

Analisis Karakteristik Kekasaran Permukaan dan Kekerasan Pelat SS304 pada Variasi Daya dan Kecepatan Pemotongan Fiber Laser

Ahmad Jalaluddin Mahtum¹, Hisyam Ma'mun², Muhammad Faesal Febriandyono³, Yuris Setyoadi⁴

^{1,2,3,4}Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Persatuan Guru Republik Indonesia Semarang, Jawa Tengah, Indonesia

Email: : ¹udino3945@gmail.com · ²hisyam@upgris.ac.id , ³muhammadfaesalfebriandyono@upgris.ac.id,

⁴yurissetyoadi@upgris.ac.id

Email Penulis Korespondensi: ¹muhammadfaesalfebriandyono@upgris.ac.id

INFO ARTIKEL	ABSTRAK
Kata Kunci: Daya Laser Kekasaran Permukaan Kekerasan Vickers Kecepatan Potong Optimasi Proses Stainless Steel 304	Industri manufaktur membutuhkan proses pemotongan logam yang presisi, efisien, serta mampu mempertahankan kualitas permukaan dan sifat mekanik material. Pada proses <i>laser cutting</i> , ketidaktepatan daya laser dan kecepatan potong dapat meningkatkan kekasaran serta mengubah kekerasan Stainless Steel 304 akibat siklus termal pemotongan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik perubahan nilai kekasaran permukaan serta kekerasan baja tahan karat SS304 akibat variasi daya laser dan kecepatan pemotongan. Penelitian menggunakan metode eksperimen faktorial 3×3 pada pelat SS304 setebal 2 mm dengan daya laser 1175, 1200, dan 1350 W serta kecepatan potong 1950, 2300, dan 2600 mm/min. Kekasaran diuji berdasarkan nilai Ra dan Rt, sedangkan kekerasan diuji menggunakan metode Vickers. Hasil penelitian menunjukkan nilai Ra sebesar 0,187–0,513 μm dan kekerasan sebesar 169,27–184,83 HV. Permukaan terbaik diperoleh pada daya 1175 W dan kecepatan 2300 mm/min, sedangkan kekerasan tertinggi diperoleh pada daya 1175 W dan kecepatan 2600 mm/min. Hasil penelitian diharapkan memberikan data eksperimental mengenai karakteristik material pada kondisi pemotongan yang diuji.
Keywords: Laser Power Surface Roughness Vickers Hardness Cutting Speed Process Optimization Stainless Steel 304	Abstract The manufacturing industry requires metal cutting processes that are precise and efficient while maintaining surface quality and material mechanical properties. In laser cutting, inaccuracies in laser power and cutting speed can increase surface roughness and alter the hardness of 304 stainless steel due to the thermal cycle of the cutting process. This study aims to analyze changes in surface roughness and hardness characteristics of SS304 stainless steel resulting from variations in laser power and cutting speed. A 3×3 factorial experimental design was employed on 2 mm thick SS304 plates, utilizing laser powers of 1175, 1200, and 1350 W and cutting speeds of 1950, 2300, and 2600 mm/min. Roughness was evaluated based on Ra and Rt values, while hardness was measured using the Vickers method. The results showed Ra values ranging from 0.187 to 0.513 μm and hardness values between 169.27 and 184.83 HV. The best surface quality was achieved at a power of 1175 W and a speed of 2300 mm/min, whereas the highest hardness was obtained at 1175 W and 2600 mm/min. The study's novelty lies in the simultaneous evaluation of roughness and hardness. The findings can serve as a reference for operating parameters to enhance production quality and efficiency.
JuKSIT is licensed under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License 	

1. PENDAHULUAN

Industri manufaktur di era Industri 4.0 menuntut adanya teknologi pemotongan logam yang cepat, presisi, dan berkualitas tinggi, salah satunya melalui penerapan teknologi *laser cutting* [1], [2]. *Laser cutting* merupakan metode pemotongan termal tanpa kontak yang sangat efektif dan banyak diaplikasikan pada Stainless Steel 304 (SS304), yaitu baja tahan karat yang umum digunakan dalam berbagai komponen industri [3]. Kualitas tepi potongan pada material ini

sangat bergantung pada pengaturan parameter operasi, terutama daya laser dan kecepatan potong, karena kedua faktor tersebut menentukan besarnya energi panas yang diterima material selama proses berlangsung [4], [5].

