



PENGARUH *HOT DIP GALVANIZING* BAJA KARBON RENDAH TERHADAP KETEBALAN STRUKTUR MIKRO DAN KEKERASAN

Richard A. M. Napitupulu^{a*}, Siwan E. A. Perangin angin^a, Wandipu P. Sihaloho^a

^aProgram Studi Teknik Mesin, Universitas HKBP Nommensen, Jl. Sutomo No 4At, Medan, 20235, Indonesia

*Corresponding authors at: richard.napitupulu (R.Napitupulu) Tel.: +62 812-6551-482

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:

Diajukan pada 08 Juni 2025

Direvisi pada 05 Agustus 2025

Disetujui pada 19 Agustus 2025

Tersedia daring pada 25 Agustus 2025

Kata kunci:

Hot Dip Galvanizing, baja ST41, struktur mikro.

Keywords:

Hot Dip Galvanizing, ST41 steel, microstructure.

ABSTRAK

Baja ST41 merupakan baja karbon rendah yang banyak digunakan sebagai material komponen mesin, namun memiliki kelemahan berupa nilai kekerasan yang rendah. Salah satu metode untuk meningkatkan kekerasan baja karbon rendah adalah dengan proses *Hot Dip Galvanizing*. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi waktu pencelupan terhadap nilai kekerasan dan komposisi kimia pada baja ST41. Proses galvanisasi dilakukan pada temperatur 440°C, 450°C, dan 460°C dengan variasi waktu pencelupan selama 30, 45, dan 60 detik. Pengujian meliputi uji kekerasan menggunakan mikrometer *Vickers*, uji ketebalan lapisan, struktur mikro, dan uji komposisi kimia. Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses *hot dip galvanizing* dapat meningkatkan kekerasan baja ST41, dengan nilai tertinggi sebesar 223,80 VHN pada suhu 460°C dan waktu pencelupan 60 detik. Ketebalan lapisan seng yang terbentuk masing-masing adalah 12,10 µm, 13,93 µm, dan 13,69 µm. Pengamatan struktur mikro menunjukkan pembentukan lapisan yang merata, yang terdiri dari fasa *eta*, *zeta*, *delta*, dan *gamma* sebagai hasil dari proses difusi antara seng dan baja.

ABSTRACT

ST41 steel is a low-carbon steel commonly used in machine components. However, one of its main drawbacks is its relatively low hardness. To improve its hardness, the hot dip galvanizing (HDG) process can be applied. The aim of this study was to investigate the effect of immersion time during the HDG process on the hardness and chemical composition of ST41 steel. The HDG process was conducted at three temperatures (440, 450, and 460 °C) with an immersion time of 30, 45, and 60 s. The tests performed included hardness testing using the Vickers microhardness method, coating thickness measurements, microstructural observations, and chemical composition analyses. The results showed that the HDG process significantly increased the hardness of the ST41 steel. The hardness of the ST41 steel was determined to be 203.16, 206.60, and 223.80 HVN at 440, 450, and 460 °C, respectively. The highest hardness was recorded at 460 °C with an immersion time of 60 s. The coating thicknesses were measured to be 12.10, 13.93, and 13.69 µm, respectively. The microstructural observations confirmed the presence of coating layers and structural changes due to the galvanizing process.

1. PENGANTAR

Baja karbon merupakan jenis logam ferrous yang paling umum digunakan di berbagai sektor industri karena harganya yang ekonomis, sifat mekanik yang cukup baik, serta kemudahan dalam pengelasan dan fabrikasi. Di antara berbagai jenis baja karbon, baja karbon rendah (*low carbon steel*) seperti tipe ST41 banyak dipilih untuk aplikasi struktural ringan, rangka kendaraan, pipa, dan komponen mesin (Singh dkk., 2023). Namun demikian, salah satu kelemahan utama dari baja karbon rendah adalah tingkat ketahanannya yang rendah terhadap korosi, terutama ketika digunakan di lingkungan terbuka atau dalam atmosfer yang bersifat agresif, seperti daerah pesisir, industri kimia, atau lingkungan dengan kelembapan tinggi (Kumar dkk., 2022). Korosi yang terjadi pada baja tidak hanya menyebabkan kerusakan secara struktural, tetapi juga berdampak pada meningkatnya biaya pemeliharaan, penggantian komponen, serta penurunan keamanan dan keandalan sistem secara keseluruhan. Oleh karena itu, perlindungan permukaan baja menjadi sangat penting, baik secara preventif maupun korektif. Salah satu metode perlindungan yang telah terbukti efektif dan ekonomis adalah pelapisan dengan proses *Hot Dip Galvanizing* (HDG) (ASTM International., 2017).

