

Analisis Pengaruh Pengaturan Parameter pada CNC Cutting Laser terhadap Kualitas Hasil Pemotongan pada Material Stainless Steel 304 di PT X

Hadi Nurwahyudin¹

Mochammad Rajib El Atros²

Mualif³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Mesin, Universitas Singaperbangsa Karawang, Jl. HS. Ronggo Waluyo, Puseurjaya, Telukjambe Timur, Karawang, Jawa Barat 41361

¹Korespondensi penulis: hadiwahyu623@gmail.com

Article Info: Received: February 22, 2025 Accepted: March 27, 2025 Available online: April 24, 2025
DOI: 10.30588/jeemm.v9i1.2164

Abstract: The advancement of manufacturing technology continues to drive optimization in material cutting processes, one of which is the use of CNC Laser Cutting machines. This study aims to analyze the effect of varying cutting parameters on the quality of Stainless Steel 304 cutting results at PT X. The parameters examined include cutting speed, laser power, gas pressure, and focal point. Experiments were conducted by adjusting these parameters and evaluating the results based on dimensional accuracy, surface cleanliness, and cutting quality. The findings indicate that an optimal combination of parameters can enhance cutting quality by reducing defects such as dimensional inaccuracies, rough surfaces, and oxidation on the cutting edges. The study concludes that proper parameter settings are crucial for improving production efficiency and final product quality in the manufacturing industry.

Keywords: CNC Laser Cutting, Stainless Steel 304, cutting parameters, cutting quality, manufacturing.

Abstrak: Perkembangan teknologi manufaktur semakin mendorong optimalisasi proses pemotongan material, salah satunya dengan penggunaan mesin CNC Laser Cutting. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi parameter pemotongan terhadap kualitas hasil pemotongan material Stainless Steel 304 di PT X. Parameter yang diuji meliputi kecepatan pemotongan, daya laser, tekanan gas, dan fokus lensa. Eksperimen dilakukan dengan mengatur parameter tersebut dan mengevaluasi hasilnya berdasarkan aspek ketepatan dimensi, kebersihan permukaan, serta kualitas potongan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi parameter yang optimal dapat meningkatkan kualitas pemotongan dengan mengurangi cacat seperti ketidakpresisian ukuran, permukaan kasar, dan oksidasi pada tepi potongan. Kesimpulan dari penelitian ini menekankan pentingnya pengaturan parameter yang tepat untuk meningkatkan efisiensi produksi dan kualitas hasil akhir dalam industri manufaktur.

Kata Kunci: CNC Laser Cutting, Stainless Steel 304, parameter pemotongan, kualitas hasil, manufaktur.

I. Pendahuluan

Kemajuan industri modern memerlukan inovasi berkelanjutan dalam metode produksi saat ini.. Hal ini dapat dipahami sebagai tren positif untuk proses pemenuhan kebutuhan barang. Sistem manufaktur dibuat menjadi lebih inovatif yang dapat menggabungkan aspek tingkat ketelitian tinggi dan juga tuntutan untuk pemenuhan komponen dengan konfigurasi yang lebih unik (Diasa et al., 2023). Kehadiran teknologi canggih memotivasi para pelaku industri untuk mencapai hasil yang optimal (Hidayat et al., 2021). Salah satunya adalah di industri manufaktur, yang melibatkan beberapa proses pemesinan, seperti pemotongan. Biasanya, proses pemotongan ini menggunakan mesin CNC (Computer

Numerical Control). Untuk pemotongan lembaran material, digunakan mesin CNC khusus, yaitu CNC Laser Cutting (Maviroh et al., 2017). Otomatisasi pemotongan di lingkungan industri dimungkinkan oleh kemampuan pemotongan laser untuk menerima data langsung dari komputer, yang memberikannya beberapa manfaat dibandingkan metode manufaktur lainnya. (Halim et al., 2022). Sistem manufaktur berbantuan komputer pemotongan laser CNC memberikan manfaat yang signifikan seperti siklus pengembangan produk yang dipersingkat, peningkatan efisiensi produksi, peningkatan kualitas produk, dan pengurangan konsumsi energi (Liu & Chang, 2023).