Pengaturan daya laser dan kecepatan potong yang tidak tepat dapat menimbulkan berbagai masalah, seperti pelelehan berlebihan, pembentukan dross (penempelan kembali logam cair), serta perubahan tingkat kekasaran permukaan dan kekerasan material akibat siklus termal [6], [7]. Meskipun banyak penelitian sebelumnya telah mengkaji optimasi mesin *laser cutting*, mayoritas penelitian tersebut masih terbatas pada evaluasi kekasaran permukaan, lebar *kerf*, atau tinggi *dross* saja [8], [9]. Masih sangat jarang penelitian yang mengevaluasi secara simultan pengaruh variasi daya dan kecepatan potong terhadap perubahan kekasaran sekaligus kekerasan mekanik pada material SS304 secara spesifik [10], [11].

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi daya laser dan kecepatan potong terhadap kekasaran permukaan dan kekerasan material SS304, serta mencari kombinasi parameter yang paling optimal. Secara praktis, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi landasan teknis bagi industri manufaktur dalam penentuan standar operasional mesin *laser cutting*, sehingga mampu meningkatkan kualitas hasil pemotongan, meminimalkan cacat produk dan pemborosan material, serta mengefisienkan waktu dan biaya produksi.



Gambar 1. Cnc Fiber Laser Cutting

(Sumber : <https://www.istockphoto.com/id/foto-foto/laser-cutting-metal>)

2. METODOLOGI PENELITIAN

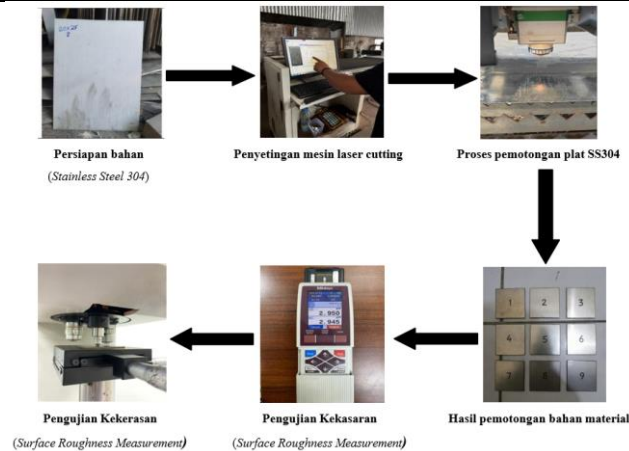
2.1. Diagram Alir Tahapan Penelitian

Tahap awal penelitian dimulai dari persiapan bahan berupa *Stainless Steel 304* (SS304), kemudian dilanjutkan dengan proses penyetingan parameter mesin *laser cutting* dan proses pemotongan pelat SS304 menggunakan mesin *laser cutting*. Parameter proses yang digunakan dalam penelitian meliputi variasi *Laser power* dan *Cutting Speed* untuk mengamati karakteristik hasil pemotongan pada berbagai kombinasi parameter proses material.

Setelah proses pemotongan selesai, spesimen hasil pemotongan dilakukan pengujian karakterisasi yang meliputi pengujian kekasaran permukaan dan pengujian kekerasan material. Pengujian kekasaran permukaan dilakukan untuk menentukan tingkat kekasaran yang digunakan sebagai parameter dalam menilai kualitas hasil pemotongan. sementara itu, pengujian kekerasan menggunakan metode *Vickers* bertujuan untuk mengetahui perubahan sifat mekanik material yang terjadi sebagai akibat dari proses pemotongan laser. Data hasil pengujian selanjutnya dianalisis untuk mengetahui pengaruh parameter proses terhadap kualitas permukaan dan sifat mekanik material SS304.



Gambar 2. Diagram Alir

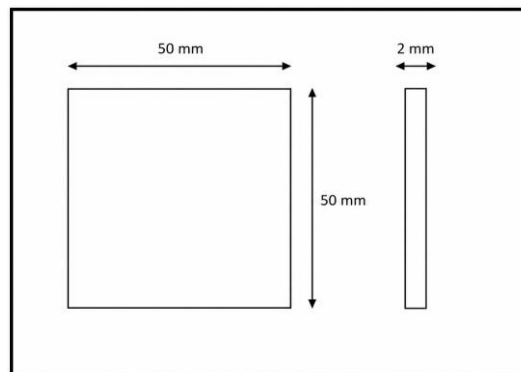


Gambar 3. Proses Alur Pembuatan

2.2. Dimensi Ukuran Bahan dan Variabel Penelitian

Penelitian ini menerapkan metode eksperimen untuk menganalisis pengaruh variasi parameter proses pemotongan laser terhadap karakteristik hasil pemotongan material *Stainless Steel 304*. Parameter proses yang dianalisis meliputi *Laser power* dan *Cutting Speed*, sedangkan karakteristik respon yang diamati berupa kekasaran permukaan dan kekerasan material setelah proses pemotongan.

