Overcoming Overhead in CNC Machines

Mengatasi Overhead pada Mesin CNC Laser Cutting

Mohamad Ilham Ammar[1], Ali Akbar[2]
*Email corresponding author: aliakbar@umsida.ac.id
Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Abstract. *CNC laser cutting machines play an important role in manufacturing processes due to their high precision and cutting efficiency; however, operational problems such as overheating often occur and can reduce machine performance and disrupt production continuity. General Background Overheating in CNC laser cutting machines is generally related to high operational loads, improper cutting parameter settings, and inadequate cooling system performance, particularly in the laser source component, which serves as the primary heat generator. Specific Background The method used in this study includes direct observation during industrial internship activities, interviews with operators and technicians, and problem analysis using a fishbone diagram and Value Stream Mapping. Knowledge Gap Existing operations lack systematic evaluations linking cooling system instabilities and non-optimal operating patterns to thermal failures in laser cutting equipment. Aims This study aims to examine overheating problems and determine root causes and corrective measures for CNC laser cutting machines. Results The results of the analysis indicate that overheating is mainly caused by instability in the laser source cooling system and non-optimal machine operating patterns. Novelty This work establishes an integrated framework combining fishbone root-cause analysis with Value Stream Mapping to optimize thermal management in CNC laser cutting lines. Implications Implementing proper adjustment of operating parameters, preventive maintenance, and cooling system optimization enhances the reliability and efficiency of CNC laser cutting machines.*
Keywords *CNC Laser Cutting, Overheating, Laser Source, Fishbone Diagram, Value Stream Mapping*

Abstrak. *Mesin pemotong laser CNC memainkan peran penting dalam proses manufaktur karena presisi dan efisiensi pemotongan yang tinggi; namun, masalah operasional seperti overheating sering terjadi dan dapat mengurangi kinerja mesin serta mengganggu kontinuitas produksi. Latar Belakang Umum Overheating pada mesin pemotong laser CNC umumnya terkait dengan beban operasional tinggi, pengaturan parameter pemotongan yang tidak tepat, dan kinerja sistem pendingin yang tidak memadai, terutama pada komponen sumber laser yang berfungsi sebagai generator panas utama. Latar Belakang Spesifik Metode yang digunakan dalam studi ini meliputi observasi langsung selama magang industri, wawancara dengan operator dan teknisi, serta analisis masalah menggunakan diagram fishbone dan Value Stream Mapping. Kesenjangan Pengetahuan Operasi yang ada saat ini kurang memiliki evaluasi sistematis yang menghubungkan ketidakstabilan sistem pendingin dan pola operasi yang tidak optimal dengan kegagalan termal pada peralatan pemotong laser. Tujuan Studi ini bertujuan untuk meneliti masalah overheating dan menentukan akar penyebab serta tindakan korektif untuk mesin pemotong laser CNC. Hasil Hasil analisis menunjukkan bahwa overheating terutama disebabkan oleh ketidakstabilan pada sistem pendingin sumber laser dan pola operasi mesin yang tidak optimal. Kebaruan Pekerjaan ini membangun kerangka kerja terintegrasi yang menggabungkan analisis akar penyebab ikan dengan Pemetaan Aliran Nilai untuk mengoptimalkan manajemen termal pada garis pemotongan laser CNC. Implikasi Penerapan penyesuaian parameter operasi yang tepat, pemeliharaan preventif, dan optimasi sistem pendingin meningkatkan keandalan dan efisiensi mesin pemotong laser CNC.*
Kata kunci *CNC Laser Cutting, Overheating, Laser Source, Diagram Fishbone, Pemetaan Nilai Stream*