CNC Cutting Laser adalah salah satu pemesian modern yang digunakan untuk memotong material keras dengan proses yang relatif cepat. CNC Laser Cutting ini ditujukan agar meningkatkan hasil kualitas potongan. Salah satu kualitas yang dihasilkan yaitu permukaan yang halus disertai dengan kecepatan pemotongan yang relatif cepat (R et al., 2016). Dengan mesin cnc ketelitian suatu produk dapat dijamin hingga 1/100mm lebih, pengerjaan produk masal dengan hasil yang sama persis dan waktu pemesian yang cepat (Lesmana et al., 2023). Waktu proses pemotongan adalah salah satu fungsi objektif untuk masalah optimasi. Fungsi objektif ini bergantung pada enam parameter proses pemotongan: 1) kecepatan pemotongan; 2) panjang lintasan pahat pemotong; 3) kecepatan gerakan diam pahat; 4) panjang gerakan diam; 5) jumlah tusukan; 6) waktu satu tusukan (Petunin & Tavaeva, 2020).

Namun demikian, kesalahan yang sering terjadi selama fase input parameter proses pemotongan laser CNC dapat menyebabkan cacat pada material yang dipotong. (Nanda et al., 2023). Beberapa parameter penting yang mempengaruhi hasil akhir meliputi daya laser (laser power), kecepatan pemotongan (cutting speed), tekanan gas asistensi (assist gas pressure), dan fokus lensa (focal point) (Maviroh et al., 2017). Kombinasi yang tepat dari parameter-parameter ini sangat penting untuk mencapai hasil pemotongan yang optimal, adapun parameter keberhasilan Laser Cutting adalah kekasaran permukaan (mm), temperature (°C), kecacatan permukaan, tingkat kesesuaian pada desain (Karyadi et al., 2023). Pengaturan yang kurang tepat pada parameter-parameter ini dapat menyebabkan berbagai masalah pada hasil pemotongan, seperti ketidaktepatan dimensi/ukuran, permukaan yang kasar, dan timbulnya oksidasi pada tepi potongan. Oleh karena itu, pemahaman yang mendalam mengenai pengaruh setiap parameter proses sangat dibutuhkan untuk meningkatkan kualitas hasil pemotongan.

Material yang sering digunakan dalam proses pemotongan yaitu stainless steel, baja, aluminum, kuningan, galvanis dan lain-lain. Setiap material tentunya mempunyai pengaturan parameter yang berbeda. Pada penelitian ini difokuskan pada pemotongan material Stainless Steel 304. Baja tahan karat 304 merupakan material penting bagi industri nasional dan pengembangan pertahanan; baja ini berperan sebagai “pembuluh darah” industri. Bentuk baja tahan karat ini secara luas digunakan dalam mesin metalurgi, navigasi sipil dan militer, dan industri lainnya karena ketangguhan, plastisitas, kemampuan las, dan ketahanan korosinya yang sangat baik pada suhu standar dan rendah (K. Wang et al., 2024). Karena kekuatan mekanistik yang sangat baik, tahan panas, keuletan, dan ketahanan korosi, komponen yang terbuat dari baja tahan karat 304 tahan lama, andal, dan menarik secara estetika. Oleh karena itu, ia banyak digunakan dalam industri medis, kimia, energi, pertahanan, dan kedirgantaraan. Karena kekuatan mekanistiknya yang tinggi dan kecenderungannya terhadap pengerasan, baja tahan karat 304 memerlukan gaya pemotongan yang signifikan selama pemesian (C. Wang et al., 2025).

Penelitian ini dilakukan di PT. X dan berfokus pada analisis kualitas hasil pemotongan pada material Stainless Steel 304, menggunakan mesin CNC Laser Cutting. Melalui uji eksperimen dengan variasi parameter, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis bagaimana variasi parameter mesin CNC laser mempengaruhi kualitas hasil pemotongan pada material stainless steel 304. Dengan mengetahui pengaruh dari masing-masing parameter, diharapkan dapat diperoleh kombinasi parameter yang optimal untuk menghasilkan potongan dengan kualitas terbaik, sehingga dapat meningkatkan efisiensi dan kualitas produk akhir dalam proses manufaktur.

1.1. Mesin CNC Laser Cutting



Gambar 1. 1 Mesin CNC Laser Cutting.

