

## PENGARUH VARIASI WAKTU PENCELUPAN HOT DIP GALVANIZING TERHADAP KETEBALAN DAN KEKERASAN LAPISAN DENGAN MENGGUNAKAN BAJA ST 60

\*Amadeus Bagas Maruli Jarwanto<sup>1</sup>, Yusuf Umardani<sup>2</sup>, Agus Suprihanto<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

<sup>2</sup>Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

\*E-mail : amadeusbagas@gmail.com

### Abstrak

Baja digunakan secara luas dalam berbagai industri dan aplikasi sehari-hari, seperti konstruksi, permesinan, dan kerajinan. Namun, penggunaan baja secara langsung tanpa mengalami *treatment* dalam mesin dan struktur terhambat oleh korosi, yang mengakibatkan degradasi prematur. Hal ini menyebabkan perubahan fisik dan mekanis pada logam, mendorong perlunya tindakan pengendalian korosi untuk memperpanjang umur pakainya. Penelitian ini berfokus pada salah satu teknik pengendalian korosi, yaitu *hot dip galvanizing*, yang melibatkan pelapisan baja dengan logam anoda pengorbanan, seng (Zn). Proses ini mengandalkan konsep anoda pengorbanan untuk melindungi baja dari korosi. Potensial elektroda seng yang lebih rendah dibandingkan dengan baja membuatnya menjadi anoda pengorbanan yang ideal. Proses *galvanizing* melibatkan perendaman baja ke dalam seng cair pada suhu sekitar 450°C. Pada penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh waktu pencelupan terhadap ketebalan lapisan coating dan kekerasannya. Dari hasil pengujian didapatkan nilai ketebalan maksimum adalah 0,4677 mm. Nilai kekerasan permukaan yang paling tinggi didapatkan sebesar 84,1111 Hv. Nilai kekerasan lapisan yang paling tinggi didapatkan sebesar 340,3334 Hv. Terdapat lapisan yang membentuk ikatan metalurgi antara seng cair dan permukaan baja, menghasilkan lapisan intermetalik Fe-Zn.

**Kata kunci :** baja ST 60; coating, hot dip galvanizing; kekerasan; ketebalan; waktu celup

### Abstract

Steel is widely used in various industries and everyday applications, such as construction, machining, and crafting. However, the direct use of untreated steel in machinery and structures is hindered by corrosion, leading to premature degradation. This results in physical and mechanical changes in the metal, prompting the need for corrosion control measures to extend its lifespan. This research focuses on one corrosion control technique, namely hot dip galvanizing, which involves coating steel with a sacrificial anode metal, zinc (Zn). This process relies on the concept of sacrificial anodes to protect steel from corrosion. Zinc's lower electrode potential compared to steel makes it an ideal sacrificial anode. The galvanizing process involves immersing steel into molten zinc at around 450°C. This study aims to analyze the influence of immersion time on the coating thickness and its hardness. The testing results revealed a maximum coating thickness value of 0.4677 mm. The highest surface hardness value obtained was 84.1111 Hv. The highest coating hardness value reached 340.3334 Hv. A layer formed a metallurgical bond between the molten zinc and the steel surface, resulting in an Fe-Zn intermetallic layer.

**Keywords :** coating; hardness; hot dip galvanizing; immersion time; ST 60 steel; thickness

### 1. Pendahuluan

Baja merupakan salah satu logam yang banyak digunakan oleh masyarakat dan dunia industri, misalnya pada bidang konstruksi, permesinan, dan kerajinan. Dalam penggunaannya baja tidak dapat digunakan secara langsung sebagai komponen permesinan dan konstruksi, dikarenakan baja akan mengalami kerusakan sebelum waktu yang diperhitungkan, diantara sebab kerusakan logam tersebut karena korosi.

Upaya pengendalian korosi banyak ragam dan caranya, salah satu caranya adalah melapisi logam dengan logam lain yang lebih anodik, atau dengan melapisi logam menggunakan zat kimia tertentu. Proses pelapisan dengan logam lain yang lebih anodik contohnya melapisi baja dengan seng, aluminium, cadmium atau magnesium. Pelapisan ini dapat dilakukan secara *electroplating*, *spraying* atau *hot dip galvanizing*. Pelapisan metode *hot dip galvanizing* dengan logam pelapis seng banyak digunakan berbagai bidang, contoh dalam aplikasi bidang otomotif dan permesinan, seperti baut dan mur, dan alat-alat perkakas.

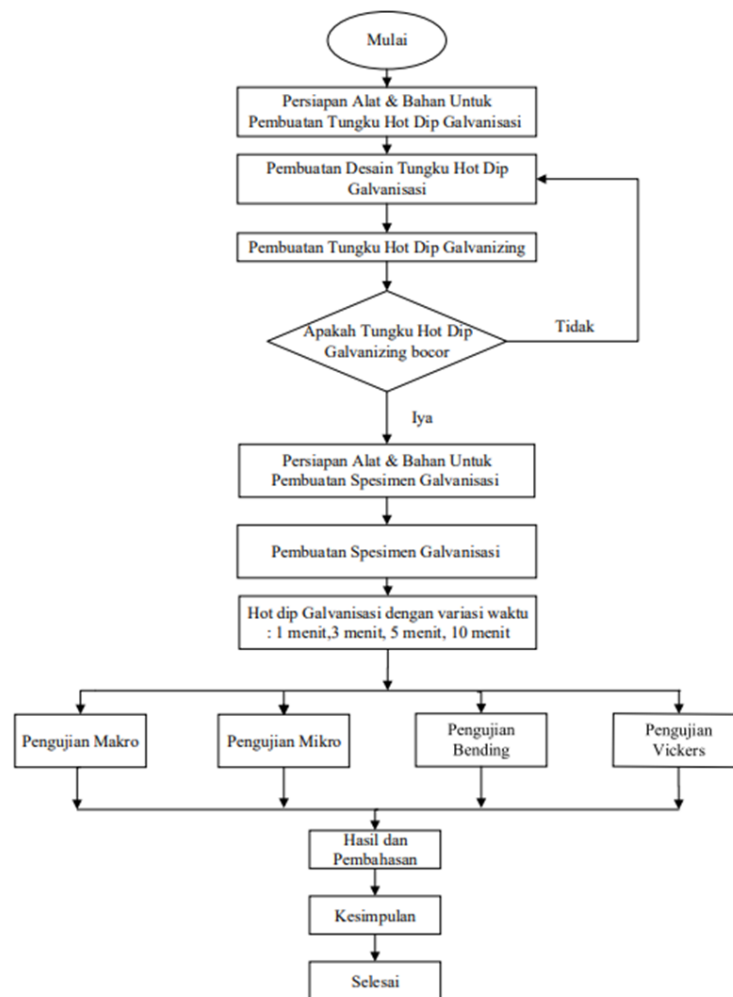
*Hot dip galvanizing* merupakan salah satu metode teknik pelapisan (coating) dengan menggunakan konsep anoda tumbal untuk melindungi suatu logam dari korosi. *Hot dip galvanizing* menggunakan unsur Seng (Zn) sebagai anoda tumbal untuk memproteksi baja dari korosi. Dengan metode Hot Dip ini sering digunakan untuk material-material (baja) yang berukuran besar seperti pipa, plat, dan lain sebagainya. Penggunaan Seng (Zn) sebagai anoda tumbal dikarenakan

