

Pengaruh Daya dan Kecepatan pada Proses *Fiber Laser Cutting* terhadap Kekerasan Menggunakan Baja A36 dengan Ketebalan 6 mm

Bujangga Bagus Wedhakara ^{1,*}, Sibut ¹

¹ Program Studi Teknik Mesin S1 Institut Teknologi Nasional Malang

Kata kunci

Fiber Laser Cutting
Baja ASTM A36
Kekerasan *Microvickers*
Heat Affected Zone

ABSTRAK

Teknologi *fiber laser cutting* telah menjadi metode pemotongan yang efisien dan presisi dalam industri manufaktur. Penelitian menganalisis pengaruh variasi daya laser dan kecepatan pemotongan terhadap kekerasan material baja ASTM A36 dengan ketebalan 6 mm menggunakan teknologi *fiber laser cutting*. Metode eksperimental dilakukan dengan variasi daya 1200, 1350, dan 1500 Watt, serta kecepatan 400, 800, dan 1200 mm/min. Pengujian kekerasan *Microvickers* dilakukan pada jarak 8, 16, 24, dan 32 mm (*Base Metal*) dari tepi pemotongan untuk menganalisis *Heat Affected Zone* (HAZ). Hasil menunjukkan *fiber laser cutting* meningkatkan kekerasan baja ASTM A36 sebesar 18,6-30,9% dibanding *base metal* (160 HV). Kekerasan tertinggi 209,4 HV dicapai pada daya 1500 Watt dengan kecepatan 400 mm/min. Terdapat hubungan terbalik antara kecepatan pemotongan dan kekerasan yang dihasilkan. HAZ terbentuk dalam radius 8-24 mm dengan distribusi kekerasan menurun *gradual* menuju *base metal*. Parameter optimal untuk kekerasan maksimum adalah daya 1500 Watt dengan kecepatan 400 mm/min, sedangkan untuk keseimbangan kekerasan-produktivitas disarankan pada daya 1200 Watt dengan kecepatan 800 mm/min.

* **Corresponding author:**
Bujangga Bagus Wedhakara (email: gusharimerta40@gmail.com)

Diterima: 11 Agustus 2025

Disetujui: 12 September 2025

Dipublikasikan: 11 November 2025

1 Pendahuluan

Teknologi pemotongan laser telah menjadi solusi inovatif yang mendapat perhatian besar sebagai alat generasi berikutnya dalam era industri modern. Industri-industri telah menerapkan pemotongan laser di berbagai bidang karena teknologi ini dapat memotong logam yang tergolong tebal secara efektif dengan kecepatan tinggi [1]. Pemotongan laser memiliki berbagai keunggulan seperti pemotongan berkecepatan tinggi, kendali jarak jauh yang mudah, gaya reaksi rendah, dan sedikit limbah sekunder dibandingkan dengan metode pemotongan lainnya [2]. Teknologi ini terdiri dari sejumlah proses yang saling independen dan saling berinteraksi seperti interaksi material radiasi, dinamika fluida gas cair dan gas pembantu, perpindahan panas dan massa dalam logam padat dan cair, proses pembakaran, dan masih banyak lagi [3].

Salah satu teknologi pemotongn laser yaitu teknik *laser cutting*. *Laser cutting* yaitu teknik pemotongan yang menggunakan teknologi berbasis sinar laser sebagai perangkat yang dikolaborasikan dengan pengolahan data secara digital. *Laser cutting* menggunakan komputer untuk memotong material dengan menggunakan *laser* berkekuatan tinggi. Teknik *laser cutting* memberikan akurasi, kekuatan, dan kecepatan pemotongan yang tidak dapat diimplementasikan oleh pemotongan secara konvensional. Teknik ini mampu memotong berbagai macam material khususnya material baja [4]. Penggunaan *laser cutting* dibandingkan dengan pemotongan konvensional

yaitu lebih praktis dan dapat meminimalisir kontaminasi karena bahan tidak kontak secara langsung dengan benda kerja sehingga tidak mencemari bahan. Selain itu, Teknik ini mampu memotong secara lebih presisi dan mampu diaplikasikan pada material baja yang tergolong sulit [5].

Baja ASTM A36 menjadi spesifikasi standar untuk baja struktural karbon yang banyak digunakan dalam industri konstruksi. Baja ini mencakup berbagai bentuk, termasuk plat dan batang serta dirancang untuk aplikasi yang memerlukan kekuatan dan daya tahan [6]. Baja A36 mengandung silikon (Si) antara 0.15% hingga 0.40% dan tembaga (Cu) maksimum 0.20%. Kandungan besi (Fe) dalam baja ini mencapai sekitar 98%. Berdasarkan komposisi ini, baja ASTM A36 dikenal sebagai baja karbon rendah yang mudah dibentuk, diproses, dan di potong. Hal ini menjadi pilihan yang tepat dalam berbagai aplikasi konstruksi [7].

Fiber laser cutting merupakan teknologi pemotongan baja yang berkembang pesat dalam industri modern karena tingkat efisiensi dan akurasi yang tinggi. Parameter daya dan kecepatan pemotongan menjadi faktor utama yang menentukan kualitas hasil pemotongan dan mempengaruhi perubahan sifat mekanik baja, khususnya kekerasan material [8]. Pengaturan daya laser yang optimal dapat meningkatkan kualitas potongan, namun daya yang berlebihan berpotensi menyebabkan kerusakan termal pada material. Kecepatan pemotongan yang tidak sesuai dengan daya yang digunakan akan menghasilkan kualitas potongan yang buruk dan dapat mempengaruhi struktur mikro baja. Proses pemotongan laser menghasilkan panas yang terakumulasi pada zona pemotongan sehingga dapat meningkatkan kekerasan baja melalui pembentukan fasa martensit jika parameter daya dan kecepatan dikontrol dengan tepat [5].

Heat Affected Zone (HAZ) merupakan area di sekitar jalur potong tempat material mengalami perubahan struktur mikro dan sifat mekanik akibat paparan panas dari sinar laser. Zona ini terbentuk ketika energi panas menyebar melalui konduksi termal dan menciptakan gradien temperatur yang memicu transformasi fasa pada baja tanpa mencapai titik leleh [9]. Parameter daya dan kecepatan laser sangat mempengaruhi karakteristik HAZ dimana peningkatan daya akan memperluas zona ini. Pada baja karbon ASTM A36, pendinginan cepat di HAZ dapat membentuk struktur martensit yang meningkatkan kekerasan permukaan material secara signifikan [10].

