi 5,5 mm/s seiring dengan peningkatan parameter pemesinan. Kenaikan yang tajam terlihat pada variasi percobaan ke-3 hingga ke-4, di mana nilai getaran meningkat dari 2,5 mm/s menjadi 4,0 mm/s dan telah melampaui batas kritis sebesar 3,8 mm/s. Kondisi ini mengindikasikan terjadinya transisi dari keadaan pemesinan yang stabil menuju kondisi tidak stabil.

Secara teoritis, peningkatan getaran ini berkaitan dengan bertambahnya energi pelepasan (*discharge energy*) yang menyebabkan ketidakstabilan proses serta pelunakan termal pada kawat. Akumulasi panas yang tinggi mempercepat degradasi material kawat, sehingga meningkatkan respons getaran pada sistem [16]. Temuan ini mendukung hipotesis bahwa peningkatan parameter pemesinan berbanding lurus dengan ketidakstabilan mekanis dan risiko kegagalan kawat.

Analisis Getaran pada Wire Guide

Getaran pada *wire guide* juga menunjukkan tren peningkatan yang konsisten pada seluruh variasi parameter pemesinan.



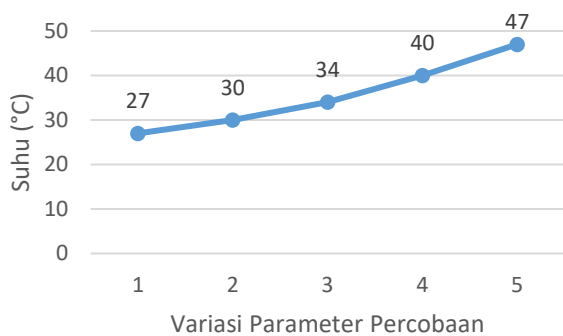
Gambar 6. Getaran wire guide terhadap variasi parameter percobaan

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa getaran pada *wire guide* meningkat dari 0,6 mm/s menjadi 4,9 mm/s seiring dengan peningkatan parameter pemesinan. Peningkatan yang cukup signifikan terjadi pada variasi percobaan ke-3 hingga ke-4, di mana nilai getaran naik dari 2,2 mm/s menjadi 3,7 mm/s dan mendekati batas kritis sebesar 3,8 mm/s. Pada variasi percobaan ke-5, nilai getaran telah melampaui batas tersebut, yang mengindikasikan terjadinya ketidakstabilan yang tinggi pada zona pemotongan.

Secara teoritis, peningkatan getaran ini dipengaruhi oleh kondisi pelepasan listrik yang tidak stabil serta efek pelunakan termal pada kawat akibat energi panas yang tinggi. Hal ini menghasilkan gaya dinamis yang berfluktuasi selama proses pemesinan, sehingga meningkatkan respons getaran pada sistem [16]. Temuan ini mendukung hipotesis bahwa peningkatan parameter pemesinan berkontribusi langsung terhadap ketidakstabilan proses dan percepatan degradasi kawat.

Analisis Suhu Fluida Dielektrik

Temperatur yang diukur di sekitar zona pemesinan menunjukkan peningkatan secara bertahap seiring dengan kenaikan parameter pemesinan. Dalam penelitian ini, fluida dielektrik yang digunakan adalah air hasil kondensasi dari sistem pendingin udara (AC), yang berperan sebagai media pendingin dan isolator selama proses berlangsung. Meskipun demikian, peningkatan energi pemesinan menyebabkan kemampuan pendinginan fluida menjadi terbatas, sehingga temperatur di area pemotongan tetap mengalami kenaikan.



Gambar 7. Suhu fluida dielektrik terhadap variasi parameter percobaan

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa temperatur meningkat dari 28°C menjadi 42,8°C seiring dengan peningkatan parameter pemesinan. Kenaikan yang cukup signifikan terjadi pada variasi ke-3 hingga ke-4, di mana temperatur meningkat dari 33°C menjadi 38,5°C, yang mengindikasikan adanya transisi menuju kondisi operasi kritis. Pada variasi ke-5, temperatur mencapai nilai tertinggi, yang menunjukkan terjadinya akumulasi panas berlebih di zona pemotongan.