Seng (Zn) memiliki nilai potensial elektroda yang lebih rendah dibandingkan dengan baja sehingga baja terproteksi dari korosi dalam lingkungan yang korosif. *Hot dip galvanizing* adalah proses pelapisan baja menggunakan pelapis logam yang memiliki titik lebur lebih rendah dari pada titik lebur baja. Proses *galvanizing* digunakan cara pencelupan baja ke dalam lelehan *zinc* pada temperatur 450°C sehingga terbentuk ikatan metalurgi antara *zinc* cair dengan permukaan baja menghasilkan lapisan intermetalik paduan Fe – Zn [1]

Pelapisan dengan Metode *Hot dip galvanizing* merupakan proses pelapisan yang dilakukan dengan cara mencelupkan logam dasar ke dalam larutan zinc. Proses pelapisan ini menggunakan logam pelapis berupa seng. Dimana seng dapat mencari pada suhu 419,47°C. Pelapisan metode *Hot dip galvanizing* secara garis besar dilakukan dengan tiga tahap pengerjaan yang terdiri dari *pre treatment*, pencelupan, dan pendinginan [2]

Dalam penelitian kali ini, *Hot dip galvanizing* akan divariasikan waktu pencelupannya. Variasi waktu tersebut akan dicari tahu bagaimana pengaruhnya terhadap tebal lapisan dan kekerasan dari spesimen yang di *galvanizing* tersebut. Spesimen yang akan di *galvanizing* akan menggunakan jenis Baja ST 60

## 2.1 Metode Penelitian



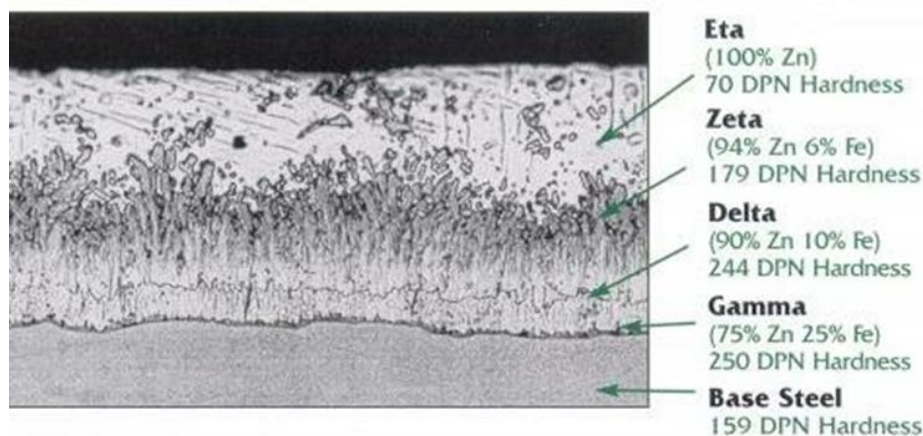
Gambar 1. Diagram Alir.

## 2.2 Hot Dip Galvanizing

*Hot dip galvanizing* adalah metode yang melibatkan pencelupan logam ke dalam seng yang dicairkan untuk menerapkan lapisan pelindung pada permukaannya. Pelapisan celup panas memiliki beberapa keunggulan, diantaranya kemampuan untuk melapisi area yang tersembunyi atau kecil (seperti sudut dan tepi) dengan ketebalan lapisan minimum standar, ketahanan terhadap kerusakan mekanis (karena lapisan tersebut melebur secara metalurgi dengan baja), dan ketahanan korosi yang baik dalam berbagai lingkungan [3].

*hot dip galvanizing* akan menghasilkan beberapa lapisan yang memiliki sifat – sifat berbeda. Setiap lapisan memiliki kekerasan dan sifat yang berbeda – beda. Lapisan bagian luar ZnO merupakan senyawa oksida seng yang

paling tidak diinginkan. Hal ini disebabkan ZnO mempunyai ketahanan korosi paling rendah dibanding produk-produk korosi yang mungkin terbentuk antara seng dan lingkungannya. Lapisan paling atas yang terbentuk antara Zn dengan Fe (*eta layer*) akan lebih murni dan lunak, sedangkan lapisan paling bawah (*gamma layer*) mempunyai paduan baja paling tinggi dibandingkan lapisan lainnya [4]. Berikut ini adalah lapisan – lapisan yang terbentuk dari *hot dip galvanizing*



**Gambar 2.** Lapisan *Galvanizing*

Berdasarkan gambar diatas dapat dijelaskan komposisi kimia dan nilai kekerasan dari tiap-tiap lapisan, diantaranya:

- Lapisan Eta, merupakan lapisan terluar yang tersusun oleh 100% seng yang memiliki kekerasan sebesar 70 DPN (Diamond Pyramid Number).
- Lapisan Zeta, merupakan lapisan yang terdiri dari 94% seng dan 6% besi yang memiliki kekerasan sebesar 179 DPN.
- Lapisan Deltak, adalah lapisan yang terdiri dari 90% seng dan 10% besi yang memiliki kekerasan sebesar 244 DPN.
- Lapisan Gamma, adalah lapisan yang terdiri dari 75% seng dan 25% besi yang memiliki kekerasan sebesar 250 DPN.

### 2.3 Proses *Hot Dip Galvanizing*

Berikut ini adalah proses – proses dari hot dip *galvanizing* yang dilakukan dalam penelitian ini :

- Proses Pembersihan secara fisik  
 Proses pembersihan secara fisik adalah proses pembersihan permukaan spesimen dengan menggunakan benda fisik seperti gerindra atau amplas yang bertujuan untuk menghaluskan permukaan yang tidak rata, menghilangkan kotoran yang menumpuk , dan menghilangkan karat permukaan.
- Proses Pembersihan secara kimia  
 Proses pembersihan secara kimia merupakan proses pembersihan pengotor yang menempel pada permukaan spesimen dengan menggunakan bahan- bahan kimia. Berikut ini adalah tahapan pembersihan secara kimia :
  - Degreasing  
*Degreasing* bertujuan untuk menghilangkan kotoran berupa minyak, lemak, oli, cat, dan kotoran padat lain nya yang menempel pada permukaan. *Degreasing* dilakukan menggunakan larutan NaOH atau water glass dengan konsentrasi 4-8%. Lama *degreasing* pada permukaan dilakukan selama 5 menit
  - Pickling*  
 Proses *pickling* berfungsi untuk menghilangkan karat yang menempel pada permukaan pipa. Proses *pickling* ini unun nya menggunakan larutan HCL dengan konsentrai 7-15 % dan proses pencelupan nya selama 15 menit.
  - Fluxing  
 Proses fluxing berfungsi sebagai lapisan / perekat permukaan pipa, agar lapisan flux juga berfungsi sebagai medan magent, dan dipanaskan untuk mempercepat proses perekatan. Proses fluxing ini menggunakan *Zinc Ammonium Chloride* dengan konsentrasi sebanyak 22-24% dengan tempreatur 60 – 90 %. Pencelupan pada proses fluxing dilakukan selama 2 menit

### 2.4 Difusi

Pada saat melakukan hot dip *galvanizing*, campuran dari logam *zinc* dan spesimen dari besi baja akan membuat sebuah lapisan intermetallik yang menjadi lapisan FeZn. Lapisan FeZn ini terbentuk dari proses yang dinamakan difusi. Dalam perpektif atomik, difusi adalah migrasi perpindahan atom dari satu kisi-kisi kristal ke kisi-kisi kristal lain nya. Pada kenyataannya, atom dalam bahan padat terus-menerus bergerak dan berpindah tempat [5]. Dalam proses terjadinya