Salah satu instrumen yang digunakan dalam industri untuk meningkatkan efisiensi pemotongan adalah pemotongan laser.. Proses pemotongan menggunakan laser menghasilkan potongan yang lebih presisi dan cepat, sehingga memberikan keuntungan dari segi kecepatan. Mesin laser cutting sering dimanfaatkan dalam industri untuk memotong pelat logam dan dapat mengatasi keterbatasan pada mesin-mesin konvensional. Alat ini bekerja dengan menggunakan sinar laser sebagai media pemotongan, yang didukung oleh gas pemotong untuk membantu proses pemotongan logam (Hidayat et al., 2021).

CNC cutting laser adalah salah satu pemersinan modern yang digunakan untuk memotong material keras dengan proses yang relatif cepat. CNC cutting laser ini ditujukan agar meningkatkan hasil kualitas pemotongan. Salah satu kualitas yang dihasilkan yaitu permukaan yang halus disertai dengan kecepatan pemotongan yang relatif cepat (R et al., 2016).

CNC laser cutting ini dilengkapi dengan DSP (Digital Signal Processing) untuk memotong atau mengukir material. Mesin ini dapat dioperasikan secara otomatis maupun manual saat mengatur desain dan parameter, yang dikontrol melalui monitor portabel. CNC laser cutting ini memiliki tiga fungsi utama, yaitu untuk memotong, mengukir, dan memberi tanda (marking) (Salam et al., 2020).

1.2. Komponen Mesin CNC Laser Cutting

a. **Mesin Utama**

Mesin utama adalah bagian mekanik yang bertugas menggerakkan sumbu X-Y-Z dan mendukung proses pemotongan material. Mesin laser cutting ini dilengkapi dengan komponen berkualitas tinggi untuk memastikan presisi dan stabilitas optimal, memungkinkan pergerakan akurat sesuai sistem kontrol yang ada.

b. **Generator Laser**

Generator laser merupakan sumber utama sinar laser pada mesin laser cutting dan salah satu komponen paling mahal dalam mesin ini.

c. **Lensa Laser**

Lensa laser berfungsi untuk menjaga stabilitas jalur sinar laser sesuai perencanaan. Lensa berkualitas tinggi mampu memfokuskan sinar tanpa menyebabkan penyimpangan sudut.

d. **Sistem CNC**

Sistem CNC berperan dalam pengaturan pemrograman komputer yang mengendalikan pergerakan sumbu laser.

e. **Power Supply**

Power supply adalah sumber daya listrik untuk mesin laser cutting, berfungsi untuk menghubungkan generator laser, pemotong, dan sistem kelistrikan.

f. **Kepala Pemotong Laser**

Kepala pemotong terdiri dari nozzle, lensa laser, dan sensor pengarah, yang mengatur pergerakan pada sumbu Z sesuai program. Tinggi kepala pemotong harus disesuaikan dengan jenis dan ketebalan material.

g. **Panel Kontrol**

Panel kontrol pada mesin laser mengatur dan mengendalikan proses pemotongan material.

h. **Motor Penggerak**

Motor penggerak adalah sistem utama yang menggerakkan mesin. Terdapat dua jenis motor yang sering digunakan, yaitu stepper motor dan servo motor.

i. **Chiller**

Chiller berfungsi menjaga suhu generator laser tetap stabil, mencegah overheating, dengan menyediakan air pendingin untuk memastikan operasi generator tetap optimal.

1.3. Prinsip Kerja CNC Laser Cutting

Laser cutting bekerja dengan mengarahkan daya laser maksimum ke material yang akan dipotong, sehingga material tersebut meleleh, terbakar, atau menguap dengan bantuan gas. Tekanan gas yang diberikan menghasilkan tepi potongan dengan permukaan berkualitas tinggi (Hidayat et al., 2021).

1. Resonator laser memancarkan sinar laser dengan diameter sekitar $\frac{3}{4}$ inci.
2. Sinar laser yang dihasilkan dibelokkan oleh lensa pembias agar dapat mengalir sesuai jalurnya tanpa adanya sudut penyimpangan.
3. Sinar laser tersebut kemudian diarahkan ke lensa fokus untuk mengonsentrasikan energi laser.
4. Laser yang telah difokuskan dilepaskan melalui nozzle bersama aliran gas bertekanan.
5. Sinar laser dan aliran gas kemudian bekerja secara otomatis untuk memotong benda kerja mengikuti pola yang ditentukan oleh sistem CNC.