I. PENDAHULUAN

.1 Latar Belakang

Mesin pemotong laser CNC banyak digunakan dalam industri manufaktur karena mampu menghasilkan pemotongan dengan tingkat presisi tinggi. Mesin ini bekerja dengan energi panas dari sumber laser. Oleh karena itu, kestabilan suhu kerja sangat penting untuk menjaga kinerja dan keandalan mesin pemotong laser.Selama praktik kerja lapangan, mesin CNC laser cutting mengalami overheat ketika digunakan selama waktu tertentu. Suhu kerja mesin meningkat dan alarm peringatan muncul, menghentikan proses pemotongan secara otomatis. Overheat ini menyebabkan proses produksi menjadi tidak lancar, membuat mesin berhenti lebih lama, dan menurunkan efisiensi kerja.[1]

Beberapa faktor yang saling berkaitan berkontribusi pada masalah panas berlebih pada mesin pemotong laser CNC, khususnya pada komponen sumber laser yang merupakan sumber panas utama. Tekanan kerja mesin yang tinggi, pengaturan parameter pemotongan yang tidak sesuai, dan kinerja sistem pendinginan yang buruk semua menyebabkan panas tidak dapat dibuang secara efektif. Dalam situasi seperti ini, analisis diperlukan untuk mengidentifikasi penyebab utama overheat dan upaya perbaikan yang tepat untuk meningkatkan keandalan dan efisiensi pengoperasian mesin pemotong laser CNC.[2]

I. METODE

Metode yang digunakan dalam artikel ini adalah observasi lapangan langsung selama praktik kerja lapangan pada mesin pemotong CNC laser. Observasi dilakukan untuk mengetahui kondisi pengoperasian mesin dan proses overheating. Di antara hal-hal yang diamati adalah durasi operasi mesin, pengaturan parameter pemotongan, perubahan suhu kerja mesin, dan kondisi sistem pendinginan. Penekanan khusus diberikan pada bagian sumber laser yang merupakan sumber panas utama.

Observasi diawali dengan pengecekan kondisi awal mesin CNC laser cutting sebelum digunakan, meliputi kondisi sistem pendinginan, suhu awal mesin, dan kesiapan komponen utama. Selanjutnya dilakukan pengamatan selama proses pemotongan berlangsung hingga muncul indikasi *overheat*, seperti peningkatan suhu kerja dan alarm peringatan pada panel kontrol. Selain observasi langsung,Observasi dilakukan untuk mengetahui pola pengoperasian mesin, kondisi sistem pendinginan, serta perubahan suhu mesin selama proses pemotongan. Wawancara dilakukan untuk memperoleh informasi mengenai kendala yang sering dihadapi operator terkait overheat serta langkah-langkah penanganan yang selama ini diterapkan. Data yang diperoleh kemudian dianalisis dengan mengelompokkan faktor-faktor penyebab overheat menggunakan pendekatan diagram sebab-akibat (fishbone). Selain itu, disusun tabel kondisi aktual (As-Is) dan kondisi perbaikan (To-Be) untuk merumuskan rekomendasi penanggulangan secara sistematis.

II. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah metode fishbone diagram digunakan untuk menemukan penyebab overheat pada mesin CNC laser cutting, perbaikan dilakukan dari kondisi aktual (As-Is) menuju kondisi perbaikan (To-Be). Fokus perbaikan terletak pada elemen dominan yang telah diidentifikasi; ini terutama terkait dengan komponen sumber laser, sistem pendinginan, dan teknik pengoperasian mesin. Hasil perbaikan dievaluasi setelah penerapan usulan perbaikan, berdasarkan perubahan kondisi pengoperasian mesin dan respons mesin terhadap beban kerja.Ketika dioperasikan secara terus-menerus dengan daya laser tinggi dalam kondisi apa pun, mesin pemotong laser CNC sering mengalami overheat. Suhu air chiller dan aliran pendingin menjadi tidak stabil karena sistem pendinginan sumber laser tidak diawasi secara teratur.Kondisi ini menyebabkan alarm peringatan suhu muncul dan proses pemotongan dihentikan. Suhu kerja mesin menjadi lebih stabil dan jarang terjadi alarm overheat setelah perbaikan kondisi To-Be, termasuk pengaturan duty cycle dan jeda operasi mesin serta pemantauan suhu chiller secara berkala[3]