Beberapa penelitian terdahulu telah menunjukkan pentingnya optimasi parameter pemotongan untuk mencapai hasil yang optimal. Penelitian Rahmat Illahi menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan potong dapat menurunkan kekerasan material namun meningkatkan elongasi, dimana kekerasan turun dari 86,6 HRB menjadi 80,8-83,2 HRB saat kecepatan dinaikkan [11]. Selanjutnya, penelitian Armada Syailendra menunjukkan bahwa ketelitian terbaik pada Fiber Laser Cutting dicapai pada tekanan gas 2,4 bar dengan kecepatan 4,2 m/menit, menghasilkan lebar potong $0,3 \pm 0,021$ mm sesuai standar ISO 9013 [12]. Penelitian sebelumnya lebih banyak berfokus pada metode *flame cutting* atau parameter tunggal sehingga belum memberikan pemahaman yang komprehensif mengenai interaksi dua parameter seperti daya dan kecepatan potong terhadap kekerasan material ini.

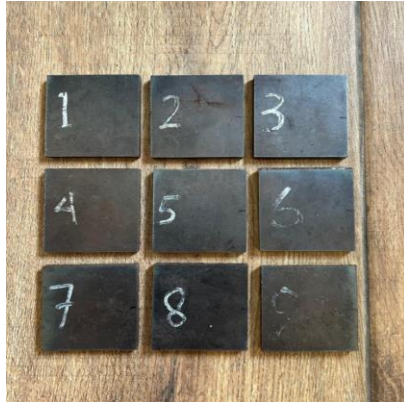
Berdasarkan beberapa hal yang telah diuraikan, maka diperlukan sebuah penelitian terkait pengaruh daya dan kecepatan pada laser cutting untuk material ASTM A36. Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki bagaimana variasi daya dan kecepatan mempengaruhi kekerasan baja ASTM A36 dengan ketebalan 6mm, serta untuk mengidentifikasi kondisi optimal yang dapat meningkatkan kekerasan permukaan tanpa mengurangi keuletan inti material. Pada penelitian ini, diharapkan dapat menghasilkan pemotongan yang memiliki nilai kekerasan yang baik sesuai dengan standar yang dibutuhkan.

2 Metode Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan untuk menganalisis pengaruh variasi daya laser dan kecepatan pemotongan terhadap nilai kekerasan baja ASTM A36 menggunakan teknologi *fiber laser cutting*. Penelitian dilakukan dari bulan April 2025 hingga Juni 2025 di tiga lokasi berbeda yaitu Laboratorium Manufaktur Institut Teknologi Nasional Malang untuk proses pemotongan laser, Laboratorium Perlakuan Bahan Universitas Negeri Malang untuk pengujian komposisi kimia, dan Laboratorium Metalurgi Institut Teknologi Nasional Malang untuk pengujian kekerasan permukaan. Penelitian ini menggunakan rancangan eksperimen faktorial dengan dua parameter utama yaitu daya laser dan kecepatan pemotongan. Desain eksperimen menggunakan kombinasi tiga tingkat daya laser (1200 Watt, 1350 Watt, 1500 Watt) dengan tiga tingkat kecepatan pemotongan (400

mm/menit, 800 mm/menit, 1200 mm/menit) sehingga menghasilkan 9 kombinasi perlakuan untuk menganalisis pengaruhnya terhadap kekerasan baja ASTM A36.

Bahan utama penelitian berupa baja ASTM A36 dengan ketebalan 6 mm yang telah diverifikasi komposisi kimianya melalui pengujian XRF. Alat utama yang digunakan meliputi mesin laser cutting untuk proses pemotongan material, alat pengujian Micro Vickers untuk mengukur kekerasan permukaan, dan spektrometer XRF untuk analisis komposisi kimia material. Berikut merupakan bahan dan alat pengujian microvickers.



Gambar 1 Spesimen Baja ASTM A36



Gambar 2 Alat Pengujian *Micro vickers*



Gambar 3 Mesin *Fiber Laser Cutting*



Gambar 4 XRF Portable

Proses pengumpulan data dimulai dengan persiapan material berupa baja ASTM A36 yang kemudian dipotong menggunakan mesin laser cutting dengan parameter yang telah ditetapkan. Setiap spesimen diberi penanda berupa penomoran untuk menghindari kesalahan identifikasi pada tahap pengujian selanjutnya. Parameter pemotongan yang digunakan meliputi diameter nozzle 1,5 mm, gas oksigen dengan tekanan 1 bar, dan sudut nozzle 90 derajat.

Prosedur penelitian dilakukan melalui beberapa tahapan sistematis yaitu sebagai berikut.

1. Tahap pertama adalah persiapan material dan kalibrasi mesin *laser cutting* sesuai dengan parameter yang telah ditentukan.
2. Tahap kedua adalah pelaksanaan proses pemotongan dengan variasi daya dan kecepatan sesuai dengan rancangan eksperimen menggunakan mesin *fiber laser cutting*. Setiap kombinasi parameter diulang untuk memastikan konsistensi hasil.
3. Tahap ketiga adalah pengujian kekerasan menggunakan metode *Micro Vickers* dimana spesimen diukur dimensinya terlebih dahulu, kemudian ditempatkan pada dudukan alat uji untuk dilakukan pengukuran kekerasan.
4. Tahap keempat yaitu pengujian komposisi kimia dilakukan menggunakan metode *X-Ray Fluorescence* (XRF) untuk menentukan komposisi unsur kimia dalam sampel tanpa merusak material.

Teknik analisis data yang digunakan meliputi analisis deskriptif untuk menggambarkan karakteristik data hasil pengujian kekerasan dan komposisi logam Data hasil pengujian disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk memudahkan interpretasi dan pembahasan hasil penelitian. Analisis dilakukan dengan membandingkan nilai kekerasan pada berbagai kombinasi parameter untuk menentukan kondisi optimal yang menghasilkan kekerasan yang stabil dan sesuai dengan standar yang diharapkan.

3 Hasil dan Pembahasan

3.1 Data Hasil Pengujian

Hasil penelitian ini membahas pengaruh variasi daya dan kecepatan pemotongan terhadap kekerasan material yang dipotong. Penelitian ini menghasilkan analisis tentang kekerasan baja setelah dilakukan pemotongan menggunakan mesin *fiber laser cutting* dengan variasi daya 1200 Watt, 1350 Watt, 1500 Watt dan kecepatan 400 mm/min, 800 mm/min, 1200 mm/min.

3.1.1 Hasil pengujian Komposisi Kimia

Table 1 Hasil Pengujian Komposisi Kimia.