Proses *Hot Dip Galvanizing* adalah metode pelapisan logam dengan mencelupkan baja ke dalam seng cair pada suhu sekitar 445–460°C. Proses ini membentuk lapisan pelindung berupa senyawa intermetalik antara besi (Fe) dan seng (Zn), seperti lapisan *Gamma* (Γ), *Delta* (δ), *Zeta* (ζ), dan *Eta* (η). Masing-masing lapisan tersebut memiliki karakteristik ketebalan, kekerasan, dan adhesi yang berbeda (Zastrow., 2021). Keunggulan dari HDG tidak hanya terbatas pada perlindungan fisik terhadap oksigen dan kelembapan, tetapi juga memberikan perlindungan katodik, di mana lapisan seng akan mengalami korosi terlebih dahulu sebelum mencapai substrat baja.

Mekanisme ini memberikan perlindungan yang bersifat “*self-sacrificing*” dan memperpanjang umur pakai material (Lee dkk., 2020). Namun, proses HDG tidak serta-merta menghasilkan lapisan yang seragam atau optimal. Ketebalan dan kualitas lapisan galvanis dipengaruhi oleh banyak faktor, seperti kandungan unsur kimia dalam baja (terutama silikon dan fosfor), suhu pencelupan, waktu pencelupan, serta bentuk geometri benda kerja (plat atau silinder) (Zhang dkk., 2022) (Ghosh dkk., 2019). Efek Sandelin dan Sebisty, misalnya, menunjukkan bahwa keberadaan silikon dalam rentang kritis dapat mempercepat pertumbuhan lapisan intermetalik secara tidak terkendali, menyebabkan lapisan yang terlalu tebal dan rapuh (Lin dkk., 2020). Unsur lain seperti mangan (Mn), aluminium (Al), dan kromium (Cr) juga memiliki pengaruh terhadap reaktivitas antara baja dan seng cair (Rassili dkk., 2018). Di sisi lain, dari sudut pandang sifat mekanik, pelapisan HDG dapat meningkatkan kekerasan permukaan karena terbentuknya fasa intermetalik yang keras. Namun, peningkatan ini sering kali disertai dengan penurunan keuletan akibat sifat getas dari lapisan intermetalik tersebut. Oleh karena itu, penting untuk melakukan analisis menyeluruh terhadap struktur mikro dan kekerasan permukaan setelah proses HDG, agar dapat mengoptimalkan perlindungan tanpa mengorbankan integritas mekanik material (Prasad dkk., 2023).

Dengan mempertimbangkan pentingnya peran HDG dalam meningkatkan durabilitas baja karbon rendah, maka penelitian ini diarahkan untuk menganalisis pengaruh variasi bentuk geometri (plat dan silinder), serta parameter proses berupa suhu dan waktu pencelupan, terhadap ketebalan lapisan seng, struktur mikro, dan kekerasan permukaan baja ST41. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi ilmiah yang berguna dalam optimalisasi proses galvanisasi, baik untuk keperluan manufaktur industri maupun untuk acuan penerapan standar teknis seperti ISO 1461:1999.

2. METODE

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Metalurgi Universitas HKBP Nommensen Medan. Material yang digunakan adalah baja karbon rendah tipe ST41 berbentuk silinder berdiameter 41 mm dan tebal 3 mm. Spesimen penelitian ini dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1: Spesimen penelitian

Pelapisan dilakukan menggunakan metode *hot dip galvanizing* dengan variasi suhu pencelupan 440 °C, 450 °C, dan 460 °C. Bahan dan Alat yang digunakan meliputi baja karbon rendah dan larutan H_2SO_4 untuk proses *pickling*. Alat yang digunakan antara lain gergaji besi, kertas amplas, mikroskop optik, alat uji kekerasan *Micro Vickers*, dan *thickness meter*. Alat pelindung diri digunakan selama proses penelitian. Prosedur Penelitian dan Tahapan penelitian meliputi, Pemotongan dan pengeboran *specimen*, Pemolesan permukaan menggunakan kertas amplas, Proses pelapisan melalui tahap *pickling*, *rinsing*, *fluxing*, *drying*, dan pencelupan dalam seng cair pada tiga variasi suhu (440 °C, 450 °C, 460 °C) selama 1 menit, diakhiri dengan *quenching*, penimbangan dan pengukuran ketebalan lapisan. Sebelum dilakukan pencelupan, terlebih dahulu material diuji komposisi. Komposisi material diperlihatkan pada tabel 1, dan proses pengujian komposisi terlihat pada gambar 2.