1.4. Material Stainless Steel 304

Stainless steel 304 adalah jenis baja antikorosi yang menawarkan ketahanan luar biasa terhadap korosi, suhu ekstrem, dan berbagai kondisi lingkungan yang keras. Material ini memiliki sejumlah keunggulan, di antaranya:

a. **Tahan Korosi**

Stainless steel 304 memiliki ketahanan tinggi terhadap korosi berkat kandungan kromium dan nikel. Kromium berperan mengikat oksigen pada permukaan baja, membentuk lapisan pelindung yang mencegah oksidasi dan karat.

b. **Tahan Panas**

Stainless steel 304 juga memiliki ketahanan yang baik terhadap panas, sehingga cocok untuk penggunaan pada suhu tinggi.

Baja tahan karat telah menarik minat yang luas karena sifat mekaniknya yang luar biasa. Telah diketahui bahwa salah satu sifat mikrostruktur terpenting yang memungkinkan keseimbangan optimal antara kekuatan dan keuletan pada baja ini adalah adanya austenit metastabil. Ditemukan bahwa baja tahan karat austenitik 304 umumnya digunakan untuk memproses pipa berongga berpenampang kecil, berdinding tipis, dan batang padat (Xu et al., 2023). Struktur mikro baja tahan karat 304 sebagian besar berupa austenit poligonal, dan sejumlah kecil martensit terbentuk di batas butir. Ukuran butir rata-rata sekitar $150\ \mu\text{m}$, dan ukuran butirnya besar. Kekuatan luluh sampel pelat baja tahan karat 304 sekitar 260 MPa, kekuatan tarik sekitar 685 MPa, dan perpanjangan 57%. Kekuatan luluh spesimen batang baja tahan karat 304 sekitar 277 MPa, kekuatan tarik sekitar 675 MPa, dan perpanjangan 60% (J. Wang et al., 2024).

II. Bahan dan Metode

2.1. Alat dan Bahan

a. **Alat**

- Mesin CNC Laser Cutting : Alat untuk memotong material.
- Nozzle : Mengarahkan aliran gas.
- Kaliper : Mengukur dimensi hasil pemotongan.

b. Bahan

- Plat Stainless Steel 304 Ketebalan 3mm : Stainless steel 304 adalah jenis baja antikorosi yang menawarkan ketahanan luar biasa terhadap korosi, suhu ekstrem, dan berbagai kondisi lingkungan yang keras.
- Gas Nitrogen : Mencegah oksidasi pada material.

2.2. Metode Penelitian

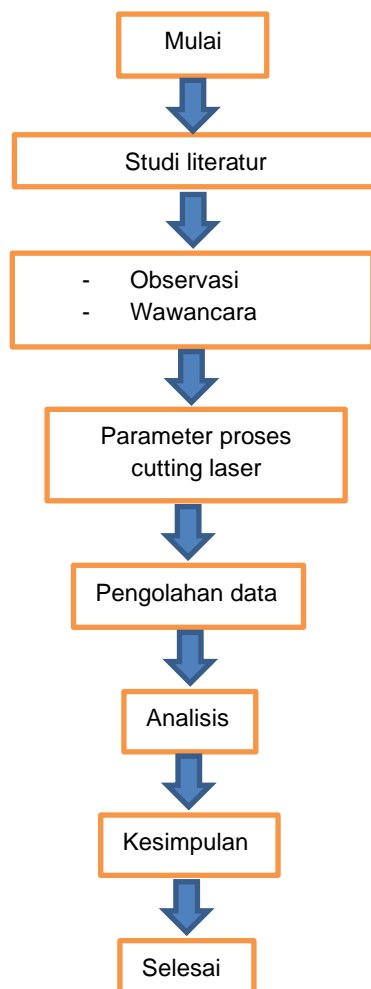
a. Studi Literatur

Penelitian ini dimulai dengan kajian literatur untuk memperoleh referensi ilmiah yang mendukung, seperti buku, jurnal, dan data statistik, guna memperkuat dasar teori mengenai pengaruh pengaturan parameter mesin CNC laser cutting terhadap kualitas pemotongan material stainless steel 304.

b. Observasi

Observasi bertujuan untuk mengumpulkan data yang ada di lapangan yang sifatnya valid dan objektif langsung dari objek atau subjek penelitian tanpa bergantung pada laporan maupun interpretasi orang lain.

