

# Pengaruh Variasi Pukulan Terhadap Kekerasan Baja Menggunakan Mesin Hammer Otomatis

Kiki Qauri Valentino \*, M. Rasid, Dwi Arnoldi

Teknik Mesin Produksi dan Perawatan, Politeknik Negeri Sriwijaya, Palembang

\*Koresponden email: kikiqaurivarentino@gmail.com

Diterima: 14 Januari 2025

Disetujui: 23 Januari 2025

## Abstract

This study evaluates the effect of varying hammer strokes during the forging process using an automatic hammer machine on the hardness of ST 37 steel, ST 60 steel and automotive leaf springs. The experiments were carried out at a temperature of 600°C to analyse dimensional changes and material hardness resulting from plastic deformation. Data was obtained from thickness and hardness tests using the Vickers method. Variations in hammer strokes (0, 32 and 49 strokes) resulted in a significant increase in material hardness. For ST 37 steel the hardness increased from 137,964 kgf/mm<sup>2</sup> to 170,088 kgf/mm<sup>2</sup>, for ST 60 steel from 158,781 kgf/mm<sup>2</sup> to 172,56 kgf/mm<sup>2</sup> and for automotive leaf springs from 198,442 kgf/mm<sup>2</sup> to 241,756 kgf/mm<sup>2</sup>. This improvement is attributed to the strain hardening mechanism, which induces the accumulation of dislocations in the microstructure of the material, thereby increasing its resistance to further deformation. The variation in hammer strokes also influenced the changes in material thickness, with different levels of deformation depending on the mechanical properties of each material. ST 60 steel showed a more controlled deformation response compared to ST 37 steel, while automotive leaf springs showed greater deformation due to their more ductile nature. These results emphasise that forging process parameters, such as the number of hammer strokes, play a crucial role in enhancing the mechanical properties of materials to meet specific engineering application requirements.

**Keywords:** Forging, Strain hardening, ST 37 steel, ST 60 steel, Automobile leaf springs

## Abstrak

Penelitian ini mengevaluasi pengaruh variasi pukulan pada proses tempa menggunakan mesin hammer otomatis terhadap kekerasan logam Baja ST 37, Baja ST 60, dan pir daun mobil. Penelitian dilakukan pada suhu 600 °C untuk menganalisis perubahan dimensi dan kekerasan material akibat deformasi plastis. Data diperoleh melalui pengujian ketebalan dan kekerasan menggunakan *Vickers*. Variasi pukulan (0, 32, dan 49 pukulan) menghasilkan peningkatan signifikan pada kekerasan material, dengan Baja ST 37 menunjukkan peningkatan dari 137,964 kgf/mm<sup>2</sup> menjadi 170,088 kgf/mm<sup>2</sup>, Baja ST 60 dari 158,781 kgf/mm<sup>2</sup> menjadi 172,56 kgf/mm<sup>2</sup>, dan pir daun mobil dari 198,442 kgf/mm<sup>2</sup> menjadi 241,756 kgf/mm<sup>2</sup>. Peningkatan ini disebabkan oleh mekanisme *strain hardening* yang menginduksi akumulasi dislokasi dalam struktur mikro material, meningkatkan resistensinya terhadap deformasi lebih lanjut. Variasi jumlah pukulan juga memengaruhi perubahan ketebalan material, menunjukkan tingkat deformasi yang berbeda berdasarkan karakteristik mekanis masing-masing material. Baja ST 60 memiliki respons deformasi yang lebih terkendali dibandingkan Baja ST 37, sementara pir daun mobil menunjukkan respons deformasi yang lebih besar karena sifatnya yang lebih lentur. Hasil Penelitian ini menegaskan bahwa parameter proses tempa, seperti variasi pukulan, memainkan peran penting dalam meningkatkan sifat mekanis material untuk memenuhi kebutuhan aplikasi teknik tertentu.

**Kata Kunci :** Tempa, Strain hardening, Baja ST 37, Baja ST 60, Pir daun mobil

## 1. Latar Belakang

Kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi mengalami kemajuan yang sangat pesat terutama dalam bidang pembuatan perkakas. Pemenuhan permintaan konsumen terhadap produk berkualitas memerlukan inovasi dan penelitian yang dapat mendukung peningkatan kualitas produk. Di Indonesia, selain pembuatan perkakas yang dilakukan oleh industri modern berskala besar terdapat juga pembuatan perkakas yang dilakukan dengan cara tradisional oleh industri rumahan pengerajin logam. Proses pembuatannya dilakukan

dengan menggunakan alat sederhana, dan proses pembuatannya dilakukan dengan cara ditempa. Kualitas alat yang buruk menyebabkan hilangnya kepercayaan konsumen terhadap produk yang dibuat oleh pengerajin logam. Oleh karena itu, Dalam proses pemanasan atau pembakaran pada penempaan mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap sifat mekanik dan kekerasan bahan logam. Ketika suatu logam dipanaskan, struktur mikro yang terkandung di dalam material tersebut mengalami perubahan fasa, yang mempengaruhi sifat fisik dan mekaniknya. Proses ini mempunyai pengaruh khusus terhadap hasil tumbukan dan kekerasan apabila menggunakan mesin *Hammer* otomatis pada proses penempaan logam.

Penempaan berfokus pada logam yang mempunyai gaya tekan yang tinggi. Penempaan dilakukan untuk pemadatan partikel atau serat menjadi bahan mentah. Proses penempaan memperbaiki struktur mikro dengan cara mengkompresi dan mereduksi partikel untuk meningkatkan kekuatan dan kekerasan paduan[1]. Proses penempaan ini bertujuan untuk memperkecil lebar dan tebal suatu bagian dengan cara dipukul, yaitu menjadikan bagian tersebut lebih panjang tetapi padat. Pengujian kekerasan suatu logam merupakan suatu cara untuk menentukan derajat kekerasan suatu logam. Suatu bahan logam dapat menahan penetrasi atau deformasi plastis. Pengujian kekerasan sangat penting karena dapat memberikan informasi tentang sifat mekanik logam seperti kekuatan, keuletan, dan ketahanan terhadap deformasi. Informasi ini dapat digunakan untuk memilih bahan yang tepat untuk suatu bahan, memantau kualitas produksi, dan mengevaluasi efek perlakuan, perlakuan panas dan perlakuan lainnya pada logam[2].

Berdasarkan penelitian Nandito (2022), dapat disimpulkan bahwa variasi jumlah pukulan pada proses tempa *cold working* memiliki pengaruh signifikan terhadap sifat mekanis dan struktur mikro material. Peningkatan jumlah pukulan, seperti pada 75 dan 100 pukulan, menyebabkan pecahnya fasa efektoid dan meningkatnya distribusi silikon, yang memicu mekanisme penumpukan dislokasi pada batas butir. Akibatnya, material mengalami peningkatan kekerasan. Penelitian ini menunjukkan bahwa proses tempa *cold working* secara langsung memengaruhi kekerasan, struktur mikro, dan perubahan dimensi material.

