

Karakteristik Kekasaran Permukaan dan Kekerasan Baja ASTM A36 2 mm pada Proses *Fiber Laser Cutting* dengan Variasi Daya Laser dan *Cutting Speed*

Agil Setya Nugroho¹, Muhammad Faesal Febriandyono², Hisyam Ma'mun³, Yuris Setyoadi⁴

^{1,2,3}Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas PGRI Semarang, Kota Semarang 50232, Indonesia

Email: ¹agilstyngh@gmail.com, ²muhammadfaesalfebriandyono@upgris.ac.id, ³hisyam@upgris.ac.id, ⁴yurissetyoadi@upgris.ac.id

Email Penulis Korespondensi: ²muhammadfaesalfebriandyono@upgris.ac.id

Info Artikel	Abstrak
Kata kunci: ASTM A36 <i>cutting speed</i> <i>Fiber Laser Cutting</i> kekasaran permukaan kekerasan daya laser baja karbon.	Penelitian ini bertujuan untuk mengkarakterisasi kekasaran permukaan dan kekerasan baja ASTM A36 dengan ketebalan 2 mm pada proses <i>Fiber Laser Cutting</i> berdasarkan variasi daya laser dan <i>cutting speed</i>. Penelitian dilakukan secara eksperimen menggunakan sembilan kombinasi parameter, yaitu daya laser 1050 W, 1100 W, dan 1150 W serta <i>cutting speed</i> 2000 mm/min, 2400 mm/min, dan 2700 mm/min. Kekasaran permukaan dievaluasi menggunakan parameter Ra, Rq, Rz, dan Rt, sedangkan kekerasan diukur menggunakan metode <i>Vickers</i> pada jarak 8 mm, 16 mm, dan 24 mm dari tepi potongan. Setiap kombinasi parameter menggunakan satu spesimen independen, sehingga hasil dianalisis secara deskriptif-komparatif dan tidak digunakan untuk menyatakan perbedaan yang signifikan secara statistik. Hasil menunjukkan bahwa kombinasi daya laser 1150 W dan <i>cutting speed</i> 2000 mm/min menghasilkan nilai kekasaran terendah pada seluruh parameter yang diuji, yaitu Ra sebesar 0,991 μm, Rq sebesar 1,292 μm, Rz sebesar 9,139 μm, dan Rt sebesar 12,087 μm. Pada kombinasi parameter yang sama, kekerasan sebesar 121,1 HV diperoleh pada jarak 8 mm dan menurun menjadi 114,3 HV pada jarak 16 mm serta 104,7 HV pada jarak 24 mm. Penurunan kekerasan terhadap bertambahnya jarak dari tepi potongan menunjukkan adanya perbedaan respons sifat mekanis terhadap jarak pengukuran yang kemungkinan berkaitan dengan siklus termal selama proses pemotongan. Namun, keberadaan dan lebar <i>heat-affected zone</i> (HAZ) tidak dapat ditentukan secara langsung karena penelitian ini tidak mencakup pengamatan mikrostruktur. Dengan demikian, pada rentang parameter yang diteliti, kombinasi 1150 W dan 2000 mm/min memberikan karakteristik kekasaran terendah, sedangkan profil kekerasan menunjukkan kecenderungan penurunan terhadap bertambahnya jarak dari tepi potongan.
Keywords: ASTM A36 <i>cutting speed</i> <i>Fiber Laser Cutting</i> surface roughness hardness laser power carbon steel.	This study aims to characterize the surface roughness and hardness of 2 mm thick ASTM A36 steel subjected to Fiber Laser Cutting, based on variations in laser power and cutting speed. The research was conducted experimentally using nine parameter combinations: laser powers of 1050 W, 1100 W, and 1150 W, and cutting speeds of 2000 mm/min, 2400 mm/min, and 2700 mm/min. Surface roughness was evaluated using Ra, Rq, Rz, and Rt parameters, while hardness was measured via the Vickers method at distances of 8 mm, 16 mm, and 24 mm from the cut edge. Each parameter combination utilized a single independent specimen; consequently, the results were analyzed descriptively and comparatively rather than to establish statistical significance. The results indicate that the combination of 1150 W laser power and a cutting speed of 2000 mm/min yielded the lowest roughness values across all tested parameters: Ra = 0.991 μm, Rq = 1.292 μm, Rz = 9.139 μm, and Rt = 12.087 μm. With this same parameter combination, a hardness of 121.1 HV was recorded at a distance of 8 mm, decreasing to 114.3 HV at 16 mm and 104.7 HV at 24 mm. The decrease in hardness with increasing distance from the cut edge suggests a variation in mechanical property response relative to the measurement distance, likely linked to the thermal cycle experienced during the cutting process. However, the presence and width of the heat-affected zone (HAZ) could not be directly determined, as the study did not include microstructural analysis. Thus, within the investigated parameter range, the combination of 1150 W and 2000 mm/min produced the lowest roughness characteristics, while the hardness profile exhibited a downward trend as the distance from the cut edge increased.

JuKSIT is licensed under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License



1. PENDAHULUAN

Fiber Laser Cutting banyak digunakan dalam manufaktur karena mampu menghasilkan pemotongan yang cepat dan presisi[1]. Proses ini melibatkan pemusatan energi laser yang menyebabkan material mengalami pemanasan dan pelelehan, kemudian material cair dikeluarkan sehingga terbentuk celah potongan. Karakteristik hasil pemotongan dipengaruhi oleh parameter proses, terutama daya laser dan *cutting speed*, karena kedua parameter tersebut menentukan kondisi interaksi energi laser dengan material selama proses pemotongan[2][3].

Baja ASTM A36 merupakan material struktural yang banyak digunakan pada bidang manufaktur dan konstruksi. Pada pelat tipis, seperti ketebalan 2 mm, pemilihan parameter pemotongan diperlukan untuk menjaga kualitas permukaan dan kondisi material di sekitar tepi potongan[4]. Daya laser dan *cutting speed* merupakan parameter yang menentukan kondisi interaksi laser dengan material[5]. Peningkatan daya meningkatkan energi yang tersedia untuk proses pelelehan, sedangkan peningkatan *cutting speed* mengurangi waktu interaksi dan masukan panas per satuan panjang. Perubahan kondisi tersebut dapat memengaruhi pembentukan celah hasil pemotongan, pelepasan material cair, dan akhirnya karakteristik permukaan hasil pemotongan. Penelitian sebelumnya pada baja ASTM A36 menunjukkan bahwa variasi daya laser dan *cutting speed* berpengaruh terhadap kekasaran permukaan hasil *Fiber Laser Cutting*[6][7][8].

Kualitas permukaan hasil pemotongan dapat dievaluasi melalui parameter kekasaran Ra, Rq, Rz, dan Rt. Perubahan kondisi pemotongan dapat menghasilkan perbedaan karakteristik profil permukaan karena proses pelelehan dan pengeluaran material cair berlangsung pada kondisi energi dan waktu interaksi yang berbeda. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa daya laser dan *cutting speed* dapat memengaruhi kekasaran permukaan hasil *Fiber Laser Cutting*. Selain daya laser dan *cutting speed*, posisi fokus laser serta tekanan gas bantu (*gas pressure*) juga merupakan kondisi proses yang dapat memengaruhi karakteristik hasil pemotongan[9][10].

Selain kekasaran, siklus pemanasan dan pendinginan selama pemotongan dapat menyebabkan perubahan kekerasan di sekitar tepi potongan[11]. Pengukuran kekerasan pada beberapa jarak dari tepi dapat digunakan untuk menggambarkan kecenderungan perubahan sifat mekanis setelah proses pemotongan[12][13]. Namun, keberadaan atau lebar *heat-affected zone* (HAZ) tidak dapat ditentukan secara langsung dalam penelitian ini karena pengamatan mikrostruktur dan pengukuran HAZ tidak dilakukan[14][15].

Penelitian terdahulu telah banyak membahas kualitas hasil *Fiber Laser Cutting* menggunakan berbagai material dan kombinasi parameter. Namun, masih diperlukan karakterisasi simultan kekasaran permukaan dan profil kekerasan pada baja ASTM A36 tebal 2 mm dengan variasi daya laser dan *cutting speed*. Celah tersebut menjadi dasar penelitian ini untuk mengevaluasi respons permukaan menggunakan Ra, Rq, Rz, dan Rt serta profil kekerasan *Vickers* pada beberapa jarak dari tepi potongan. Kontribusi penelitian ini adalah memberikan karakterisasi empiris hubungan variasi parameter proses dengan respons kekasaran dan kecenderungan perubahan kekerasan pada kondisi pemotongan yang diteliti.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengkarakterisasi kekasaran permukaan dan profil kekerasan baja ASTM A36 tebal 2 mm pada proses *Fiber Laser Cutting* dengan variasi daya laser dan *cutting speed* serta mengidentifikasi kombinasi parameter yang menghasilkan nilai kekasaran terendah pada kondisi eksperimen yang digunakan.



Gambar 1. CNC Fiber Laser Cutting

Sumber : L.P. Gadvantech (n.d.)