2.3. Flowchart Penelitian



Gambar 2. 1 Flowchart Penelitian.

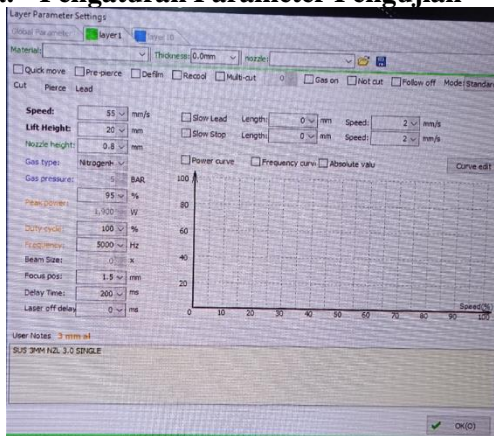
2.4. Prosedur Pengujian

- Persiapan Material
 - Ukur plat *Stainless Steel 304* (3 mm) dengan *kaliper* dan letakkan di meja mesin *CNC*.
- Pemeriksaan & Aktivasi Mesin
 - Pastikan koneksi mesin dalam kondisi baik.
 - Tekan *emergency stop* untuk keamanan, lalu hidupkan mesin dan komputer *CNC*.
 - Lalu kalibrai mesin guna meningkatkan keakuratan pemotongan.
- Mengunggah Desain & Pengaturan Jalur Potong
 - Unggah desain ke sistem *CNC*.
 - Atur *kerf* (outer 0,25 mm, inner 0,19 mm) dan *leadline* untuk kestabilan pemotongan.
- Pengaturan Parameter
 - Gunakan *nozzle single 3 mm*.
 - Atur *gas pressure*, *laser power*, dan *cutting speed* sesuai spesifikasi.
- Memulai Pemotongan
 - Pastikan desain terblok dengan benar.
 - Tekan Start pada *remote CNC* untuk memulai pemotongan.

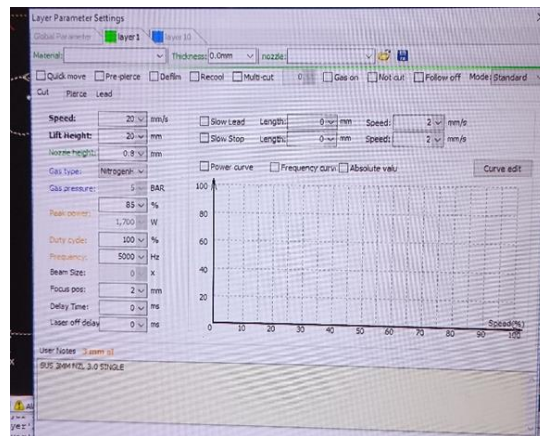
III. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Penelitian

a. Pengaturan Parameter Pengujian



(a)



(b)

Gambar 3. 1 Pengaturan Parameter Layer Cut Specimen (a) 1 dan (b) 2.

Tabel 3. 1 Perbandingan Pengaturan Parameter Layer Cut Specimen 1 dan Specimen 2

Parameter	Specimen 1	Specimen 2	Perbedaan
Speed	55 mm/s	20 mm/s	Kecepatan potong Specimen 1 lebih tinggi
Lift Height	20 mm	20 mm	Tidak ada perbedaan
Nozzle Height	0,8 mm	0,8 mm	Tidak ada perbedaan
Gas Type	Nitrogen	Nitrogen	Tidak ada perbedaan