Berdasarkan penelitian Suprpto (2018), dapat disimpulkan bahwa kekerasan dan struktur mikro material baja 0,5 CrMnSi dan JIS SUP 9 sangat dipengaruhi oleh temperatur penempaan. Penurunan temperatur penempaan berbanding lurus dengan peningkatan nilai kekerasan. Peningkatan kekerasan tertinggi ditemukan pada baja JIS SUP 9 variasi dua, dengan nilai 112 HV pada permukaan dan 106,2 HV pada penampang. Sementara itu, pada baja 0,5 CrMnSi variasi dua, nilai kekerasan tertinggi tercatat sebesar 158,5 HV pada permukaan dan 21,3 HV pada penampang. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pengendalian temperatur penempaan adalah faktor kunci dalam mengoptimalkan kekerasan dan struktur mikro baja untuk aplikasi tertentu[3].

Berdasarkan penelitian Sujendro (2023), variasi temperatur pemanasan memiliki pengaruh signifikan terhadap kekerasan, struktur mikro, dan perubahan bentuk material paduan kuningan dalam proses penempaan pembuatan katup gas. Semakin rendah temperatur pemanasan (300 °C, 400 °C, dan 500 °C), semakin tinggi nilai kekerasan yang dihasilkan. Struktur mikro menunjukkan variasi ukuran dan bentuk yang disebabkan oleh perbedaan temperatur dan gaya tempa, yang secara langsung memengaruhi nilai kekerasan dan perubahan bentuk material. Selain itu, temperatur pemanasan juga memengaruhi perubahan bentuk material, di mana temperatur yang lebih tinggi menghasilkan flash lebih banyak dan gaya tempa yang lebih ringan, sementara temperatur yang lebih rendah menghasilkan flash lebih sedikit namun memerlukan gaya tempa yang lebih besar. Temperatur optimal ditemukan pada 400 °C, karena pada suhu ini perubahan bentuk terjadi secara sempurna tanpa cacat akibat kelebihan atau kekurangan flash, serta tingkat keuletan material cukup untuk melanjutkan proses pembentukan selanjutnya, seperti permesinan[4].

Berdasarkan penelitian Mardjuki (2009), variasi temperatur pada proses forging memiliki pengaruh signifikan terhadap kekerasan dan kekuatan tarik paduan aluminium seri 308,0. Semakin tinggi temperatur forging (350 °C, 400 °C, 450 °C, 500 °C), nilai kekerasan yang dihasilkan cenderung menurun, dengan masing-masing nilai sebesar 49,9 HRB, 41,58 HRB, 36 HRB, dan 31,8 HRB. Hal serupa terjadi pada kekuatan tarik, di mana peningkatan temperatur menyebabkan penurunan nilai kekuatan tarik secara bertahap, yaitu sebesar 26,68 kg/mm<sup>2</sup>, 25,12 kg/mm<sup>2</sup>, 21,11 kg/mm<sup>2</sup>, dan 19,85 kg/mm<sup>2</sup>. Temuan ini menunjukkan bahwa kontrol temperatur pada proses *forging* merupakan faktor penting dalam mempertahankan sifat mekanis paduan aluminium. Berdasarkan *state-of-the-art* diatas yang menjadi acuan dalam penelitian ini, sehingga penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan informasi pengaruh variasi pukulan terhadap baja ST 37, baja ST 60 dan pir daun mobil.

## 2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode analisis data kuantitatif berdasarkan hasil uji penempahan baja ST 37, baja ST 60 dan pir daun mobil.

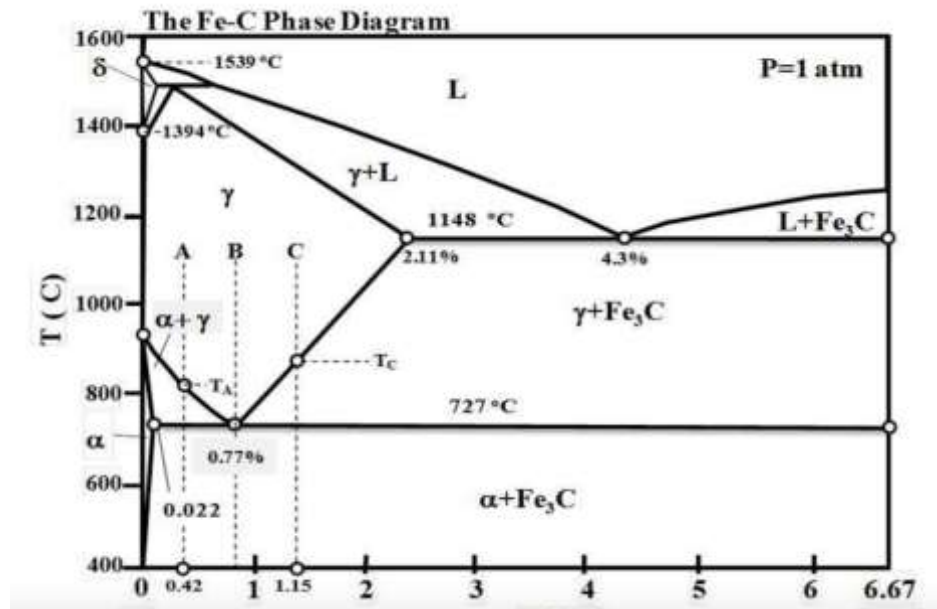
### 2.1 Alat dan Bahan

Dalam penelitian ini alat dan bahan yang digunakan yaitu sebagai berikut : mesin *hammer* otomatis, *vickers*, baja ST 37, baja ST 60 dan pir daun mobil.

### 2.2 Heat Treatment

Perlakuan panas adalah kombinasi pemanasan dan pendinginan suatu logam atau paduan dalam keadaan padat untuk mencapai sifat tertentu. Laju pendinginan dan batas suhu mempengaruhi struktur dan sifat logam[5][6]. Tujuan dari perlakuan panas adalah untuk meningkatkan keuletan, meningkatkan kemampuan mesin, menghilangkan tegangan internal, menghaluskan butiran kristal, dan meningkatkan sifat listrik atau magnet[7]. Faktor-faktor yang mempengaruhi perlakuan panas adalah suhu pemanasan, waktu yang dibutuhkan, dan laju pendinginan[8][9].

Diagram fasa besi-karbon yang ditunjukkan pada **Gambar 1** menunjukkan hubungan antara suhu, bentuk fase dan batas antar daerah fase. Secara umum sistem paduan besi-karbon dapat dibagi menjadi dua jenis: baja dan besi tuang. Baja merupakan paduan besi dan karbon dengan kandungan karbon kurang dari 2%. Jika kandungan karbonnya lebih besar dari 2% disebut besi tuang.