Perbaikan juga dilakukan pada metode pengoperasian mesin dengan menyesuaikan parameter pemotongan berdasarkan jenis dan ketebalan material. Pada kondisi *As-Is*, parameter pemotongan sering digunakan secara umum tanpa penyesuaian, sehingga meningkatkan beban kerja *laser source*. Setelah diterapkan kondisi *To-Be* berupa standarisasi parameter pemotongan, hasil pemotongan menjadi lebih konsisten dan beban panas yang diterima *laser source* berkurang. Hal ini menunjukkan bahwa penyesuaian parameter memiliki pengaruh signifikan terhadap penurunan risiko *overheat*.Selain itu, penerapan perawatan preventif secara terjadwal memberikan hasil positif terhadap kinerja mesin CNC laser cutting. Pada kondisi *To-Be*, pengecekan sistem pendinginan dan kondisi *laser source* dilakukan secara rutin, sehingga potensi gangguan dapat terdeteksi lebih awal. [4] Hasil pengamatan menunjukkan adanya penurunan frekuensi *downtime* akibat *overheat* dan peningkatan kontinuitas proses pemotongan. Dengan demikian, penerapan metode *fishbone diagram* yang dikombinasikan dengan analisis *As-Is* dan *To-Be* terbukti efektif dalam mengevaluasi dan meningkatkan kinerja mesin CNC laser cutting terhadap permasalahan *overheat*.

Penerapan VSM To-Be menunjukkan bahwa aktivitas produksi setelah perbaikan mengalami penurunan waktu henti mesin akibat *overheat*. Proses pemotongan dapat berjalan lebih konsisten tanpa gangguan alarm suhu, sehingga waktu proses menjadi lebih efisien. Dengan demikian, [5]VSM To-Be menjadi representasi visual dari hasil perbaikan yang telah dilakukan, sekaligus menunjukkan bahwa perbaikan berbasis analisis *fishbone* dan pendekatan *As-Is* ke *To-Be* memberikan dampak positif terhadap efisiensi dan keandalan proses produksi mesin CNC laser cutting.

Dalam mesin CNC laser cutting, terdapat beberapa komponen utama yang berperan langsung terhadap keberlangsungan proses pemotongan dan kestabilan kinerja mesin. Komponen-komponen tersebut menjadi objek kajian dalam penelitian ini karena berkaitan langsung dengan permasalahan overheat yang terjadi selama proses pengoperasian mesin.

Salah satu komponen utama tersebut adalah laser source, yang berfungsi sebagai sumber energi panas dalam proses pemotongan material. Sebagai bagian dari sistem mesin, kinerja laser source sangat dipengaruhi oleh kondisi operasional serta sistem pendukung yang bekerja bersamanya, khususnya dalam pengendalian suhu kerja.

A. *Laser Source*

Dalam mesin CNC *laser cutting, laser source* merupakan komponen utama yang berfungsi sebagai sumber energi panas untuk proses pemotongan material. Laser source menghasilkan sinar laser berdaya tinggi yang kemudian difokuskan melalui sistem optik menuju permukaan material. Kinerja laser source sangat dipengaruhi oleh kestabilan suhu kerja, karena komponen ini sensitif terhadap panas berlebih dan memerlukan sistem pendinginan yang optimal.

Berdasarkan hasil observasi di lapangan, [6]laser source menjadi salah satu komponen yang berkontribusi signifikan terhadap terjadinya overheat pada mesin *CNC laser cutting*.

Overheat pada laser source umumnya disebabkan oleh beban kerja yang tinggi dan pengoperasian mesin secara terus-menerus tanpa jeda pendinginan yang cukup. Ketika mesin digunakan dalam waktu lama dengan daya laser yang tinggi, panas yang dihasilkan oleh *laser source* meningkat secara signifikan. Apabila sistem pendinginan, baik berupa chiller air maupun kipas pendingin,[7] tidak bekerja secara optimal, maka panas tersebut akan terakumulasi dan menyebabkan suhu laser source melebihi batas aman operasional. Kondisi ini tidak hanya menurunkan efisiensi pemotongan, tetapi juga berpotensi menyebabkan penurunan umur pakai laser source.