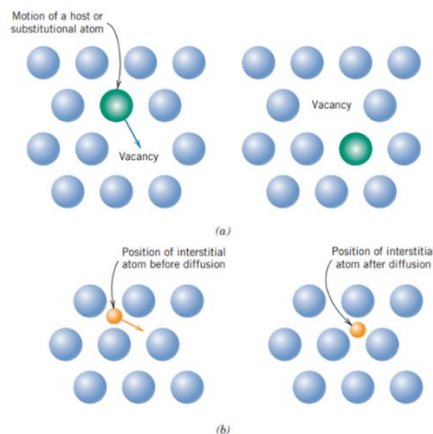
difusi terdapat beberapa kondisi yang harus terpenuhi agar sebuah atom melakukan pergerakan, yaitu harus ada kekosongan (*vacancy*) dalam atom, dan atom harus memiliki cukup energi untuk memutuskan ikatan dengan atom lain nya dan kemudian menghasilkan distorsi kisi selama perpindahannya. Terdapat 2 jenis difusi metallic, sebagai berikut :

1. *Vacancy diffusion*

Difusi vakansi adalah difusi yang terjadi karena adanya kekosongan, sehingga atom bergerak untuk mengisi kekosongan tersebut. Keberadaan vakansi diperlukan untuk proses ini, dan difusi vakansi dapat terjadi merupakan fungsi dari jumlah cacat-cacat ini yang ada; konsentrasi vakansi yang signifikan mungkin ada dalam logam pada suhu tinggi. Karena atom-atom yang berdifusi dan vakansi saling bertukar lokasi, mobilitas atom dalam satu arah sesuai dengan migrasi vakansi dalam arah yang berlawanan. Mekanisme ini memungkinkan untuk difusi diri sendiri (*self-diffusion*) dan difusi antara (*interdiffusion*)

2. *Interstitial diffusion*

Jenis difusi kedua melibatkan atom-atom yang bermigrasi dari posisi interstisial ke posisi yang kosong (*vacancy*). Mekanisme ini ditemukan pada interdifusi zat pencemar seperti hidrogen, karbon, nitrogen, dan oksigen, yang memiliki atom-atom yang cukup kecil untuk masuk ke dalam posisi interstisial. Pada sebagian besar paduan logam, difusi interstisial terjadi jauh lebih cepat daripada difusi melalui mode vakansi, karena atom-atom interstisial lebih kecil dan lebih mudah bergerak. Selain itu, terdapat lebih banyak posisi interstisial kosong daripada vakansi, oleh karena itu, probabilitas pergerakan atom interstisial lebih besar daripada probabilitas difusi melalui vakansi.



Gambar 3. Difusi *Vacancy* (a) dan Difusi Interstitial (b)

2.5 **Tungku Hot Dip Galvanizing**

Alat yang digunakan untuk mencairkan seng adalah sebuah tungku buatan yang berjenis *crucible furnace*. tungku ini terbuat dari *drum* besi yang ditengah – tengah nya terdapat tungku silinder untuk tempat mencair nya seng dan tempat dilakukannya *galvanizing*. Tungku ini terdapat 2 bagian yaitu , *drum* dan tungku pelelehan. *Drum* berfungsi sebagai tempat meletakkan *furnace* dan tempat diletakkan nya *fire brick*. *Fire brick* berfungsi sebagai mempertahankan panas yang berada di *furnace galvanizing*. Pada *drum* ini terdapat lubang kecil yang berfungsi sebagai tempat masuk nya udara dari *blower*. Udara yang dihasilkan dari *blower* digunakan untuk menyalakan bahan bakar *furnace* ini yaitu batu bara dan arang yang digunakan sebagai bahan bakar tungku.



Gambar 3. Tungku Hot Dip Galvanizing

## 2.6 Spesimen Baja ST 60

Spesimen dalam penelitian ini menggunakan plat baja ST 60 yang akan dipotong berbentuk segiempat dengan ukuran 5cm x 5 cm dengan tebal 0,3 cm. Setelah spesimen sudah terbentuk sedemikian rupa, spesimen kepingan baja ST60 masuk ke dalam proses pengamplasan untuk membentuk variasi kekasaran permukaan. Variasi amplas yang digunakan adalah 100, 400, 800, dan 2000. Metode pengamplasan yang digunakan adalah dengan pengamplasan cara manual dengan arah horizontal dan vertikal. Spesimen dapat dilihat pada gambar dibawah.

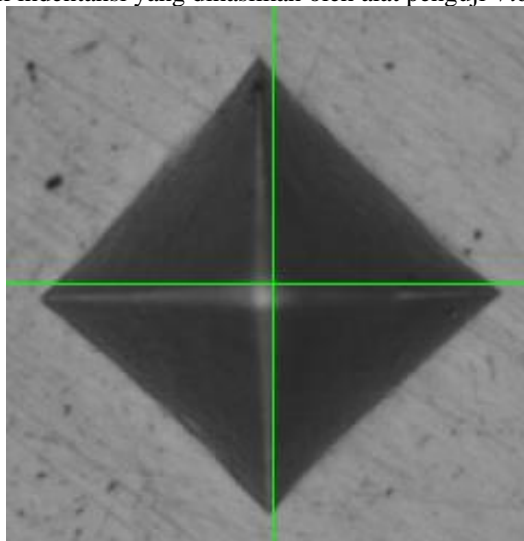


Gambar 4. Spesimen Plat Baja ST 60

## 2.7 Pengujian Kekerasan

Kekerasan suatu logam merupakan sifat ketahanan atau kemampuan suatu logam terhadap penetrasi dalam memberikan suatu indikasi yang cepat mengenai perilaku deformasi plastis. Uji kekerasan adalah jenis pengujian untuk mengetahui nilai kekerasan suatu material. Uji kekerasan adalah jenis uji bahan yang dapat bersifat destructive ataupun tidak. Bahan diletakkan di atas suatu alas sebelum ditekan dengan alat. Terdapat tiga jenis metode pengujian kekerasan: *Vickers*, *Rockwell*, *Knoop*, dan *Brinell* [6]

Pada penelitian ini menggunakan metode pengujian kekerasan *vickers*. Pengujian kekerasan *Vickers* diukur dengan menggunakan alat penguji *Vickers*. Teknik pengujian kekerasan *vickers* harus dilakukan dengan beban yang bervariasi dari 5 hingga 120 kgf, dan durasi penekanan pada sampel material dilakukan selama 10 hingga 15 detik. Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, parameter-parameter ini harus ditentukan sesuai dengan sifat mekanik dari material yang akan dievaluasi. Satuan HV (*Hardness vickers*) digunakan untuk mengekspresikan kekerasan *vickers*. Penekan pengujian kekerasan *vickers* memiliki konfigurasi geometri berbentuk piramida persegi yang terbuat dari intan. Berikut ini adalah gambar dari hasil indentansi yang dihasilkan oleh alat penguji *Vickers*.