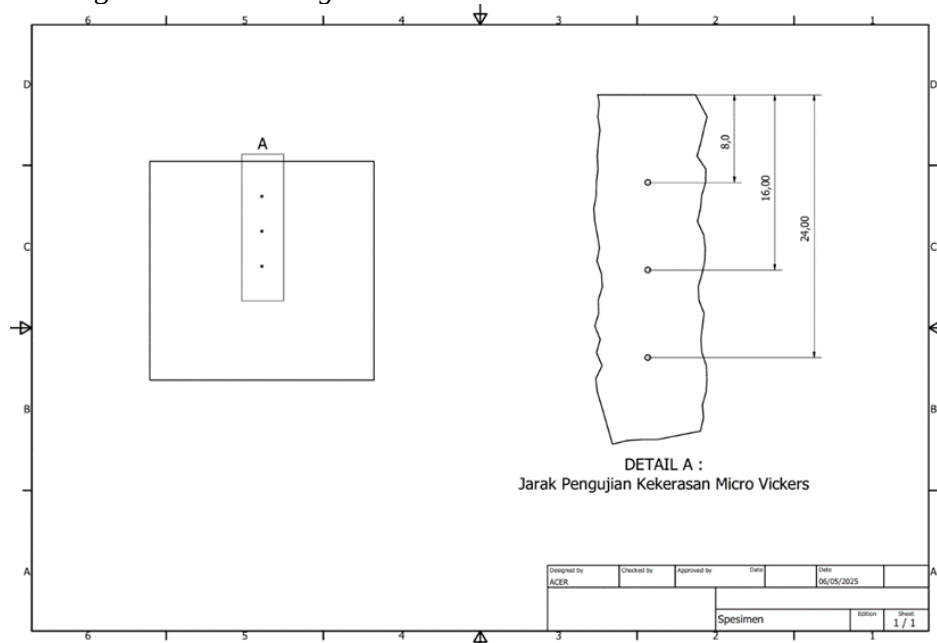
Fosfor (P)	Kalsium (Ca)	Kromium (Cr)	Mangan (Mn)	Besi (Fe)	Tembaga (Cu)	Rubidium (Rb)	Europium (Eu)
0,4%	0,21%	0,12%	1%	96,83%	0,063%	0,49%	0,87%

(Sumber : Laboratorium Perlakuan Bahan Universitas Negeri Malang)

Hasil analisis komposisi material baja A36 menunjukkan bahwa besi mendominasi sampel dengan persentase 96,83%, sehingga mengindikasikan bahwa material ini berbasis besi. Meskipun unsur-unsur lain hadir dalam jumlah yang lebih kecil, unsur-unsur tersebut memberikan sifat-sifat khusus pada material. Mangan dan fosfor dapat meningkatkan kekuatan serta ketahanan material, sedangkan kromium dapat meningkatkan ketahanan terhadap korosi. Kalsium dan tembaga juga berperan dalam menentukan sifat mekanik dan ketahanan material.

3.1.2 Hasil Pengujian Kekerasan Microvickers

Pengujian kekerasan Mikro-Vickers telah dilakukan di Laboratorium Metalurgi, Institut Teknologi Nasional Malang, untuk menganalisis distribusi kekerasan pada material yang telah dipotong menggunakan teknologi fiber *laser cutting*.



Gambar 5 Contoh Desain Jarak Pengujian Kekerasan Pada Benda Uji

Pengujian dilakukan sebanyak tiga kali pada setiap titik dengan jarak pengukuran masing-masing 8, 16, 24 milimeter (mm) dan 32 (Sebagai *Base Metal*) dari sisi pinggir spesimen, dimulai dari area yang

terdampak panas (*Heat Affected Zone/HAZ*) menuju ke bagian tengah material, seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.1 diatas. Mengacu pada Penelitian Nugraha tahun 2023 menunjukkan bahwa pengaruh panas dari *laser cutting* umumnya terbatas dalam radius 20mm-30mm [8].

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui perubahan sifat mekanik pada kekerasan yang terjadi akibat pengaruh panas selama proses pemotongan laser. Data lengkap dari hasil pengujian ditampilkan pada tabel di bawah ini:

Table 2 Hasil Uji Kekerasan Daya 1200 Watt

Spesimen	Daya (Watt)	Jarak (mm)	Cutting speed (mm/min)	Kekerasan baja (HV)
1	1200	8	400	206,6
	1200	16		190,9
	1200	24		185,2
	1200	32		160
2	1200	8	800	199,6
	1200	16		187,5
	1200	24		178,6
	1200	32		160
3	1200	8	1200	190,4
	1200	16		179,3
	1200	24		170,5
	1200	32		160

Sumber: (Laboratorium Material Institut Teknologi Nasional Malang, 2025)

Berdasarkan hasil tabel diatas menunjukkan hasil pengujian kekerasan pada baja ASTM A 36 di Laboraturium Pengujian Material Institut Teknologi Nasional Malang dengan 3 kali pengulangan pada 9 spesimen dengan jarak 8 mm, 16mm, 24mm, dan 32mm (*Base Metal*) dengan daya 1200 Watt dan *cutting speed* yang berbeda (400 mm/min, 800 mm/min, 1200 mm/min) tiap pengulangan menggunakan alat.

Table 3 Hasil Uji Kekerasan Daya 1350 Watt

Spesimen	Daya (Watt)	Jarak (mm)	Cutting speed (mm/min)	Kekerasan baja (HV)
4	1350	8	400	202,5
	1350	16		191,5
	1350	24		184,4
	1350	32		160
5	1350	8	800	195,5
	1350	16		186,4
	1350	24		178,7
	1350	32		160
6	1350	8	1200	191,9
	1350	16		180,4
	1350	24		173,6
	1350	32		160

Sumber: (Laboratorium Material Institut Teknologi Nasional Malang, 2025)

Kemudian, tabel diatas menunjukkan hasil uji kekerasan baja ASTM A36 pada variasi *cutting speed* dengan daya laser yang ditingkatkan menjadi sebesar 1350 Watt dan ketebalan material 6 mm.

Table 4 Hasil Uji Kekerasan Daya 1500 Watt

Spesimen	Daya (Watt)	Jarak (mm)	Cutting speed (mm/min)	Kekerasan baja (HV)
7	1500	8	400	209,4
	1500	16		187,3

	1500	24		176,8
	1500	32		160
8	1500	8		199,1
	1500	16	800	180,6
	1500	24		171,8
	1500	32		160
	1500	8		189,8
9	1500	16	1200	173,3
	1500	24		165,5
	1500	32		160
	1500	32		160

Sumber: (Laboratorium Material Institut Teknologi Nasional Malang, 2025)

Terakhir, tabel diatas menunjukkan hasil uji kekerasan baja ASTM A36 pada variasi cutting speed dengan daya laser yang ditingkatkan lagi menjadi sebesar 1500 Watt dan ketebalan material 6 mm.

3.2 Analisa Data dan Pembahasan

Pengujian ini mengkaji pengaruh daya laser dan kecepatan pemotongan terhadap kekerasan material baja ASTM A36 yang dipotong menggunakan teknologi *fiber laser cutting*. Analisis data dilakukan secara sistematis, dimulai dengan memastikan komposisi kimia material sesuai dengan standar ASTM A36, kemudian dilanjutkan dengan analisis terhadap data kekerasan *Microvickers* dari berbagai kombinasi parameter proses.