Material yang digunakan dalam penelitian ini berupa baja tahan karat SS304 dengan ketebalan 2 mm. Spesimen penelitian dipersiapkan dengan ukuran 5×5 cm untuk setiap sampel pengujian. Proses pemotongan dilakukan menggunakan mesin *laser cutting* dengan Variasi daya laser yang digunakan dalam penelitian ini meliputi 1175 W dan 1200 W, dan 1350 W, disertai variasi *Cutting Speed* sebesar 1950 mm/min, 2300 mm/min, dan 2600 mm/min. Selama proses pemotongan, parameter lainnya dipertahankan konstan, yaitu diameter nozzle sebesar 1,5 mm dan tekanan gas bantu sebesar 1 bar.



Gambar 4. Sampel Benda Kerja

Kombinasi variasi *Laser power* dan *Cutting Speed* menghasilkan sembilan spesimen pengujian. Pada penelitian ini, setiap kombinasi parameter pemotongan direpresentasikan oleh satu spesimen uji, sehingga diperoleh sembilan spesimen dengan sembilan kondisi parameter yang berbeda. Pengujian kekasaran permukaan dilakukan satu kali pada setiap spesimen tanpa adanya pengulangan spesimen. Oleh karena itu, data kekasaran yang diperoleh digunakan untuk menganalisis karakteristik perubahan nilai kekasaran pada setiap variasi parameter secara deskriptif. Rancangan parameter proses bahan yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Variasi Parameter Proses *FiberLaser cutting*

Sampel	<i>Laser power</i> (W)	<i>Cutting Speed</i> (mm/min)	Nozzle (mm)	Tekanan Gas (bar)
1	1175	1950	1,5	1
2	1175	2300	1,5	1
3	1175	2600	1,5	1
4	1200	1950	1,5	1

5	1200	2300	1,5	1
6	1200	2600	1,5	1
7	1350	1950	1,5	1
8	1350	2300	1,5	1
9	1350	2600	1,5	1

Setelah proses pemotongan selesai, seluruh spesimen dilakukan pengujian karakterisasi untuk mengetahui pengaruh perubahan parameter proses terhadap kualitas permukaan dan sifat mekanik material.

2.3. Pengukuran Kekasaran Permukaan (*Surface Roughness Measurement*)

Pengukuran kekasaran permukaan dilakukan menggunakan Surface Roughness Tester Mitutoyo untuk memperoleh parameter Ra (Average Roughness) dan Rt (Maximum Height of Profile) sebagai indikator karakteristik permukaan hasil pemotongan. Pengukuran dilakukan pada masing-masing spesimen hasil pemotongan sesuai kombinasi parameter yang telah ditentukan. Pengukuran dilakukan dengan tujuan memperoleh parameter kekasaran permukaan berupa Ra (*Average Roughness*) dan Rt (*Maximum Height of Profile*) sebagai indikator kualitas permukaan hasil pemotongan. Karena setiap kombinasi parameter hanya menggunakan satu spesimen, nilai kekasaran yang diperoleh merupakan nilai hasil pengukuran pada kondisi pemotongan tersebut dan tidak merupakan nilai rata-rata dari beberapa spesimen.



Gambar 5. *Surface Roughness Tester Mitutoyo*

(Sumber : <https://mohawktheater.com/mitutoyo-profilometer-calibration-standard/>)

2.4. Pengukuran Kekerasan Permukaan (*Vickers Hardness Tester*)

Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan *Vickers Hardness Tester* dengan metode indentasi *Vickers*. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui perubahan sifat mekanik material akibat pengaruh siklus termal selama proses *laser cutting*. Nilai kekerasan diperoleh berdasarkan ukuran diagonal jejak indentasi dan dinyatakan dalam satuan *Vickers Hardness* (HV).