Gambar 1. Diagram Fe- Fe<sub>3</sub>C

### 2.3 Proses Tempa (*Forging*)

Penempaan atau *forging* adalah suatu proses pembentukan logam dimana logam mengalami perubahan bentuk dan ukuran secara plastis, dilakukan secara konvensional atau menggunakan mesin tempa dengan suhu kerja tertentu. Selama penempaan, logam dan paduan dideformasi menjadi bentuk tertentu dengan menggunakan pukulan berulang-ulang dari alat tempa atau palu[10]. Biasanya proses penempaan melibatkan pemanasan logam, meski terkadang penempaan juga dapat dilakukan dengan pengerjaan dingin. Proses penempaan memperbaiki struktur mikro dengan cara mengompresi dan mereduksi butiran sehingga meningkatkan kekuatan dan kekerasan paduan[11][12][13]. Penempaan juga dapat dilakukan dengan pengerjaan dingin, yang biasanya menghasilkan kekuatan lebih tinggi namun mengurangi keuletan. Dalam aplikasi modern, proses ini sering dioptimalkan dengan simulasi termomekanis[14][15] untuk mencapai kombinasi sifat material yang diinginkan, termasuk kekuatan tarik tinggi dan ketahanan aus. Proses penempaan ditunjukkan pada **Gambar 2** Penempaan mesin sering dilakukan untuk pekerjaan berat.

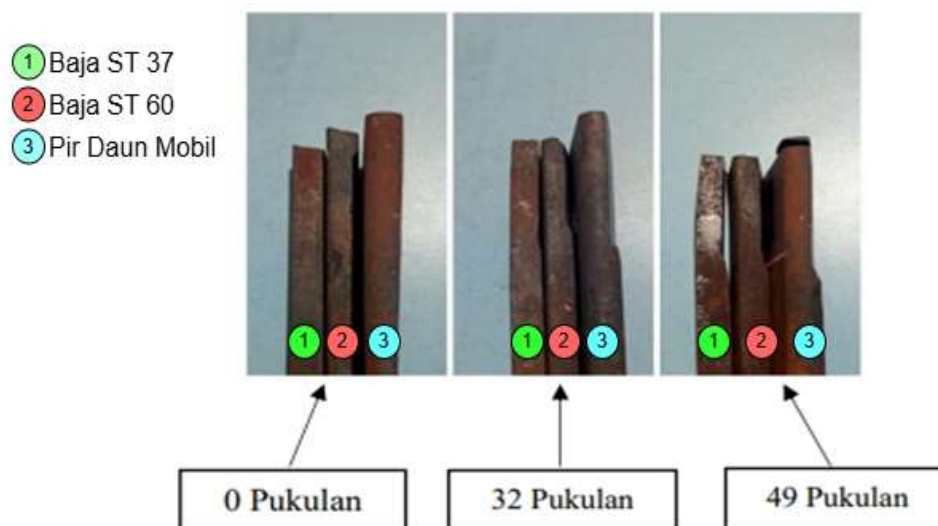


**Gambar 2.** Proses tempa

### 3. Hasil dan Pembahasan

Penelitian ini menggunakan pendekatan analisis deskriptif dengan membandingkan data hasil pengujian variasi pukulan terhadap baja ST 37, baja ST 60 dan pir daun mobil. Pengujian dan penghitungan dilakukan untuk menentukan variabel- variabel yang menjadi fokus penelitian dengan data hasil pengujian yang dapat menyokong keberhasilan penelitian ini.

Hasil penelitian tentang pengaruh pukulan 0,32 dan 49 pada proses tempa terhadap sifat mekanis. Material yang dipilih yaitu baja ST 37, baja ST 60 dan pir daun mobil proses tempa diberi perlakuan panas dengan suhu 600°C. Proses tempa menggunakan mesin dioperasikan dengan sistem *handle* atau sistem *IOT*. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan nilai kekerasan pada material yang telah di tempa dengan variasi pukulan. Dapat dilihat hasil proses penempaan pada **Gambar 3** sebagai berikut.



**Gambar 3.** Hasil perbandingan penempaan terhadap variasi pukulan

Pada **Gambar 3** hasil penempaan yang telah dilakukan sebelumnya terdapat perbedaan bentuk pada masing-masing spesimen. Variasi pukulan sangat mempengaruhi bentuk dari masing-masing spesimen. Hasil dari perhitungan selisih ketebalan masing-masing spesimen dapat dilihat pada **Tabel 1**.

**Tabel 1.** Hasil selisih ketebalan setelah dilakukan proses tempa pada baja ST 37, ST 60 dan pir daun mobil

No	Sampel	Pukulan	Suhu (°C)	Ketebalan Awal (mm)	Ketebalan Akhir (mm)	Selisih Ta-Tb
1.	Baja ST 37	0	600°C	12,2	12,2	12,2
		32	600°C	12,2	11,4	0,8
		49	600°C	12,2	11,7	1,5
2.	Baja ST 49	0	600°C	11,8	11,8	11,8
		32	600°C	11,8	11,6	0,2
		49	600°C	11,8	11,4	0,4
3.	Pir Daun Mobil	0	600°C	11,9	11,9	11,9
		32	600°C	11,9	11,3	0,6
		49	600°C	11,9	10,7	1,2

Berdasarkan **Tabel 1** hasil selisih ketebalan setelah dilakukan proses tempa pada baja ST 37, ST 60, dan pir daun mobil, dapat diamati bahwa variasi pukulan memengaruhi perubahan ketebalan material. Pada baja ST 37, ketebalan awal sebesar 12,2 mm dengan pukulan 0 menghasilkan ketebalan akhir yang tetap sama, menunjukkan tidak adanya perubahan dimensi. Ketika variasi pukulan bertambah menjadi 32 dan 49, ketebalan akhir masing-masing menjadi 11,4 mm dan 11,7 mm, dengan selisih ketebalan sebesar 0,8 mm dan 0,5 mm. Hal ini menunjukkan bahwa deformasi plastis semakin signifikan pada pukulan 32 tetapi sedikit berkurang pada pukulan 49, yang mungkin disebabkan oleh efek relaksasi material setelah mencapai batas deformasi tertentu.

Pada baja ST 60, dengan ketebalan awal 11,8 mm, ketebalan akhir tetap 11,8 mm pada pukulan 0, menunjukkan tidak ada deformasi. Ketika variasi pukulan bertambah menjadi 32 dan 49, ketebalan akhir masing-masing menjadi 11,3 mm dan 11,0 mm, dengan selisih ketebalan 0,5 mm dan 0,8 mm. Perbedaan respons deformasi pada Baja ST 60 dibandingkan dengan Baja ST 37 dapat disebabkan oleh sifat mekanis Baja ST 60 yang memiliki kekuatan lebih tinggi, sehingga lebih banyak energi yang diperlukan untuk menghasilkan deformasi.

Pada pir daun mobil, ketebalan awal 11,9 mm tidak mengalami perubahan pada pukulan 0. Ketika variasi pukulan bertambah menjadi 32 dan 49, ketebalan akhir menjadi 11,3 mm dan 10,7 mm, dengan selisih ketebalan masing-masing 0,6 mm dan 1,2 mm. Respon material pir daun mobil terhadap pukulan lebih signifikan dibandingkan dengan Baja ST 37 dan ST 60, yang dapat dijelaskan oleh karakteristik material yang lebih lentur dan mampu menahan deformasi lebih besar.