Gambar 5. Hasil Penekanan Indentor *Vickers*



Diagonal yang didapat dari hasil indentasi kemudian diukur menggunakan perhitungan dari mesin pengujian. Maka akan didapatkan nilai d1 dan d2 dari diagonal, yang ditunjukkan pada gambar 2.5 digunakan untuk menghitung nilai diagonal rata-rata ( $D_{mean}$ ). Dari  $D_{mean}$  tersebut dapat mencari nilai kekerasan dengan rumus sebagai berikut :

$$HV = \frac{1.8544 F}{D_{mean}^2} \quad (1)$$

Dimana :

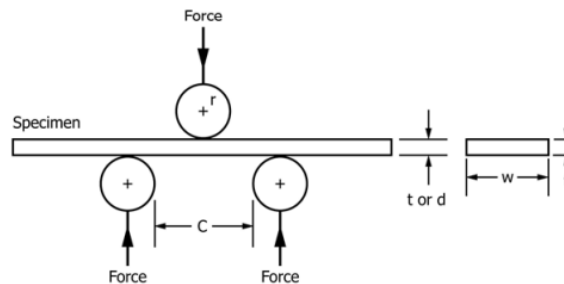
F = beban yang diberikan (kgf)

$D_{mean}$  = diagonal rata rata (mm)

## 2.8 Pengujian Bending

Pengujian *bending* adalah metode untuk menentukan kekuatan lentur dan sifat-sifat penting lain dari suatu bahan. Pengujian ini dilakukan dengan memberikan beban pada suatu bahan atau struktur sehingga akan mengalami deformasi atau perubahan bentuk. Metode ini melibatkan peregangan sepanjang bahan di atas jarak tertentu dan penerapan tekanan untuk menekuk bahan hingga bahan tersebut pecah.

Pada penelitian ini menggunakan menggunakan pengujian metode ASTM E 290-14. Pada ASTM E 290-14 akan diperhitungkan untuk jarak tumpuan nya. Berikut ini adalah gambar tumpuan dan rumus yang digunakan dalam memperhitungkan jarak tumpuan pengujian *bending* :



**Gambar 6.** Standar Pengujian *Bending* (ASTM E 290-14, 2014)

$$C = 2r + 3t \pm \frac{t}{2} \quad (2)$$

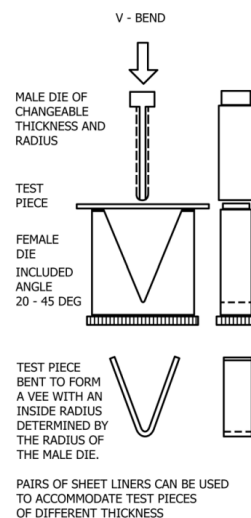
Dimana :

C = Jarak antara kedua tumpuan (cm)

t = Ketebalan specimen (cm)

r = Jari-jari ujung beban penekuk (cm)

Pengujian *bending* dapat dilakukan dengan dua macam tumpuan diantaranya tumpuan berbentuk U dan V. Pengujian *bending* dengan tumpuan berbentuk V mengikuti standar ASTM E 290-14 seperti pada gambar berikut.



**Gambar 7.** Standar Tumpuan Pengujian *Bending* (ASTM E 290-14, 2014)

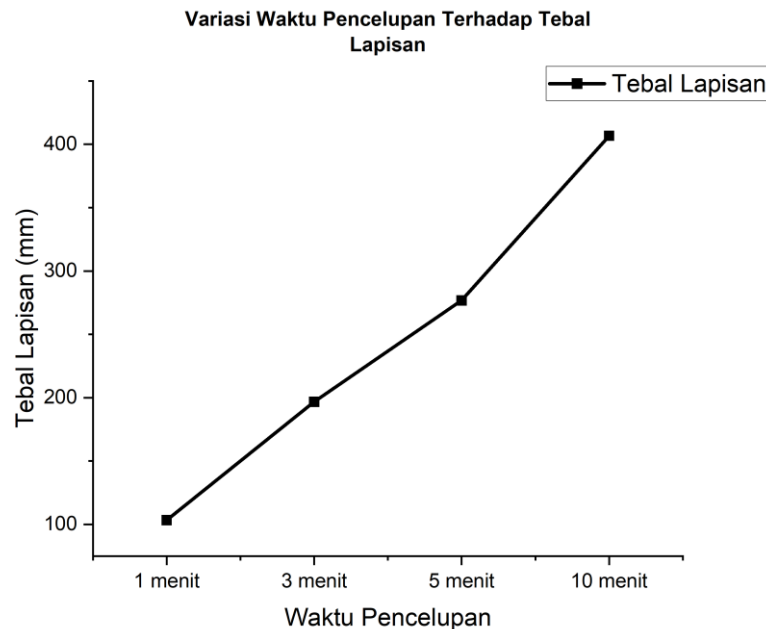
### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Hasil Pengujian Makro Ketebalan Lapisan

Pengujian makro dilakukan untuk mengetahui tebal lapisan *zinc* yang melekat pada permukaan. Pengujian makro dilakukan dengan menggunakan mikroskop makro dengan perbesaran makro. Berikut ini adalah hasil pengujian makro untuk mengetahui ketebalan lapisan *zinc* yang didapatkan, ditunjukkan oleh tabel 1 dan gambar 7 :

**Tabel 1.** Hasil Pengujian Kekasaran Permukaan Spesimen

No	Tebal Lapisan (mm)				
	Waktu Pencelupan	Spesimen 1	Spesimen 2	Spesimen 3	rata rata
1	1 menit	0,08	0,11	0,12	0,10333
2	3 menit	0,16	0,17	0,26	0,19667
3	5 menit	0,23	0,33	0,27	0,27667
4	10 menit	0,43	0,39	0,4	0,40667