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen untuk mengkarakterisasi kekasaran permukaan dan kekerasan baja ASTM A36 tebal 2 mm setelah proses *Fiber Laser Cutting*. Pelaksanaan pemotongan spesimen berlangsung di fasilitas bengkel pemotongan Prima Laser, sedangkan pengujian kekasaran serta kekerasan material dikerjakan di Laboratorium Material Universitas Muhammadiyah Semarang. Desain faktorial diadopsi dalam penelitian ini dengan meninjau dua variabel bebas, yaitu daya laser dan *cutting speed*. Pengujian memadukan tiga tingkat daya laser (1050 W, 1100 W, dan 1150 W) dengan tiga tingkat *cutting speed* (2000 mm/min, 2400 mm/min, dan 2700 mm/min), sehingga diperoleh 9 kombinasi perlakuan dengan masing-masing satu spesimen. Pengukuran kekasaran permukaan dilakukan sebanyak tiga kali pada setiap spesimen sebagai pengukuran berulang pada spesimen yang sama, bukan sebagai replikasi spesimen independen. Nilai yang digunakan dalam analisis merupakan rata-rata dari tiga kali pengukuran tersebut. Parameter kekasaran yang dianalisis meliputi Ra, Rq, Rz, dan Rt. Perbedaan nilai kekerasan terhadap jarak dari tepi potongan digunakan untuk menggambarkan kecenderungan perubahan kekerasan setelah proses pemotongan, yang secara teoritis dapat berkaitan dengan siklus termal selama proses, keberadaan dan batas daerah *heat-affected zone* (HAZ) tidak dapat ditentukan secara langsung karena pengamatan mikrostruktur dan pengukuran lebar HAZ tidak dilakukan dalam penelitian ini. Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan metode *Vickers* dengan beban pengujian 2 kgf dan waktu penahanan 10 detik. Pengujian dilakukan pada tiga posisi dari tepi hasil pemotongan, yaitu 8 mm, 16 mm, dan 24 mm. Setiap spesimen diuji pada ketiga posisi tersebut, sehingga diperoleh tiga titik pengujian kekerasan untuk setiap spesimen. Pada setiap titik pengujian diperoleh nilai diagonal *d1* dan *d2* serta nilai kekerasan *Vickers* (HV). Nilai HV yang digunakan dalam analisis merupakan nilai yang tercatat pada hasil pengujian laboratorium untuk masing-masing titik pengukuran.

Pelat baja ASTM A36 dengan ketebalan 2 mm dipilih sebagai benda uji. Bahan baku dipreparasi menjadi pelat berukuran 40 × 40 cm, kemudian dipotong menjadi benda uji berdimensi 5 × 5 cm menggunakan *Fiber Laser Cutting* berdasarkan matriks parameter yang telah dirancang. Instrumen utama yang digunakan meliputi mesin *Fiber Laser Cutting* sebagai sarana fabrikasi pemotongan, *Surface roughness Tester* untuk kekasaran, dan mesin *Vickers hardness tester* untuk mengukur tingkat kekerasan permukaan material.

2.1. Diagram Alir Penelitian

Bagan alir penelitian ini merepresentasikan urutan tahapan riset yang diawali dengan perumusan masalah terkait implikasi variasi daya laser dan *cutting speed* pada pengerjaan *Fiber Laser Cutting* terhadap integritas pemotongan pelat baja ASTM A36. Penelusuran kepustakaan kemudian dilakukan guna menghimpun dasar teoritis serta rujukan studi terdahulu yang relevan mengenai teknologi *Fiber Laser Cutting*, profil kekasaran permukaan, hingga sifat kekerasan material. Langkah berikutnya mencakup penetapan sasaran riset dan penyusunan rancangan eksperimen (*design of experiment*) demi mengunci kombinasi variabel pemotongan yang akan diaplikasikan.

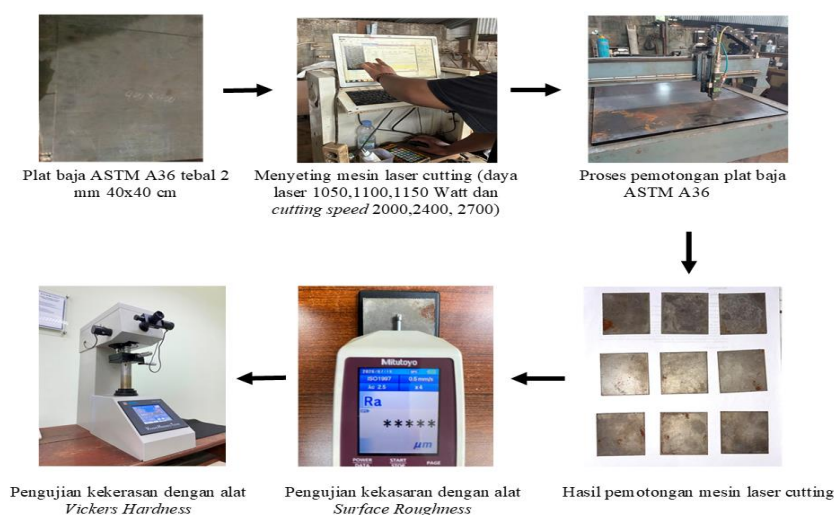
Fase lanjutan berfokus pada preparasi sarana dan benda uji, yang mencakup penyediaan unit mesin *Fiber Laser Cutting*, pelat baja ASTM A36, serta instrumen karakterisasi material. Benda kerja selanjutnya dipotong secara sistematis memanfaatkan konfigurasi daya laser dan *cutting speed* yang telah dipetakan. Pelat hasil proses pemotongan lalu dipreparasi menjadi spesimen pengujian dengan dimensi yang terstandarisasi. Seluruh spesimen tersebut kemudian diuji secara menyeluruh melalui evaluasi kekasaran permukaan berbasis parameter Ra, Rq, Rt, dan Rz, serta karakterisasi kekerasan mikro metode *Vickers* (HV).

Data mentah luaran pengujian berikutnya diolah dan dianalisis secara mendalam guna mengungkap korelasi antara fluktuasi daya laser serta *cutting speed* terhadap respons kekasaran dan kekerasan *Vickers* baja ASTM A36. Berlandaskan temuan analitis tersebut, Kombinasi parameter pemotongan dengan nilai kekasaran terendah ditentukan berdasarkan hasil pengukuran Ra, Rq, Rz, dan Rt. Rangkaian riset dipungkasi dengan penarikan kesimpulan serta perumusan saran aplikatif berbasis data empiris yang diperoleh, menandai tuntasnya seluruh tahapan eksperimen.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

2.2 Alur Penelitian



Gambar 3. Diagram Alir Proses Penelitian

2.3 Dimensi Bahan dan Variabel Penelitian

Material yang digunakan adalah pelat baja karbon ASTM A36 dengan ketebalan nominal 2 mm. Bahan baku berukuran 40 cm × 40 cm dipreparasi menjadi spesimen berukuran 50 mm × 50 mm, sebagaimana diilustrasikan dalam Gambar 2.3. Pemotongan spesimen dilakukan menggunakan mesin *Fiber Laser Cutting* berdasarkan kombinasi parameter daya laser dan *cutting speed* yang telah ditetapkan. Variabel proses dalam penelitian ini terdiri atas daya laser (*laser power*) dan laju pemotongan (*cutting speed*), sementara parameter dependen yang dievaluasi meliputi profil kekasaran permukaan serta angka kekerasan mikro *Vickers*. Daya laser yang digunakan adalah 1050 W, 1100 W, dan 1150 W, sedangkan *cutting speed* yang digunakan adalah 2000 mm/min, 2400 mm/min, dan 2700 mm/min. Kedua variabel tersebut dikombinasikan sehingga diperoleh sembilan kondisi pemotongan. Respons yang diamati terdiri atas kekasaran permukaan dan kekerasan *Vickers*. Kekasaran permukaan dinilai berdasarkan parameter Ra, Rq, Rz, dan Rt, sedangkan kekerasan diukur pada tiga jarak dari tepi potongan, yaitu 8 mm, 16 mm, dan 24 mm.

Adapun parameter kontrol yang dipertahankan konstan meliputi spesifikasi dan ketebalan pelat baja, diameter lubang *nozzle*, jarak celah antara *nozzle* dengan permukaan benda kerja (*stand-off distance*), serta besaran tekanan gas bantu potong. Penyeragaman dimensi dan variabel kendali di seluruh benda uji ditujukan guna menghasilkan data karakterisasi yang valid dan komparabel, sekaligus memetakan secara presisi dampak fluktuasi daya laser dan *cutting speed* terhadap integritas hasil pemotongan baja ASTM A36.