Secara teoritis, variasi pukulan pada proses tempa menghasilkan deformasi plastis yang menyebabkan perubahan dimensi material. Mekanisme ini terjadi karena gaya tempa menginduksi tegangan pada material, menyebabkan struktur mikro mengalami pergeseran dan menghasilkan deformasi makro berupa perubahan ketebalan. Material dengan kekuatan mekanis lebih tinggi, seperti Baja ST 60, cenderung membutuhkan gaya yang lebih besar untuk mencapai deformasi plastis dibandingkan material dengan kekuatan mekanis lebih rendah, seperti pir daun mobil. Proses tempa juga menghasilkan redistribusi tekanan di dalam material, yang berkontribusi pada perubahan bentuk dan ketebalan akhir. Dengan demikian, **Tabel 2** ini menunjukkan bahwa variasi pukulan memengaruhi perubahan dimensi logam sesuai dengan sifat material dan parameter proses tempa.

**Tabel 2.** Hasil Uji Kekerasan (*Vickers*)

No	Jenis Logam	Suhu (°C)	Variasi Pukulan	Beban (Kgf)	Lama Penekanan	Hasil Tingkat Kekerasan (Kgf/mm <sup>2</sup> )
1.	Baja ST 37	600	0	30	10	137,964
		600	32	30	10	153,966
		600	49	30	10	170,088
2.	Baja ST 60	600	0	30	10	158,781
		600	32	30	10	171,275
		600	49	30	10	172,56
3.	Pir Daun Mobil	600	0	30	10	198,442
		600	32	30	10	228,31
		600	49	30	10	241,756

Berdasarkan data **Tabel 2**, variasi pukulan memengaruhi kekerasan material logam pada suhu 600 °C, dengan beban 30 kgf dan lama penekanan 10 detik. Kekerasan material meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah pukulan. Hal ini terjadi karena adanya mekanisme strain hardening atau pengerasan regangan, di mana proses pukulan menyebabkan deformasi plastis yang menghasilkan akumulasi dislokasi dalam struktur mikro material. Akumulasi dislokasi ini meningkatkan resistensi material terhadap deformasi lebih lanjut, sehingga menghasilkan nilai kekerasan yang lebih tinggi.

Baja ST 37 menunjukkan nilai kekerasan terendah dibandingkan Baja ST 60 dan pir daun mobil. Hal ini dapat dikaitkan dengan komposisi kimia Baja ST 37 yang memiliki kandungan karbon lebih rendah, sehingga kekuatannya relatif lebih rendah. Sebaliknya, Baja ST 60 memiliki kekerasan lebih tinggi dibandingkan Baja ST 37, sesuai dengan sifat material berkarbon tinggi yang cenderung memiliki kekuatan mekanis lebih baik. Pir daun mobil menunjukkan kekerasan tertinggi di antara ketiga jenis logam. Hal ini dapat dijelaskan karena pir daun mobil merupakan material paduan yang dirancang khusus untuk memiliki kekuatan dan kekerasan tinggi guna menahan beban dinamis.

Pada Baja ST 37, kekerasan meningkat dari 137,964 kgf/mm<sup>2</sup> pada 0 pukulan menjadi 170,088 kgf/mm<sup>2</sup> pada 49 pukulan, menunjukkan kenaikan sekitar 23,2%. Pada Baja ST 60, kekerasan meningkat dari 158,781 kgf/mm<sup>2</sup> pada 0 pukulan menjadi 172,56 kgf/mm<sup>2</sup> pada 49 pukulan, dengan kenaikan sekitar 8,7%. Untuk pir daun mobil, kekerasan meningkat dari 198,442 kgf/mm<sup>2</sup> pada 0 pukulan menjadi 241,756 kgf/mm<sup>2</sup> pada 49 pukulan, menunjukkan kenaikan sekitar 21,8%. Data ini menunjukkan bahwa respons material terhadap variasi pukulan berbeda-beda tergantung pada sifat intrinsik logam tersebut.

Suhu 600 °C menjadi faktor penting yang memungkinkan logam mengalami deformasi plastis dengan lebih baik tanpa retak, karena pada suhu ini logam cenderung mengalami pelunakan sementara yang mendukung pembentukan struktur mikro baru. Lama penekanan 10 detik memberikan waktu yang cukup untuk relaksasi tegangan dan pembentukan struktur mikro yang lebih stabil, sehingga menghasilkan peningkatan kekerasan yang optimal. Data ini mengindikasikan bahwa pengendalian jumlah pukulan, komposisi material, serta parameter proses seperti suhu dan lama penekanan dapat digunakan sebagai strategi untuk mengatur kekerasan material sesuai dengan kebutuhan aplikasi teknik tertentu. Titik kekerasan dapat diketahui dengan menggunakan *Vickers* dengan hasil yang dapat dilihat pada **Tabel 3**.

**Tabel 3.** Titik kekerasan *vickers*

No	Jenis Logam	Variasi Pukulan	Titik	Beban (Kgf)	d1 (mm <sup>2</sup> )	d2 (mm <sup>2</sup> )	d(rata-rata)	d2		
1.	Baja ST 37	0	1	30	0,526	0,553	0,553	0,291		
			2	30	0,530	0,543	0,543	0,288		
			3	30	0,523	0,528	0,528	0,277		
		32	1	30	0,589	0,602	0,599	0,358		
			2	30	0,568	0,601	0,601	0,361		
			3	30	0,583	0,582	0,582	0,339		
		49	1	30	0,589	0,581	0,585	0,342		
			2	30	0,568	0,568	0,568	0,322		
			3	30	0,568	0,559	0,563	0,318		
		2.	Baja ST 60	0	1	30	0,587	0,600	0,594	0,352
					2	30	0,587	0,600	0,595	0,354
					3	30	0,583	0,592	0,588	0,345
32	1			30	0,533	0,556	0,545	0,297		
	2			30	0,580	0,569	0,575	0,330		
	3			30	0,527	0,543	0,535	0,352		
49	1			30	0,568	0,572	0,570	0,325		
	2			30	0,559	0,572	0,566	0,320		
	3			30	0,581	0,555	0,568	0,322		
3.	Pir Daun Mobil			0	1	30	0,533	0,533	0,533	0,284
					2	30	0,529	0,529	0,531	0,282
					3	30	0,526	0,526	0,525	0,275
		1	30		0,568	0,572	0,570	0,334		