Selain faktor beban kerja, kondisi sistem pendinginan *laser source* juga sangat berpengaruh terhadap terjadinya overheat. Chiller yang kotor, sirkulasi air pendingin yang tidak lancar, atau suhu air pendingin yang terlalu tinggi mengakibatkan proses pembuangan panas dari laser source tidak berjalan efektif. Berdasarkan hasil wawancara dengan teknisi, permasalahan overheat pada laser source sering kali diawali dari kurangnya perawatan rutin pada sistem pendingin, seperti keterlambatan penggantian air chiller dan filter pendingin.[8]

Dampak overheat pada laser source sangat signifikan terhadap kinerja mesin *CNC laser cutting*. *Overheat* dapat menyebabkan penurunan kestabilan daya laser, hasil potongan menjadi tidak konsisten, serta meningkatkan risiko terjadinya *fault* atau alarm pada sistem kontrol mesin.[9] Dalam kondisi tertentu, mesin akan berhenti secara otomatis sebagai bentuk perlindungan, yang mengakibatkan downtime produksi. Oleh karena itu, pengendalian suhu laser source menjadi faktor kritis dalam menjaga keandalan dan kontinuitas operasi mesin *CNC laser cutting.*

Upaya penanggulangan overheat pada *laser source* dapat dilakukan dengan memastikan sistem pendinginan bekerja secara optimal, melakukan pengaturan daya laser sesuai dengan ketebalan dan jenis material, serta menerapkan jadwal perawatan preventif secara berkala. Pengecekan suhu kerja *laser source*, kondisi chiller, dan aliran air pendingin perlu dilakukan secara rutin untuk mencegah terjadinya overheat. Dengan pengendalian yang baik terhadap *laser source*, risiko overheat pada mesin *CNC laser cutting* dapat diminimalkan dan performa mesin dapat dipertahankan pada kondisi optimal.[10]



Gambar 1. 1 *Laser Source*

Sebagai komponen yang bekerja dengan daya tinggi dan menghasilkan panas secara kontinu, laser source memerlukan sistem pendukung untuk menjaga kestabilan suhu kerja. Oleh karena itu, sistem pendinginan (cooling system) menjadi bagian penting yang berfungsi mengendalikan panas yang dihasilkan laser source selama proses pemotongan berlangsung.

B. Cooling System

Pada mesin CNC laser cutting, kesiapan mesin sebelum dioperasikan dapat diketahui dengan melakukan pengecekan pada sistem pendinginan (*cooling system*). Berdasarkan alat yang digunakan, pengecekan dilakukan dengan mengamati air pendingin yang keluar (*output*) dari mesin menuju penampungan.[11]

Mesin dinyatakan dalam kondisi normal dan siap digunakan apabila air pendingin yang keluar dari mesin masih terasa dingin dan mengalir dengan lancar. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem pendinginan bekerja dengan baik dan mampu menjaga suhu kerja *laser source* tetap stabil. Sebaliknya, apabila air output terasa hangat atau panas, [12]

hal tersebut menandakan sistem pendinginan tidak bekerja secara optimal dan mesin belum siap untuk dioperasikan karena berpotensi mengalami *overheat*.Oleh karena itu, pengecekan suhu air output menjadi salah satu langkah penting dalam memastikan mesin CNC laser cutting berada dalam kondisi aman dan normal sebelum proses pemotongan dilakukan.[13]

Namun, berdasarkan kondisi aktual di lapangan, sistem pendinginan yang digunakan belum sepenuhnya mampu menjaga kestabilan suhu laser source sehingga masih terjadi kondisi overheat. Untuk mengidentifikasi hubungan