3.2.1 Analisa dan Pembahasan Hasil Pengujian Komposisi Kimia

Laboratorium Perlakuan Bahan Universitas Negeri Malang telah melakukan karakterisasi unsur kimia material baja A36 sesuai Tabel 4.1 yang menunjukkan spesimen memenuhi persyaratan spesifikasi ASTM A36. Hasil analisis memperlihatkan dominasi elemen besi (Fe) sebesar 96,83% yang memvalidasi karakteristik baja karbon rendah berbasis ferrous, dengan distribusi elemen tambahan meliputi mangan (Mn) 1% sebagai komponen penguatan dan agen deoksidasi, fosfor (P) 0,4% untuk mengoptimalkan resistensi mekanik, kromium (Cr) 0,12% untuk ketahanan oksidasi, kalsium (Ca) 0,21%, tembaga (Cu) 0,063%, rubidium (Rb) 0,49%, dan europium (Eu) 0,87% sebagai elemen jejak dari tahapan manufaktur. Profil kimia ini membuktikan bahwa spesimen baja A36 memiliki atribut yang cocok untuk penggunaan struktural dengan fleksibilitas memadai dan kapasitas deformasi plastis optimal untuk prosedur pemotongan laser tanpa mengalami retak serius.

Komposisi kimia yang diperoleh menunjukkan karakteristik yang sesuai dengan standar ASTM A36, dimana setiap unsur memberikan kontribusi spesifik terhadap sifat mekanik material [13]:

1. Besi (Fe) - 96,83%

Sebagai unsur utama, besi memberikan struktur dasar material dan menentukan sifat ferromagnetik baja. Kandungan Fe yang tinggi mengindikasikan kemurnian material yang baik dan konsistensi dengan klasifikasi baja karbon rendah.

2. Mangan (Mn) - 1%

Mangan berfungsi sebagai agen deoksidasi dan desulfurisasi selama proses pembuatan baja. Kandungan Mn 1% dalam penelitian ini optimal untuk meningkatkan kekuatan tarik dan kekerasan melalui pembentukan *solid solution strengthening*. Mangan juga berperan dalam memperbaiki mampu bentuk (*workability*) dan mengurangi kecenderungan *hot shortness*.

3. Fosfor (P) - 0,4%

Kandungan fosfor 0,4% masih dalam batas yang dapat diterima untuk ASTM A36 (maksimal 0,4%). Fosfor dalam jumlah terkontrol dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasan melalui mekanisme *solid solution strengthening*, namun kandungan berlebih dapat menyebabkan cold shortness dan menurunkan ketangguhan material.

4. Kromium (Cr) - 0,12%

Meskipun dalam jumlah kecil, kromium memberikan kontribusi terhadap ketahanan korosi dan sedikit meningkatkan *hardenability*. Kandungan Cr rendah ini konsisten dengan klasifikasi baja karbon yang tidak memerlukan sifat tahan karat khusus.

5. Kalsium (Ca) - 0,21%

Kalsium berperan sebagai agen pembentuk inklusi yang mengontrol morfologi sulfida, sehingga memperbaiki sifat mekanik transversal dan mengurangi anisotropi material. Penambahan Ca juga meningkatkan kemampuan pemrosesan (*machinability*) material.

6. Tembaga (Cu) - 0,063%

Kandungan tembaga yang rendah menunjukkan kemurnian material yang baik. Cu dalam jumlah kecil dapat sedikit meningkatkan ketahanan korosi atmosferik tanpa mengurangi sifat las (*weldability*) material secara signifikan.

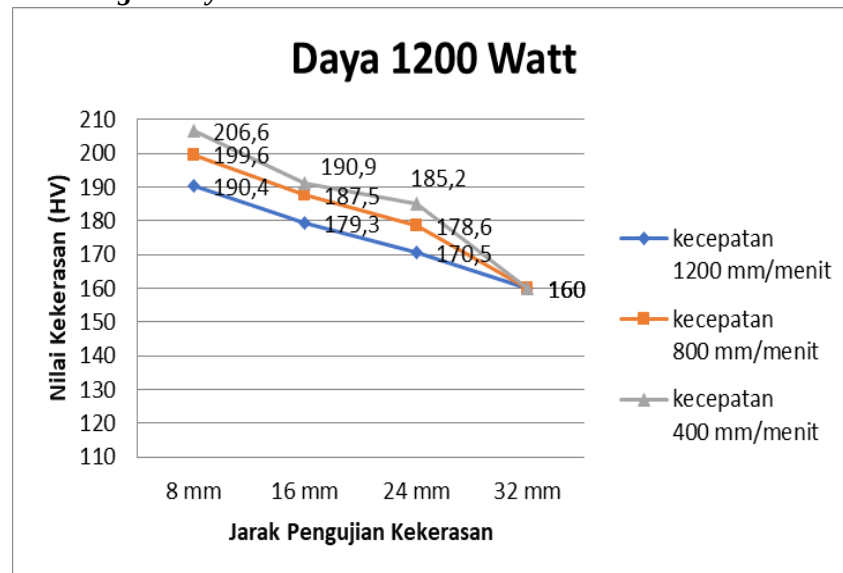
7. Rubidium (Rb) - 0,49% dan Europium (Eu) - 0,87%

Keberadaan unsur-unsur langka ini kemungkinan berasal dari kontaminasi selama proses produksi atau merupakan bagian dari komposisi bahan baku. Kandungan yang relatif kecil tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap sifat mekanik utama material.

3.2.2 Analisa Data dan Pembahasan Hasil Pengujian Kekerasan

Berdasarkan analisa data hasil pengujian kekerasan *Microvickers* didapatkan data kekerasan pada Baja ASTM A36. Pengujian dilakukan dengan mempertimbangkan variasi parameter operasional yang mencakup tiga tingkat daya (80%, 90%, dan 100%) serta tiga variasi kecepatan pemotongan (400 mm/min, 800 mm/min, dan 1200 mm/min). Data komprehensif dari hasil pengujian tersebut dapat diamati pada grafik-grafik berikut yang menampilkan hubungan antara jarak pengujian dengan nilai kekerasan material.

3.2.2.1 Nilai Kekerasan Dengan Daya 1200 Watt



Gambar 6 Grafik Nilai Kekerasan Dengan Daya 1200 Watt

Hasil uji kekerasan *Vickers* pada spesimen yang dipotong menggunakan laser 1200 Watt memperlihatkan tren seragam untuk seluruh variasi laju pemotongan dengan pengukuran pada interval 8 mm, 16 mm, 24 mm, dan 32 mm dari pinggir potongan. Temuan menunjukkan bahwa kekerasan puncak terjadi pada posisi 8 mm dari tepi pemotongan untuk semua kecepatan yang diuji, kemudian mengalami degradasi progresif hingga kembali ke tingkat kekerasan material dasar sebesar 160 HV di posisi 32 mm. Jarak 8 mm dipilih karena berada pada zona transisi HAZ dimana efek termal masih signifikan namun telah mulai menurun, sesuai dengan ketebalan material baja 6 mm. Temuan ini konsisten dengan penelitian Nugraha yang menyebutkan bahwa pengaruh panas *laser cutting* terbatas dalam radius 20-30 mm, sehingga pengujian pada berbagai jarak memberikan gradasi yang representatif dari zona yang terkena pengaruh panas langsung [8].