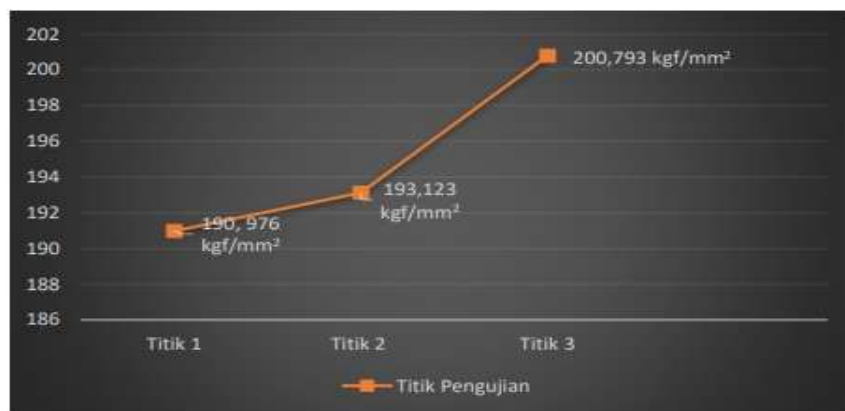
No	Jenis Logam	Variasi Pukulan	Titik	Beban (Kgf)	d1 (mm <sup>2</sup> )	d2 (mm <sup>2</sup> )	d(rata-rata)	d2
		32	2	30	0,559	0,572	0,566	0,242
			3	30	0,581	0,555	0,568	0,192
			1	30	0,443	0,447	0,439	0,192
		49	2	30	0,481	0,482	0,481	0,232
			3	30	0,591	0,486	0,494	0,284

Berdasarkan **Tabel 3** pengujian kekerasan *vickers* pada Baja ST 37, Baja ST 60, dan pir daun mobil, dapat dianalisis bahwa variasi pukulan berpengaruh signifikan terhadap nilai rata-rata diagonal (d) dan nilai kekerasan material (d2). Pada Baja ST 37, peningkatan jumlah pukulan dari 0, 32, hingga 49 menyebabkan rata-rata diagonal (d rata-rata) mengalami sedikit kenaikan, yang menunjukkan adanya peningkatan deformasi plastis pada permukaan material akibat tekanan tempa. Hal ini dapat dilihat dari perubahan nilai d2, yang bertambah seiring bertambahnya jumlah pukulan, menunjukkan kekerasan material yang meningkat secara bertahap. Peningkatan kekerasan pada baja ST 37 disebabkan oleh fenomena *strain hardening*, di mana deformasi plastis menyebabkan akumulasi dislokasi pada struktur mikro material.

Pada baja ST 60, pola yang serupa juga diamati, dengan rata-rata diagonal (d rata-rata) yang sedikit meningkat seiring bertambahnya variasi pukulan. Nilai d2 menunjukkan peningkatan kekerasan yang lebih stabil dibandingkan dengan baja ST 37, yang dapat dijelaskan oleh karakteristik baja ST 60 yang memiliki kekuatan mekanis lebih tinggi. Baja ST 60 lebih tahan terhadap deformasi, sehingga peningkatan kekerasan cenderung lebih terkontrol. Perubahan ini disebabkan oleh redistribusi tekanan internal dalam material, yang memperkuat struktur mikro akibat gaya tempa.

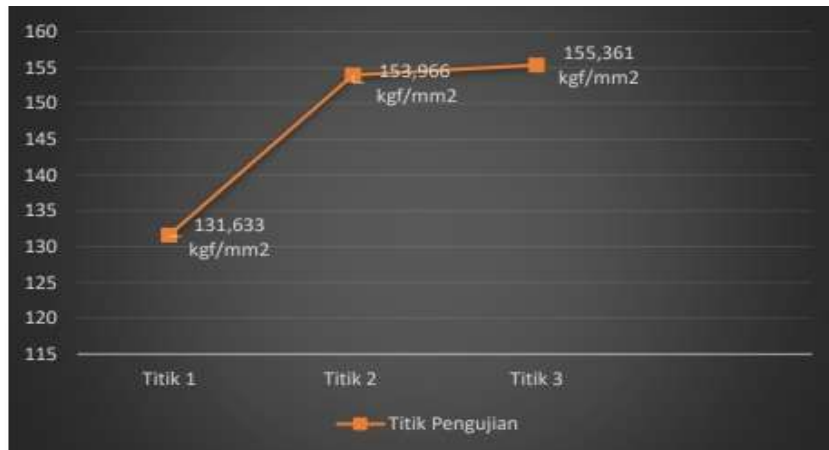
Pada pir daun mobil, pengaruh variasi pukulan terhadap nilai rata-rata diagonal (d rata-rata) dan nilai d2 juga terlihat jelas. Dengan meningkatnya variasi pukulan dari 0, 32, hingga 49, nilai rata-rata diagonal mengalami kenaikan yang lebih signifikan dibandingkan kedua jenis baja. Hal ini menunjukkan bahwa material pir daun mobil memiliki respons deformasi plastis yang lebih besar, sehingga menghasilkan kekerasan yang lebih tinggi pada nilai d2. Karakteristik material yang lebih lentur dibandingkan baja membuatnya lebih responsif terhadap gaya tempa, menghasilkan peningkatan kekerasan yang signifikan melalui proses *strain hardening*.

Secara teoritis, nilai kekerasan *vickers* dipengaruhi oleh deformasi plastis yang terjadi pada material selama proses tempa. Ketika jumlah pukulan meningkat, gaya tekan pada material menyebabkan peningkatan akumulasi dislokasi pada batas butir, yang menghambat pergerakan dislokasi dan meningkatkan kekerasan material. Material yang lebih kuat, seperti baja ST 60, menunjukkan peningkatan kekerasan yang lebih terkontrol dibandingkan material yang lebih lentur seperti pir daun mobil. Variasi dalam rata-rata diagonal (d rata-rata) juga mencerminkan distribusi tekanan yang tidak merata selama proses tempa, yang menghasilkan perubahan lokal pada kekerasan material. Dengan demikian, tabel ini menunjukkan bahwa variasi pukulan memiliki pengaruh yang berbeda pada jenis material berdasarkan sifat mekanis dan struktur mikro masing-masing.



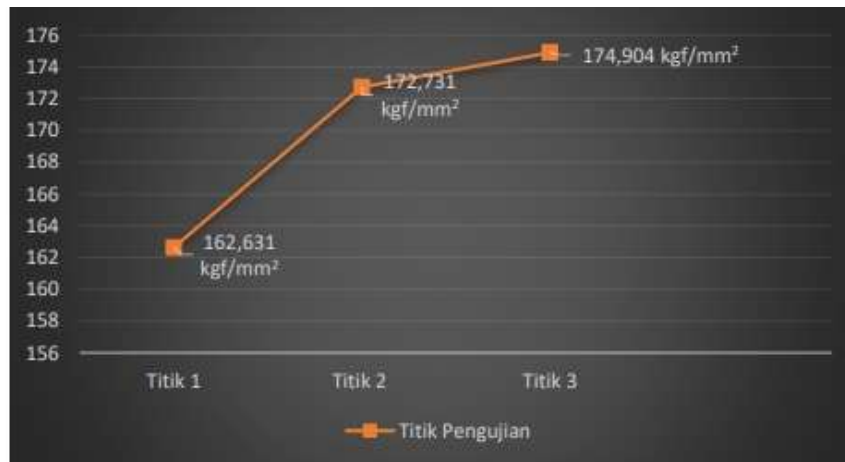
**Gambar 4.** Hasil perhitungan baja ST 37 tanpa perlakuan