Gas Pressure	5 BAR	5 BAR	Tidak ada perbedaan
Peak Power	1900 W	1700 W	Daya yang dikeluarkan mesin pada Specimen 1 lebih tinggi
Duty Cycle	100%	100%	Tidak ada perbedaan
Frequency	5000 Hz	5000 Hz	Tidak ada perbedaan
Beam Size	0 x	0 x	Tidak ada perbedaan
Focus Pos	1,5 mm	2 mm	Posisi focus pada Specimen 2 lebih tinggi
Delay Time	200 ms	0 ms	Waktu delay pada Specimen 1 lebih tinggi
Laser Off Delay	0 ms	0 ms	Tidak ada perbedaan
Diameter Nozzle	3.0 mm Single	3.0 mm Single	Tidak ada perbedaan

b. Hasil Pengujian

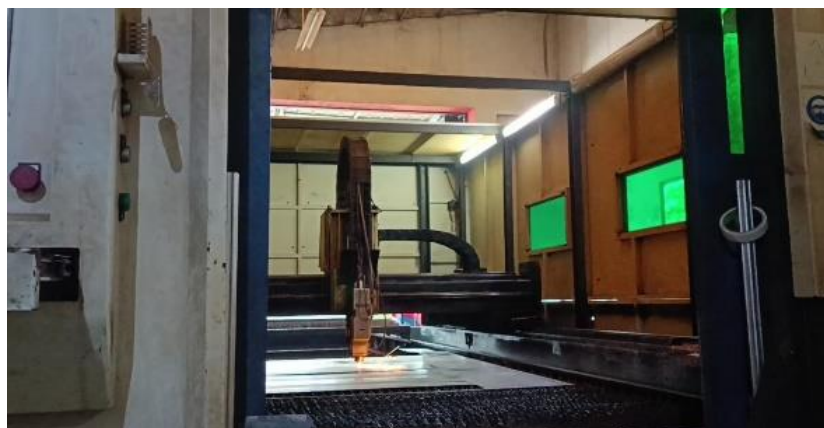


Specimen 1



Specimen 2

Gambar 3. 2 Hasil Pengujian Specimen 1 dan Specimen 2.



Gambar 3.3 Proses pemotongan

Tabel 3. 2 Perbandingan Hasil Pengujian Specimen 1 dan Specimen 2

Specimen 1	Specimen 2
Potongan yang tidak tembus	Potongan tembus
Permukaan yang kasar	Permukaan yang halus
Terdapat noda bekas laser	Permukaan yang bersih

Pembahasan:

Specimen 1 :

- Potongan yang tidak tembus, dikarenakan kecepatan yang terlalu tinggi dengan daya laser yang tinggi pula sehingga menyebabkan laser bergerak dengan sangat cepat yang mengakibatkan pelat tidak sepenuhnya terpotong.
- Permukaan yang kasar, dikarenakan daya laser yang terlalu tinggi sehingga menyebabkan material memuai dengan cepat.
- Terdapat noda bekas laser, dikarenakan daya laser yang terlalu tinggi sehingga percikan yang dihasilkan juga besar yang menyebabkan noda hitam.

Specimen 2 :

- Potongan tembus, kombinasi dari parameter yang sesuai terutama kombinasi kecepatan dengan daya laser yang tepat.
- Permukaan yang halus, kombinasi dari parameter yang sesuai terutama pada kesesuaian daya laser yang digunakan dalam proses pemotongan.
- Permukaan yang bersih, kombinasi dari parameter yang sesuai terutama pada kesesuaian daya laser yang digunakan dalam proses pemotongan.

3.2. Kegagalan Yang Sering Terjadi Pada Saat Pemotongan

a. Kekasaran Permukaan

Kegagalan ini berupa terdapat sisa potongan pada permukaan material berupa sisa lelehan material yang telah dipotong. Namun, kegagalan ini bisa dimaklumi dikarenakan masih bisa dilakukan pembersihan bekas potongan maupun lelehan pada permukaan material dengan menggunakan surface grinder machine. Akan tetapi, tidak semua orang memaklumi akan hal itu.

b. Ketidakpresisian Potongan

Kegagalan ini berupa ukuran material yang dipotong tidak sesuai dengan apa yang diinginkan atau melebihi batas toleransi yang ditentukan. Kegagalan ini terjadi karena settingan compensate yang tidak sesuai. Kegagalan ini biasanya terjadi pada bagian potongan berbentuk lingkaran atau lubang dikarenakan bentuk potongan berupa lubang harus sesuai dengan apa yang ditentukan karena biasanya potongan lubang ini dibuat untuk penempatan screw maupun pin.