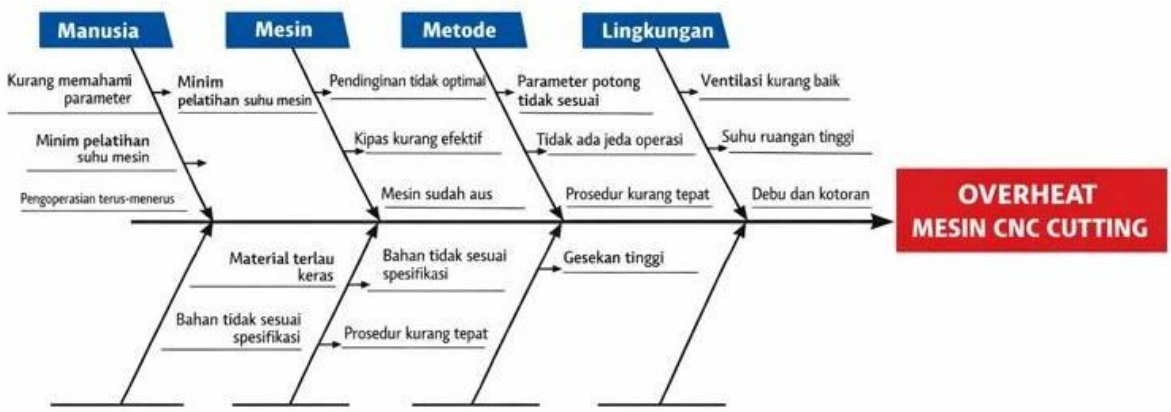
sebab dan akibat dari permasalahan tersebut, digunakan diagram fishbone sebagai alat analisis berdasarkan kondisi aktual (As-Is).



Gambar 1. 2 *Cooling System*

C. Fishbone

Diagram Fishbone digunakan untuk mengidentifikasi dan memetakan akar penyebab terjadinya overheat pada mesin CNC cutting secara sistematis. Faktor-faktor penyebab dikelompokkan ke dalam lima kategori utama, yaitu manusia, mesin, metode, material, dan lingkungan.



Gambar 1. 3 *Fishbone*

Tabel 1. 1 Hasil Analisis dengan Fishbone Diagram

Proses Kritis	Kondisi Aktual	Rekomendasi Perbaikan
Pengoperasian Mesin	Parameter pemotongan tidak konsisten	Penyesuaian parameter pemotongan sesuai jenis material dan SOP
Sistem Pendinginan	Coolant kotor dan aliran tidak lancar	Perawatan rutin dan penggantian coolant secara berkala
Lingkungan Kerja	Ventilasi kurang memadai	Penambahan kipas dan perbaikan sistem sirkulasi udara
Perawatan Mesin	Perawatan belum terjadwal	Penerapan *preventive maintenance* secara berkala

Hasil analisis fishbone menunjukkan bahwa permasalahan overheat dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti pengoperasian mesin, sistem pendinginan, pengaturan parameter cutting, serta pola perawatan mesin. Berdasarkan faktor-faktor tersebut, dirancang kondisi perbaikan (To-Be) sebagai upaya pengendalian overheat pada laser source

Perbaikan yang dirancang berdasarkan hasil analisis fishbone berdampak pada perubahan alur pengoperasian mesin CNC laser cutting, khususnya dalam pengendalian overheat dan penerapan jeda waktu operasi. Untuk menggambarkan kondisi alur proses setelah perbaikan, digunakan metode Value Stream Mapping (VSM) kondisi To-Be.

D. *Value Stream Mapping (VSM) To-Be*

Value Stream Mapping (VSM) To-Be digunakan untuk menggambarkan kondisi proses yang diharapkan setelah dilakukan perbaikan terhadap permasalahan overheat pada mesin CNC laser cutting. VSM To-Be berfokus pada pengurangan aktivitas tidak bernilai tambah (Non-Value Added) yang berkaitan dengan waktu tunggu akibat overheat, downtime mesin, serta rework hasil pemotongan. Perbaikan diarahkan pada komponen kritis, khususnya laser source dan sistem pendinginannya, agar aliran proses produksi menjadi lebih stabil dan efisien.