Tabel 1 :Nilai Uji Komposisi

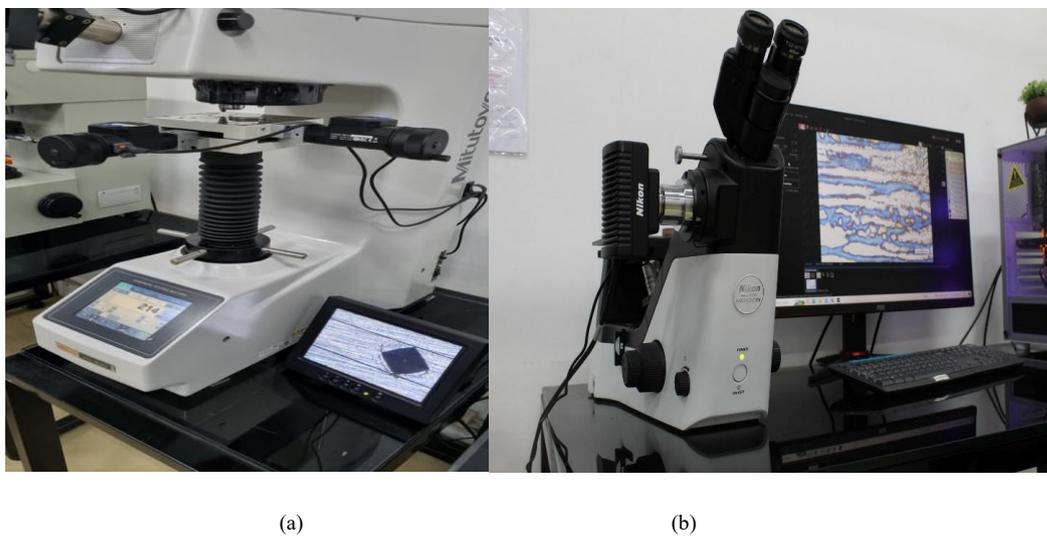
Komponen	Unit	Kandungan
Fe	%wt.	98,26
S	%wt.	0,036
Al	%wt.	0,0002
C	%wt.	0,138
Ni	%wt.	0,088
Nb	%wt.	0,0043
Si	%wt.	0,211
Cr	%wt.	0,239
V	%wt.	0,0045
Mn	%wt.	0,639
Mo	%wt.	0,001
W	%wt.	0,033
P	%wt.	0,03
Cu	%wt.	0,177
Ti	%wt.	0,0011
Ta	%wt.	0,002
Mg	%wt.	0,0012

Sumber : Data eksperimen 2024



Gambar 2: Proses pengujian komposisi

Setelah dilakukan pencelupan material, maka dilakukan pengukuran ketebalan lapisan dan kekerasan material dengan menggunakan *microvickers*. Setelah itu struktur *micro* diamati dengan menggunakan mikroskop optik yang terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3: (a) *Microvickers* dan (b) Mikroskop Metalurgi

Gambar 3 memperlihatkan alat *Microvickers* dan Mikroskop Metalurgi. *MicroVickers Hardness Tester* adalah alat uji kekerasan yang menggunakan beban ringan dan indenter berbentuk piramida untuk mengukur kekerasan permukaan material pada skala mikro. Dalam konteks penelitian ini, alat ini sangat penting untuk mengetahui seberapa keras lapisan hasil pencelupan pada suhu tertentu, yang mencerminkan kualitas perlindungan permukaan material. Nilai kekerasan yang tinggi menunjukkan lapisan yang lebih padat dan tahan aus, sedangkan nilai yang rendah bisa mengindikasikan adanya kelemahan dalam proses perlakuan panas atau pelapisan. Sementara itu, Mikroskop Metalurgi digunakan untuk mengamati struktur mikro dari permukaan logam setelah perlakuan. Alat ini memungkinkan peneliti untuk melihat bentuk, ukuran, dan distribusi butir logam, serta mengidentifikasi fase-fase mikrostruktural yang terbentuk akibat perlakuan suhu. Dengan bantuan mikroskop ini, peneliti dapat menganalisis homogenitas lapisan, ketebalan lapisan pelindung, serta mendeteksi adanya cacat mikro seperti porositas atau retakan. Kombinasi kedua alat ini memberikan gambaran menyeluruh tentang efek perlakuan suhu pencelupan terhadap sifat mekanik dan struktur mikro material yang diteliti.

Dalam penelitian ini, *Micro Vickers Hardness Tester* berfungsi untuk mengukur tingkat kekerasan permukaan lapisan logam hasil perlakuan panas atau pelapisan seng, dengan menggunakan prinsip indentasi piramida berbasis rumus *Vickers Hardness Number* (VHN). Rumus tersebut, seperti yang ditampilkan, menggunakan nilai beban penekanan (P) dan hasil pengukuran diagonal bekas penekanan (d_1 dan d_2) untuk menghitung nilai kekerasan VHN secara presisi. Nilai VHN ini menjadi indikator penting dalam mengevaluasi ketahanan aus dan kekuatan lapisan pelindung yang terbentuk pada spesimen. Rumus menghitung kekerasan spesimen diperlihatkan rumus 1 dan 2. Kekerasan dari spesimen diatas dicari dengan rumus (Wahyudi., 2016):

$$\text{VHN} = 1,854 \times \frac{P}{d^2} \quad (1)$$

dengan

$$d^2 = \left[\frac{d_1 + d_2}{2} \right]^2 \quad (2)$$

dimana :

VHN = *Vickers Hardness Number* [kg/mm²]

P = beban penekan [kg]

d = panjang diagonal rata-rata [mm]

d₁ = panjang diagonal penekanan 1 [mm]

d₂ = panjang diagonal penekanan 2 [mm]

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Pengukuran Tebal Lapisan

Dari hasil pengukuran tebal lapisan Zn dengan variasi temperatur pencelupan dapat dilihat pada tabel 2 sampai dengan tabel 4.