c. Terjadinya Oksidasi

Oksidasi pada permukaan maupun tepi material stainless steel terjadi karena interaksi antara logam panas dengan oksigen. Hasilnya berupa warna kebiruan ataupun kecokelatan pada permukaan material. Hal ini juga yang menjadi alasan mengapa pemotongan pada material stainless steel harus menggunakan gas berupa nitrogen, yaitu untuk menghindari terjadinya oksidasi.

d. Pemotongan Tidak Tuntas

Pemotongan tidak tuntas dengan kata lain potongan yang tidak menembus material. Hal ini

bisa terjadi dikarenakan daya laser terlalu rendah dengan diiringi kecepatan yang terlalu tinggi. Akibatnya, material tidak sepenuhnya terpotong.

e. **Bekas Laser**

Kegagalan ini muncul ketika material yang terlalu panas, sehingga mengakibatkan bekas noda gelap maupun berwarna kuning pada area sekitar pemotongan.

f. **Distorsi Bentuk**

Distorsi bentuk material dengan kata lain pembengkokan material yang disebabkan pemusatan panas yang terjadi disuatu titik sehingga mengakibatkan material memuai. Hal tersebut disebabkan karena daya laser yang terlalu besar dengan kecepatan yang terlalu kecil.

g. **Kerusakan Tepi**

Kegagalan ini berupa ketidakrataan atau kekasaran pada bagian tepi material. Kegagalan ini mengakibatkan bagian tepi material yang bergelombang atau tidak halus. Kegagalan ini terjadi karena daya laser yang tidak menyesuaikan dengan ketebalan material dengan kecepatan pemotongan yang terlalu tinggi.

IV. Kesimpulan

CNC Laser Cutting merupakan sebuah inovasi pada dunia industri, terutama pada industri manufaktur. Laser cutting ini lebih efektif dan efisien jika dibandingkan dengan mesin konvensional manual, karena laser cutting ini mampu memotong sebuah material dengan hasil yang maksimal dengan waktu yang singkat. Akan tetapi, dibalik hasil yang maksimal tentunya harus dilakukan pengaturan parameter-parameter yang ada pada laser cutting. Jika tidak, hasil yang didapatkan kurang maksimal bahkan bisa saja terjadi kegagalan pada proses pemotongan.

Terdapat beberapa parameter pada CNC laser cutting, contohnya kecepatan potong, daya laser, tekanan gas dan lain-lain. Parameter-parameter yang ada pada laser cutting dikombinasikan agar mendapatkan hasil yang maksimal dan juga sesuai keinginan serta layak pakai. Akan tetapi, kadang dari kombinasi yang telah dilakukan terhadap parameter laser cutting masih menghasilkan hasil yang kurang maksimal.

Kegagalan yang sering kali terjadi dalam proses pemotongan menggunakan laser cutting yaitu terdapat permukaan dan sisi yang masih kasar, dan juga material yang dipotong tidak tembus atau tidak sepenuhnya terpotong. Maka, perlu dilakukan pengamatan terhadap percobaan pengaturan parameter laser cutting agar mendapatkan hasil yang maksimal.

Pada kedua percobaan proses pemotongan pada material stainless steel 304 dengan ketebalan yang berbeda menggunakan CNC laser cutting menghasilkan hasil yang maksimal dengan parameter yang berbeda. Hasil yang didapatkan yaitu semua parameter mempunyai pengaruh masing-masing terhadap hasil yang didapatkan. Akan tetapi, parameter yang paling berpengaruh secara signifikan yaitu kecepatan pemotongan, daya laser, dan juga tekanan gas. Parameter-parameter yang ada juga tentunya harus menyesuaikan dengan jenis material dan juga ketebalan material yang akan dipotong.