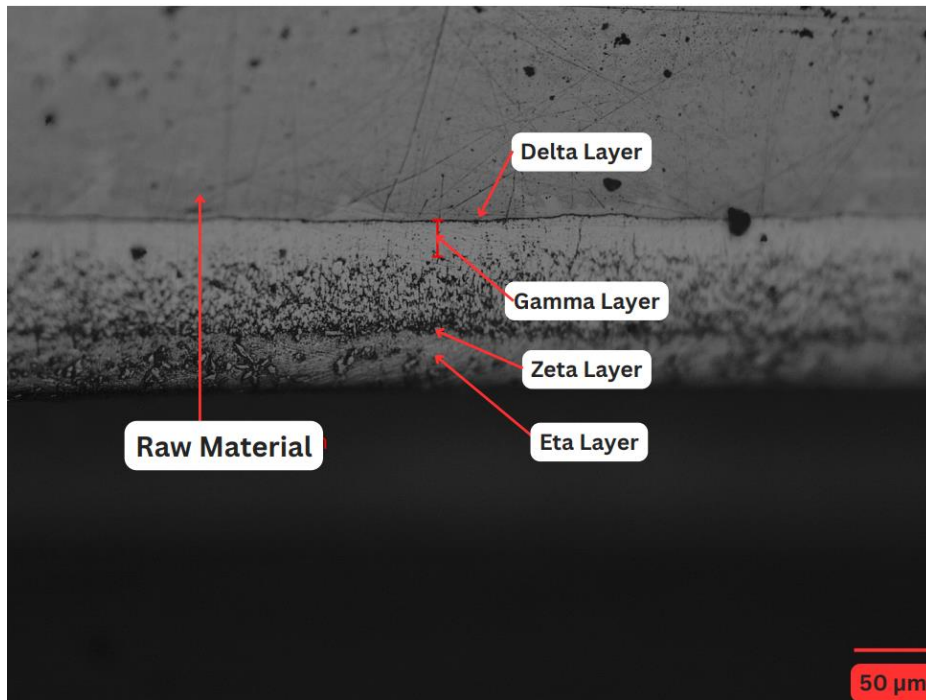


**Gambar 7.** Grafik Pengaruh Variasi Waktu Pencelupan Terhadap Tebal Lapisan

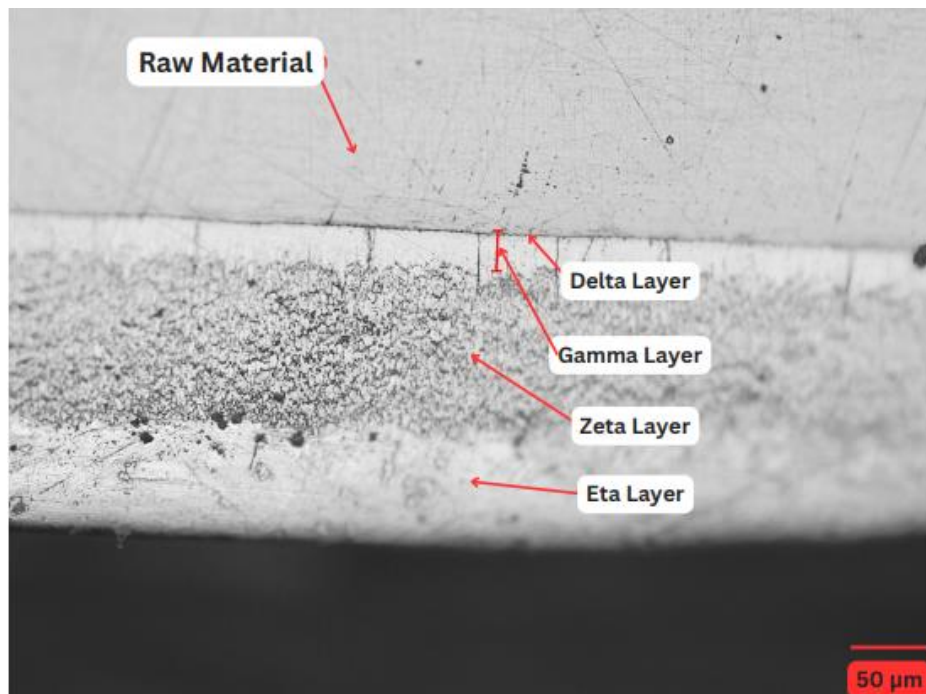
Berdasarkan data hasil pengujian kekasaran permukaan diatas, dapat dilihat bahwa nilai kekasaran permukaan terbesar terdapat pada variasi waktu pencelupan 10 menit dengan nilai rata- rata ketebalan lapisan 0,40667 mm dan nilai ketebalan lapisan terkecil terdapat pada waktu pencelupan dengan nilai 1 menit dengan nilai rata- rata ketebalan lapisan 0,10333 mm. berdasarkan tabel diatas menunjukkan dapat dilihat bahwa semakin lama waktu pencelupan hot dip *galvanizing* maka tebal lapisan yang dihasilkan semakin tebal. Hal ini disebabkan pada saat proses *galvanizing* (proses pencelupan ke seng cair) terjadi pembentukan dan pertumbuhan lapisan intermetalik. Berdasarkan tabel di atas menunjukkan bahwa semakin lama waktu yang dibutuhkan untuk atom-atom dalam paduan logam Zn cair untuk berdifusi ke dalam kisi-kisi atom logam Fe (spesimen uji), hal ini juga berlaku sebaliknya. [7] Mengontrol ketebalan pelapisan dengan variasi waktu pencelupan menjadi tantangan dan sering kali tidak konsisten. Seperti yang ditunjukkan pada spesimen 3 variasi 3 dan 5 menit dimana peningkatan ketebalan yang terjadi hanya 0,1 mm sedangkan pada spesimen 1 variasi 5 dan 10 menit terjadi peningkatan ketebalan sebesar 0,20 mm. Hal ini terjadi karena pertumbuhan lapisan seiring berjalannya waktu menjadi lambat, dengan laju pertumbuhan yang lebih kuat di awal dan melambat saat lapisan menjadi stabil (mencapai ketebalan yang sesuai).

### 3.2 Hasil Pengujian Mikrografi

Pengujian Mikrografi dilakukan di Laboratorium Material Teknik Mesin Undip dengan menggunakan standar ASTM E3. Pengujian mikrografi yang dilakukan menggunakan lensa perbesaran 200 kali pada spesimen variasi waktu pencelupan 1 menit, 3 menit, 5 menit, dan 10 menit. Hasil Pengujian mikrografi dapat dilihat pada gambar-gambar berikut.