Jarak 8mm dipilih berdasarkan pertimbangan yaitu :

1. Cukup dekat dengan tepi potong untuk mendeteksi perubahan kekerasan akibat HAZ
2. Cukup jauh untuk menghindari deformasi struktur material akibat proses preparasi sampel
3. Memberikan titik referensi yang stabil untuk pengujian berulang

Secara umum, grafik menunjukkan bahwa nilai kekerasan cenderung menurun seiring Hasil pengujian kekerasan *Vickers* menunjukkan bahwa nilai kekerasan cenderung menurun seiring

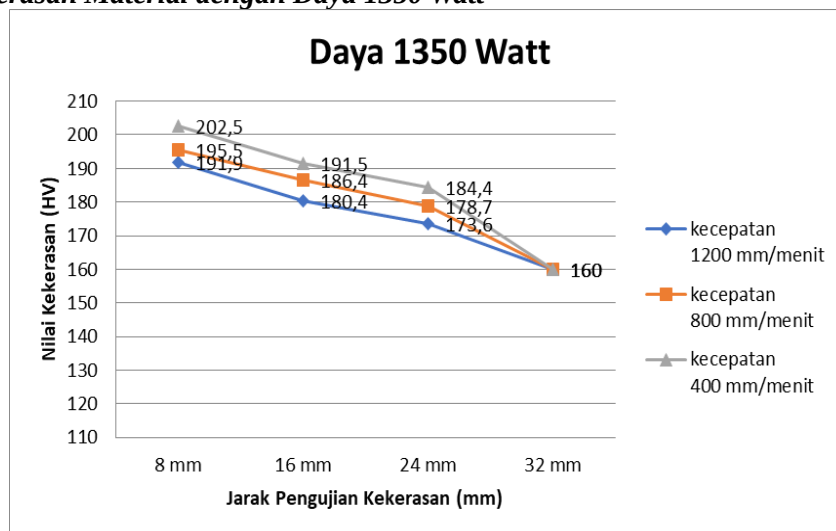
bertambahnya jarak pengujian untuk semua variasi kecepatan, mengindikasikan adanya penurunan kekerasan material akibat efek panas selama proses pemotongan. Variasi kecepatan pemotongan memberikan pengaruh signifikan terhadap distribusi kekerasan di zona HAZ, dimana kecepatan 400 mm/menit menghasilkan kekerasan maksimum 206,6 HV pada jarak 8 mm yang menurun menjadi 190,9 HV (16 mm), 185,2 HV (24 mm), dan 160 HV (32 mm), sedangkan kecepatan 800 mm/menit mencapai kekerasan maksimum 199,6 HV pada jarak 8 mm dengan penurunan menjadi 187,5 HV (16 mm), 178,6 HV (24 mm), dan 160 HV (32 mm), serta kecepatan 1200 mm/menit memperoleh kekerasan maksimum 190,4 HV pada jarak 8 mm yang menurun menjadi 179,3 HV (16 mm), 170,5 HV (24 mm), dan mencapai kekerasan *base metal* 160 HV pada jarak 32 mm.

Pada jarak 24mm terdapat perbedaan nilai hasil dari pengujian kekerasan yang disebabkan oleh beberapa faktor yaitu:

1. Pada Kecepatan Rendah Menghasilkan *over-tempering effect*.
2. Pada Kecepatan Sedang Menciptakan kondisi termal yang tidak optimal.
3. Pada Kecepatan Tinggi Memberikan kontrol termal yang lebih baik.

Hasil pengujian kekerasan Microvickers pada material baja ASTM A36 pasca proses *fiber laser cutting* menunjukkan peningkatan nilai kekerasan yang signifikan sebesar 30-50% dari nilai kekerasan standar 120-160 HV. Fenomena ini terjadi akibat kombinasi kompleks antara efek perlakuan panas lokal (*heat treatment effect*), transformasi fasa, dan *work hardening* selama proses pemotongan laser yang menciptakan pemanasan intensif pada area terbatas [14]. Peningkatan kekerasan ini konsisten dengan teori *Rosenthal heat transfer* model yang menjelaskan distribusi panas dalam proses *laser cutting*, dimana intensitas panas menurun eksponensial terhadap jarak dari sumber panas, sehingga membuktikan bahwa proses *fiber laser cutting* secara efektif mengubah sifat mekanik material baja ASTM A36 melalui mekanisme metalurgi yang terjadi selama pemotongan [15].

3.2.2.2 Nilai Kekerasan Material dengan Daya 1350 Watt



Gambar 7 Nilai Kekerasan Material Dengan Daya 1350 Watt

Hasil pengujian kekerasan yang telah dilakukan pada material hasil pemotongan *laser cutting* dengan daya 1350 Watt, dapat diamati bahwa terdapat variasi kekerasan yang signifikan pada daerah sekitar tepi potong. Material *base metal* menunjukkan nilai kekerasan sebesar 160 HV yang konsisten pada jarak 32 mm dari tepi potong untuk semua variasi kecepatan pemotongan yang diuji.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa kecepatan pemotongan laser berpengaruh secara signifikan terhadap distribusi kekerasan di zona terpengaruh panas (*Heat Affected Zone/HAZ*). Pada kecepatan pemotongan 400 mm/menit, nilai kekerasan tertinggi tercapai sebesar 202,5 HV pada jarak 8 mm dari tepi potong. Nilai ini menunjukkan peningkatan kekerasan sebesar 26,6% dibandingkan dengan kekerasan *base metal*. Distribusi kekerasan pada parameter ini menunjukkan

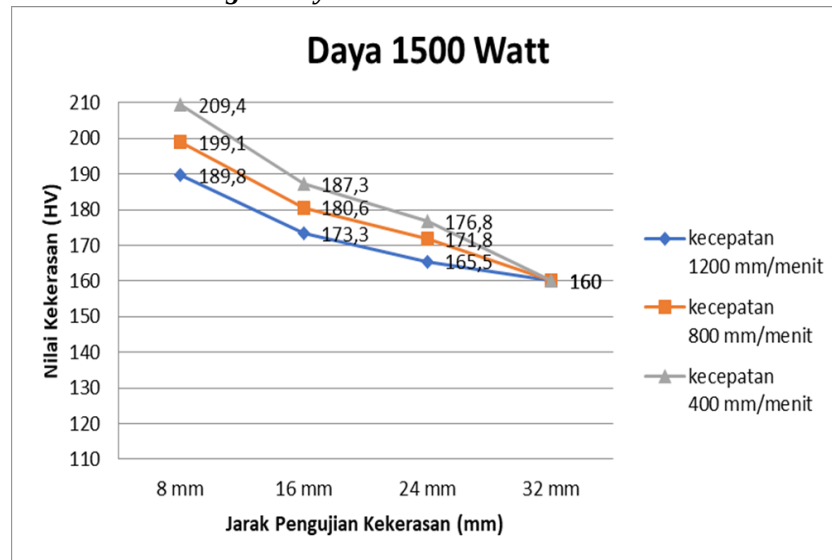
penurunan yang gradual, yaitu 191,5 HV pada jarak 16 mm, kemudian menurun menjadi 184,4 HV pada jarak 24 mm, dan akhirnya mencapai nilai *base metal* 160 HV pada jarak 32 mm.