Tabel 2: Pengukuran tebal lapisan seng pada variasi suhu sekitar 440 °C

Spesimen Ke-	Pengukuran (μm)					Rata-rata
	1	2	3	4	5	
1	14,46	10,71	13,39	12,85	14,46	13,17
2	13,39	12,32	13,93	10,71	10,71	12,21
3	12,86	8,57	10,72	12,32	10,18	10,93
			Rata-rata			12,10

Sumber: Data eksperimen 2024

Pengujian pada suhu 440 °C menghasilkan rata-rata ketebalan lapisan seng sebesar 12,10 μm dari tiga spesimen uji. Nilai tertinggi rata-rata dicapai oleh spesimen pertama (13,17 μm), sedangkan spesimen ketiga menunjukkan ketebalan paling rendah (10,93 μm). Data menunjukkan adanya kecenderungan penurunan ketebalan lapisan seng dibandingkan suhu 450°C yang sebelumnya menghasilkan rata-rata 13,93 μm . Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan suhu pencelupan berdampak positif terhadap ketebalan lapisan seng yang terbentuk, karena suhu yang lebih tinggi mempercepat proses difusi dan reaksi antara seng dan substrat logam. Meskipun begitu, variasi antar spesimen masih terlihat, yang bisa disebabkan oleh perbedaan kondisi permukaan, waktu pencelupan, atau laju pendinginan.

Tabel 3: Pengukuran tebal lapisan seng pada variasi suhu sekitar 450 °C

Spesimen Ke-	Pengukuran (μm)					Rata-rata
	1	2	3	4	5	
1	12,32	9,64	15,53	12,32	11,25	12,21
2	11,26	13,94	13,94	19,84	13,40	14,47
3	16,08	14,47	16,08	16,08	12,87	15,11
			Rata-rata			13,93

Sumber: Data eksperimen 2024

Pengukuran ketebalan lapisan seng pada suhu pencelupan sekitar 450 °C menghasilkan nilai rata-rata sebesar 13,93 μm dari tiga spesimen uji. Ketebalan tertinggi tercatat pada spesimen ketiga dengan rata-rata 15,11 μm , sedangkan yang terendah terdapat pada spesimen pertama sebesar 12,21 μm . Variasi ketebalan ini dapat dipengaruhi oleh perbedaan kondisi permukaan awal bahan, durasi pencelupan yang mungkin tidak sepenuhnya identik, atau variasi pada proses difusi seng ke substrat logam. Secara umum, hasil ini menunjukkan bahwa suhu 450 °C sudah cukup efektif untuk membentuk lapisan seng pelindung, meskipun terdapat sedikit ketidakteraturan yang mungkin perlu dikendalikan dalam proses produksi agar hasil lebih seragam.

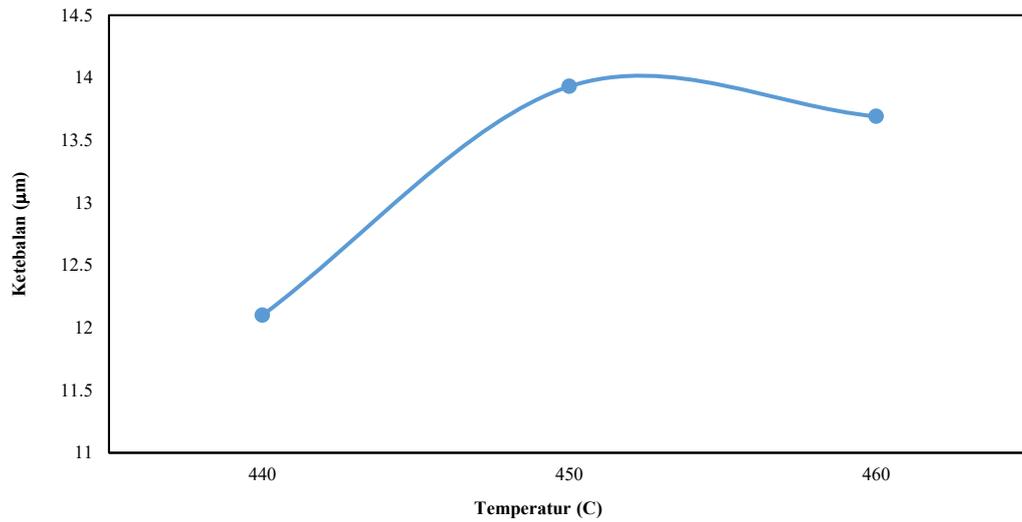
Tabel 4: Pengukuran tebal lapisan seng pada variasi suhu sekitar 460°C