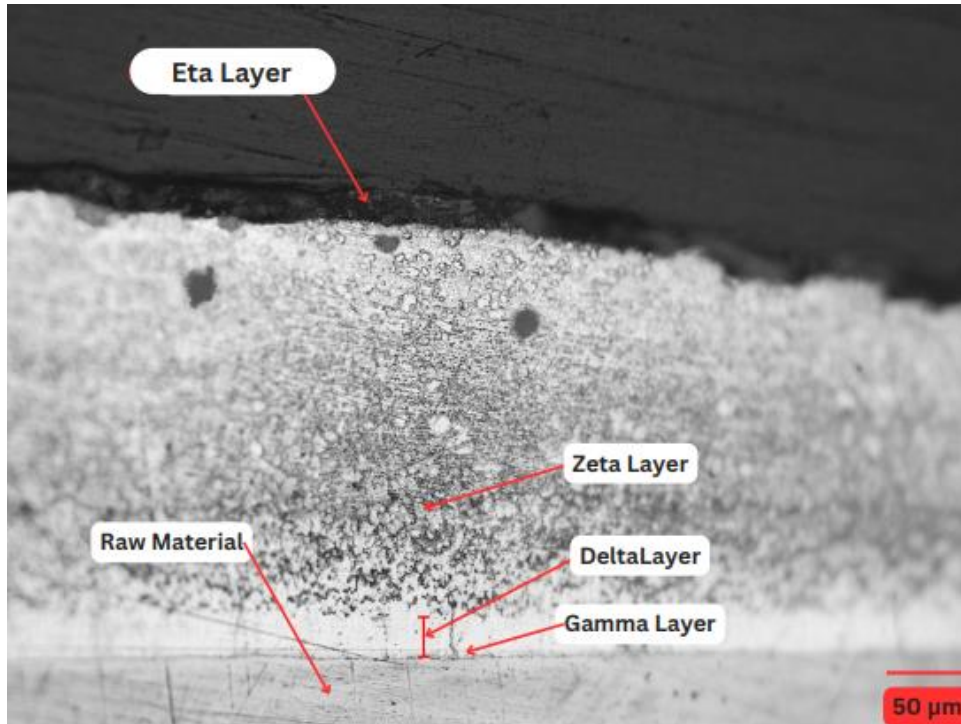


**Gambar 8.** Foto Mikro Lapisan Hot Dip *Galvanizing* Variasi 1 Menit

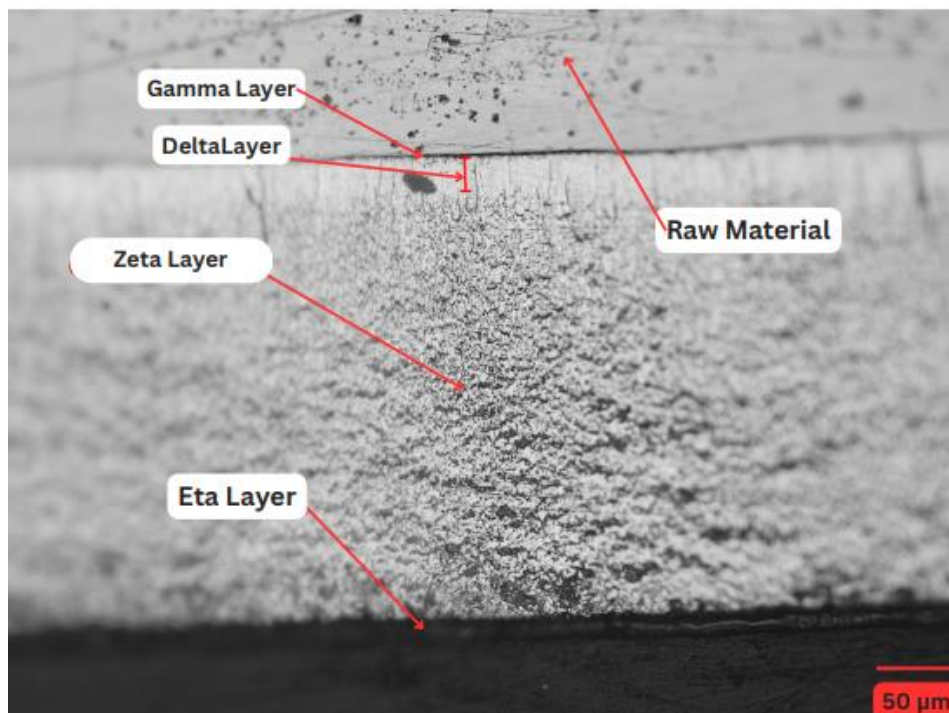


**Gambar 9.** Foto Mikro Lapisan Hot Dip *Galvanizing* Variasi 3 Menit





Gambar 10. Foto Mikro Lapisan Hot Dip Galvanizing Variasi 5 Menit



Gambar 11. Foto Mikro Lapisan Hot Dip Galvanizing Variasi 10 Menit

Hasil dari pengujian mikrografi memperlihatkan terdapat lapisan difusi antara material spesimen dengan material *zinc*. Pada lapisan difusi, terbentuk senyawa Fe-Zn yang terdiri dari *gamma layer*, *delta layer*, *zeta layer*, dan *eta layer*.

### 3.3 Hasil Pengujian Bending

Pengujian bending bertujuan untuk mengetahui ada nya retakan pada permukaan lapisan *zinc*. Pengujian bending dilakukan berdasarkan ASTM yang berlaku yaitu ASTM E290-14 tentang metode standar untuk pengujian bending. Berdasarkan informasi yang didapatkan dari ASTM E290-14 penekuk yang digunakan dalam hal ini berbentuk V dengan nilai *r* sebesar 4,75 mm, tebal spesimen sebesar 3 mm dan jarak antar tumpuan diatur seperti pada perhitungan berikut :

$$C = 2r + 3t \pm \frac{t}{2}$$

$$C = 2 \times 4,75 + 3 \times 3 \pm \frac{3}{2}$$

$$C = 9,5 \pm 9 \pm 1,5$$

$$C = 20 \text{ mm}$$

Berdasarkan keterangan ASTM E290-14, penekukan harus mencapai sudut 45°. Oleh itu, pengujian yang dilakukan pada penelitian ini dilakukan dengan mengamati tiap sudut istimewa hingga sudut 45°. Hal yang diamati dalam pengujian *bending* ini adalah apakah terjadi retak pada lapisan *galvanizing* atau tidak. Tabel 2 dibawah menunjukan data hasil pengujian *bending* :

**Tabel 2.** Hasil Pengujian Tebal Lapisan

No	Nama	variasi sudut (derajat)				
		150°	120°	90°	60°	45°
1	1 menit spesimen 1			✓	✓	✓
2	1 menit spesimen 2			✓	✓	✓
3	1 menit spesimen 3	✓	✓	✓	✓	✓
4	3 menit spesimen 1			✓	✓	✓
5	3 menit spesimen 2	✓	✓	✓	✓	✓
6	3 menit spesimen 3	✓	✓	✓	✓	✓
7	5 menit spesimen 1	✓	✓	✓	✓	✓
8	5 menit spesimen 2	✓	✓	✓	✓	✓
9	5 menit spesimen 3	✓	✓	✓	✓	✓
10	10 menit spesimen 1	✓	✓	✓	✓	✓
11	10 menit spesimen 2	✓	✓	✓	✓	✓
12	10 menit spesimen 3	✓	✓	✓	✓	✓

Berdasarkan data yang didapat dari pengujian bending, variasi 1 menit untuk spesimen 2 dan 3 tidak mengalami patah ketika ditekuk hingga 120°, Namun seluruh spesimen yang dilakukan pengujian mengalami patah mulai dari sudut 150°. Hal ini menyatakan bahwa seluruh lapisan *galvanizing* pada spesimen mengalami patah pada saat ditekuk hingga sudut 45°. Pengecualian varian pada 1 menit spesimen 3 sudah mengalami patah dari awal dikarenakan hasil *galvanizing* yang tidak merata, menyebabkan mudah nya patah pada lapisan coating. Berdasarkan hasil yang didapat, dapat diketahui bahwa lapisan *galvanizing* bersifat getas dan memiliki sifat mudah retak apabila mendapat perlakuan tekuk.

Berdasarkan Beer dkk (2012) [8] bending menggambarkan perilaku elemen struktural seperti balok, ketika terkena beban eksternal yang diterapkan tegak lurus terhadap sumbu horizontal elemen. Beban pembengkokan akan menghasilkan gaya tekan dan tarik yang tegak lurus dengan sumbu balok. Gaya-gaya ini menghasilkan tegangan pada balok. Ketika balok dengan penampang lintang seragam melengkung, tegangan tekan maksimum terjadi di tepi paling atas dan tegangan tarik maksimum terjadi di tepi bawahnya. Karena tegangan di antara dua maksimum yang berlawanan ini bervariasi secara linear, terdapat titik pada jalur linear di antara keduanya yang tidak memiliki tegangan pembengkokan. Sumbu netral adalah lokasi dari titik-titik ini sepanjang panjang balok. Rumus untuk memperhitungkan bending stress pada batang adalah sebagai berikut :

$$\sigma_x = -\frac{Mc}{I} \quad (3)$$

Dimana :

$\sigma$  = bending stress

M = momen terhadap sumbu netral batang

C = jarak tegak lurus bagian terluar terhadap sumbu netral

I = inersia

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Cocco dkk (2018) menunjukkan bahwa semakin lama waktu pencelupan maka semakin juga besar crack yang terjadi. Hal ini dikarenakan seiring waktu pencelupan yang semakin lama maka fasa zeta yang semakin banyak muncul dibandingkan fasa eta dan delta. Fase zeta ini memiliki sifat getas. Pada penelitian ini menunjukkan bahwa pada retak mulai muncul di variasi waktu pencelupan 3 menit keatas.

Berdasarkan pengujian bending, kita dapat mengetahui sifat coating yang dihasilkan dengan menggunakan variasi waktu pencelupan apa aja akan menghasilkan sifat getas dan memiliki sifat yang mudah retak apabila mengalami perlakuan tekuk.