Gambar 6. *Vickers Hardness Tester*

(Sumber : <https://www.ndpac.com/product/digital-vickers-hardness-tester-of-precision-turret/>)

Data hasil pengujian dianalisis secara kuantitatif dengan membandingkan perubahan nilai kekasaran permukaan (R_a dan R_t) serta nilai kekerasan *Vickers* (HV) pada setiap variasi parameter proses. Penelitian ini menggunakan sembilan kombinasi parameter yang terdiri dari tiga tingkat daya laser, yaitu 1175, 1200, dan 1350 W, serta tiga tingkat kecepatan pemotongan, yaitu 1950, 2300, dan 2600 mm/min. Setiap kombinasi parameter menggunakan satu spesimen. Oleh karena itu, analisis hasil dilakukan secara deskriptif berdasarkan nilai pengujian pada masing-masing kondisi dan tidak digunakan untuk pengujian signifikansi statistik.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Variasi Parameter Proses *Laser cutting*

Menyajikan hasil eksperimen, implementasi, simulasi, observasi, atau pengujian secara sistematis. Seluruh tabel, gambar, dan grafik harus dirujuk dalam naskah dan diberi nomor secara berurutan.

Tabel 1. Variasi Parameter Pemotongan

Spesimen	Kecepatan Pemotongan (mm/min)	Daya Laser (W)
1A	1950	1175
2B	2300	1175
3C	2600	1175
4A	1950	1200
5B	2300	1200
6C	2600	1200
7A	1950	1350
8B	2300	1350
9C	2600	1350

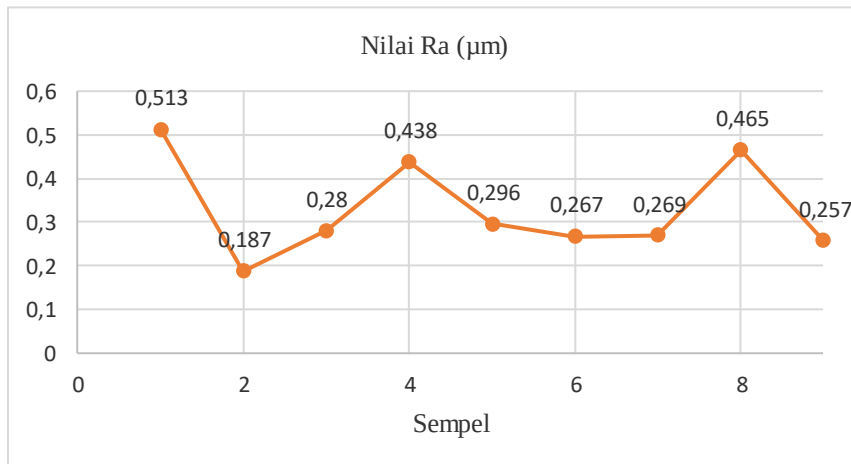
Variasi parameter pada Tabel 1 menunjukkan bahwa penelitian menggunakan rancangan faktorial 3×3 , yaitu tiga variasi *Laser power* (1175 W, 1200 W, dan 1350 W) serta tiga variasi *Cutting speed* (1950 mm/min, 2300 mm/min, dan 2600 mm/min). Kombinasi tersebut menghasilkan sembilan spesimen pengujian yang digunakan untuk mengevaluasi karakteristik perubahan nilai kekasaran permukaan dan kekerasan material pada setiap kondisi parameter pemotongan.

3.2 Hasil Pengujian Kekasaran Permukaan

Pengujian kekasaran permukaan dilakukan untuk mengevaluasi karakteristik permukaan hasil proses pemotongan laser. Parameter yang digunakan adalah R_a (Average Roughness) sebagai indikator tingkat ketidakrataan permukaan akibat proses pemotongan. Setiap kombinasi parameter memiliki satu nilai pengukuran karena pengujian dilakukan pada satu spesimen tanpa replikasi. Hasil Analisis Kekasaran Permukaan ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Data Hasil Pengujian Kekasaran Permukaan R_a

Sampel	<i>Laser power</i> (W)	<i>Cutting Speed</i> (mm/min)	R_a (μm)
1	1175	1950	0,513
2	1175	2300	0,187
3	1175	2600	0,28
4	1200	1950	0,438
5	1200	2300	0,296
6	1200	2600	0,267
7	1350	1950	0,269
8	1350	2300	0,465
9	1350	2600	0,257