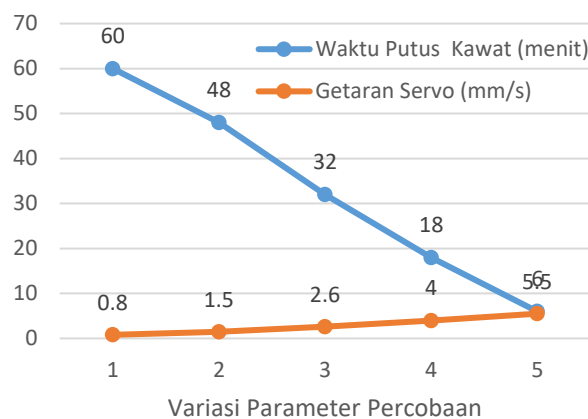
Secara teoritis, peningkatan temperatur ini disebabkan oleh bertambahnya energi pelepasan (*discharge energy*) akibat kenaikan arus dan tegangan, serta penurunan kecepatan kawat yang menyebabkan durasi paparan panas menjadi lebih lama. Selain itu, efektivitas fluida dielektrik

dalam proses pendinginan menjadi menurun, sehingga tidak mampu mengimbangi pembangkitan panas yang terjadi. Kondisi ini mempercepat pelunakan termal dan degradasi kawat [17]. Temuan ini mendukung hipotesis bahwa peningkatan parameter pemesinan berkontribusi langsung terhadap peningkatan beban termal dan ketidakstabilan proses.

Hasil penelitian ini juga memperkuat hubungan antara energi pemesinan, fenomena termal, dan mekanisme degradasi kawat. Dari sisi praktis, temperatur dapat dimanfaatkan sebagai indikator utama dalam penerapan *Condition-Based Maintenance* (CBM) untuk mendeteksi kondisi kritis secara dini. Dengan demikian, potensi kegagalan kawat dapat diantisipasi lebih awal, sehingga meningkatkan keandalan sistem dan mengurangi risiko *downtime* dalam proses produksi.

Korelasi Antar Getaran dan Putus Kawat

Teridentifikasi adanya hubungan berbanding terbalik yang kuat antara tingkat getaran dan waktu terjadinya putus kawat. Semakin tinggi nilai getaran, semakin singkat umur pakai kawat.



Gambar 8. Grafik korelasi antara getaran dan putus kawat

Hasil eksperimen menunjukkan adanya korelasi berbanding terbalik yang kuat antara tingkat getaran dan waktu terjadinya *wire break*, di mana peningkatan getaran diikuti oleh penurunan umur pakai kawat. Berdasarkan data yang diperoleh, getaran servo meningkat dari 0,8 mm/s menjadi 5,7 mm/s, sementara waktu *wire break* menurun signifikan dari 60 menit menjadi 6 menit. Transisi kritis teridentifikasi pada variasi percobaan ke-3 hingga ke-4, ditandai dengan kenaikan getaran dari 2,5 mm/s menjadi 4,0 mm/s yang disertai penurunan tajam waktu *wire break* dari 31 menit menjadi 17 menit.

Secara teoritis, hubungan ini dipengaruhi oleh kombinasi efek pelunakan termal dan kelelahan mekanis. Peningkatan energi pelepasan (*discharge energy*) menyebabkan kenaikan temperatur yang menurunkan kekuatan mekanis kawat, sementara kondisi pemesinan yang tidak stabil menghasilkan gaya dinamis yang berfluktuasi dan memicu getaran. Tegangan dinamis tersebut mempercepat inisiasi dan propagasi retak pada kawat, sehingga mempercepat terjadinya kegagalan [16]. Temuan ini mendukung hipotesis bahwa peningkatan

parameter pemesinan berkontribusi terhadap degradasi kawat melalui interaksi fenomena termal dan mekanis. Berdasarkan semua data hasil eksperimen yang didapat:

Variasi parameter percobaan ke 1–2 → Normal
Variasi parameter percobaan ke 3 → Peringatan
Variasi parameter percobaan ke 4–5 → Kritis

Klasifikasi ini menunjukkan bahwa pemantauan berbasis multisensor mampu mengidentifikasi degradasi mesin secara efektif serta mendukung penerapan *predictive maintenance*.

Analisis Pengaruh Parsial Parameter Pemesinan

Meskipun hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi parameter pemesinan secara simultan memberikan pengaruh signifikan terhadap peningkatan getaran, temperatur, serta penurunan waktu putus kawat, analisis tersebut belum sepenuhnya mampu menjelaskan kontribusi masing-masing parameter secara independen. Hal ini disebabkan oleh desain eksperimen yang memvariasikan parameter arus, tegangan, kecepatan kawat, dan tekanan fluida dielektrik secara bersamaan dalam setiap variasi percobaan, sehingga menimbulkan kondisi multikolinearitas yang tinggi antarvariabel.