Gambar 4. Dimensi Spesimen Baja ASTM A36

2.4 Pengukuran Kekasaran Permukaan (*Surface Roughness Measurement*)

Evaluasi profil topografi permukaan spesimen dilakukan menggunakan instrumen *Surface Roughness Tester* merek Mitutoyo. Karakterisasi ini ditujukan untuk memperoleh parameter kekasaran permukaan yang mencakup R_a , R_q , R_z , serta R_t sebagai tolak ukur integritas dan mutu penampang hasil pemotongan. Pengukuran dilakukan dengan arah lintasan stylus tegak lurus terhadap arah garis potongan pada permukaan hasil pemotongan. Pengukuran kekasaran permukaan dilakukan sebanyak tiga kali pada setiap spesimen sebagai pengukuran berulang pada spesimen yang sama. Hasil dari tiga kali pengukuran tersebut kemudian dirata-ratakan dan digunakan sebagai nilai kekasaran masing-masing spesimen. Pengukuran kekasaran permukaan dilakukan dengan mengacu pada ISO 4287:1997, *Geometrical Product Specifications (GPS) Surface texture: Profile method Terms, definitions and surface texture parameters*, yang digunakan sebagai acuan terminologi dan parameter tekstur permukaan. Pengukuran menggunakan *profile R* dengan *cutoff length* (λ_c) sebesar 2,5 mm, *measurement length* sebesar 10,00 mm, *filter Gaussian*, jumlah evaluasi $N = 4$, *short-wavelength cutoff* (λ_s) sebesar 8 μm , dan kecepatan pengukuran sebesar 0,5 mm/s. Pengukuran dilakukan dengan arah lintasan stylus tegak lurus terhadap arah garis potongan pada permukaan hasil pemotongan. Kondisi pengukuran diterapkan secara sama pada seluruh spesimen untuk menjaga keterbandingan hasil.



Gambar 5. Alat Uji Kekasaran Permukaan Mitutoyo SurfTest SJ-210

Sumber : Mitutoyo America Corporation, SurfTest SJ-210

2.5 Pengukuran Kekerasan Permukaan (*Vickers Hardness Tester*)

Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan *Vickers Hardness Tester* merek NOBEL di Laboratorium Material. Pengujian dilakukan dengan metode *Vickers* menggunakan beban sebesar 2 kgf dan waktu penahanan (*dwell time*) selama 10 detik. Pelaksanaan pengujian mengikuti prosedur pengujian yang diterapkan oleh Laboratorium Material. Permukaan spesimen dipastikan dalam kondisi rata, bersih, dan bebas dari kotoran atau ketidakrataan yang dapat mengganggu pengamatan jejak indentasi. Pengukuran dilakukan pada tiga posisi, yaitu 8 mm, 16 mm, dan 24 mm dari tepi hasil potongan. Ketiga posisi tersebut digunakan untuk menggambarkan profil kekerasan berdasarkan jarak dari tepi potongan. Pada setiap posisi dilakukan satu kali penjejakan, sehingga diperoleh satu nilai kekerasan untuk masing-masing lokasi pada setiap spesimen. Ketiga lokasi tersebut bukan merupakan replikasi eksperimen, melainkan posisi pengukuran yang berbeda dalam satu spesimen. Setelah pembebanan, diagonal jejak indentasi d_1 dan d_2 diamati melalui sistem optik alat. Nilai diagonal rata-rata digunakan untuk menentukan nilai kekerasan *Vickers* (HV). Perhitungan dilakukan menggunakan persamaan kekerasan *Vickers* sesuai beban pengujian dan diagonal rata-rata hasil indentasi. Nilai kekerasan pada jarak 8 mm, 16 mm, dan 24 mm kemudian dibandingkan secara deskriptif untuk menggambarkan kecenderungan perubahan kekerasan terhadap jarak dari tepi potongan. Karena pengamatan

mikrostruktur dan pengukuran lebar HAZ tidak dilakukan, perubahan nilai kekerasan tidak digunakan untuk menentukan secara langsung keberadaan atau lebar HAZ.



Gambar 6. Alat Uji Kekerasan *Vickers Hardness Tester*
Sumber : Noble Metallography

Data hasil pengujian dianalisis secara kuantitatif menggunakan analisis deskriptif-komparatif. Setiap kombinasi perlakuan menggunakan satu spesimen independen. Pada setiap spesimen dilakukan tiga kali pengukuran kekasaran permukaan sebagai pengukuran berulang (*repeated measurements*) pada spesimen yang sama, bukan sebagai tiga replikasi eksperimen independen. Nilai R_a , R_q , R_z , dan R_t yang diperoleh dari ketiga pengukuran kemudian dirata-ratakan untuk mendapatkan satu nilai kekasaran representatif pada masing-masing spesimen. Selanjutnya, nilai rata-rata tersebut dibandingkan pada sembilan kombinasi variasi daya laser dan cutting speed untuk mengetahui kecenderungan perubahan kekasaran permukaan akibat variasi parameter pemotongan. Data kekerasan *Vickers* pada jarak 8, 16, dan 24 mm dari tepi potongan dibandingkan untuk menggambarkan profil kekerasan terhadap jarak dan kecenderungan perubahannya antarperlakuan. Analisis bersifat deskriptif dan tidak digunakan untuk menguji signifikansi efek utama maupun interaksi karena setiap kombinasi perlakuan hanya menggunakan satu spesimen independen. Oleh karena itu, hasil penelitian ditafsirkan sebagai karakteristik empiris pada rentang parameter dan kondisi proses yang digunakan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Pengujian

Paparan hasil studi ini mengulas variasi nilai yang dihasilkan oleh fluktuasi daya laser dan *cutting speed* selama operasi *Fiber Laser Cutting* pelat baja ASTM A36 setebal 2 mm terhadap profil kekasaran serta respons kekerasan permukaannya. Eksperimen ini memformulasikan evaluasi mendalam perihal tingkat kekasaran topografi dan kekerasan mikro baja pascaproses pemotongan memanfaatkan perangkat *Fiber Laser Cutting* dengan pengaturan daya laser (1050 W, 1100 W, dan 1150 W) serta variasi laju potong (2000 mm/min, 2400 mm/min, dan 2700 mm/min). Karakterisasi ini ditujukan secara spesifik guna memetakan transformasi perilaku mekanis pada kekasaran permukaan dan nilai kekerasan material yang terinduksi oleh masukan energi panas (*heat input*) sepanjang pemotongan laser berlangsung. Rangkuman data empiris pengujian secara terperinci disajikan pada tabulasi berikut:

3.2 Hasil Pengujian Kekasaran Permukaan

Tabel 1. Hasil Pengujian Kekasaran Permukaan

Spesimen	Daya laser (Watt)/Cutting Speed(mm/min)	Pengukuran	Kekasaran permukaan			
			R_a (μm)	R_q (μm)	R_z (μm)	R_t (μm)
1	1050/2000	1	1,333	2,225	18,761	23,954
		2	1,768	2,800	19,799	24,263
		3	1,883	3,015	22,214	28,317
		Rata-rata	1,661	2,680	20,258	25,511
2	1050/2400	1	2,730	4,185	24,814	54,197
		2	1,082	1,428	9,095	11,967
		3	1,228	1,954	15,166	21,326
		Rata-rata	1,680	2,552	16,358	29,163
3	1050/2700	1	1,082	1,580	13,206	17,711
		2	1,016	1,421	10,357	17,785
		3	0,888	1,179	8,639	11,730

	Rata-rata		0,995	1,393	10,734	15,742
4	1100/2000	1	1,317	1,957	14,881	25,097
		2	1,091	1,797	16,681	22,446
		3	1,570	2,341	17,785	39,531
	Rata-rata		1,326	2,032	16,449	29,025
5	1100/2400	1	1,369	2,065	15,072	22,863
		2	1,311	1,787	12,537	17,505
		3	1,508	2,408	18,452	22,701
	Rata-rata		1,396	2,087	15,354	21,023
6	1100/2700	1	1,078	1,544	12,151	20,458
		2	1,188	1,817	14,123	27,804
		3	1,581	2,191	15,559	18,226
	Rata-rata		1,282	1,851	13,944	22,163
7	1150/2000	1	0,927	1,204	8,837	11,205
		2	1,112	1,447	9,701	12,321
		3	0,935	1,226	8,879	12,735
	Rata-rata		0,991	1,292	9,139	12,087
8	1150/2400	1	1,258	1,981	15,861	27,716
		2	1,175	1,628	12,109	20,288
		3	0,994	1,442	10,849	14,971
	Rata-rata		1,142	1,684	12,939	20,992
9	1150/2700	1	1,099	1,482	11,332	16,930
		2	1,272	1,786	13,109	16,331
		3	0,943	1,313	9,546	17,380
	Rata-rata		1,105	1,527	11,329	16,880

Data pada tabel di atas merepresentasikan luaran evaluasi kekasaran permukaan pelat baja karbon ASTM A36 setebal 2 mm yang diuji di Laboratorium Material Universitas Muhammadiyah Semarang melalui pengukuran sebanyak tiga kali pada setiap spesimen memanfaatkan instrumen *Surface Roughness Tester* dengan batasan panjang pemotong (*cutoff length*) sebesar 2,5 mm.

3.3 Hasil Pengujian Kekerasan Permukaan

Tabel 2. Hasil Pengujian Kekerasan Permukaan (daya 1050 Watt)

Spesimen	Daya Laser (Watt)/ <i>Cutting Speed</i> (mm/min)	Jarak (mm)	<i>D1</i> (μ m)	<i>D2</i> (μ m)	<i>Vickers Hardness</i> (HV)
1	1050/2000	8	179,8	181,9	113,3
		16	185,6	186,6	107,0
		24	186,6	187,5	105,9
2	1050/2400	8	180,1	181,4	113,4
		16	184,6	183,9	109,2
		24	186,4	186,9	106,4
3	1050/2700	8	187,9	177,1	111,2
		16	186,3	185,7	107,1
		24	187,4	187,2	105,6

Data yang disajikan pada tabel di atas mendokumentasikan hasil pengujian kekerasan pelat baja ASTM A36 setebal 2 mm di Laboratorium Material Universitas Muhammadiyah Semarang pada 3 spesimen yang masing-masing mewakili satu kombinasi perlakuan daya laser dan *cutting speed*, dengan titik pengukuran berjarak 8 mm, 16 mm, dan 24 mm dari tepi potong.