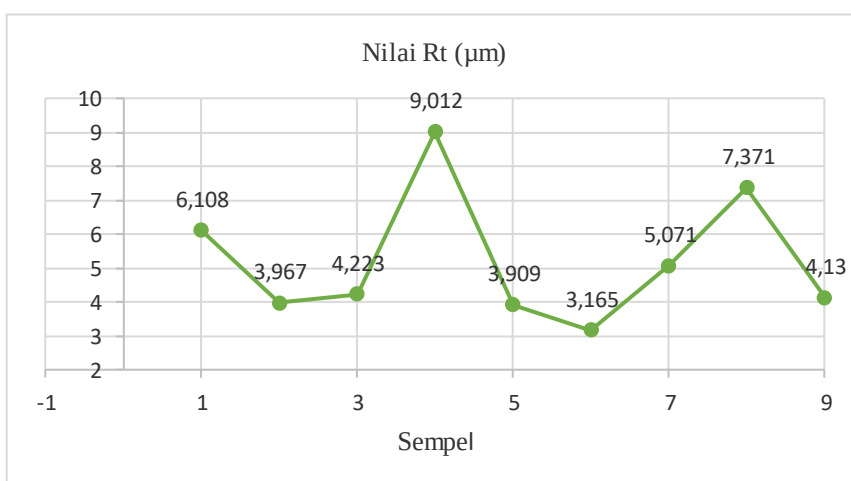


Gambar 7. Grafik Hasil Nilai Ra

Berdasarkan hasil pengujian, nilai Ra berada pada rentang 0,187–0,513 µm. Nilai kekasaran terendah diperoleh pada sampel 2 dengan kombinasi Laser power 1175 W dan Cutting Speed 2300 mm/min sebesar 0,187 µm. Sedangkan nilai kekasaran tertinggi diperoleh pada sampel 1 dengan kombinasi Laser power 1175 W dan Cutting Speed 1950 mm/min sebesar 0,513 µm.

Tabel 3. Data Hasil Pengujian Kekasaran Permukaan Rt

Sampel	Laser power (W)	Cutting Speed (mm/min)	Rt (µm)
1	1175	1950	6,108
2	1175	2300	3,967
3	1175	2600	4,223
4	1200	1950	9,012
5	1200	2300	3,909
6	1200	2600	3,165
7	1350	1950	5,071
8	1350	2300	7,371
9	1350	2600	4,13



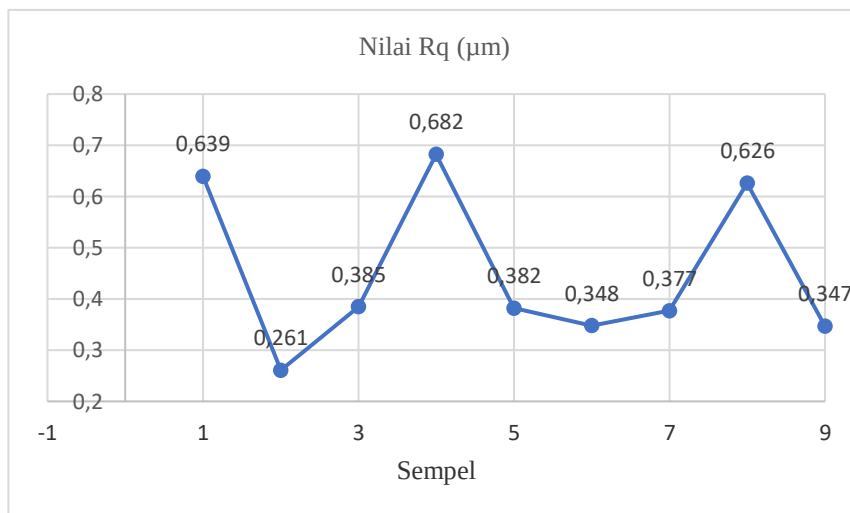
Gambar 8. Grafik Hasil Nilai Rt

Nilai Rt menunjukkan tinggi maksimum profil permukaan. Perbedaan nilai Rt menunjukkan adanya pengaruh energi panas dan kestabilan pelelehan material selama proses pemotongan. Selain parameter Ra dan Rt, pengujian

kekasaran permukaan juga dianalisis menggunakan parameter *Root Mean Square Roughness* (Rq) dan tinggi maksimum profil kekasaran (Rz). Parameter Rq menunjukkan nilai rata-rata kuadrat penyimpangan profil permukaan, sedangkan Rz menunjukkan perbedaan tinggi profil permukaan maksimum pada hasil pemotongan *Stainless Steel 304*.