Spesimen Ke-	Pengukuran (μm)					Rata-rata
	1	2	3	4	5	
1	13,38	13,91	16,05	14,98	12,84	14,23
2	13,93	12,85	11,25	12,85	13,93	12,96
3	14,97	12,83	14,44	11,23	16,04	13,90
			Rata-rata			13,69

Sumber: Data eksperimen 2024

Pengukuran tebal lapisan seng pada suhu pencelupan sekitar 460 °C menunjukkan hasil yang cukup konsisten di tiga spesimen uji. Nilai ketebalan rata-rata masing-masing spesimen adalah 14,23 μm , 12,96 μm , dan 13,90 μm , dengan rata-rata keseluruhan sebesar 13,69 μm . Perbedaan nilai antar spesimen kemungkinan disebabkan oleh variasi lokal dalam kondisi permukaan bahan dasar atau ketidakseragaman laju pendinginan saat proses pencelupan. Secara umum, nilai ini mencerminkan terbentuknya lapisan pelindung seng yang cukup seragam dan sesuai dengan rentang yang diharapkan untuk proses galvanisasi termal. Ketebalan yang stabil menunjukkan bahwa suhu 460 °C cukup efektif untuk menghasilkan perlindungan korosi yang baik pada permukaan logam.

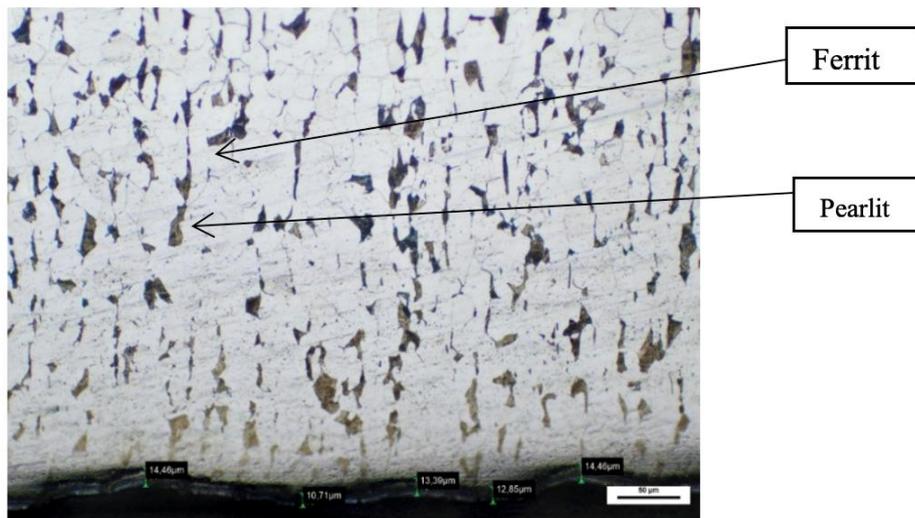
Tabel 2 sampai tabel 4 ini menunjukkan perbedaan tebal lapisan Zn yang didasarkan pada perbedaan temperatur pencelupan. Spesimen dicelupkan pada suhu 440 °C memiliki tebal lapisan Zn rata-rata sebesar 12,10 μm , ketebalan ini semakin naik sebesar 1,87% pada spesimen yang dicelup pada suhu 450 °C dan naik sebesar 3,50 % hasil pengukuran diperlihatkan pada Gambar 4.



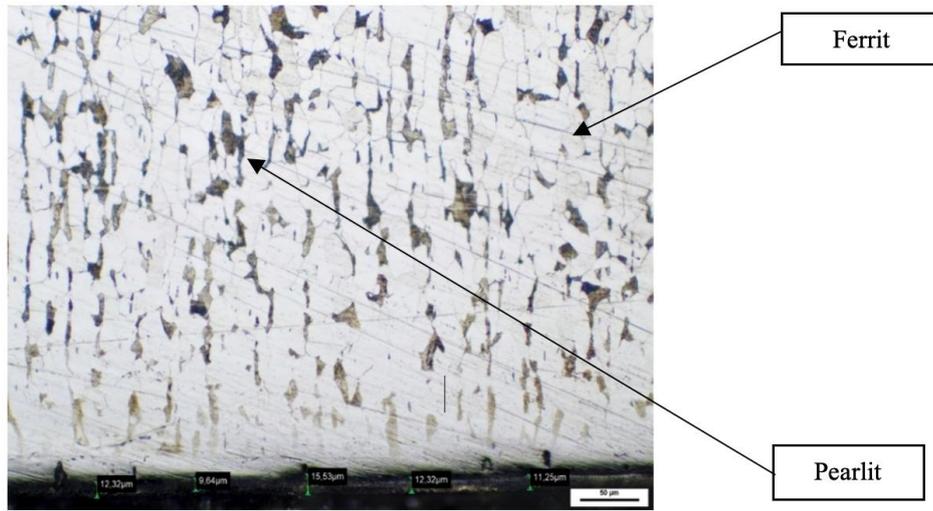
Gambar 4 : Grafik nilai ketebalan vs temperatur pencelupan