Pada kecepatan pemotongan 800 mm/menit, kekerasan maksimum yang tercapai adalah 195,8 HV pada jarak 8 mm dari tepi potong, yang menunjukkan peningkatan sebesar 22,4% dari *base metal*. Pola distribusi kekerasan menunjukkan penurunan yang konsisten dengan nilai 186,4 HV pada jarak 16 mm, 178,7 HV pada jarak 24 mm, dan kembali ke nilai *base metal* 160 HV pada jarak 32 mm.

Sementara itu, pada kecepatan pemotongan tertinggi yaitu 1200 mm/menit, kekerasan maksimum yang dicapai adalah 194,9 HV pada jarak 8 mm dari tepi potong, dengan peningkatan sebesar 21,8% dari *base metal*. Distribusi kekerasan menunjukkan penurunan menjadi 180,4 HV pada jarak 16 mm, 173,6 HV pada jarak 24 mm, dan mencapai nilai *base metal* pada jarak 32 mm.

Kecepatan pemotongan 400 mm/menit memberikan peningkatan kekerasan tertinggi yang dapat menguntungkan untuk aplikasi yang membutuhkan ketahanan aus tinggi pada tepi potong. Namun, parameter ini juga menghasilkan HAZ yang lebih luas dan keras, yang mungkin tidak diinginkan untuk aplikasi tertentu. Kecepatan pemotongan yang lebih tinggi (800-1200 mm/menit) dapat mengurangi lebar dan intensitas HAZ sambil tetap mempertahankan kualitas pemotongan yang baik.

3.2.2.3 Nilai Kekerasan Material dengan Daya 1500 Watt



Gambar 8 Grafik Nilai Kekerasan Material Dengan Daya 1500 Watt

Grafik di atas memperlihatkan pengaruh variasi jarak pengujian kekerasan terhadap nilai kekerasan material pada kondisi daya 1500 Watt, dengan kecepatan pengelasan yang divariasikan pada 400 mm/min, 800 mm/min, dan 1200 mm/min.

Pada kecepatan pemotongan 400 mm/menit, material menunjukkan nilai kekerasan tertinggi yaitu 209,4 HV pada jarak 8mm dari tepi pemotongan. Nilai kekerasan kemudian menurun secara bertahap menjadi 187,3 HV pada jarak 16mm, 176,8 HV pada jarak 24mm, dan akhirnya mencapai nilai *base metal* 160 HV pada jarak 32mm. Penurunan kekerasan yang terjadi pada kecepatan ini menunjukkan gradien yang paling tajam dibandingkan dengan kecepatan pemotongan lainnya.

Kecepatan pemotongan 800 mm/menit menghasilkan nilai kekerasan yang lebih rendah dibandingkan kecepatan 400 mm/menit, namun masih menunjukkan peningkatan yang signifikan dari *base metal*. Pada jarak 8mm, nilai kekerasan tercatat sebesar 199,1 HV, kemudian menurun menjadi 180,6 HV pada jarak 16mm, 174,8 HV pada jarak 24mm, dan kembali ke nilai *base metal* 160 HV pada jarak 32mm. Penurunan kekerasan pada kecepatan ini menunjukkan gradien yang lebih landai dibandingkan kecepatan 400 mm/menit.

Sementara itu, kecepatan pemotongan 1200 mm/menit menunjukkan nilai kekerasan terendah di antara ketiga variasi yang diuji. Nilai kekerasan pada jarak 8mm adalah 189,8 HV, menurun menjadi 173,3 HV pada jarak 16mm, 165,5 HV pada jarak 24mm, dan mencapai *base metal* 160 HV pada jarak 32mm. Gradien penurunan kekerasan pada kecepatan ini adalah yang paling landai, menunjukkan distribusi panas yang lebih merata.

Hasil pengujian menunjukkan adanya pembentukan *Heat Affected Zone* (HAZ) yang jelas pada semua variasi kecepatan pemotongan. HAZ terbentuk akibat siklus termal yang dialami material selama proses *laser cutting*, dimana material mengalami pemanasan cepat diikuti dengan pendinginan yang relatif cepat pula. Fenomena ini menyebabkan transformasi mikrostruktur material, khususnya di area yang berdekatan dengan jalur pemotongan laser [10].

Luas HAZ yang terbentuk menunjukkan korelasi dengan kecepatan pemotongan yang digunakan. Pada kecepatan pemotongan yang lebih rendah (400 mm/menit), HAZ yang terbentuk memiliki gradien kekerasan yang lebih tajam, menunjukkan adanya heat input yang lebih tinggi per satuan panjang material. Sebaliknya, pada kecepatan pemotongan yang lebih tinggi (1200 mm/menit), HAZ yang terbentuk memiliki gradien yang lebih landai, menunjukkan distribusi panas yang lebih merata dengan heat input yang lebih rendah.

3.2.3 Analisa Keseluruhan Pengaruh Daya dan Kecepatan Terhadap Kekerasan Baja ASTM A36

Table 5 Pengaruh daya dan kekerasan terhadap Baja ASTM A36

Daya (watt)	Kecepatan (mm/min)	Kekerasan Maksimum (HV)	Peningkatan dari <i>Base Metal</i> (%)
1200	400	206.6	29.1%
	800	199.6	24.8%
	1200	190.4	19.0%
1350	400	202.5	26.6%
	800	195.8	22.4%
	1200	194.9	21.8%
1500	400	209.4	30.9%
	800	199.1	24.4%
	1200	189.8	18.6%

3.2.3.1 Analisa Pengaruh Daya Terhadap Kekerasan

Pada daya 1200 Watt, material menunjukkan peningkatan kekerasan yang konsisten dengan variasi yang relatif moderat antar berbagai kecepatan pemotongan. Nilai kekerasan tertinggi yang dicapai adalah 206,6 HV pada kecepatan pemotongan 400 mm/min, yang menunjukkan peningkatan sebesar 29,1% dibandingkan dengan kekerasan *base metal* sebesar 160 HV.

Peningkatan daya menjadi 1350 Watt menghasilkan karakteristik kekerasan yang berbeda, dimana material menunjukkan distribusi kekerasan yang relatif stabil dengan fluktuasi yang lebih kecil antar variasi kecepatan. Pada parameter ini, kekerasan tertinggi yang dicapai adalah 202,5 HV pada kecepatan pemotongan 400 mm/min, menunjukkan peningkatan sebesar 26,6% dari *base metal*. Menariknya, pada daya 1350 Watt terdapat fenomena dimana perbedaan kekerasan antara kecepatan 800 mm/min dan 1200 mm/min tidak terlalu signifikan, dengan nilai masing-masing 195,8 HV dan 194,9 HV.