Tabel 4. Data Hasil Pengujian Kekasaran Permukaan Rq

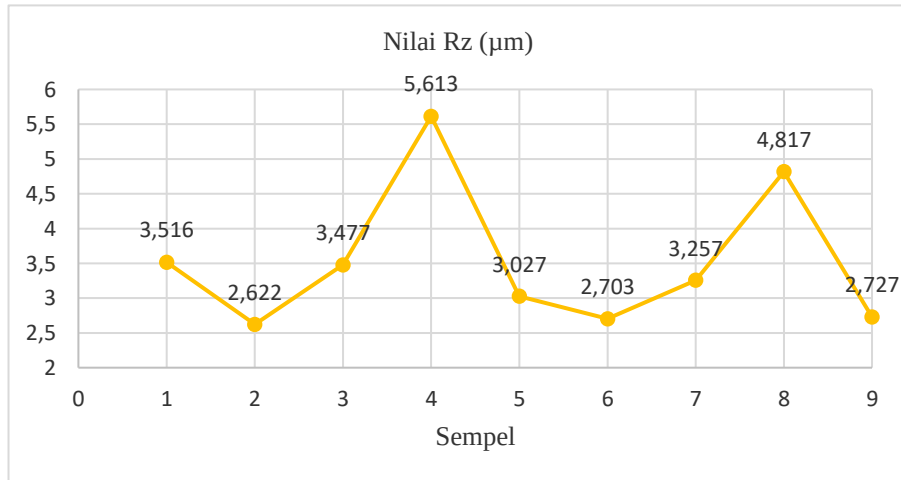
Sampel	Laser power (W)	Cutting Speed (mm/min)	Rq (μm)
1	1175	1950	0,639
2	1175	2300	0,261
3	1175	2600	0,385
4	1200	1950	0,682
5	1200	2300	0,382
6	1200	2600	0,348
7	1350	1950	0,377
8	1350	2300	0,626
9	1350	2600	0,347



Gambar 9. Grafik Hasil Nilai Rq

Tabel 5. Data Hasil Pengujian Kekasaran Permukaan Rz

Sampel	Laser power (W)	Cutting Speed (mm/min)	Rz (μm)
1	1175	1950	3,516
2	1175	2300	2,622
3	1175	2600	3,477
4	1200	1950	5,613
5	1200	2300	3,027
6	1200	2600	2,703
7	1350	1950	3,257
8	1350	2300	4,817
9	1350	2600	2,727



Gambar 10. Grafik Hasil Nilai Rz

Parameter Rq dan Rz memberikan informasi tambahan mengenai karakteristik profil permukaan. Nilai Rq dan Rz yang rendah menunjukkan profil permukaan lebih stabil dengan penyimpangan yang lebih kecil. Data ini digunakan sebagai pendukung analisis Ra dan Rt dalam menentukan kualitas hasil pemotongan.

3.3 Pembahasan Pengaruh Parameter Laser terhadap Kekasaran Permukaan

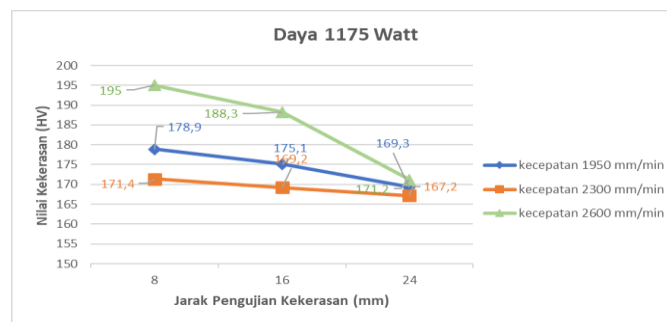
Perbedaan kombinasi Laser power dan Cutting Speed menghasilkan variasi nilai kekasaran permukaan. Berdasarkan hasil pengujian, perubahan parameter pemotongan menunjukkan adanya kecenderungan perubahan karakteristik permukaan hasil laser cutting.

3.4 Hasil Pengujian Kekerasan Vickers

Pengujian kekerasan menggunakan metode Vickers untuk mengetahui perubahan sifat mekanik material yang disebabkan oleh pengaruh siklus termal selama proses pemotongan laser. Pengujian dilakukan pada sembilan spesimen dengan tiga titik pengukuran pada masing-masing specimen.