Pada spesimen yang dicelup 460 °C . Hal ini sesuai dengan teori bahwa tebal lapisan dipengaruhi oleh kondisi permukaan pada baja, lama pencelupan yang bervariasi dan temperatur pencelupan yang berbeda. Hasil pengujian ketebalan lapisan Zn menunjukkan kecenderungan meningkatnya tebal lapisan seng yang melekat pada baja sering dengan naiknya temperatur pencelupan. Hal ini dikarenakan semakin tinggi temperatur seng akan mengakibatkan kekentalannya menjadi turun sehingga daya larutnya bertambah besar dan akan meningkatkan reaktivitas seng yang berakibat mobilitas ion- ion seng menjadi tinggi sehingga mudah berdifusi pada baja.

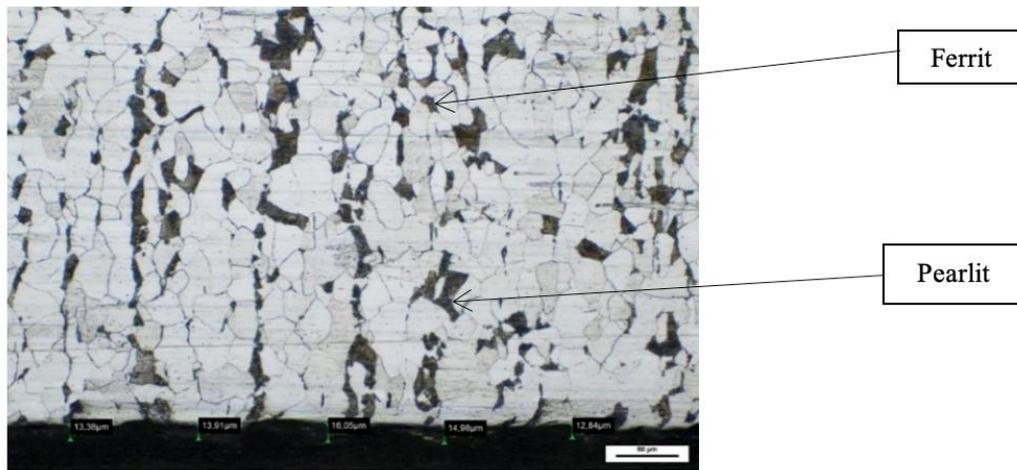
Berikut ini adalah foto struktur mikro hasil pemotretan spesimen uji untuk setiap jenis perlakuan:



Gambar 5: Struktur mikro pada temperatur 440 °C



Gambar 6: Struktur mikro pada temperatur 450 °C



Gambar 7: Struktur mikro pada temperatur 460 °C

Gambar 5 sampai dengan gambar 7 memperlihatkan mikrostruktur spesimen *raw material* menunjukkan dominasi fasa ferit (terang) dibanding perlit (gelap), menandakan bahwa material merupakan baja karbon rendah dengan tingkat kekerasan yang relatif rendah. Setelah proses pelapisan dengan metode *hot dip galvanizing*, terlihat bahwa seng (Zn) berhasil menempel dengan baik pada permukaan baja. Ketebalan lapisan meningkat seiring dengan kenaikan suhu pencelupan dari 440 °C, 450 °C hingga 460 °C. Pada 440 °C, lapisan belum merata, sedangkan pada 450 °C dan 460 °C terlihat struktur lapisan yang lebih seragam dan padat. Kenaikan suhu mempercepat proses difusi ion Zn ke dalam substrat baja, membentuk lapisan paduan antar muka (Zn-Fe). Kandungan unsur pada lapisan diuji dengan uji komposisi, sedangkan kekerasan lapisan diukur menggunakan pengujian *mikro vickers* (VHN) untuk mengetahui distribusi sifat mekanis pada tiap lapisan yang terbentuk.