Secara konseptual, hubungan antara parameter pemesinan dan waktu putus kawat dapat direpresentasikan melalui model regresi linear berganda sebagai berikut:

$$WB = \beta_0 + \beta_1 I + \beta_2 V + \beta_3 WS + \beta_4 P \quad (6)$$

Dimana,

WB Adalah waktu putus kawat (menit)

I Adalah arus (A)

V Adalah tegangan (V)

WS Adalah kecepatan kawat (m/min)

P Adalah tekanan fluida dielektrik (bar)

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, dilakukan pendekatan alternatif berbasis energi *discharge* sebagai variabel representatif yang mengintegrasikan pengaruh arus dan tegangan. Energi *discharge* didefinisikan sebagai hasil perkalian antara arus dan tegangan ($E = I \times V$). Berdasarkan hasil analisis regresi linear sederhana antara energi *discharge* dan waktu putus kawat, diperoleh model sebagai berikut:

$$WB = 78,7 - 0,104E \quad (7)$$

Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan energi *discharge* berbanding terbalik dengan waktu putus kawat, di mana setiap kenaikan energi sebesar 1 unit menyebabkan penurunan waktu putus kawat sebesar 0,104 menit. Fenomena ini mengindikasikan bahwa energi *discharge* merupakan parameter dominan yang mengontrol degradasi kawat melalui mekanisme termal, di mana peningkatan energi menyebabkan akumulasi panas yang mempercepat kelelahan material kawat.

Selain itu, kecepatan kawat juga dianalisis sebagai parameter independen terhadap waktu putus kawat. Berdasarkan hasil regresi linear sederhana, diperoleh hubungan sebagai berikut:

$$WB = 13,5WS - 61,5 \quad (8)$$

Model ini menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan kawat berkontribusi dalam memperpanjang umur pakai

kawat. Hal ini disebabkan oleh berkurangnya durasi paparan panas pada satu titik kawat, sehingga distribusi panas menjadi lebih merata dan mengurangi akumulasi energi termal yang dapat menyebabkan kegagalan.

Sementara itu, tekanan fluida dielektrik berperan dalam proses pendinginan dan stabilisasi proses pemesinan, namun berdasarkan tren data yang diperoleh, pengaruhnya relatif lebih kecil dibandingkan dengan parameter listrik dan kecepatan kawat. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme termal akibat energi *discharge* merupakan faktor utama dalam menentukan stabilitas proses dan umur pakai kawat.

Berdasarkan hasil analisis tersebut, dapat disimpulkan bahwa energi *discharge* (kombinasi arus dan tegangan) merupakan faktor dominan yang memengaruhi waktu putus kawat, sedangkan kecepatan kawat berperan sebagai parameter pengendali yang memoderasi efek termal. Namun demikian, perlu ditekankan bahwa hasil ini masih bersifat indikatif, karena desain eksperimen yang digunakan belum sepenuhnya mampu memisahkan pengaruh masing-masing parameter secara independen.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa variasi parameter pemesinan berpengaruh signifikan terhadap kinerja dan stabilitas proses *Computer Numerical Control (CNC) Wire Electrical Discharge Machining (WEDM)*. Peningkatan arus dan tegangan yang disertai penurunan kecepatan kawat menyebabkan kenaikan energi pelepasan, sehingga meningkatkan getaran dan temperatur serta menurunkan waktu putus kawat secara drastis. Penurunan kecepatan kawat berperan dalam memperpanjang durasi paparan energi pada kawat, yang mengakibatkan akumulasi panas lebih tinggi dan mempercepat degradasi akibat kombinasi kelelahan termal dan mekanis.

Hasil penelitian juga mengonfirmasi bahwa getaran dan temperatur merupakan indikator yang andal dalam pemantauan kondisi mesin berbasis *Condition-Based Maintenance (CBM)*. Berdasarkan data eksperimen, kondisi mesin diklasifikasikan menjadi tiga kategori, yaitu normal (getaran < 2 mm/s dan temperatur < 30°C), peringatan (2–3,8 mm/s dan 30–38°C), serta kritis (> 3,8 mm/s dan > 38°C).

Selain itu, teridentifikasi adanya transisi signifikan antara variasi percobaan ke-3 dan ke-4, yang ditandai dengan peningkatan tajam getaran dan temperatur serta penurunan drastis waktu putus kawat. Hal ini menunjukkan pergeseran dari kondisi stabil menuju kondisi kritis akibat energi pelepasan yang tinggi dan pendinginan yang tidak optimal.

Untuk mencegah terjadinya putus kawat secara dini dan menjaga stabilitas proses, parameter pemesinan perlu dikendalikan dalam batas aman, terutama dengan membatasi arus dan tegangan serta menjaga kecepatan kawat tetap memadai. Secara praktis, getaran sebaiknya tidak melebihi 3,8 mm/s dan temperatur dijaga di bawah 38°C, karena nilai tersebut merupakan batas kritis sebelum terjadi kegagalan kawat. Pengendalian ini mampu menjaga kestabilan proses, memperpanjang umur kawat, dan meningkatkan efisiensi operasional.