Tabel 3. Hasil Pengujian Kekerasan Permukaan (daya 1100 Watt)

Spesimen	Daya Laser (Watt)/ <i>Cutting Speed</i> (mm/min)	Jarak (mm)	<i>D1</i> (μ m)	<i>D2</i> (μ m)	<i>Vickers Hardness</i> (HV)
----------	---	------------	----------------------	----------------------	---------------------------------

4	1100/2000	8	174,9	175,4	120,7
		16	181,8	182,7	111,5
		24	186,4	187,2	106,2
5	1100/2400	8	178,3	178,9	116,2
		16	179,1	179,7	115,1
		24	181,1	180,8	113,4
6	1100/2700	8	179,2	179,9	114,9
		16	183,4	182,8	110,5
		24	186,6	187,8	105,8

Selanjutnya, sajian data pada tabel di atas mengilustrasikan profil kekerasan pelat baja ASTM A36 setebal 2 mm di bawah pengaruh variasi laju pemotongan (*cutting speed*) sebesar 2000 mm/min, 2400 mm/min, dan 2700 mm/min dengan kenaikan besaran daya laser menjadi 1100 W.

Tabel 4. Hasil Pengujian Kekerasan Permukaan (daya 1150 Watt)

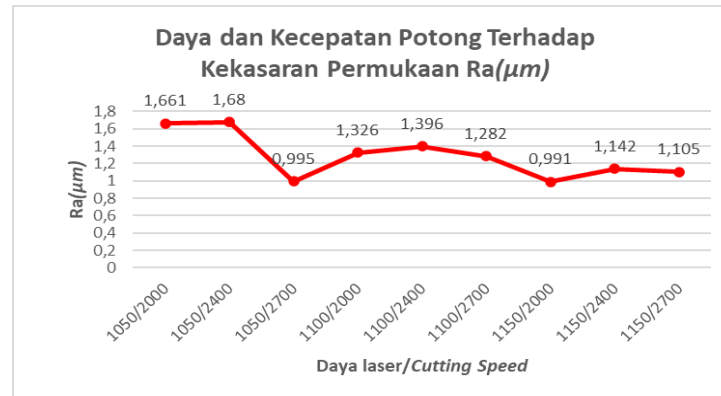
Spesimen	Daya Laser (Watt)/ <i>Cutting Speed</i> (mm/min)	Jarak (mm)	<i>D1</i> (μ m)	<i>D2</i> (μ m)	<i>Vickers Hardness</i> (HV)
7	1150/2000	8	174,2	175,7	121,1
		16	179,6	180,5	114,3
		24	187,8	188,4	104,7
8	1150/2400	8	175,2	176,5	119,9
		16	177,8	178,8	116,6
		24	182,8	181,1	111,9
9	1150/2700	8	179,3	178,7	115,7
		16	180,0	181,1	113,7
		24	188,0	187,2	105,2

Adapun tabulasi di atas memaparkan luaran evaluasi kekerasan spesimen baja ASTM A36 berketebalan 2 mm pada rentang variasi laju potong (*cutting speed*) 2000 mm/min, 2400 mm/min, serta 2700 mm/min dengan peningkatan output daya laser mencapai 1150 W.

3.4 Pembahasan

Pembahasan hasil penelitian difokuskan pada karakteristik kekasaran permukaan dan kekerasan baja ASTM A36 dengan ketebalan 2 mm akibat variasi daya laser dan *cutting speed* pada proses *Fiber Laser Cutting*. Parameter kekasaran yang dianalisis meliputi Ra, Rq, Rz, dan Rt, sedangkan karakteristik kekerasan dievaluasi berdasarkan jarak titik pengukuran 8 mm, 16 mm, 24 mm dari tepi potongan. Keempat parameter kekasaran digunakan secara bersama-sama untuk menggambarkan karakteristik topografi permukaan, sedangkan perubahan kekerasan terhadap jarak digunakan untuk melihat kecenderungan respons mekanis material di sekitar daerah pemotongan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa perubahan nilai kekasaran tidak membentuk kecenderungan linier terhadap peningkatan daya laser maupun *cutting speed*. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa karakteristik permukaan merupakan respons kombinasi antara energi laser, waktu interaksi laser dengan material, proses pelelehan, dan pengeluaran material cair dari *kerf*. Oleh karena itu, pembahasan berikut tidak hanya membandingkan nilai setiap parameter, tetapi juga menginterpretasikan pola perubahan yang ditunjukkan oleh masing-masing grafik dan mengaitkannya dengan hasil penelitian terdahulu.

3.4.1 Karakteristik Kekasaran Permukaan



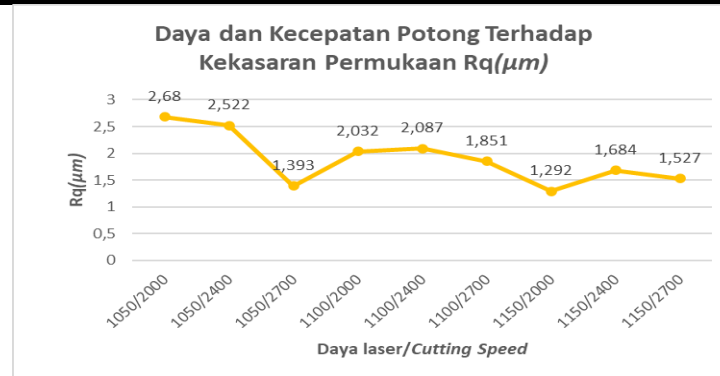
Gambar 7. Grafik daya laser dan *cutting speed* terhadap kekasaran permukaan Ra (μm)

Berdasarkan grafik Ra, terlihat bahwa nilai kekasaran rata-rata permukaan berubah pada setiap kombinasi daya laser dan *cutting speed*. Perubahan tersebut tidak menunjukkan pola kenaikan atau penurunan yang konsisten ketika salah satu parameter dinaikkan. Pada daya 1050 W, misalnya, perubahan *cutting speed* menghasilkan respons Ra yang berbeda pada setiap tingkat kecepatan. Pola yang tidak monoton juga terlihat pada daya 1100 W dan 1150 W. Hal ini menunjukkan bahwa respons kekasaran tidak ditentukan oleh *cutting speed* atau daya laser secara terpisah, tetapi merupakan hasil kombinasi kedua parameter tersebut.

Secara fisik, daya laser menentukan jumlah energi yang tersedia untuk memanaskan dan melelehkan material, sedangkan *cutting speed* menentukan lama interaksi antara berkas laser dan material. Peningkatan *cutting speed* mengurangi waktu interaksi sehingga panas yang terakumulasi per satuan panjang pemotongan dapat berubah. Sebaliknya, peningkatan daya laser meningkatkan energi yang tersedia pada daerah pemotongan. Keseimbangan kedua kondisi tersebut menentukan kestabilan pelelehan dan pengeluaran material cair dari *kerf*. Literatur menunjukkan bahwa daya laser dan *cutting speed* merupakan parameter penting yang memengaruhi *surface roughness* dan karakteristik *kerf* pada *Fiber Laser Cutting*.

Pada penelitian ini, nilai Ra terendah diperoleh pada kombinasi daya laser 1150 W dan *cutting speed* 2000 mm/min, yaitu 0,991 μm . Nilai Ra menunjukkan bahwa perubahan daya laser dan *cutting speed* memengaruhi karakteristik kekasaran permukaan hasil pemotongan. Kondisi dengan nilai Ra yang lebih rendah menunjukkan permukaan hasil pemotongan yang relatif lebih halus dibandingkan dengan kondisi yang menghasilkan nilai Ra lebih tinggi. Perbedaan nilai Ra tersebut menunjukkan adanya perubahan karakteristik kekasaran permukaan akibat kombinasi parameter proses yang digunakan. Namun, berdasarkan data penelitian ini, perubahan nilai Ra tidak dapat secara langsung dikaitkan dengan kestabilan proses pelelehan dan pengeluaran material karena kedua fenomena tersebut tidak diamati secara langsung selama proses pemotongan.

Hasil tersebut memiliki kesesuaian dengan penelitian pada baja A36 yang menunjukkan bahwa perubahan daya laser dan *cutting speed* menghasilkan perubahan *surface roughness* dan bahwa daya yang lebih tinggi tidak selalu menghasilkan permukaan lebih kasar apabila diimbangi dengan *cutting speed* yang sesuai. Penelitian pada baja struktural S355JR juga menunjukkan bahwa *surface roughness* dipengaruhi oleh kombinasi parameter *Fiber Laser Cutting*, termasuk daya laser dan *cutting speed*.