Tabel 6. Data Hasil Pengujian Kekerasan Vickers Daya 1175

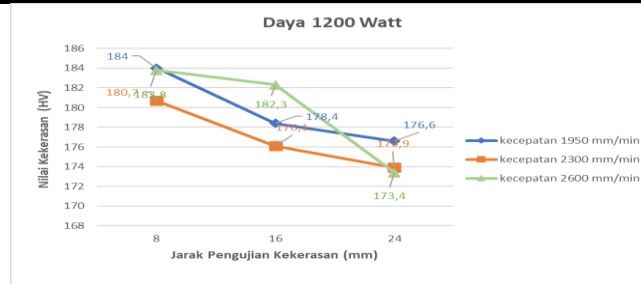
jarak	1950	2300	2600
8	178,9	171,4	195
16	175,1	169,2	188,3
24	169,3	167,2	171,2



Gambar 11. Grafik Hasil Kekerasan Vickers Daya 1175

Tabel 7. Data Hasil Pengujian Kekerasan Vickers Daya 1200

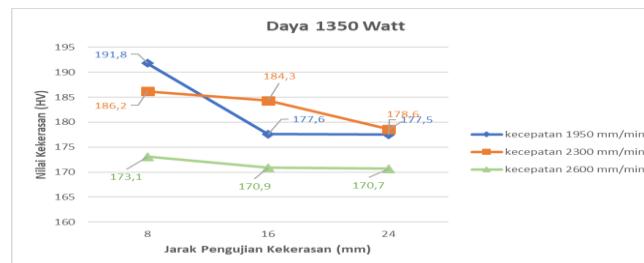
jarak	1950	2300	2600
8	184	180,7	183,8
16	178,4	176,1	182,3
24	176,6	173,9	173,4



Gambar 12. Grafik Hasil Kekerasan Vickers Daya 1200

Tabel 8. Data Hasil Pengujian Kekerasan Vickers Daya 1350

jarak	1950	2300	2600
8	191,8	186,2	173,1
16	177,6	184,3	170,9
24	177,5	178,6	170,7



Gambar 13. Grafik Hasil Kekerasan Vickers Daya 1350

Hasil pengukuran tiga titik indentasi pada setiap spesimen menunjukkan nilai kekerasan individual berada pada rentang 167,2–195 HV. Setelah dilakukan perhitungan nilai rata-rata tiga titik pengukuran, diperoleh nilai kekerasan rata-rata berada pada rentang 169,27–184,83 HV. Nilai kekerasan rata-rata tertinggi diperoleh pada sampel 3 dengan kombinasi Laser power 1175 W dan Cutting Speed 2600 mm/min sebesar 184,83 HV.

3.5 Pembahasan Pengaruh Parameter Laser terhadap Kekerasan

Perubahan kekerasan terjadi akibat pengaruh masukan panas selama proses pemotongan. Pemanasan dan pendinginan cepat pada daerah potong dapat menyebabkan perubahan struktur mikro sehingga nilai kekerasan mengalami perubahan.

3.6 Analisis Hubungan Kekasaran dan Kekerasan

Hasil pengujian menunjukkan bahwa kekasaran dan kekerasan tidak memiliki kecenderungan yang sama. Nilai Ra terendah sebesar 0,187 μm diperoleh pada 1175 W dan 2300 mm/min, sedangkan kekerasan rata-rata tertinggi sebesar 184,83 HV diperoleh pada 1175 W dan 2600 mm/min. Hasil tersebut menunjukkan bahwa parameter terbaik untuk kekasaran tidak selalu menghasilkan kekerasan tertinggi.

4. KESIMPULAN

Variasi daya laser dan kecepatan pemotongan menghasilkan perbedaan karakteristik kekasaran permukaan dan kekerasan SS304. Daya 1175 W menunjukkan kinerja paling baik berdasarkan dua respons utama, dengan nilai kekasaran terendah sebesar 0,187 μm pada kecepatan 2300 mm/min dan kekerasan rata-rata tertinggi sebesar 184,83 HV pada kecepatan 2600 mm/min.