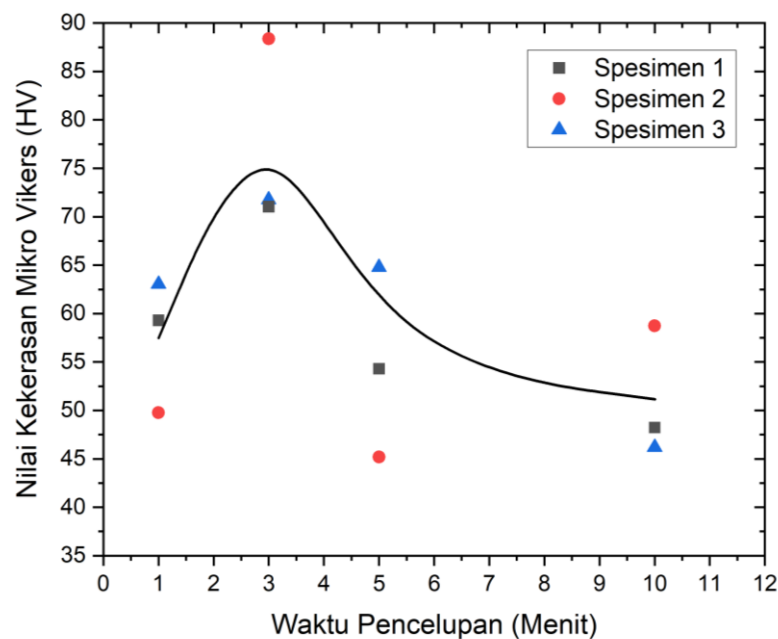
### 3.4 Hasil Pengujian Kekerasan

#### 3.4.1 Hasil Pengujian Kekerasan pada Permukaan Coating

Pengujian kekerasan micro Vickers dilakukan untuk mengetahui kekerasan lapisan yang dihasilkan dari *hot dip galvanizing*. Proses pengujian menggunakan standar ASTM 384 dan pembebanan yang digunakan pada pengujian ini adalah 500 gf. Proses pembentukan indentasi dilakukan pada lapisan atas permukaan *galvanizing* Hasil dari pengujian kekerasan *Vickers* pada lapisan coating dapat dilihat pada tabel 3 dan gambar 12 dibawah ini :

**Tabel 3.** Hasil Pengujian Vickers pada Lapisan Coating Spesimen Hot Dip *Galvanizing*

No	Nama	Percobaan 1			Percobaan 2			Percobaan 3			Rata-rata
		D1	D2	HV	D1	D2	HV	D1	D2	HV	
1	1 menit spesimen 1	17	17	57,4	123	123	61,1	125	125	59,4	59,3
2	1 menit spesimen 2	133	133	52,3	138	138	49	138	138	48	49,8
3	1 menit spesimen 3	127	127	57,3	123	123	61,9	115	115	69,9	63
4	3 menit spesimen 1	99	98,5	95	102	102	89,9	101	101	91,7	92,2
5	3 menit spesimen 2	105	105	84,3	102	102	89,7	101	101	91,1	88,4
6	3 menit spesimen 3	113	113	73	115	115	70,2	114	114	72,1	71,8
7	5 menit spesimen 1	133	133	52,3	129	129	55,7	130	130	54,9	54,3
8	5 menit spesimen 2	134	134	52,1	145	145	44	153	153	39,5	45,2
9	5 menit spesimen 3	124	124	60,5	114	114	71,9	122	122	62	64,8
10	10 menit spesimen 1	134	134	51	139	139	48,1	143	143	45,6	48,2
11	10 menit spesimen 2	127	127	57,4	122	122	62,6	129	129	56,2	58,7
12	10 menit spesimen 3	139	139	48,3	141	141	46,6	146	146	43,7	46,2



**Gambar 12.** Grafik Nilai Kekerasan Permukaan Hot Dip *Galvanizing*

Berdasarkan data dan grafik nilai kekerasan vickers yang didapatkan, menunjukkan bahwa pada waktu pencelupan 1 menit hingga 3 menit terjadi peningkatan kekerasan. Rata – rata nilai kekerasan pencelupan variasi 1 menit adalah 57,3667 HV dan rata – rata nilai kekerasan pencelupan variasi 3 menit adalah 84,111 HV Untuk variasi waktu pencelupan 5 menit dan 10 menit, nilai kekerasan menjadi turun. Rata – rata nilai kekerasan pencelupan variasi 5 menit adalah 54,766 HV dan rata – rata nilai kekerasan pencelupan variasi 10 menit adalah 51,05556 HV.

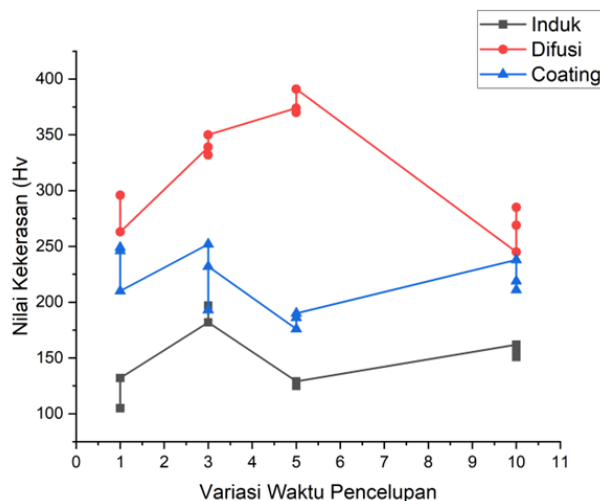
Dari grafik menunjukkan bahwa nilai kekerasan vickers terjadi penurunan seiring meningkat nya waktu pencelupan. Pada saat variasi waktu pencelupan 1 menit menuju 3 menit mengalami peningkatan kekerasan, sedangkan waktu pencelupan 3 menit hingga 10 menit mengalami penurunan. Nilai kekerasan ini mengalami penurunan dikarenakan bahan mentah telah dilindungi dengan logam Zn dengan nilai kekerasan lebih rendah daripada bahan mentah, sehingga penekan peralatan pengujian kekerasan hanya menyentuh lapisan Zn dan hanya sedikit menyentuh bahan dasar; hanya pada lapisan Zeta yang mengandung 94% Zn dan 6% Fe, sehingga nilai kekerasan menjadi lebih kecil daripada nilai kekerasan awal bahan mentah. Perendaman selama 5 dan 10 menit menunjukkan nilai kekerasan rata-rata masing-masing sebesar 54,766 HV dan 51,05556 HV. Nilai-nilai kekerasan ini lebih rendah dibandingkan dengan perendaman selama 3 menit. Hal ini disebabkan oleh lapisan logam Zn yang lebih tebal akan melapisi bahan dasar bersama dengan waktu perendaman yang lebih lama sehingga penekan hanya menyentuh lapisan Zn dan hanya sedikit menekan bahan dasar. Data yang diperoleh menunjukkan bahwa semakin lama waktu perendaman, semakin kecil nilai kekerasannya.