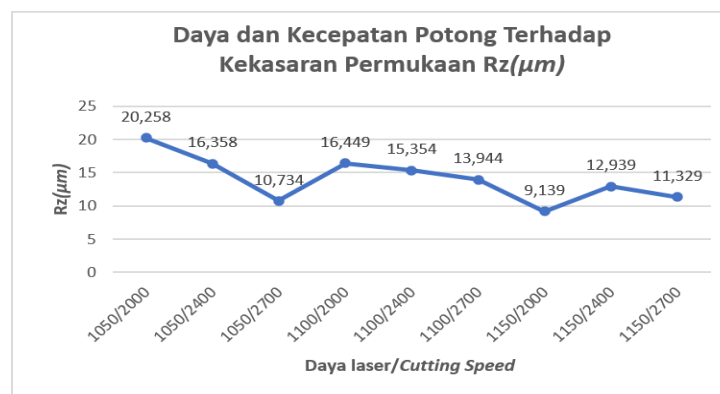
Gambar 8. Grafik daya laser dan *cutting speed* terhadap kekasaran permukaan Rq (μm)

Berdasarkan grafik Rq, perubahan nilai Ra menunjukkan kecenderungan yang sejalan dengan perubahan Ra, tetapi parameter Rq memberikan sensitivitas yang lebih besar terhadap penyimpangan profil karena perhitungannya menggunakan kuadrat penyimpangan profil. Variasi nilai Rq pada kombinasi daya laser dan *cutting speed* menunjukkan bahwa perubahan parameter proses tidak menghasilkan perubahan kekasaran secara monoton.

Nilai Rq terendah diperoleh pada kombinasi 1150 W–2000 mm/min, yaitu 1,292 μm. Nilai tersebut menunjukkan bahwa penyimpangan profil permukaan secara kuadratik relatif rendah pada kondisi tersebut. Kesamaan kondisi minimum antara Ra dan Rq memperkuat bahwa kombinasi 1150 W–2000 mm/min menghasilkan permukaan yang relatif lebih seragam dibandingkan kombinasi lainnya dalam rentang penelitian.

Perubahan Rq dapat dikaitkan dengan kondisi pelelehan dan pengeluaran material selama proses pemotongan. Ketika energi daya laser dan *cutting speed* berada pada kombinasi yang sesuai, material yang meleleh dapat dikeluarkan melalui *kerf* secara lebih stabil. Sebaliknya, ketidaksesuaian antara energi daya laser dan *cutting speed* dapat menyebabkan perubahan pola aliran material cair sehingga menghasilkan ketidakrataan profil permukaan.

Dengan demikian, hasil Rq memperkuat hasil Ra bahwa peningkatan daya laser atau *cutting speed* tidak dapat dipandang sebagai faktor yang secara mandiri menentukan kualitas permukaan. Hasil penelitian terdahulu juga menunjukkan bahwa hubungan antara parameter proses dan kekasaran sangat bergantung pada material serta kondisi pemotongan yang digunakan.



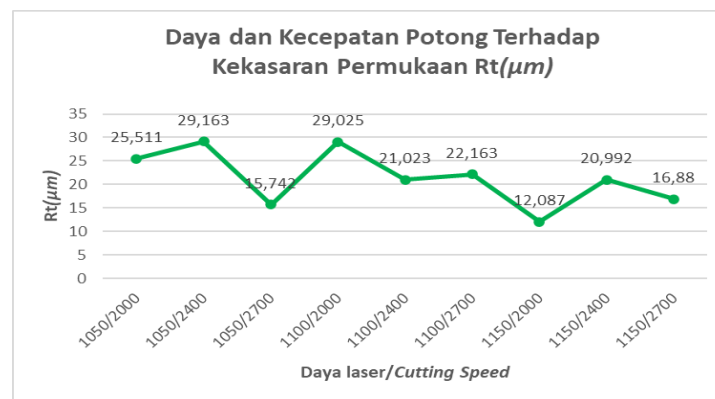
Gambar 9. Grafik daya laser dan *cutting speed* terhadap kekasaran permukaan Rz (μm)

Berdasarkan grafik hasil pengujian, nilai Rz menunjukkan perubahan tinggi antara puncak dan lembah profil permukaan pada berbagai kombinasi parameter pemotongan. Dibandingkan dengan Ra dan Rq, parameter Rz lebih menggambarkan perbedaan tinggi puncak dan lembah pada profil permukaan sehingga memberikan informasi tambahan mengenai ketidakrataan topografi permukaan.

Nilai Rz terendah diperoleh pada kombinasi 1150 W–2000 mm/min, yaitu 9,139 μm. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa perbedaan karakteristik puncak dan lembah pada profil permukaan relatif lebih kecil dibandingkan kombinasi parameter lainnya. Kesamaan lokasi nilai minimum antara Rz dengan Ra dan Rq menunjukkan bahwa kombinasi tersebut tidak hanya menghasilkan nilai penyimpangan rata-rata yang rendah, tetapi juga menghasilkan profil dengan perbedaan tinggi puncak-lembah yang relatif lebih kecil.

Perubahan Rz pada kombinasi parameter lainnya dapat dikaitkan dengan proses pembentukan dan pengeluaran material pada *kerf*. Selama *laser cutting*, material menerima energi termal hingga mengalami pelelehan, kemudian material cair dikeluarkan dari celah potong. Ketidakstabilan proses pelelehan atau pengeluaran material dapat menghasilkan variasi topografi berupa puncak dan lembah yang lebih besar. Literatur mengenai *laser cutting* juga menjelaskan bahwa kualitas permukaan berkaitan dengan kondisi pelelehan, material removal, serta kombinasi daya laser dan *cutting speed*.

Dengan demikian, Rz memberikan informasi yang melengkapi Ra dan Rq dalam menjelaskan kualitas permukaan hasil pemotongan. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa karakteristik permukaan terbaik dalam konteks nilai Rz berada pada kombinasi 1150 W–2000 mm/min dalam batas parameter yang diuji.



Gambar 10. Grafik daya laser dan *cutting speed* terhadap kekasaran permukaan Rt (μm)

Berdasarkan grafik Rt, perubahan nilai total tinggi profil menunjukkan adanya variasi karakteristik permukaan pada setiap kombinasi daya laser dan *cutting speed*. Rt menggambarkan jarak vertikal total antara titik tertinggi dan titik terendah pada profil sehingga parameter ini dapat digunakan untuk melihat penyimpangan ekstrem pada permukaan hasil pemotongan.

Nilai Rt terendah diperoleh pada kombinasi 1150 W–2000 mm/min, yaitu 12,087 μm . Nilai tersebut menunjukkan bahwa pada kombinasi tersebut perbedaan vertikal maksimum pada profil permukaan relatif lebih kecil. Hasil ini konsisten dengan kecenderungan Ra, Rq, dan Rz yang juga menghasilkan nilai minimum pada kombinasi parameter yang sama. Kesesuaian nilai minimum pada keempat parameter kekasaran menunjukkan bahwa kombinasi 1150 W–2000 mm/min menghasilkan karakteristik topografi permukaan yang relatif lebih seragam dalam rentang parameter penelitian. Namun demikian, nilai tersebut tidak dapat digunakan untuk menyatakan bahwa kombinasi tersebut merupakan kondisi optimum untuk seluruh proses pemotongan baja ASTM A36 karena penelitian hanya mencakup rentang daya laser dan *cutting speed* tertentu.

Secara umum, variasi Rt dapat dijelaskan melalui perubahan kondisi termal dan material removal selama proses pemotongan. Penelitian mengenai *Fiber Laser Cutting* menunjukkan bahwa karakteristik material removal dan aliran material cair berhubungan dengan kualitas permukaan serta pembentukan dross pada *kerf*. Oleh karena itu, perubahan Rt pada penelitian ini dipandang sebagai salah satu respons topografi akibat perubahan kombinasi parameter proses.

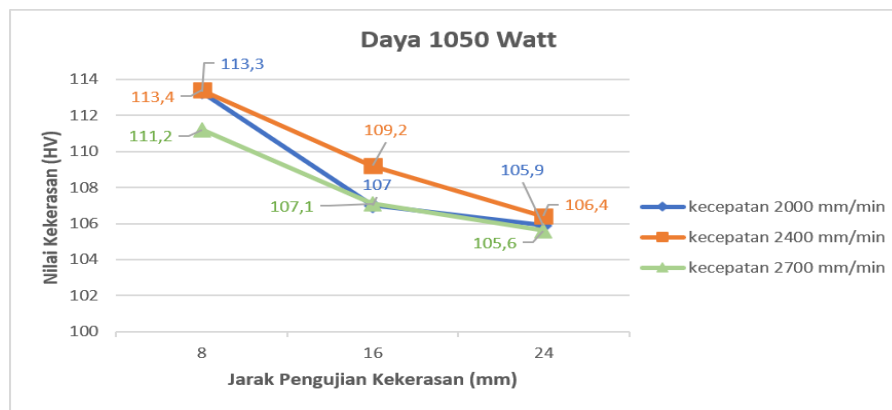
Jadi Jika keempat parameter kekasaran dibandingkan secara bersamaan, yaitu Ra, Rq, Rz, dan Rt, kombinasi daya laser 1150 W dan *cutting speed* 2000 mm/min menghasilkan nilai terendah masing-masing sebesar 0,991 μm , 1,292 μm , 9,139 μm , dan 12,087 μm . Kesamaan kondisi minimum pada keempat parameter menunjukkan bahwa kombinasi tersebut menghasilkan karakteristik topografi permukaan yang relatif paling seragam dalam rentang parameter yang diuji. Hasil tersebut juga menunjukkan bahwa perubahan kekasaran tidak mengikuti hubungan linier sederhana terhadap daya laser atau *cutting speed*. Hal ini dapat dijelaskan karena peningkatan daya meningkatkan energi termal yang tersedia untuk proses pelelehan, sedangkan peningkatan *cutting speed* mengurangi waktu interaksi laser dengan material. Kedua parameter tersebut secara bersama-sama menentukan kondisi pelelehan, aliran material cair, dan material removal dari *kerf*. Oleh karena itu, kualitas permukaan merupakan hasil keseimbangan antara energi yang diberikan dan kecepatan pemotongan.