**Gambar 4** menunjukkan hasil perhitungan baja ST 37 dengan titik 1,2, dan 3 spesimen nilai tertinggi tanpa perlakuan mendapatkan hasil sebesar 200,793 kgf/mm<sup>2</sup> dengan titik terendah 190,976 kgf/mm<sup>2</sup>



**Gambar 5.** Hasil perhitungan baja ST 37 dengan 32 pukulan

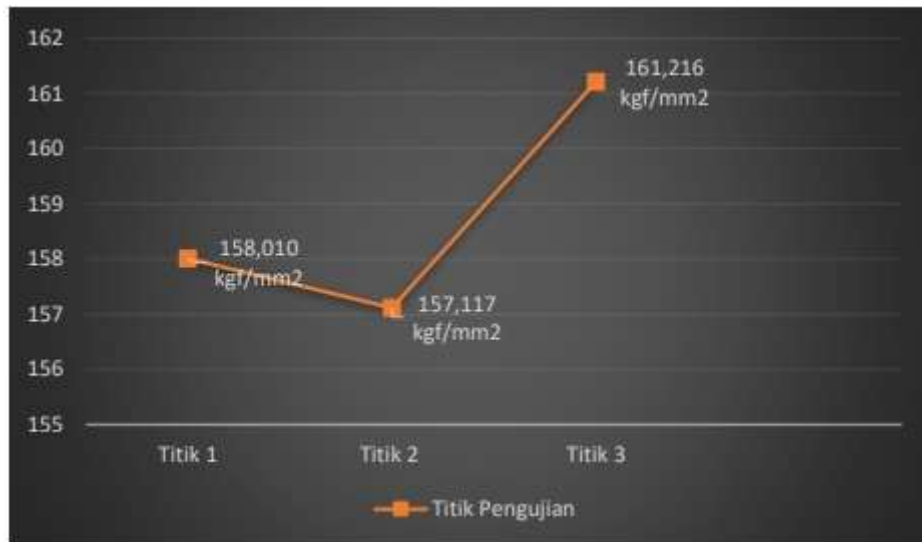
**Gambar 5** menunjukkan hasil tertinggi perhitungan titik 1,2,3 spesimen tertinggi 32 pukulan mendapatkan hasil tertinggi sebesar 155,361 kgf/mm<sup>2</sup> dan terendah 131,633 kgf/mm<sup>2</sup>.



**Gambar 6.** Hasil perhitungan baja ST 37 dengan 49 pukulan

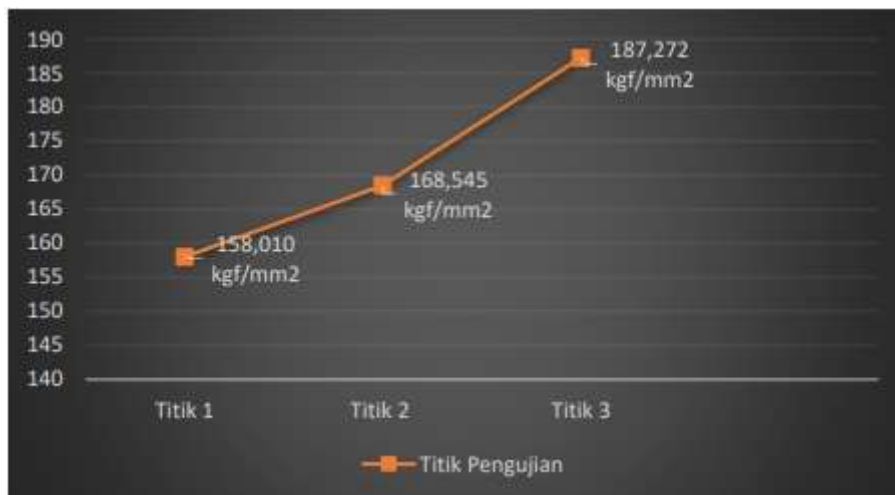
**Gambar 6** menunjukkan hasil tertinggi perhitungan titik 1,2,3 spesimen tertinggi 49 pukulan mendapatkan hasil tertinggi sebesar 174,904 kgf/mm<sup>2</sup> dan terendah 162,631 kgf/mm<sup>2</sup>.





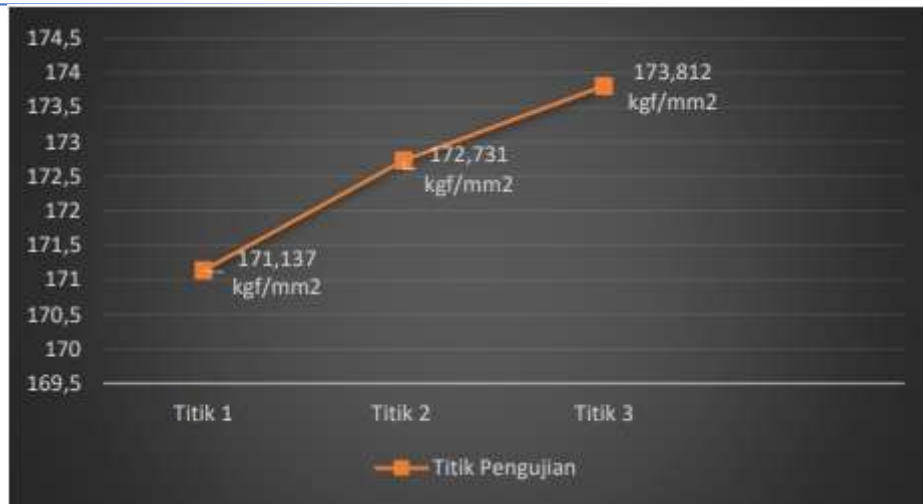
**Gambar 7.** Hasil perhitungan baja ST 60 tanpa pukulan

**Gambar 7** menunjukkan hasil tertinggi perhitungan titik 1,2,3 spesimen tertinggi 60 pukulan mendapatkan hasil tertinggi sebesar 161,216 kgf/mm<sup>2</sup> dan terendah 157,117 kgf/mm<sup>2</sup>.