Penggunaan daya tertinggi yaitu 1500 Watt menunjukkan hasil yang paling ekstrem, dimana pada kecepatan rendah menghasilkan kekerasan tertinggi dari seluruh pengujian yaitu 209,4 HV (peningkatan 30,9%), namun pada kecepatan tinggi mengalami penurunan yang paling signifikan menjadi 189,8 HV. Fenomena ini mengindikasikan bahwa pada daya tinggi, pengaruh kecepatan pemotongan menjadi lebih kritis dalam menentukan hasil akhir kekerasan material.

3.2.3.2 Analisa Pengaruh Kecepatan Terhadap Kekerasan

Kecepatan pemotongan 400 mm/min secara konsisten menghasilkan nilai kekerasan tertinggi pada setiap variasi daya, dengan rentang nilai antara 202,5 HV hingga 209,4 HV. Hal ini dapat dijelaskan melalui konsep heat input, dimana kecepatan pemotongan yang lebih rendah

memberikan waktu paparan panas yang lebih lama pada material, sehingga menghasilkan efek perlakuan panas yang lebih intensif.

Kecepatan pemotongan 800 mm/min memberikan hasil kekerasan yang berada pada tingkat menengah, dengan rentang nilai antara 195,8 HV hingga 199,6 HV. Parameter ini menunjukkan konsistensi yang baik antar variasi daya, mengindikasikan bahwa kecepatan ini memberikan kondisi termal yang stabil untuk proses pemotongan. Dari perspektif produktivitas, kecepatan ini menawarkan keseimbangan yang optimal antara kualitas hasil pemotongan dan efisiensi waktu produksi.

Kecepatan pemotongan tertinggi yaitu 1200 mm/min menghasilkan nilai kekerasan terendah pada semua variasi daya, dengan rentang nilai antara 189,8 HV hingga 194,9 HV. Meskipun menghasilkan kekerasan yang relatif rendah dibandingkan kecepatan lainnya, nilai-nilai ini masih menunjukkan peningkatan yang signifikan dibandingkan *base metal*, dengan peningkatan minimal 18,6%. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun heat input yang lebih rendah, proses *laser cutting* tetap memberikan efek perlakuan panas yang bermanfaat bagi material.

3.2.3.3 Optimasi Parameter Berdasarkan Tujuan Aplikasi

Kombinasi daya 1500 Watt dengan kecepatan pemotongan 400 mm/min menghasilkan kekerasan tertinggi sebesar 209,4 HV. Nilai ini menunjukkan peningkatan sebesar 30,9% dibandingkan base metal, sehingga sangat sesuai bagi aplikasi yang membutuhkan ketahanan aus tinggi. Aplikasi seperti komponen *cutting tools* atau *wear plates* akan sangat diuntungkan oleh parameter ini.

Kombinasi daya 1200 Watt dengan kecepatan pemotongan 800 mm/min menghasilkan kekerasan sebesar 199,6 HV dengan peningkatan 24,8% dari base metal. Selain menghasilkan kekerasan yang cukup tinggi, parameter ini juga memberikan produktivitas lebih baik dibandingkan kecepatan rendah. Oleh karena itu, parameter ini cocok diterapkan pada aplikasi struktural umum dan komponen mesin yang membutuhkan keseimbangan antara kekerasan dan efisiensi produksi.

Kombinasi daya 1350 Watt dengan kecepatan pemotongan 1200 mm/min menghasilkan kekerasan sebesar 194,9 HV. Meskipun nilai kekerasannya lebih rendah dibandingkan parameter lainnya, peningkatan sebesar 21,8% dari base metal tetap tergolong signifikan. Kombinasi ini dapat menjadi pilihan tepat pada produksi massal yang memprioritaskan efisiensi dan produktivitas, selama peningkatan kekerasan moderat masih mencukupi.

3.2.3.4 Kesimpulan Analisis Keseluruhan

Hasil analisis komprehensif memperlihatkan bahwa teknik pemotongan *fiber laser* pada material baja ASTM A36 berhasil meningkatkan tingkat kekerasan material dengan cara yang sangat efektif. Seluruh variasi parameter yang diteliti mampu menghasilkan peningkatan kekerasan dalam rentang 18,6% sampai 30,9% jika dibandingkan dengan kekerasan material dasar. Peningkatan ini terjadi karena adanya kombinasi rumit dari pengaruh pemanasan lokal, perubahan struktur fasa, dan pengerasan akibat deformasi yang berlangsung saat proses pemotongan.

Untuk mencapai kekerasan tertinggi, parameter yang disarankan adalah penggunaan daya 1500 Watt dengan laju pemotongan 400 mm/menit. Sementara itu, untuk aplikasi yang memerlukan keseimbangan antara tingkat kekerasan dan efisiensi produksi, direkomendasikan penggunaan daya 1200 Watt dengan laju pemotongan 800 mm/menit. Temuan dari penelitian ini memberikan sumbangsih yang berarti bagi perkembangan teknologi *laser cutting* dalam mengoptimalkan karakteristik mekanik material, terutama untuk keperluan industri yang memerlukan peningkatan daya tahan terhadap keausan dan kekuatan material di area hasil pemotongan.

Berdasarkan analisis komparatif terhadap grafik nilai kekerasan material Baja ASTM A36 pada variasi daya 1200 Watt, 1350 Watt, dan 1500 Watt, dapat ditarik beberapa kesimpulan penting mengenai pengaruh parameter pemotongan terhadap karakteristik mekanik material. Secara keseluruhan, nilai kekerasan cenderung menurun seiring dengan meningkatnya jarak dari titik awal pemotongan, mengindikasikan adanya pengaruh *Heat Affected Zone* (HAZ) yang meluas. Fenomena ini konsisten dengan prinsip-prinsip metalurgi fisik, di mana paparan termal selama proses pemotongan dapat menyebabkan perubahan kekerasan, seperti pertumbuhan butir, yang pada gilirannya menurunkan kekerasan material [9].

Penelitian ini sejalan dengan hasil penelitian Nugraha tahun 2023 yang menunjukkan bahwa perubahan daya dan kecepatan pemotongan memberikan pengaruh signifikan terhadap nilai kekerasan material. Peningkatan daya laser menyebabkan energi termal yang diserap material meningkat sehingga berpotensi meningkatkan kekerasan permukaan [8]. Namun, energi panas yang tidak terkendali dapat memperluas zona pengaruh panas sehingga memengaruhi distribusi kekerasan. Kecepatan pemotongan yang rendah menyebabkan waktu pemanasan lebih lama dan penyebaran panas yang lebih luas, sedangkan kecepatan tinggi cenderung memperkecil zona pemanasan sehingga nilai kekerasan menjadi lebih stabil [10].

Hasil pengujian yang diperoleh menunjukkan konsistensi dengan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Davis tahun 2001 yang menyebutkan bahwa baja struktural ASTM A36 dalam kondisi normal memiliki rentang kekerasan antara 120-160 HV. Peningkatan kekerasan yang signifikan pada semua kombinasi parameter yang diuji memvalidasi efektivitas proses *fiber laser cutting* sebagai metode perlakuan panas lokal yang dapat meningkatkan sifat mekanik material [13].