Temuan tersebut sejalan dengan kajian Alsaadawy et al. yang menunjukkan bahwa daya laser dan *cutting speed* merupakan parameter penting dalam menentukan kualitas permukaan dan *kerf*, tetapi kecenderungan respons dapat berbeda bergantung pada material dan kondisi proses. Penelitian pada A36 dengan ketebalan 6 mm juga menunjukkan bahwa kombinasi daya laser dan *cutting speed* tertentu diperlukan untuk memperoleh kekasaran permukaan yang lebih

rendah. Perbedaan ketebalan antara penelitian tersebut dan penelitian ini perlu diperhatikan, sehingga hasilnya digunakan sebagai pembandingan mekanisme, bukan sebagai pembandingan nilai absolut.

Dengan demikian, kombinasi 1150 W – 2000 mm/min dapat dinyatakan sebagai kombinasi parameter dengan karakteristik kekasaran terendah pada rentang eksperimen penelitian ini. Penetapan parameter optimum secara umum memerlukan rentang parameter yang lebih luas serta replikasi eksperimen yang memadai.

3.4.2 Karakteristik Kekerasan terhadap jarak dari tepi



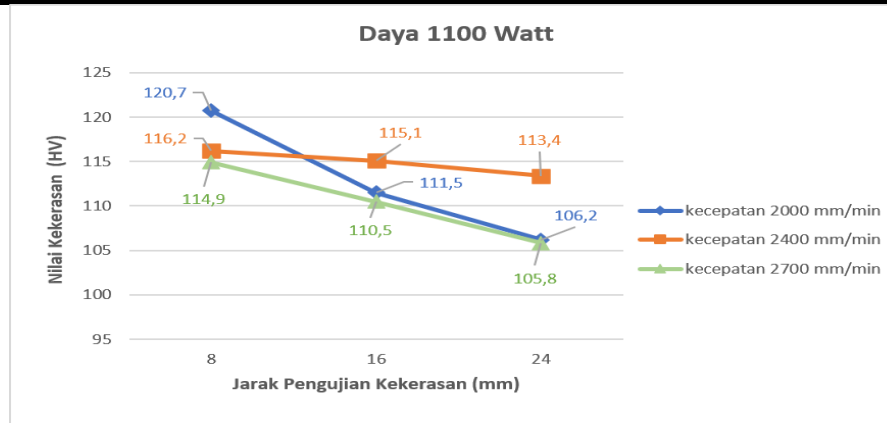
Gambar 11. Grafik nilai kekerasan dengan daya laser 1050 Watt

Berdasarkan Gambar 3.4.5, pada daya laser 1050 W nilai kekerasan pada posisi 8 mm cenderung lebih tinggi dibandingkan posisi 16 mm dan 24 mm untuk seluruh *cutting speed*. Pada *cutting speed* 2000 mm/min, kekerasan menurun dari 113,3 HV pada 8 mm menjadi 107,0 HV pada 16 mm dan 105,9 HV pada 24 mm. Pada 2400 mm/min, nilai berubah dari 113,4 HV menjadi 109,2 HV dan 106,4 HV, sedangkan pada 2700 mm/min berubah dari 111,2 HV menjadi 107,1 HV dan 105,6 HV.

Pola tersebut menunjukkan adanya perubahan nilai kekerasan terhadap jarak dari tepi potongan. Posisi yang lebih dekat dengan tepi potongan menerima kondisi termal proses yang berbeda dibandingkan posisi yang lebih jauh, sehingga perbedaan respons kekerasan dapat diamati pada ketiga lokasi pengukuran. Perbedaan *cutting speed* juga menghasilkan profil kekerasan yang berbeda, yang secara proses dapat dikaitkan dengan perubahan waktu interaksi antara laser dan material.

Peningkatan kekerasan pada area yang lebih dekat dengan tepi potongan diduga berkaitan dengan pengaruh termal selama proses pemotongan. Wilayah tersebut menyerap masukan panas (*heat input*) yang lebih intensif sehingga dapat memengaruhi perubahan nilai kekerasan material di sekitar tepi hasil potongan. Seiring bertambahnya jarak pengukuran dari tepi potongan, nilai kekerasan cenderung menurun dan menunjukkan nilai yang relatif lebih rendah pada posisi pengukuran yang lebih jauh.

Penurunan nilai kekerasan seiring bertambahnya jarak pengukuran mengindikasikan adanya perubahan sifat mekanis material yang kemungkinan berkaitan dengan kondisi termal selama proses *Fiber Laser Cutting*. Namun, pola tersebut belum dapat digunakan untuk menentukan secara langsung kedalaman penetrasi panas atau batas *Heat Affected Zone* (HAZ), karena penelitian ini tidak melakukan pengamatan mikrostruktur maupun pengukuran langsung terhadap lebar HAZ. Di samping faktor jarak pengukuran, penyesuaian *cutting speed* turut memicu variasi nilai kekerasan yang terukur. Korelasi ini menunjukkan bahwa *cutting speed* menjadi parameter yang menunjukkan perubahan karakteristik mekanis baja pascaproses *Fiber Laser Cutting*. Perbedaan *cutting speed* meregulasi durasi interaksi termal antara berkas laser dan permukaan material, yang pada akhirnya menentukan distribusi panas serta karakteristik kekerasan di sekitar zona potongan.

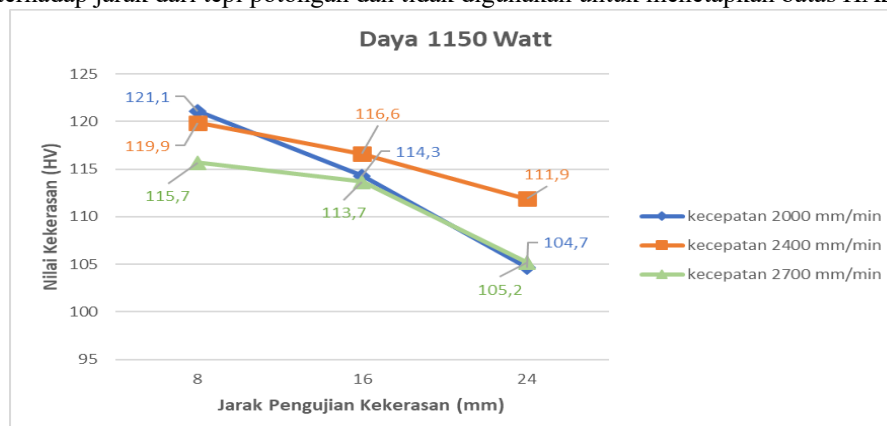


Gambar 12. Grafik nilai kekerasan dengan daya 1100 Watt

Berdasarkan Gambar 3.4.6 menunjukkan bahwa pada daya laser 1100 W nilai kekerasan cenderung menurun dengan bertambahnya jarak dari tepi potongan. Pada *cutting speed* 2000 mm/min, nilai kekerasan turun dari 120,7 HV pada 8 mm menjadi 111,5 HV pada 16 mm dan 106,2 HV pada 24 mm. Pada 2700 mm/min, nilai turun dari 114,9 HV menjadi 110,5 HV dan 105,8 HV. Sementara itu, pada 2400 mm/min perubahan lebih kecil, yaitu dari 116,2 HV menjadi 115,1 HV dan 113,4 HV. Magnitudo kekerasan maksimum tercatat sebesar 120,7 HV pada parameter laju potong 2000 mm/min pada titik ukur 8 mm, sementara angka kekerasan paling rendah sebesar 105,8 HV teridentifikasi pada konfigurasi 2700 mm/min di posisi 24 mm

Perbedaan gradien tersebut menunjukkan bahwa respons kekerasan terhadap jarak tidak sama pada setiap *cutting speed*. Pada kondisi 2000 mm/min, selisih kekerasan antara 8 mm dan 24 mm mencapai 14,5 HV, sedangkan pada 2400 mm/min selisihnya sebesar 2,8 HV dan pada 2700 mm/min sebesar 9,1 HV. Dengan demikian, perubahan *cutting speed* memengaruhi bentuk profil kekerasan yang diperoleh pada tiga posisi pengukuran. Secara proses, perbedaan tersebut dapat dikaitkan dengan perubahan waktu interaksi dan kondisi termal selama pemotongan. *cutting speed* yang berbeda mengubah durasi paparan energi laser pada material sehingga distribusi panas di sekitar daerah potongan dapat berbeda. Literatur menunjukkan bahwa respons kekerasan pada daerah hasil *Fiber Laser Cutting* dapat berbeda dari material induk dan bahwa keseimbangan antara parameter laser dan sifat material penting dalam menentukan respons permukaan maupun kekerasan.