Berdasarkan hasil penelitian ini, pengembangan selanjutnya dapat disarankan pada pembuatan model prediksi putus kawat berbasis data multisensor, misalnya dengan pendekatan *machine learning*, untuk meningkatkan akurasi pemeliharaan prediktif. Selain itu, perlu dilakukan pengujian dengan variasi material benda kerja dan jenis fluida dielektrik guna mengevaluasi pengaruhnya terhadap kestabilan proses dan degradasi kawat. Sistem pemantauan yang telah dikembangkan juga berpotensi diintegrasikan dengan kontrol mesin secara *real-time*, sehingga memungkinkan penerapan *adaptive control* dan meningkatkan efektivitas *Condition-Based Maintenance* (CBM) di lingkungan industri.

Penelitian ini masih memiliki keterbatasan dalam mengidentifikasi pengaruh masing-masing parameter pemesinan secara independen, karena variasi parameter dilakukan secara simultan. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan menggunakan pendekatan desain eksperimen yang lebih terstruktur, seperti metode Taguchi atau *factorial design*, untuk menentukan parameter yang paling signifikan secara kuantitatif serta mengurangi jumlah percobaan yang diperlukan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. Lauwers et al., "Hybrid processes in manufacturing," *CIRP Annals*, vol. 63, no. 2, pp. 561–583, 2014.
- [2] Y. Han, Y. Wang, and L. Zhang, "Investigation of wire breakage mechanism in WEDM," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 255, pp. 284–295, 2018.
- [3] S. Kumar and A. Singh, "Performance analysis of WEDM process parameters," *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, no. 2, pp. 4390–4399, 2018.
- [4] A. Carvalho et al., "A systematic literature review of maintenance strategies," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 45, pp. 170–186, 2017.
- [5] H. Wang, Y. Peng, and J. Li, "Condition-based maintenance for industrial systems," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 123–135, 2020.
- [6] L. Monostori et al., "Cyber-physical systems in manufacturing," *CIRP Annals*, vol. 65, no. 2, pp. 621–641, 2016.
- [7] P. Sharma and A. Kumar, "Multi-sensor data fusion for fault diagnosis," *Materials Today: Proceedings*, vol. 26, pp. 2482–2487, 2020.
- [8] H. Zhang et al., "Thermal effects and wire break in WEDM," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 120, pp. 72–85, 2019.
- [9] J. Lee et al., "Industrial AI and predictive analytics," *Annual Reviews in Control*, vol. 47, pp. 273–289, 2019.
- [10] R. Yan, R. X. Gao, and X. Chen, "Wavelets for fault diagnosis of rotary machines: A review with applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 2, pp. 1680–1689, 2017.
- [11] B. Lauwers, J. P. Kruth, and W. Liu, "Investigation of material removal mechanisms in wire EDM," *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, vol. 59, no. 1, pp. 243–246, 2010.
- [12] J. Lee, H. Davari, J. Singh, and V. Pandhare, "Industrial AI and predictive analytics for smart manufacturing systems," *Annual Reviews in Control*, vol. 47, pp. 273–289, 2019.
- [13] H. Zhang, Y. Liu, and J. Fan, "Condition monitoring of wire EDM process based on vibration signal analysis," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 120, pp. 72–85, 2019.
- [14] P. Sharma and A. Kumar, "Multi-sensor based monitoring and fault diagnosis in wire EDM," *Materials Today: Proceedings*, vol. 26, pp. 2482–2487, 2020.
- [15] H. Zhang, Y. Liu, and J. Fan, "Thermal behavior analysis in WEDM process," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 120, pp. 72–85, 2019.
- [16] S. Singh and A. Sharma, "Experimental investigation of process parameters on wire breakage and vibration characteristics in WEDM," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 45, pp. 743–752, 2019.
- [17] A. Goswami and J. Kumar, "Investigation of machining characteristics and dielectric effect in WEDM," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 40, pp. 355–365, 2019.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan apresiasi dan terima kasih kepada mahasiswa Teknik Mesin angkatan 2022 Universitas Tarumanagara atas dukungan dan kerja samanya yang berperan penting dalam keberhasilan pelaksanaan penelitian ini.

KONTRIBUSI PENULIS

Kontribusi penulis dalam penelitian ini mencakup beberapa tahapan penting, mulai dari perumusan konsep dasar dan perancangan metode penelitian, hingga pelaksanaan eksperimen serta pengumpulan data. Selanjutnya, penulis juga terlibat dalam proses pengolahan dan analisis data untuk memperoleh hasil yang relevan dengan tujuan penelitian. Penyusunan naskah awal, revisi, serta penyuntingan dilakukan secara kolaboratif guna meningkatkan kualitas artikel. Selain itu, proses pembimbingan, dan pengarahan penelitian turut menjadi bagian dari kontribusi dalam menyelesaikan penelitian ini.