3.2. Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan merupakan salah satu metode penting untuk mengevaluasi perubahan sifat mekanik material setelah melalui proses perlakuan termal atau pelapisan. Dalam konteks penelitian ini, baja karbon rendah tipe ST41 diuji untuk mengetahui pengaruh proses *Hot Dip Galvanizing* (HDG) terhadap kekerasan permukaannya. Proses HDG dilakukan pada suhu 440 °C selama 30 menit, yang merupakan parameter yang cukup umum dalam aplikasi industri untuk memastikan difusi optimal antara atom besi (Fe) dari substrat baja dengan atom seng (Zn) dari media pelapis. Pengujian kekerasan dalam penelitian ini menggunakan alat uji kekerasan *Micro Vickers* dengan pembebanan sebesar 50 gram. dari hasil perhitungan nantinya akan diperoleh nilai kekerasan *Vickers* (VHN). Hasil pengujian kekerasan *Vickers* ditunjukkan dalam tabel 5 sampai dengan tabel 7 berikut ini.

Tabel 5: Nilai kekerasan suhu pencelupan 440°C

No	Suhu	Pengujian Titik	Waktu	Diagonal (μm)	Kekerasan (VHN)	Rata-rata
1.	440°C	1	30	21,6	293	198,68
		2	30	20,7	297,3	216,34
		3	30	22,1	289,8	189,79
		4	30	21,7	292,8	196,86

5	30	20,8	299,9	214,26
Rata-rata				203,18

Pengujian kekerasan material setelah pencelupan pada suhu 440°C selama 30 menit menghasilkan nilai kekerasan *Vickers* yang cukup tinggi, dengan rentang antara 289,8 hingga 299,9 VHN dan rerata sekitar 294,76 VHN. Hasil ini mencerminkan bahwa perlakuan panas pada suhu tersebut memberikan pengaruh signifikan terhadap peningkatan kekerasan permukaan, kemungkinan karena terbentuknya struktur mikro yang keras akibat transformasi fasa selama proses pendinginan. Variasi antar titik uji sangat kecil, menandakan bahwa perlakuan dilakukan secara merata dan stabil. Dengan demikian, suhu pencelupan 440°C terbukti mampu memberikan kekuatan permukaan yang baik dan sesuai untuk aplikasi komponen mekanis yang memerlukan daya tahan aus yang tinggi.

Tabel 6: Nilai kekerasan suhu pencelupan 450 °C

No	Suhu	Pengujian Titik	Waktu	Diagonal (µm)	Kekerasan (VHN)	Rata-rata
2	450°C	1	45	22,1	290,7	189,79
		2	45	21,3	294,4	204,32
		3	45	21,4	292,9	202,41
		4	45	21,4	292,9	202,41
		5	45	19,9	306,6	234,08
			Rata-rata			206,60

Hasil pengujian kekerasan pada material yang dicelup pada suhu 450 °C selama 45 menit menunjukkan nilai kekerasan *Vickers* (VHN) yang tinggi, dengan rata-rata sekitar 295,5 VHN. Nilai kekerasan ini jauh lebih tinggi dibandingkan perlakuan panas biasa tanpa pencelupan, yang menunjukkan bahwa proses pencelupan kemungkinan melibatkan mekanisme pendinginan cepat (*quenching*) yang memicu terbentuknya struktur mikro keras seperti martensit. Terlihat juga bahwa semakin kecil panjang diagonal jejak indentasi, semakin tinggi nilai kekerasannya, sebagaimana ditunjukkan pada titik kelima. Dengan demikian, proses pencelupan pada suhu ini sangat efektif meningkatkan kekerasan material, menjadikannya cocok untuk aplikasi yang memerlukan ketahanan aus dan kekuatan tinggi.

Tabel 7: Nilai kekerasan suhu pencelupan 460 °C

No	Suhu	Pengujian Titik	Waktu	Diagonal (µm)	Kekerasan (VHN)	Rata-rata
3	460°C	1	60	21,9	296,9	193,28
		2	60	20,9	298,2	212,22
		3	60	20,4	300,9	222,75
		4	60	20,7	297,3	216,34
		5	60	18,4	306,6	234,08
			Rata-rata			223,80