Meskipun demikian, perubahan tersebut tidak dapat digunakan untuk menentukan batas HAZ secara langsung. Tidak adanya pengamatan mikrostruktur menyebabkan interpretasi dibatasi pada kecenderungan distribusi kekerasan terhadap jarak. Oleh karena itu, hasil pengujian kekerasan dalam penelitian ini hanya digunakan untuk menggambarkan profil kekerasan terhadap jarak dari tepi potongan dan tidak digunakan untuk menetapkan batas HAZ secara spesifik.



Gambar 13. Grafik nilai kekerasan dengan daya laser 1150 Watt

Gambar 3.4.7 menunjukkan bahwa pada daya laser 1150 W nilai kekerasan cenderung lebih tinggi pada posisi 8 mm dibandingkan posisi 16 mm dan 24 mm. Pada *cutting speed* 2000 mm/min, nilai kekerasan sebesar 121,1 HV pada 8 mm menurun menjadi 114,3 HV pada 16 mm dan 104,7 HV pada 24 mm. Pada 2400 mm/min, nilai berubah dari

119,9 HV menjadi 116,6 HV dan 111,9 HV, sedangkan pada 2700 mm/min berubah dari 115,7 HV menjadi 113,7 HV dan 105,2 HV.

Pada kombinasi 1150 W–2000 mm/min, selisih kekerasan antara posisi 8 mm dan 24 mm mencapai 16,4 HV. Besarnya perubahan tersebut lebih tinggi dibandingkan kombinasi 1150 W–2400 mm/min yang memiliki selisih 8,0 HV, sedangkan pada 1150 W–2700 mm/min selisihnya mencapai 10,5 HV. Data ini menunjukkan bahwa perubahan profil kekerasan tidak hanya bergantung pada jarak pengukuran, tetapi juga berbeda menurut *cutting speed*. Nilai 121,1 HV pada posisi 8 mm dan 104,7 HV pada posisi 24 mm pada kombinasi 1150 W–2000 mm/min merupakan nilai kekerasan tertinggi dan terendah dalam kombinasi parameter tersebut. Pola penurunan terhadap jarak dapat mengindikasikan bahwa daerah yang lebih dekat dengan jalur pemotongan mengalami kondisi proses yang berbeda dibandingkan daerah yang lebih jauh. Namun, tanpa karakterisasi mikrostruktur, mekanisme perubahan tersebut tidak dapat ditetapkan secara langsung sebagai akibat perubahan fase atau pembentukan HAZ.

Hasil tersebut secara umum konsisten dengan penelitian Basak et al. yang menunjukkan bahwa hardness pada daerah hasil *Fiber Laser Cutting* dapat berbeda dari material induk dan bahwa respons tersebut dipengaruhi oleh kombinasi parameter proses serta sifat intrinsik material. Penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa mild steel dapat mengalami perubahan kekerasan pada daerah hasil pemotongan. Oleh karena itu, hasil penelitian ini mendukung adanya perubahan kekerasan di sekitar daerah potongan, tetapi tidak digunakan untuk menentukan lebar HAZ secara langsung.

Jika ketiga grafik kekerasan dibandingkan, yaitu daya 1050 W, 1100 W, dan 1150 W, terdapat kecenderungan bahwa nilai kekerasan pada posisi 8 mm lebih tinggi daripada posisi 16 mm dan 24 mm pada sebagian besar kombinasi *cutting speed*. Pada 1050 W, nilai kekerasan berada pada rentang 105,6–113,4 HV; pada 1100 W berada pada rentang 105,8–120,7 HV; sedangkan pada 1150 W berada pada rentang 104,7–121,1 HV. Data tersebut menunjukkan bahwa rentang nilai kekerasan berbeda pada setiap tingkat daya laser, tetapi perubahan tersebut tidak membentuk pola linier sederhana terhadap daya laser.

Kecenderungan penurunan kekerasan terhadap jarak dapat digunakan untuk menggambarkan distribusi sifat mekanis pada tiga posisi pengukuran, tetapi tidak dapat digunakan untuk menetapkan kedalaman HAZ. Literatur menunjukkan bahwa hardness pada daerah hasil *Fiber Laser Cutting* dapat berbeda dari material induk, sementara karakteristik tersebut dipengaruhi oleh kondisi material dan parameter pemotongan. Oleh karena itu, pada penelitian ini perubahan kekerasan diinterpretasikan sebagai karakteristik distribusi kekerasan terhadap jarak dari tepi potongan dan bukan sebagai pengukuran langsung lebar HAZ.

Penelitian pada baja struktural S355JR juga menunjukkan bahwa parameter *Fiber Laser Cutting* dan kondisi pemotongan dapat memengaruhi kualitas hasil potongan serta zona yang mengalami perubahan akibat proses laser. Namun, penelitian tersebut menggunakan ketebalan 4 mm dan 6 mm serta melakukan pengamatan mikroskopis terhadap HAZ, sehingga hasilnya tidak dapat dibandingkan secara langsung dengan penelitian ASTM A36 tebal 2 mm ini. Perbandingan tersebut digunakan untuk memperkuat mekanisme umum proses, sedangkan nilai kekerasan penelitian ini tetap ditafsirkan berdasarkan data eksperimen sendiri.

3.4.3 Keterkaitan Karakteristik Kekasaran Permukaan dan Kekerasan

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi daya laser dan *cutting speed* menghasilkan variasi karakteristik kekasaran permukaan dan kekerasan pada baja ASTM A36 2 mm. Keempat parameter kekasaran menunjukkan nilai terendah pada kombinasi 1150 W–2000 mm/min, yaitu R_a 0,991 μm , R_q 1,292 μm , R_z 9,139 μm , dan R_t 12,087 μm . Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kombinasi tersebut menghasilkan karakteristik kekasaran terendah dalam rentang parameter yang diuji. Sementara itu, hasil kekerasan menunjukkan kecenderungan nilai yang lebih tinggi pada posisi 8 mm dibandingkan posisi yang lebih jauh pada sebagian besar kondisi.

Pola kekasaran dapat dijelaskan melalui interaksi antara daya laser, *cutting speed*, energi yang diberikan, pelelehan material, dan pengeluaran material cair melalui *kerf*. Sementara itu, perubahan kekerasan terhadap jarak menunjukkan adanya variasi sifat mekanis di sekitar daerah potongan, tetapi belum dapat digunakan untuk menentukan HAZ karena penelitian tidak melakukan karakterisasi mikrostruktur. Interpretasi tersebut konsisten dengan literatur yang menunjukkan bahwa kualitas *Fiber Laser Cutting* merupakan hasil interaksi antara parameter proses dan sifat material. Karena setiap kombinasi perlakuan pada penelitian ini diwakili oleh satu spesimen independen, perbedaan antarperlakuan diperlakukan sebagai kecenderungan deskriptif-komparatif dan tidak dinyatakan sebagai perbedaan yang signifikan secara statistik. Dengan demikian, kombinasi 1150 W–2000 mm/min dinyatakan sebagai kombinasi dengan nilai kekasaran terendah pada kondisi eksperimen yang digunakan, bukan sebagai parameter optimum universal.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, variasi daya laser dan *cutting speed* menghasilkan karakteristik kekasaran permukaan dan kekerasan yang berbeda pada baja ASTM A36 dengan ketebalan 2 mm. Karakteristik kekasaran yang dievaluasi melalui parameter Ra, Rq, Rz, dan Rt menunjukkan bahwa kombinasi daya laser 1150 W dan *cutting speed* 2000 mm/min menghasilkan nilai kekasaran terendah pada seluruh parameter yang diuji, yaitu Ra sebesar 0,991 μm , Rq sebesar 1,292 μm , Rz sebesar 9,139 μm , dan Rt sebesar 12,087 μm . Hasil tersebut menunjukkan bahwa pada rentang parameter penelitian, kombinasi tersebut memberikan karakteristik permukaan paling rendah berdasarkan keempat parameter kekasaran. Profil kekerasan menunjukkan kecenderungan nilai yang lebih tinggi pada posisi yang lebih dekat dengan tepi potongan dibandingkan posisi yang lebih jauh. Pada kombinasi 1150 W dan 2000 mm/min, nilai kekerasan sebesar 121,1 HV diperoleh pada jarak 8 mm, 114,3 HV pada jarak 16 mm, dan 104,7 HV pada jarak 24 mm. Kecenderungan perubahan kekerasan terhadap jarak menunjukkan adanya perbedaan respons sifat mekanis di sekitar daerah potongan yang secara teoritis dapat berkaitan dengan siklus termal selama proses pemotongan. Namun, hasil kekerasan tidak digunakan untuk menentukan keberadaan atau lebar *heat-affected zone* (HAZ) secara langsung karena penelitian ini tidak mencakup pengamatan mikrostruktur dan pengukuran lebar HAZ. Dengan mempertimbangkan bahwa setiap kombinasi parameter hanya menggunakan satu spesimen independen, hasil penelitian ini diperlakukan sebagai karakterisasi deskriptif-komparatif. Oleh karena itu, kombinasi 1150 W dan 2000 mm/min dinyatakan sebagai kombinasi dengan nilai kekasaran terendah pada kondisi eksperimen yang digunakan, bukan sebagai parameter optimum yang berlaku secara umum. Hasil penelitian dapat menjadi data awal untuk karakterisasi kualitas hasil *Fiber Laser Cutting* pada baja ASTM A36 tebal 2 mm. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan replikasi spesimen independen dan memperluas variasi parameter, seperti tekanan dan komposisi gas bantu, diameter *nozzle*, posisi fokus laser, serta ketebalan material, disertai karakterisasi mikrostruktur untuk mengidentifikasi HAZ secara lebih langsung.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Dr. Ir. Yuris Setyoadi, S.Pd., M.T., Bapak Muhammad Faesal Febriandyono, S.T., M.T., dan Bapak Ir. Hisyam Ma'mun, S.T., M.T. atas bimbingan, arahan, dan masukan yang diberikan dan motivasi yang tak henti-hentinya dicurahkan sepanjang pelaksanaan penelitian ini. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada Bapak Kurdi, Ibu Endang Siswati, dan kakak Setya Alit Purnawati atas doa, dukungan, dan motivasi yang senantiasa diberikan. Terima kasih kepada Ahmad Jalaludin Mahtum atas kontribusinya dan bantuan serta kerja sama yang solid sehingga karya ilmiah ini dapat diselesaikan secara optimal, serta kepada seseorang dengan NPM 22220026 atas perhatian, dukungan, dan semangat yang diberikan hingga karya ilmiah ini dapat diselesaikan.