Penerapan VSM To-Be menekankan perbaikan pada tiga aspek utama, yaitu pengoperasian mesin, sistem pendinginan laser source, dan perawatan preventif. Dengan penerapan perbaikan tersebut, diharapkan waktu henti mesin akibat overheat dapat diminimalkan dan kontinuitas proses pemotongan dapat terjaga

Tabel 1. 2 Solusi Future State

Proses Kritis	Kondisi Aktual (As-Is)	Kondisi Perbaikan (To-Be)	Dampak Perbaikan
Pengoperasian Mesin	Mesin beroperasi terus-menerus dengan daya laser tinggi tanpa jeda	Pengaturan *duty cycle* dan jeda operasi sesuai standar	Beban panas berkurang dan suhu *laser source* lebih stabil
Respon Setelah Overheat	Mesin langsung dioperasikan kembali	Diberikan jeda pendinginan ±5–10 menit sebelum pemotongan dilanjutkan	Suhu *laser source* turun ke batas aman
Laser Source	Beban panas tinggi tanpa kontrol suhu	Monitoring suhu *laser source* selama operasi	Risiko overheat berulang berkurang
Sistem Pendinginan	Suhu air chiller sering tinggi dan tidak dipantau	Pemantauan suhu chiller secara berkala	*Proses pembuangan panas lebih efektif*
Parameter Cutting	Parameter digunakan secara umum	Parameter disesuaikan dengan jenis & ketebalan material	Beban kerja laser lebih ringan
Perawatan Mesin	Bersifat reaktif setelah gangguan	*Preventive maintenance* terjadwal	Potensi gangguan terdeteksi lebih awal
Alur Produksi	Sering terhenti akibat alarm overheat	Proses pemotongan lebih stabil dan berkelanjutan	*Waiting time* dan *downtime* menurun
Efisiensi Produksi	Waktu proses tidak konsisten	Alur produksi lebih terkontrol	Efisiensi produksi meningkat

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa permasalahan overheat pada mesin CNC cutting disebabkan oleh kombinasi beberapa faktor, yaitu faktor manusia, mesin, metode, material, dan lingkungan kerja. Faktor dominan penyebab overheat adalah beban kerja mesin yang berlebih akibat pengaturan parameter pemotongan yang tidak sesuai serta sistem pendinginan yang kurang optimal.Upaya penanggulangan overheat perlu difokuskan pada perbaikan sistem pengoperasian dan perawatan mesin secara menyeluruh. Rekomendasi perbaikan meliputi penyesuaian parameter pemotongan sesuai karakteristik material, optimalisasi sistem pendinginan, peningkatan ventilasi area kerja, serta penerapan program perawatan preventif secara terjadwal. Dengan penerapan rekomendasi tersebut, diharapkan suhu kerja mesin CNC cutting dapat terjaga pada kondisi normal, sehingga kinerja mesin, kualitas hasil pemotongan, dan umur pakai mesin dapat meningkat.

UCAPAN TERIMA KASIH

Saya sebagai Penulis mengucapkan terima kasih kepada Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya sehingga artikel ini dapat diselesaikan dengan baik. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada pihak perusahaan tempat pelaksanaan praktik kerja lapangan yang telah memberikan kesempatan, bimbingan, serta fasilitas selama proses magang berlangsung. Ucapan terima kasih disampaikan kepada dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, masukan, dan motivasi dalam penyusunan artikel ini. Tidak lupa penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah membantu, baik secara langsung maupun tidak langsung, sehingga artikel ini dapat diselesaikan dengan lanca

.

REFERENSI

[1] B. Tjahjono, R. M. Wattimena, A. Sai, and M. S. N. Ulum, "Pengaruh Kecepatan Potong Mesin CNC Laser Cutting terhadap Akurasi Potong untuk Efisiensi Proses Blanking," Jurnal Rekayasa Mesin, vol. 18, no. 3, pp. 453–462, 2023.

[2] M. Rajib, E. Atros, B. Sena, F. Hibatullah, and S. Permadi, "The Influence of CNC Laser Cutting Machine Parameters on the Cutting Quality," Jurnal Pendidikan Teknik Mesin Undiksha, vol. 13, no. 2, pp. 246–252, 2025.