Daftar Pustaka

- Diasa, N., Suhadi, A., & Karyadi. (2023). Rekayasa Parameter Pemotongan Dengan Mesin CNC Tipe Fiber Laser Cutting A1 untuk Produk Dudukan Spring Coil. *Teknobiz : Jurnal Ilmiah Program Studi Magister Teknik Mesin*, 13(1), 57–62. <https://doi.org/10.35814/teknobiz.v13i1.4850>
- Halim, G., Asroni, A., & Budiyanto, E. (2022). Analisa kerja mesin CNC laser cutting CO2 2 axis berbasis MACH3 pada variasi pemotongan. *ARMATUR : Artikel Teknik Mesin & Manufaktur*, 3(1), 28–36. <https://doi.org/10.24127/armatur.v3i1.1935>
- Hidayat, M. A., Farid, A., & Suwandono, P. (2021). Analisa parameter pada pemotongan plate menggunakan CNC fiber laser cutting terhadap kekasaran permukaan. *Turbo : Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 10(2), 239–247. <https://doi.org/10.24127/trb.v10i2.1737>
- Karyadi, K., Nanda, R. A., & Suhara, A. (2023). Analisa Cacat Timbul pada Material Aluminium Akibat Pemotongan Menggunakan Laser Cutting. *VOCATECH: Vocational Education and Technology*

- Journal*, 5(1), 33–46. <https://doi.org/10.38038/vocatech.v5i1.127>
- Lesmana, B., Heryana, G., & Jatira. (2023). Perancangan Sistem Kendali Mesin CNC (Computer Numerical Control) laser Cutting CO2 2 Axis Berbasis Arduino Uno. *Journal of Applied Mechanical Technology*, 2(2), 28–33. <https://doi.org/10.31884/jamet.v2i2.43>
- Liu, X., & Chang, D. (2023). An Improved Method for Optimizing CNC Laser Cutting Paths for Ship Hull Components with Thicknesses up to 24 mm. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/jmse11030652>
- Maviroh, P. A., Karuniawan, B. W., & Rachman, F. (2017). *Optimasi Kekasaran Permukaan dan Laju Pemotongan pada Mesin Laser cutting Menggunakan Material SUS 316L dengan Metode Taguchi dan Neural Network*. 2654, 191–199.
- Nanda, R. A., Danuarta, M., & Sunandar, A. A. (2023). Pelatihan CNC Laser Cutting Untuk Siswa SMK Plus Laboratorium Karawang: Penunjang Karir Siswa. *Jurnal Pengabdian Masyarakat Dan Penelitian Terapan*, 1(3), 118–129. <https://doi.org/10.38035/jpmpt.v1i3>
- Petunin, A., & Tavaeva, A. (2020). The Dependence of Actual Laser Cutting Speed on CNC Sheet Equipment on Number of NC Program Commands for Metal Grades 1.0114 and AWA1Mg3. *Journal of Physics: Conference Series*, 1527(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1527/1/012013>
- R, R., BW, K., & Juniani, A. I. (2016). Optimasi Parameter Mesin Laser Cutting Terhadap Kekasaran Dan Laju Pemotongan Pada Sus 316L Menggunakan Taguchi Grey Relational Analysis Method. *J@ti Undip : Jurnal Teknik Industri*, 11(2), 97. <https://doi.org/10.14710/jati.11.2.97-106>
- Salam, A., Mukhtar, & Trisbenheiser. (2020). Rancang Bangun Mesin CNC Laser Cutting Sebagai Media Pembelajaran. *Prosiding 4th Seminar Nasional Penelitian & Pengabdian Kepada Masyarakat 2020*, 173–178.
- Wang, C., Li, Y., Gao, F., Wu, K., Yin, K., He, P., & Xu, Y. (2025). Milling-Force Prediction Model for 304 Stainless Steel Considering Tool Wear. *Machines*, 13(1), 1–17. <https://doi.org/10.3390/machines13010072>
- Wang, J., Cao, X., Chen, J., Zou, J., Hu, Y., & Huang, R. (2024). Study on deformation-induced martensitic transformation behavior of 304 and 316 stainless steels. *Journal of Physics: Conference Series*, 2760(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2760/1/012014>
- Wang, K., Liu, H., Liu, N., Chen, X., & Chen, J. (2024). Effect of Oxidant Concentration on the Oxide Layer Thickness of 304 Stainless Steel. *Materials*, 17(12), 1–11. <https://doi.org/10.3390/ma17122816>
- Xu, J., Wang, G., & Liu, R. (2023). On the Similarity Relationship between the Structural-Steel Prototype and the 304-Stainless-Steel Dynamic Scale Model. *Buildings*, 13(12), 1–14. <https://doi.org/10.3390/buildings13122966>