Dengan demikian, 1175 W merupakan daya yang paling unggul pada rentang pengujian, sedangkan kecepatan 2300 mm/min paling unggul untuk menghasilkan permukaan yang lebih halus. Namun, kecepatan 2600 mm/min menghasilkan kekerasan rata-rata tertinggi. Hasil ini menunjukkan bahwa parameter terbaik untuk kekasaran tidak selalu menghasilkan kekerasan tertinggi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan penghargaan dan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Bapak Ir.Hisyam Ma'mun, S.T., M.T. Bapak Muhammad Fasesal Febriandyono. S.T., M.T. atas segala penulis menyampaikan apresiasi dan terima kasih atas bimbingan, arahan, serta motivasi yang telah diberikan selama pelaksanaan penelitian. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada Agil Setya Nugroho atas dukungan serta kerja sama yang telah diberikan selama proses penelitian atas dukungan yang telah diberikan selama pelaksanaan penelitian hingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

REFERENCES

- [1] J. Butt, "A strategic roadmap for the manufacturing industry to implement industry 4.0," *Designs*, vol. 4, no. 2, pp. 1–31, 2020, doi: 10.3390/designs4020011.
- [2] Ł. Bohdal and D. Schmidtke, "Effect of fiber and CO2 lasers parameters on the cut surface quality of RVS 1.4301 stainless steel," *J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 16, no. 2, pp. 8862–8872, 2022, doi: 10.15282/jmes.16.2.2022.05.0701.
- [3] A. Mahrle, M. Borkmann, and P. Pfohl, "Factorial analysis of fiber laser fusion cutting of aisi 304 stainless steel: Evaluation of effects on process performance, Kerf Geometry and cut edge roughness," *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 10, 2021, doi: 10.3390/ma14102669.
- [4] Mohammad Rudi Romadhoni and Samsul Hadi, "Effect Variation Cutting Speed and Oxygen Pressure of Fiber Laser Cutting Machine on Surface Roughness of 304 Stainless Steel Material," *J. Tek. Mesin*, vol. 3, no. 2, pp. 318–322, 2024, doi: 10.33795/j-meeg.v3i2.5713.
- [5] A. S. Ali, T. Abdelmonem, R. Elsoeudy, M. A. Mohsen, and N. Elzayady, "Characterization of AISI 304 stainless steel based on laser cutting process optimization," *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, pp. 1–19, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-24932-6.
- [6] İ. Cebeci, B. Özlü, and H. Demir, "AISI 304 paslanmaz sac malzemenin lazerle işlenmesinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü, kerf genişliği ve çapak yüksekliğine etkisinin araştırılması Investigation the effect of cutting parameters on surface roughness, kerf width and dross height ," *Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci.*, vol. 11, no. 2, pp. 410–415, 2022, doi: 10.28948/ngmuh.764983.
- [7] J. Selech, G. Burzynski, D. Tibebe, D. Ulbrich, and P. Banas, "Influence of Laser Cutting Parameters on the Microhardness, Roughness, and Microstructure of AISI 304, S355J2, and AlMg3 Alloys," *Materials (Basel)*, vol. 19, no. 2, pp. 1–14, 2026, doi: 10.3390/ma19020240.
- [8] V. Nguyen, F. Altarazi, and T. Tran, "Optimization of Process Parameters for Laser Cutting Process of Stainless Steel 304: A Comparative Analysis and Estimation with Taguchi Method and Response Surface Methodology," *Math. Probl. Eng.*, vol. 2022, 2022, doi: 10.1155/2022/6677586.
- [9] E. Nas and S. Uzuner, "JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES Optimization of laser cutting parameters for improved," vol. 9, no. 3, pp. 654–662, 2023.
- [10] A. K. Basak, K. Lightbody, and A. Pramanik, "The effect of material intrinsic properties on the quality of machined surface during laser beam cutting," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 336, no. February, p. 130546, 2025, doi: 10.1016/j.matchemphys.2025.130546.
- [11] B. Chandrasekaran, R. Kaliyamoorthy, A. Murugavel, G. Vinayagam, E. NoorMohammed, and S. H. Karimullah, "Fiber Laser Cutting of AISI 431 Martensitic Stainless Steel: An Experimental Investigation †," *Eng. Proc.*, vol. 61, no. 1, pp. 2–6, 2024, doi: 10.3390/engproc2024061038.
- [12] "Cnc Fiber Laser Cutting." [Online]. Available: <https://www.istockphoto.com/id/foto-foto/laser-cutting-metal>
- [13] "Surface Roughness Tester Mitutoyo." [Online]. Available: <https://mohawktheater.com/mitutoyo-profilometer-calibration-standard/>
- [14] "Vickers Hardness Tester." [Online]. Available: <https://www.ndpac.com/product/digital-vickers-hardness-tester-of-precision-turret/>