[3] M. Rajib, E. Atros, and V. No, "Analisis Pengaruh Variasi Parameter Mesin CNC Laser Cutting terhadap Hasil Pemotongan Material SPHC 5 mm di PT. XYZ," Journal of Electrical and Electronic Machine Manufacturing, vol. 9, no. 1, pp. 121–129, 2025. doi: 10.30588/jeemm.v9i1.2163.

[4] V. No, "Analisis Pengaruh Pengaturan Parameter pada CNC Cutting Laser terhadap Kualitas Hasil Pemotongan pada Material Stainless Steel 304 di PT X," Journal of Electrical and Electronic Machine Manufacturing, vol. 9, no. 1, pp. 121–130, 2025. doi: 10.30588/jeemm.v9i1.2164.

[5] K. Dan, L. Pemotongan, P. Sus, R. Rakasita, B. W. Karuniawan, and A. I. Juniani, "Optimasi Parameter Mesin Laser Cutting Terhadap Kualitas Hasil Potong," Jurnal Teknik Industri, vol. 14, no. 2, pp. 45–52, 2016.

[6] N. Satyawardhana and M. S. Y. Lubis, "Optimasi Parameter Proses Laser Cutting terhadap Kekasaran Permukaan Material Acrylic Type Clear dengan Menggunakan Metode Taguchi," Jurnal Rekayasa Material dan Manufaktur, vol. 4, no. 1, pp. 5–10, 2020.

[7] G. Pressure, "Analisis Proses Laser Cutting dengan Variasi Cutting Speed, Jarak Focusline, dan Gas Pressure terhadap Kekerasan dan Kekasaran Material MS SPHC," Jurnal Dinamika Teknik Mesin, vol. 7, no. 2, pp. 160–169, 2023.

[8] L. T. Cutting, "Laser Tube Cutting Technologies and Applications," Industrial Manufacturing Review, vol. 11, no. 4, pp. 88–95, 2022.

[9] S. Rohmatulloh and M. Kusban, "Sistem Pengontrol pada CNC Laser Cutting Berbasis Mikrokontroler," EMITOR: Jurnal Teknik Elektro, vol. 24, no. 1, pp. 84–92, 2024. doi: 10.23917/emitor.v24i1.4365.

[10] A. Y. Aminy and M. Ikhsan, "Identifikasi Pengaruh Interaksi Potongan Laser Terhadap Material Kain Tekstil," Jurnal Produksi Keteknikan, vol. 28, no. 1, pp. 9–14, 2024. doi: 10.25042/jpe.052024.02.

[11] K. Xu, Y. Yang, W. Feng, M. Wan, and W. Zhang, "Internal Cooling Techniques in Cutting Process: A Review," Journal of Advanced Manufacturing Science and Technology, vol. 4, no. 4, pp. 1–19, 2024. doi: 10.51393/j.jamst.2024013.

[12] G. Wong et al., Recent Progress and Evolution of Coolant Usages in Conventional Machining Methods: A Comprehensive Review, London: Springer, 2022. doi: 10.1007/s00170-021-08182-0.

[13] R. Kumar, S. Sharma, R. Kumar, and S. Verma, "Review of Lubrication and Cooling in Computer Numerical Control (CNC) Machine Tools: A Content and Visualization Analysis, Research Hotspots and Gaps," CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, vol. 40, pp. 1–44, 2023.

[14] J. M. Smith and R. K. Taylor, "Thermal Management and Cooling System Optimization for High-Power Fiber Laser Sources in Industrial Cutting," International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 180, p. 103932, 2022. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2022.103932.

[15] D. Prasetyo and B. Hartono, "Reliability Centered Maintenance and Overheat Failure Mitigation in High-Precision CNC Laser Systems," Engineering Failure Analysis, vol. 142, p. 106750, 2022. doi: 10.1016/j.engfailanal.2022.106750.