Fenomena pembentukan HAZ yang terbatas dalam radius 24-32 mm dari tepi potong juga konsisten dengan temuan Nugraha tahun 2023 yang menyebutkan bahwa pengaruh panas dari *laser cutting* umumnya terbatas dalam radius 20-30 mm. Hal ini mengkonfirmasi bahwa metodologi pengujian yang digunakan dalam penelitian ini tepat dan hasil yang diperoleh dapat diandalkan untuk analisis lebih lanjut [8].

Hubungan terbalik antara kecepatan pemotongan dan kekerasan yang dihasilkan juga sesuai dengan teori heat input dalam proses thermal cutting, dimana heat input yang lebih tinggi (kecepatan rendah) menghasilkan efek perlakuan panas yang lebih intensif. Validasi teoretis ini memperkuat kesimpulan bahwa parameter proses *laser cutting* dapat dioptimalkan untuk mencapai karakteristik kekerasan yang diinginkan sesuai dengan kebutuhan aplikasi spesifik.

4 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian pengaruh variasi daya dan kecepatan pemotongan menggunakan fiber laser terhadap kekerasan baja ASTM A36, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Peningkatan daya laser dari 1200 Watt hingga 1500 Watt menunjukkan pengaruh signifikan terhadap nilai kekerasan maksimum yang dicapai. Daya 1500 Watt menghasilkan kekerasan tertinggi sebesar 209,4 HV, diikuti daya 1200 Watt (206,6 HV) dan daya 1350 Watt (202,5 HV).
2. Kecepatan pemotongan berbanding terbalik dengan nilai kekerasan yang dihasilkan. Kecepatan 400 mm/min secara konsisten menghasilkan kekerasan tertinggi pada semua variasi daya, sedangkan kecepatan 1200 mm/min menghasilkan kekerasan terendah namun dengan produktivitas tertinggi.
3. Penelitian ini mengidentifikasi tiga kombinasi optimal berdasarkan tujuan aplikasi:
 - a. Untuk kekerasan maksimum: Kombinasi daya 1500 Watt dengan kecepatan 400 mm/min (209,4 HV, peningkatan 30,9%)
 - b. Untuk keseimbangan kekerasan-produktivitas: Kombinasi daya 1200 Watt dengan kecepatan 800 mm/min (199,6 HV, peningkatan 24,8%)
 - c. Untuk produktivitas maksimum: Kombinasi daya 1350 Watt dengan kecepatan 1200 mm/min (194,9 HV, peningkatan 21,8%)
4. Seluruh kombinasi parameter yang diuji berhasil meningkatkan kekerasan material baja ASTM A36 dalam rentang 18,6% hingga 30,9% dibandingkan dengan kekerasan base metal (160 HV). Peningkatan tertinggi dicapai pada kombinasi daya 1500 Watt dengan kecepatan 400 mm/min yang menghasilkan kekerasan 209,4 HV (peningkatan 30,9%).
5. Proses fiber laser cutting menghasilkan pembentukan HAZ yang terbatas dalam radius 24-32 mm dari tepi pemotongan. Distribusi kekerasan menunjukkan penurunan gradual dari zona terdekat tepi potong (8 mm) hingga mencapai nilai base metal pada jarak 32 mm.

5 Referensi

- [1] B. Tjahjono, R. M. Wattimena, A. Sai'in, M. S. N. Ulum, and E. Saputra, "Pengaruh Kecepatan Potong Mesin CNC Laser Cutting terhadap Akurasi Potong untuk Efisiensi Proses Blanking," *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 18, no. 3, pp. 2540–7678, 2023.
- [2] M. M. D. Gracia, "Aplikasi Laser Cutting pada Produk Fesyen," Institut Agama Islam Negeri Tulungagung, Tulungagung, 2018.
- [3] G. V. Ermolaev, P. V. Yudin, F. Briand, A. V. Zaitsev, and O. B. Kovalev, "Fundamental study of CO₂- and fiber laser cutting of steel plates with high speed visualization technique," *Journal of Laser Applications*, vol. 26, no. 4, Nov. 2014, doi: 10.2351/1.4895563.
- [4] B. D. Prihadianto and G. Nugroho, "PENGARUH JARAK LASER HEAD TERHADAP DIAMETER SPOT PADA PEMOTONGAN POLYMETHYL METHACRYLATE MENGGUNAKAN MESIN LASER CUTTING," *Jurnal Infotekmesin*, vol. 9, no. 1, 2018.
- [5] B. Amir, A. Lomnitz, L. Friedlaner, Y. Gale, S. Samuha, and O. Sadot, "Effects of shell scanning and build orientation on dynamic properties of laser powder bed fusion AlSi10Mg alloy," *Materials Science and Engineering: A*, p. 883, 2023.
- [6] J. Arifin, H. Purwanto, and I. Syafa'at, "Pengaruh Jenis Elektroda Terhadap Sifat Mekanik Hasil Pengelasan," vol. 13, no. 1, pp. 27–31, 2017.
- [7] P. Barros and P. M. D. Bautista, "Diseño de una plataforma suspendida de nivel variable y desplazamiento horizontal para realizar trabajos de mantenimiento en fachadas de edificios," Universidad Politécnica Salesiana, Quito, 2019.
- [8] 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*, vol. 7, no. 2, pp. 160–169, Dec. 2023, doi: 10.18196/jmpm.v7i2.19459.
- [9] Z. Fatoni, "Pengaruh Perlakuan Panas Terhadap Sifat Kekerasan Pisau Penyayat Batang Karet," vol. 4, pp. 56–63, 2016.
- [10] A. M. Sifullah, I. A. Khaled, Y. Nukman, M. A. Hassan, and A. Hossain, "Laser Cutting of Square Blanks in Stainless Steel-304 Sheets: HAZ and Thermal Stress Analysis," *JSM*, vol. 46, no. 5, pp. 755–762, May 2017, doi: 10.17576/jsm-2017-4605-10.
- [11] R. Illahi, "Analisa Pengaruh Kecepatan Potong Flame Cutting Pembuatan Joint Link ST52-3 Terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro," Universitas Tridinanti Palembang, Palembang, 2020.
- [12] A. Syailendra, "Pengaruh Kecepatan Potong dan Tekanan Gas terhadap Hasil Pemotongan Fiber Laser Cutting pada Material Mild Steel ASTM A36 Tebal 2.3 mm," Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Yogyakarta, 2024.
- [13] J. Davis, "Carbon and Alloy Steels Alloying: understanding the basics," 2001.
- [14] J. L. Dossett and G. E. Totten, "Heat treating of irons and steels," vol. 4D, ASM International, Materials Park: ASM handbook, 2014.
- [15] B. L. Bramfitt and A. O. Benschoter, "Metallographer's guide practices and procedures for irons and steels," *Metallurgia Italiana*, vol. 95, no. 2, p. 61, 2003.