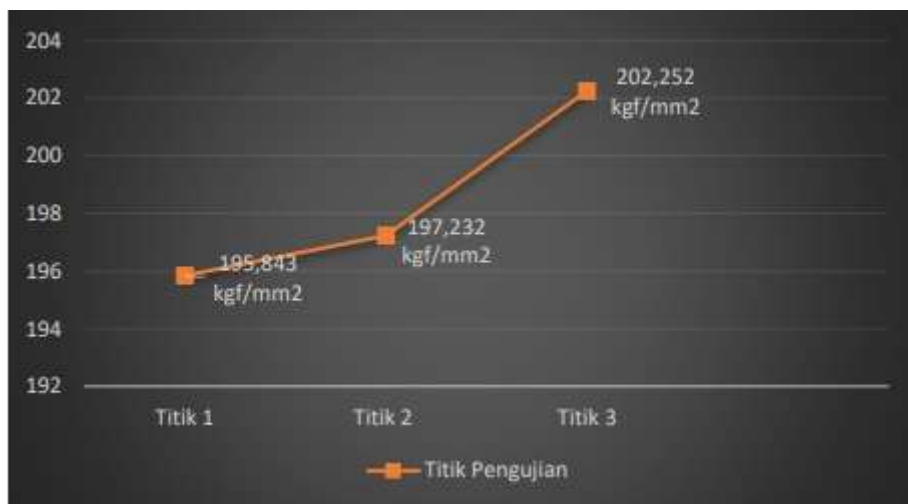
**Gambar 8.** Hasil perhitungan baja ST 60 dengan 32 pukulan

**Gambar 8** menunjukkan hasil tertinggi perhitungan titik 1,2,3 spesimen tertinggi 32 pukulan mendapatkan hasil tertinggi sebesar 187,272 kgf/mm<sup>2</sup> dan terendah 158,010 kgf/mm<sup>2</sup>



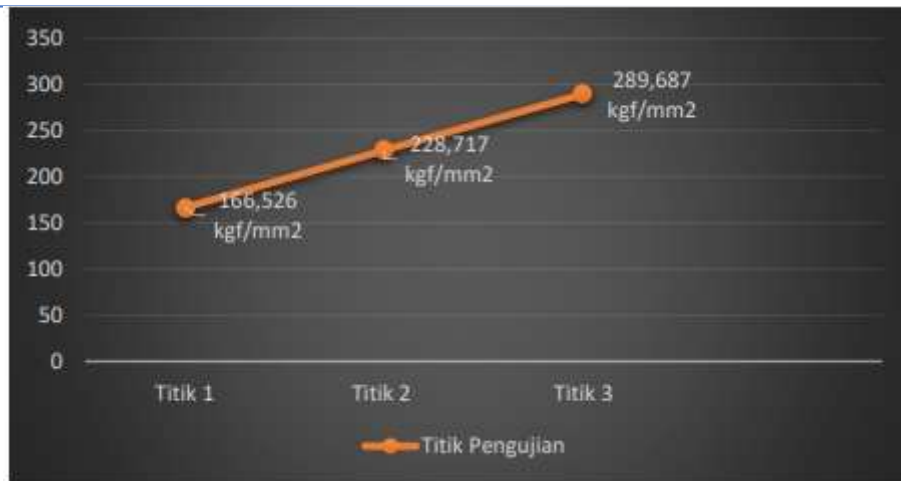
**Gambar 9.** Hasil perhitungan baja ST 60 dengan 49 pukulan

**Gambar 9** menunjukkan hasil tertinggi perhitungan titik 1,2,3 spesimen tertinggi 49 pukulan mendapatkan hasil tertinggi sebesar 173,812 kgf/mm<sup>2</sup> dan terendah 171,137 kgf/mm<sup>2</sup>.



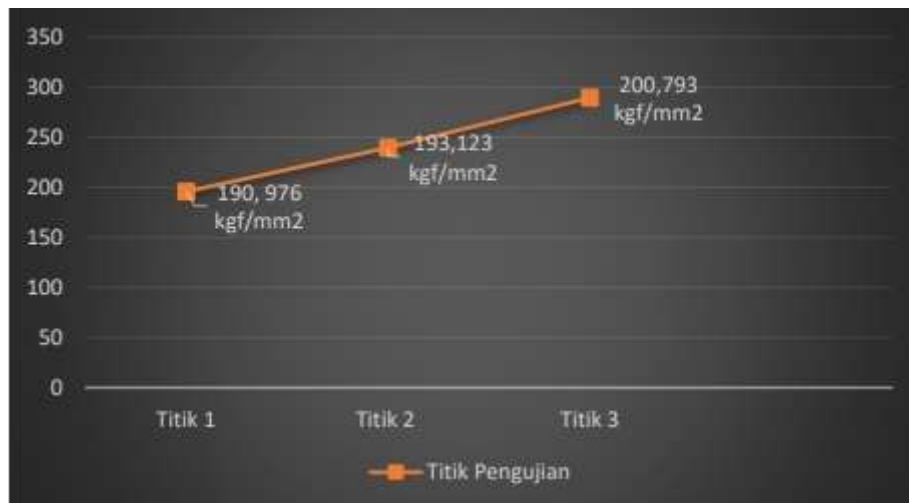
**Gambar 10.** Hasil perhitungan pir daun mobil tanpa pukulan

**Gambar 10** menunjukkan hasil tertinggi perhitungan titik 1, 2, 3 spesimen tertinggi 0 pukulan mendapatkan hasil tertinggi sebesar 202,252 kgf/mm<sup>2</sup> dan terendah 195,843 kgf/mm<sup>2</sup>



**Gambar 11.** Hasil perhitungan pir daun mobil 32 pukulan

**Gambar 11** menunjukkan hasil tertinggi perhitungan titik 1, 2, 3 spesimen tertinggi 32 pukulan mendapatkan hasil tertinggi sebesar 289,687 kgf/mm<sup>2</sup> dan terendah 166,526 kgf/mm<sup>2</sup>.

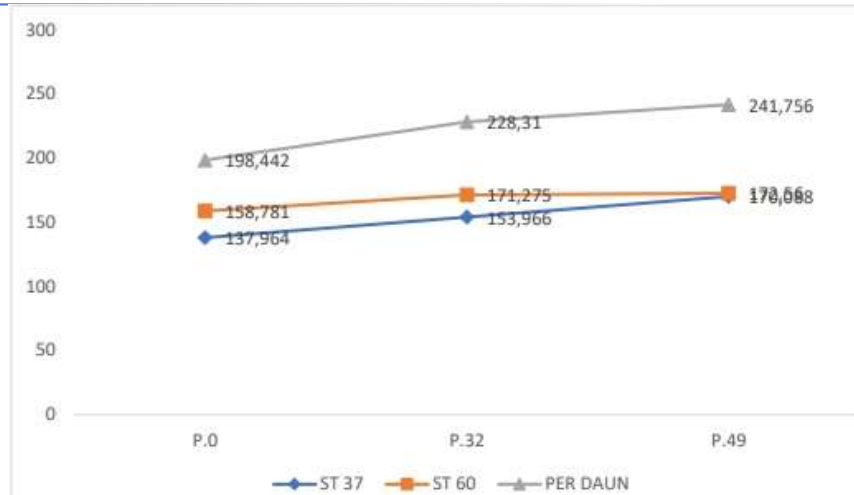


**Gambar 12.** Hasil perhitungan pir daun mobil 49 pukulan

**Gambar 12** menunjukkan hasil tertinggi perhitungan titik 1, 2, 3 spesimen tertinggi 49 pukulan mendapatkan hasil tertinggi sebesar 200,793 kgf/mm<sup>2</sup> dan terendah 190,976 kgf/mm<sup>2</sup>.