### 3.4.1 Hasil Pengujian Kekerasan Pengujian Vickers pada Lapisan *Coating*

Pengujian kekerasan microvickers juga dilakukan pada lapisan *layer* dari spesimen hot dip *galvanizing*. Proses pengujian menggunakan standar ASTM E384 dan pembebanan yang digunakan pada pengujian ini adalah 100 gf. Proses pembentukan indentasi dilakukan secara menyamping dan dilakukan pada 3 bagian yaitu lapisan *coating*, lapisan difusi, dan pada lapisan logam induk. Pengujian dilakukan dalam Hasil dari pengujian kekerasan Vickers pada lapisan coating dapat dilihat pada tabel 4 dan gambar 13 dibawah :

**Tabel 4** Hasil Pengukuran Tebal Lapisan Hot Dip *Galvanizing*

No	Variasi Pencelupan	Coating	Difusi	Logam Induk
1	1 menit	105	296	246
		132	296	249
		132	263	210
	<b>rata -rata</b>	<b>123</b>	<b>285</b>	<b>235</b>
2	3 menit	182	339	252
		197	332	193
		182	350	232
	<b>rata -rata</b>	<b>187</b>	<b>340,3333</b>	<b>252</b>
3	5 menit	129	374	176
		125	370	186
		129	391	190
	<b>rata -rata</b>	<b>127,6667</b>	<b>378,3333</b>	<b>184</b>
4	10 menit	162	245	238
		151	269	219
		158	285	211
	<b>rata -rata</b>	<b>157</b>	<b>266,3333</b>	<b>222,6667</b>



**Gambar 13.** Grafik Nilai Kekerasan Lapisan Hot Dip *Galvanizing*

Berdasarkan data dan grafik nilai kekerasan vickers yang didapatkan, menunjukkan bahwa nilai kekerasan pada lapisan difusi/delta memiliki rata – rata kekerasan yang tinggi yaitu sebesar 317,5 HV sedangkan lapisan coating zeta memiliki rata- rata kekerasan sebesar 148,667. Benarioua dkk [9] Ditemukan bahwa pertumbuhan fasa delta ( $\delta$ ) lebih cepat dibandingkan pertumbuhan fasa zeta ( $\xi$ ) dan fasa eta ( $\eta$ ). Pada waktu perendaman dalam bak yang lebih lama, fasa gamma ( $\Gamma$ ) hadir sebagai lapisan tipis dan lapisan fasa  $\delta$  mendominasi sebagian besar pelapisan, sedangkan fasa  $\eta$  dominan pada waktu perendaman yang lebih rendah. Model multilapisan memungkinkan untuk memisahkan kontribusi dari lapisan-lapisan yang berbeda dalam pelapisan dan menentukan kekerasan dari senyawa intermetalik yang berbeda secara independen dari waktu perendaman dalam bak.

Hal ini juga menunjukkan dimana pada saat variasi waktu 5 menit mengalami penurunan kekerasan saat menuju variasi waktu 10 menit, dimana pada lapisan difusi terjadi peningkatan dalam pembentukan lapisan delta. Pada percobaan ini lapisan delta telah optimum pada 5 menit sehingga memiliki kekerasan paling tinggi. Setelah waktu pencelupan mencapai lebih dari 5 menit, akan didominasi fasa zeta dan eta sehingga kekerasan menjadi menurun.

Menurut Saripudin [10] menurun nya kekerasan disebabkan karna adanya lapisan seng yang melindungi spesimen sehingga pada saat uji kekerasan lapisan seng yang teruji oleh indenter tersebut, sehingga hasilnya menurun. Pada waktu celup 1 menit detak tebal lapisan seng lebih tipis sehingga pada saat uji kekerasan sedikit menyentuh permukaan logam baut jadi hasilnya lebih keras. Sedangkan pada waktu celup 10 menit lapisan seng lebih tebal sehingga pada saat dilakukan uji kekerasan indenter hanya menyentuh lapisan seng, sehingga hasilnya menurun

#### 4. Kesimpulan

- Semakin tinggi nilai waktu pencelupan *galvanizing*, maka tebal lapisan coating di spesimen akan semakin tinggi juga nilai ketebalan lapisan hasil hot dip *galvanizing*. Hal ini dibuktikan dengan nilai ketebalan lapisan rata – rata tertinggi didapatkan oleh variasi waktu pencelupan 10 menit dengan nilai sebesar 0,40677 mm. Untuk nilai ketebalan lapisan terendah didapat dari variasi waktu pencelupan 1 menit dengan nilai sebesar 0,1033 mm.
- Lapisan hot dip *galvanizing* bersifat getas dibuktikan oleh data hasil pengujian bending dimana seluruh spesimen mengalami keretakan saat ditekuk hingga sudut  $45^\circ$ .
- Terdapat lapisan difusi yaitu Fe-Zn yang terbentuk pasca proses hot dip *galvanizing*.
- Semakin tinggi waktu pencelupan hot dip *galvanizing*, semakin rendah juga nilai kekerasan permukaan hot dip *galvanizing*. Hal ini dibuktikan dengan nilai kekerasan micro Vickers rata- rata tertinggi sebesar 84,1111 Hv yang diperoleh spesimen dengan variasi waktu pencelupan 3 menit dan nilai kekerasan micro Vickers terendah sebesar 51,0556 Hv yang diperoleh variasi waktu pencelupan 10 menit.
- Semakin tinggi waktu pencelupan hot dip *galvanizing*, semakin rendah juga nilai kekerasan *layer* hot dip *galvanizing*. Hal ini dibuktikan dengan nilai kekerasan micro Vickers rata- rata tertinggi sebesar 340,3334 Hv yang diperoleh spesimen dengan variasi waktu pencelupan 5 menit dan nilai kekerasan micro Vickers terendah sebesar 266,3333 Hv yang diperoleh variasi waktu pencelupan 10 menit.



#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Yulianto, S. and Widura, I.A. (2012) ‘Pengaruh Waktu Tahan Hot Dip Galvanized Terhadap Sifat Mekanik, Tebal Lapisan, Dan Struktur Mikro Baja Karbon Rendah’, Sintek Jurnal: *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 6(2), pp. 33–44.
- [2] W., H., Daniel & PENSE, Alan (2002) *Structure and properties of Engineering Materials*. McGraw-Hill, .
- [3] Korb, L.J. (1998) *ASM Handbook. volume 13. corrosion Vol 13*. 9th edn. Materials Park, Ohio: ASM International.
- [4] R, T.O., Sumardi, S. and Yoga, D. (2017) “Pengaruh Variasi Temperatur Pencelupan Terhadap Sifat Mekanik Pada Baja Karbon Rendah (0.02% C) Dengan Metode Pelapisan Hot Dip Galvanizing”, *Jurnal Rekayasa, Teknologi, dan Sains* , 1(1), pp. 59–67. doi:<https://doi.org/10.33024/jrets.v1i1.987>.
- [5] Callister, William D. (2007) *Material Science and Engineering An Introduction*. New York: John Wiley and Sons, Inc.
- [6] ASTM International (2017) *Standard test methods for Vickers hardness and Knoop hardness of metallic materials*. West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International.
- [7] Sulistijono. (1999) Diktat Kuliah Korosi. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- [8] Beer, F.P. *et al.* (2020) *Mechanics of Materials*. 6th edn. New York, NY: McGraw-Hill Education.
- [9] Benarioua, Y. *et al.* (2016) ‘Hardness-load modelling applied to multilayer galvanised coatings’, *Surface Engineering*, 32(3), pp. 194–200. doi:10.1080/02670844.2015.1116802.
- [10] Saripudin, Aep (2010) Pengaruh Waktu Galvanis Terhadap Pembentukan Fasa Intermetalik Fe-Zn Pada Permukaan Ulir Baut Baja. Jurnal Teknik Mesin Universitas Gunadarma