Pengujian kekerasan terhadap spesimen yang dicelupkan pada suhu 460 °C menunjukkan nilai kekerasan *Vickers* (VHN) yang cukup tinggi, dengan rentang antara 296,9 hingga 306,6 VHN. Nilai diagonal indentasi berkisar antara 18,4 hingga 21,9 µm, yang menunjukkan bahwa beban indenter menghasilkan deformasi kecil, sejalan dengan kekerasan material yang tinggi. Rata-rata kekerasan keseluruhan spesimen mencapai 223,80 VHN, mengindikasikan bahwa suhu pencelupan yang lebih tinggi dapat meningkatkan difusi antara logam dasar dan lapisan pelindung, sehingga menghasilkan struktur mikro yang lebih padat dan keras. Hal ini juga menunjukkan konsistensi kualitas permukaan pelapisan seng terhadap kekerasan pada suhu ini, menjadikannya salah satu suhu optimal dalam proses *hot-dip galvanizing* untuk memperoleh sifat mekanik yang baik.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini melihat fenomena, temperatur pencelupan dalam proses *hot dip galvanizing* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kualitas dan karakteristik lapisan seng pada baja karbon rendah. Peningkatan temperatur dari 440°C hingga 460°C menghasilkan peningkatan ketebalan lapisan seng, yakni sebesar 62,06 µm pada 440°C, meningkat menjadi 63,93 µm pada 450°C, dan mencapai ketebalan maksimum pada 460°C. Hal ini menunjukkan bahwa reaksi difusi antara seng cair dan substrat baja semakin intensif pada suhu yang lebih tinggi, sehingga lapisan pelindung terbentuk lebih tebal. Selain itu, hasil pengujian kekerasan menggunakan metode Micro *Vickers* menunjukkan bahwa nilai kekerasan meningkat seiring bertambahnya suhu pencelupan. Kekerasan sebesar 203,18 VHN diperoleh pada suhu 440°C, meningkat menjadi 216,78 VHN pada 450°C, dan mencapai 223,80 VHN pada 460°C. Kenaikan nilai kekerasan ini mengindikasikan terbentuknya fasa-fasa intermetalik yang lebih padat dan kuat akibat suhu yang lebih tinggi, yang memperkuat struktur permukaan logam terhadap deformasi mekanik dan keausan. Pengamatan struktur mikro menggunakan mikroskop metalurgi juga menunjukkan bahwa pada suhu pencelupan yang lebih tinggi, lapisan seng tampak lebih seragam dan berlapis jelas. Terbentuknya fasa-fasa intermetalik seperti eta (η), zeta (ζ), delta (δ), dan gamma (γ) semakin terlihat dengan jelas pada temperatur tinggi, yang merupakan indikator dari ikatan metalurgi yang lebih baik dan kestabilan lapisan terhadap korosi. Adanya fasa gamma yang terbentuk di dekat antarmuka baja menunjukkan bahwa difusi Fe ke dalam seng menjadi lebih dominan pada suhu tinggi. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa peningkatan temperatur pencelupan tidak hanya mempertebal lapisan seng, tetapi juga meningkatkan kekerasan dan kualitas mikrostruktur lapisan, sehingga secara keseluruhan memperbaiki daya tahan terhadap korosi dan ketahanan mekanik baja galvanis. Oleh karena itu, suhu pencelupan menjadi parameter kritis yang harus dioptimalkan dalam proses *hot dip galvanizing* untuk menghasilkan perlindungan yang maksimal terhadap substrat baja karbon rendah.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih pada universitas HKBP Nommensen yang sudah mendukung penelitian ini dengan bantuan dana penelitian, begitu juga dengan dosen dan mahasiswa yang membantu penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- ASTM International, "Standard Specification for Zinc (Hot-Dip Galvanized) Coatings on Iron and Steel Products," *ASTM A123/A123M*, West Conshohocken, PA, USA, 2017.
- A. Rassili and A. Hakkou, "Hardness Properties of HDG-Coated Steel," *Mater. Test.*, vol. 60, no. 5, pp. 429–434, 2018.
- D. Ghosh and T. K. Pal, "Effects of Silicon and Phosphorus in Galvanized Coatings," *Metall. Rev.*, vol. 64, no. 1, pp. 24–30, 2019.
- H. Lee and J. Choi, "Intermetallic Growth in Hot-Dip Galvanized Coatings," *Mater. Charact.*, vol. 167, pp. 110517, 2020.
- N. Prasad and M. Kulkarni, "Brittleness Issues in Intermetallic Layers of Galvanized Steel," *J. Mater. Sci.*, vol. 58, no. 2, pp. 764–772, 2023.
- R. Kumar and V. Singh, "Corrosion Resistance of Low Carbon Steel in Aggressive Environments," *Corros. Sci. Technol.*, vol. 56, no. 2, pp. 88–95, 2022.
- R. Zastrow, "Cathodic Protection and Zinc Coating in Steel Structures," *Int. J. Corros.*, vol. 2021, Article ID 7645083, pp. 1–7, 2021.
- Singh, R. Patel, and M. Verma, "Low Carbon Steels: Properties and Applications," *J. Mater. Eng.*, vol. 45, no. 3, pp. 112–120, 2023.
- Wahyudi, Y. (2016). Analisa Perbandingan Pelapisan Galvanis Elektroplating Dengan Hot Dip Galvanizing Terhadap Ketahanan Korosi Dan Kekerasan Pada Baja. *REM (Rekayasa Energi Manufaktur) Jurnal*, 1(1), em-v1i1.
- X. Zhang, Y. Wang, and L. Chen, "Microstructure and Mechanical Behavior of Fe-Zn Intermetallic Phases," *Surf. Coat. Technol.*, vol. 423, pp. 127594, 2022.
- Y. Lin, M. Zhao, and X. Liu, "Influence of Alloying Elements on Galvanized Layer Growth," *J. Alloys Compd.*, vol. 833, pp. 155148, 2020.