**Gambar 13** menunjukkan hasil rata-rata pada kekerasan *vickers* dari beberapa spesimen yaitu baja ST 37, baja ST 60 dan pir daun mobil. Baja ST 37 pada 0 pukulan sebesar 137,964 kgf/mm<sup>2</sup>, pada 32 pukulan sebesar 153,966 kgf/mm<sup>2</sup>, pada pukulan 49 sebesar 170,088 kgf/mm<sup>2</sup>. Pada baja ST 60 pada 0 pukulan sebesar 158,781 kgf/mm<sup>2</sup>, pada pukulan 32 sebesar 171,275 kgf/mm<sup>2</sup>, pada pukulan 49 sebesar 172,56 kgf/mm<sup>2</sup>. Baja pir daun mobil untuk 0 pukulan sebesar 198,442 kgf/mm<sup>2</sup>, 32 pukulan sebesar 228,31 kgf/mm<sup>2</sup> dan 49 pukulan sebesar 241,756 kgf/mm<sup>2</sup>.

Secara keseluruhan, peningkatan jumlah pukulan berbanding lurus dengan peningkatan kekerasan material, dengan tingkat respons yang dipengaruhi oleh karakteristik mekanis dan struktur mikro masing-masing material. Proses tempa yang melibatkan pukulan secara signifikan mengubah sifat mekanis material melalui deformasi plastis dan redistribusi tekanan internal, sehingga meningkatkan kekerasan dan kekuatan material.



Gambar 13. Hasil keseluruhan rata-rata kekerasan pada material baja menggunakan *vickers*

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa jumlah pukulan memiliki pengaruh signifikan terhadap tingkat kekerasan logam. Hal ini disebabkan oleh pengaruh tekanan dan panas yang dihasilkan selama proses penempaan yang berkontribusi terhadap perubahan struktur mikro material, meningkatkan kekerasan pada baja ST 37, ST 60, dan pir daun mobil.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan jumlah pukulan secara konsisten meningkatkan nilai kekerasan material logam. Nilai kekerasan rata-rata terendah dicatat pada baja ST 37 tanpa pukulan sebesar 137,964 kgf/mm<sup>2</sup>, baja ST 60 sebesar 158,781 kgf/mm<sup>2</sup>, dan pir daun mobil sebesar 198,442 kgf/mm<sup>2</sup>. Sebaliknya, nilai kekerasan rata-rata tertinggi dicapai pada 49 pukulan, dengan hasil sebesar 170,088 kgf/mm<sup>2</sup> untuk baja ST 37, 172,56 kgf/mm<sup>2</sup> untuk baja ST 60, dan 241,756 kgf/mm<sup>2</sup> untuk pir daun mobil.

Dengan demikian, jumlah pukulan merupakan variabel penting dalam proses penempaan logam, di mana variasi jumlah pukulan mempengaruhi peningkatan kekerasan material akibat efek sinergis dari tekanan dan panas yang dihasilkan selama proses deformasi. Penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam pengembangan teknik pemrosesan logam kedepannya.

#### 5. Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Politeknik Negeri Sriwijaya dan seluruh staf Jurusan Teknik Mesin Produksi dan Perawatan yang telah memberikan dukungan moral dan ilmu pengetahuan bagi pelaksanaan penelitian ini.

#### 6. Referensi

- [1] Ismoyo, A. H., and Bandriyana Parikin. "Analisis Pengaruh Proses Pengerolan Dan Penempaan Panas Pada Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Paduan ZrNbMoGe." *Tangerang: Pusat Sains dan Teknologi Bahan Maju-BATAN* (2014).
- [2] Mardjuki, "Proses Forging Dengan Variasi Temperatur Pada Paduan Aluminium Seri 308, 0 Terhadap Kekuatan Tarik Dan Kekerasan." *Transmisi 5.2* (2009): 509-518.
- [3] A. Suprpto and S. Suwarno, "Pengaruh Temperatur Penempaan pada Baja 0.5CCrMnSi dan JIS SUP 9 terhadap Kekerasan dan Struktur Mikro," *J. Tek. ITS*, vol. 7, 2018, doi: 10.12962/j23373539.v7i1.29615.
- [4] S. Sujendro, R. D. Anjani, and A. Santosa, "Pengaruh Temperatur Pemanasan pada Proses Penempaan Pembuatan Katup Gas," *Quantum Tek. J. Tek. Mesin Terap.*, vol. 5, no. 1, pp. 37–42, 2023, doi: 10.18196/jqt.v5i1.19113.
- [5] D. Ghernaout, "Entropy in the Brownian Motion (BM) and Coagulation Background," vol. 2, pp. 143–161, 2017, doi: 10.11648/j.css.20170204.14.

- [6] M. A. Sholikhin *et al.*, "Analisis Pengaruh Perlakuan Panas ( Heat Treatment ) Terhadap Laju Korosi pada Material Baja Karbon Menengah AISI 1045 pada Air Laut," vol. 9, no. 1, pp. 163–170, 2021.
- [7] Oyetunji, Akinlabi, and S. O. Adeosun. "Effects of carburizing process variables on mechanical and chemical properties of carburized mild steel." *Journal of Basic & Applied Sciences* 8.2 (2012): 319-324.
- [8] Y.-L. Lei, J.-L. Hu, X.-S. Zheng, X.-Z. Li, and Y. Fu, "Research on Integrated Control Strategy for Shifting Process of Automatic Transmission," *Beijing Ligong Daxue Xuebao/Transaction Beijing Inst. Technol.*, vol. 38, pp. 161–165, 2018, doi: 10.15918/j.tbit1001-0645.2018.1.035.
- [9] K. R. Trethewey and J. Chamberlain, "Korosi: Untuk Mahasiswa dan Rekayasawan," 1991. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:192829724>
- [10] Poerschke, David. "The Effects of forging on the microstructure and tensile properties of magnesium alloys AZ31 and ZK60." *Case Western Reserve University, Cleveland, OH, USA* (2009).
- [11] A. H. Ismoyo, P. Sains, B. Maju, K. Puspipetek, and T. Selatan, "Analisis Pengaruh Proses Pengerolan dan Struktur Mikro Paduan ZrNbMoGe," pp. 13–21, 2014.
- [12] M. Eqbal, "Optimisation of forging parameters of 35C8 steel using grey relational analysis," *Int. J. Microstruct. Mater. Prop.*, vol. 13, pp. 198–212, 2018, doi: 10.1504/IJMMP.2018.10017403.
- [13] D. Jandova, D. R, S. L, and D. J, "Refinement of steel microstructure by free-forging," *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.*, vol. 16, 2006.
- [14] A. Muhammad Rozihan, "Pengaruh Penempaan dan Heat Treatment pada Pembuatan Perkakas Logam Berbahan Pegas Daun Mobil terhadap Kekerasan Mikro Vickers, Kekuatan Impak dan Struktur Mikro," 2017. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:103013698>
- [15] Sopha, S. N. S., and S. Nansaarng. "Comparative study of forging parameters on microstructures and properties between Aluminum alloys Al6063 and AA7075." *Dep. Prod. Technol. Educ. King Mongkut's Univ. Technol. Thonburi* 126 (2007).