PERNYATAAN PENGGUNAAN KECERDASAN BUATAN (ARTIFICIAL INTELLIGENCE)

Dalam penyusunan naskah penelitian ini, penulis dapat menggunakan teknologi Kecerdasan Buatan (Artificial Intelligence/AI) sebagai alat bantu dalam proses penulisan dan penyuntingan naskah. Penggunaan AI terbatas pada kegiatan yang mendukung proses akademik, seperti membantu memperbaiki tata bahasa, struktur kalimat, kejelasan penyampaian, penerjemahan, pengorganisasian ide, serta penyuntingan bahasa.

AI tidak digunakan sebagai pengganti tanggung jawab intelektual penulis dalam merumuskan masalah penelitian, menentukan metodologi, mengumpulkan dan menganalisis data, menafsirkan hasil penelitian, maupun menarik kesimpulan. Seluruh data, hasil analisis, interpretasi, argumentasi ilmiah, dan kesimpulan dalam naskah menjadi tanggung jawab penuh penulis.

Penulis bertanggung jawab untuk melakukan pemeriksaan, verifikasi, dan validasi terhadap seluruh informasi atau keluaran yang dihasilkan dengan bantuan AI. Penulis juga memastikan bahwa penggunaan AI tidak mengakibatkan plagiarisme, fabrikasi atau falsifikasi data, pelanggaran hak cipta, pelanggaran kerahasiaan, maupun bentuk pelanggaran etika publikasi lainnya.

Apabila penggunaan AI menghasilkan kontribusi substantif terhadap isi naskah, penggunaannya akan diungkapkan secara transparan sesuai dengan kebijakan jurnal. AI tidak dicantumkan sebagai penulis karena teknologi AI tidak dapat bertanggung jawab terhadap integritas, keaslian, dan pertanggungjawaban ilmiah suatu karya penelitian.

Dengan demikian, penggunaan AI dalam naskah ini ditempatkan sebagai alat bantu pendukung proses penelitian dan penulisan, sedangkan seluruh tanggung jawab akademik dan etika atas isi naskah tetap berada pada penulis.

REFERENCES

- [1] L. Cepauskaite and R. Bendikiene, "Effect of Fiber-Laser Parameters on Cutting Accuracy of Thin and Thick S355JR Structural Steel Plates," 2024, [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/met14060723>
- [2] M. Alsaadawy, M. Dewidar, A. Said, I. Maher, and T. A. Shehabeldeen, *A comprehensive review of studying the influence of laser cutting parameters on surface and kerf quality of metals*, vol. 130, no. 3–4. Springer London, 2024. doi: 10.1007/s00170-023-12768-1.
- [3] R. de C. M. Sales-Contini *et al.*, "Optimizing Laser Cutting Parameters for Enhanced Surface Quality in Mild and Stainless Steel: An Experimental Study," *Eng. Reports*, vol. 7, no. 7, 2025, doi: 10.1002/eng2.70283.
- [4] 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.
- [5] S. Bujangga Bagus Wedhakara, "Pengaruh Daya dan Kecepatan pada Proses Fiber Laser Cutting terhadap Kekerasan Menggunakan Baja A36 dengan Ketebalan 6 mm," *JMME J. Mesin Mater. Manufaktur dan Energi*, vol. 5, no. 1, pp. 7–14, 2025, [Online]. Available: doi: <https://doi.org/10.47549/jmmme.v5i2.15754>
- [6] M. S. Dzulfikri and D. H. P., "Pengaruh Daya Dan Kecepatan Pemotongan Fiber Laser Cutting Pada Baja A36 Dengan Ketebalan 6 mm Terhadap Kekasaran Permukaan," *JMME J. Mesin Mater. Manufaktur dan Energi*, vol. 5, no. 1, pp. 7–14, 2025, [Online]. Available: doi: <https://doi.org/10.47549/jmmme.v5i1.13806>
- [7] F. Rahmadianto, G. A. Pohan, and K. Yanuar, "Pengaruh Cutting Speed dan Laser Power Proses Fiber Laser Cutting Terhadap Kekasaran Permukaan Pada Baja AISI 1040 Dengan Ketebalan 6mm," *J. Tek.*, vol. 23, no. 2, pp. 252–260, 2025, doi: 10.37031/jt.v23i2.710.
- [8] M. Safari, S. M. Abtahi, and J. Joudaki, "Experimental Modeling, Statistical Analysis, and Optimization of the Laser-Cutting Process of Hardox 400 Steel," *Materials (Basel)*, vol. 17, no. 12, 2024, doi: 10.3390/ma17122798.
- [9] A. Nugraha, I. W. Pradana, Y. Nugroho, and A. Nugroho, "Analisis Proses Laser Cutting dengan Variasi Cutting Speed, Jarak Focusline, dan Gas Pressure Terhadap Kekerasan dan Kekasaran Material MS SPHC," *JMPM (Jurnal Mater. dan Proses Manufaktur)*, vol. 7, no. 2, pp. 160–169, 2023, doi: 10.18196/jmpm.v7i2.19459.
- [10] D. Rafly Dwi Nuril Maulidani, "Jurnal Mesin Material Manufaktur dan Energi Pengaruh Gas pressure dan Cutting speed Pada Proses Fiber Laser Cutting Terhadap Kekasaran Permukaan Material Baja AISI 1040 Dengan Ketebalan 6 mm," *J. Mesin Mater. Manufaktur dan Energi*, vol. 6(1), no. 1, pp. 308–314, 2026, [Online]. Available: doi: <https://doi.org/10.47549/jmmme.v6i1.15770>
- [11] J. Chen, F. Tu, P. Wang, and Y. Cao, "Revealing the Enhancement Mechanism of Laser Cutting on the Strength–Ductility Combination in Low Carbon Steel," *Metals (Basel)*, vol. 14, no. 5, 2024, doi: 10.3390/met14050541.
- [12] A. Harnett, M. Ahmed Obeidi, I. U. Ahad, and A. R. Al-Hamaoy, "Comparing the surface hardness of mild steel processed with CO₂ and fibre lasers," *Results Mater.*, vol. 18, no. March, p. 100400, 2023, doi: 10.1016/j.rinma.2023.100400.
- [13] M. Ş. Adin, "Experimental research of the influence of fiber laser machining parameters on HAZ width in AISI 4140 steels," *DÜMF Mühendislik Derg.*, vol. 4, pp. 873–880, 2024, doi: 10.24012/dumf.1563430.
- [14] I. Miraoui, M. Boujelbene, and M. Zaied, "High-power laser cutting of steel plates: Heat affected zone analysis," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2016, 2016, doi: 10.1155/2016/1242565.
- [15] I. Čáčková, V. Čáčko, B. Ferenczi, A. Brusilová, E. Šooš, and S. Shabu, "Experimental Investigation and Statistical Optimization of Dimensional Accuracy and Microhardness in Fiber Laser Cutting of Low-Carbon Steel Sheets," *J. Manuf. Mater. Process.*, vol. 10, no. 5, 2026, doi: 10.3390/jmmp10050174.
- [16] "CNC Fiber Laser Cutting." [Online]. Available: <https://www.lpgadvancetech.com/service/cnc-fiber-laser-cutting/>
- [17] "Mitutoyo Surftest SJ-210." [Online]. Available: https://www.mitutoyo.com/benchmark/products/surfest-sj-210.html?utm_source=chatgpt.com
- [18] "Vickers Hardness Tester Nobel." [Online]. Available: https://www.ostenco.co.id/modern-hardness-tester.html?utm_source