

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data dan Perhitungan Hasil Pengujian

4.1.1 Data Hasil Pengujian Kekerasan

Data yang digunakan dalam pembahasan dan pembuatan grafik hubungan antara waktu pendinginan dengan kekerasan pada daerah logam las, daerah batas antara logam las dan HAZ, serta daerah HAZ adalah rata-rata dari tiga kali pengulangan pengujian spesimen.

Dari hasil pengujian kekerasan menggunakan alat uji *Microvickers Hardness Tester* dengan pembebanan 0,98 N dan waktu indentasi selama 15 detik didapatkan nilai kekerasan pada tabel berikut ini.

Tabel 4.1 Data Kekerasan pada Daerah Logam Las (HV)

Waktu Pendinginan	Spesimen Daerah Logam Las			Jumlah	Rata-rata
	1	2	3		
Tanpa perlakuan	243,0	255,6	239,8	738,4	246,1
25 detik	945,2	945,2	967,0	2857,4	952,5
50 detik	1066,3	1056,6	1071,9	3194,8	1064,9
75 detik	945,2	989,8	986,8	2921,8	973,9
100 detik	905,3	937,7	897,4	2740,4	913,5
125 detik	889,6	867,0	872,0	2628,6	876,2
150 detik	771,9	789,6	789,8	2351,3	783,8
175 detik	747,6	759,6	774,5	2281,7	760,6
200 detik	729,4	718,2	729,4	2177,0	725,7

Tabel 4.2 Data Kekerasan pada Daerah Batas antara Logam Las dan HAZ (HV)

Waktu Pendinginan	Spesimen Daerah Batas Logam Las dan HAZ			Jumlah	Rata-rata
	1	2	3		
Tanpa perlakuan	208,7	213,1	219,6	641,4	213,8
25 detik	924,2	935,9	919,6	2779,7	926,6
50 detik	1008,2	997,4	998,9	3004,5	1001,5
75 detik	889,8	886,8	889,8	2666,4	888,8
100 detik	782,0	797,4	771,9	2351,3	783,8
125 detik	731,2	753,5	761,0	2245,7	748,6
150 detik	709,9	708,5	697,7	2116,1	705,4
175 detik	669,3	681,5	665,1	2015,9	672,0
200 detik	624,4	657,4	571,9	1853,7	617,9

Tabel 4.3 Data Kekerasan pada Daerah HAZ (HV)

Waktu Pendinginan	Titik Spesimen Daerah HAZ			Jumlah	Rata-rata
	1	2	3		
Tanpa perlakuan	164,1	151,4	159,3	474,8	158,3
25 detik	768,8	786,3	761,7	2316,8	772,3
50 detik	707,6	702,3	708,4	2118,3	706,1
75 detik	631,0	634,6	654,0	1919,6	639,9
100 detik	592,8	575,1	597,2	1765,1	588,4
125 detik	561,5	536,0	567,3	1664,8	554,9
150 detik	527,4	503,7	526,5	1557,6	519,2
175 detik	454,0	458,4	462,8	1375,2	458,4
200 detik	445,5	434,0	454,6	1334,1	444,7

Nilai kekerasan didapatkan dari harga beban dibagi luas permukaan lekukan seperti pada rumus berikut:

$$VHN = \frac{2P \sin(\theta/2)}{L^2} = \frac{1,854 P}{L^2}$$

dengan:

P = Beban yang diterapkan (kgf)

L = Panjang diagonal rata-rata (mm²)

θ = Sudut antara permukaan intan yang berlawanan (136°)

Contoh perhitungan menggunakan data waktu pendinginan 25 detik spesimen daerah logam las 1:

$D_1 = 13,42$; $D_2 = 14,30$ sehingga:

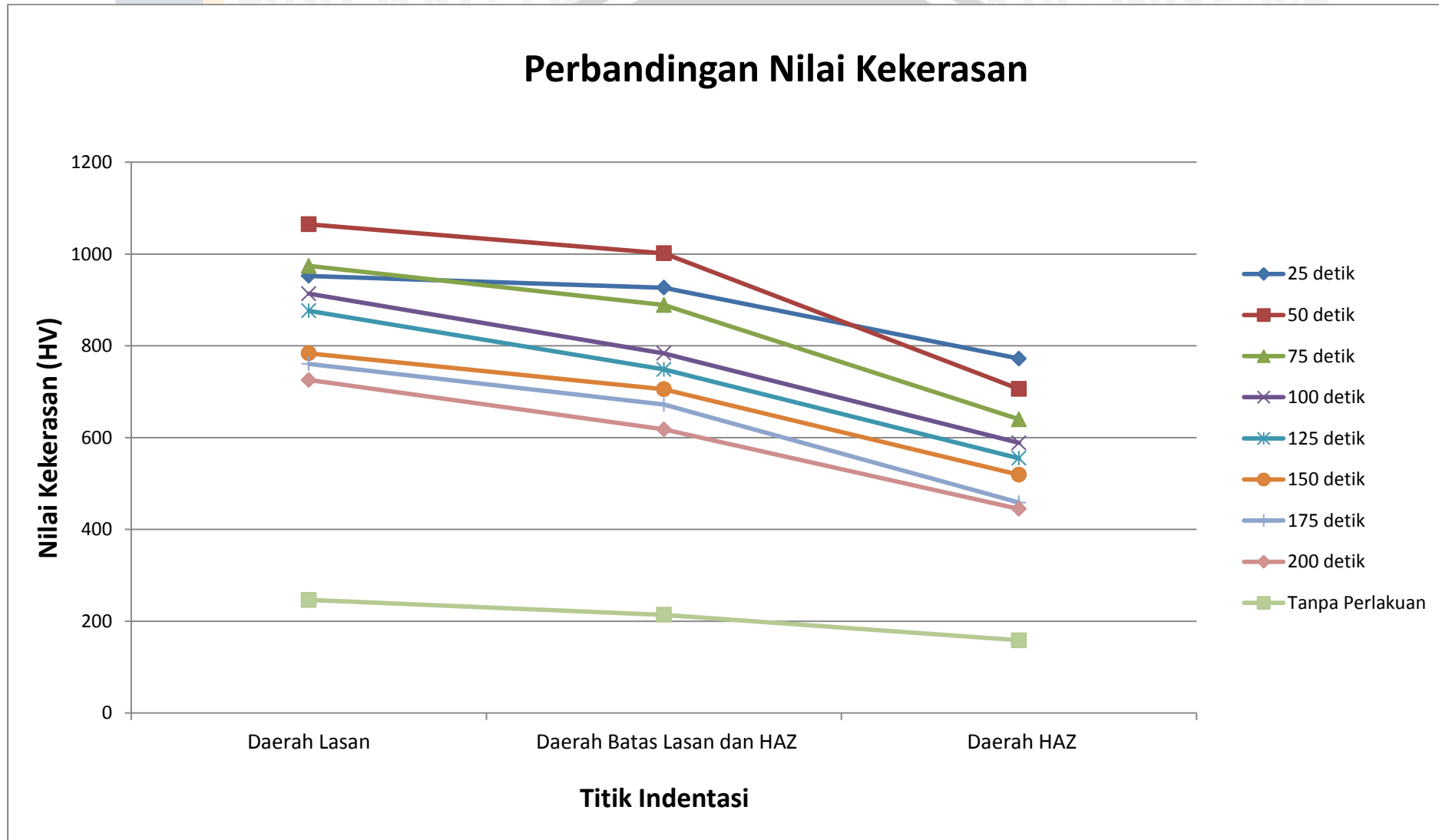
$$VHN = \frac{1,854 \cdot P}{L^2}$$

$$VHN = \frac{1,854 \cdot (0,98)}{\left(\frac{13,42 + 14,30}{2}\right)^2}$$

$$VHN = \frac{1,81692}{192,0996}$$

$$VHN = 0,009452 \approx 945,2 HV$$





Gambar 4.1 Grafik Hubungan antara Waktu Pendinginan Air dan Tanpa Perlakuan Terhadap Nilai Kekerasan

4.1.2 Pembahasan Grafik Nilai Kekerasan

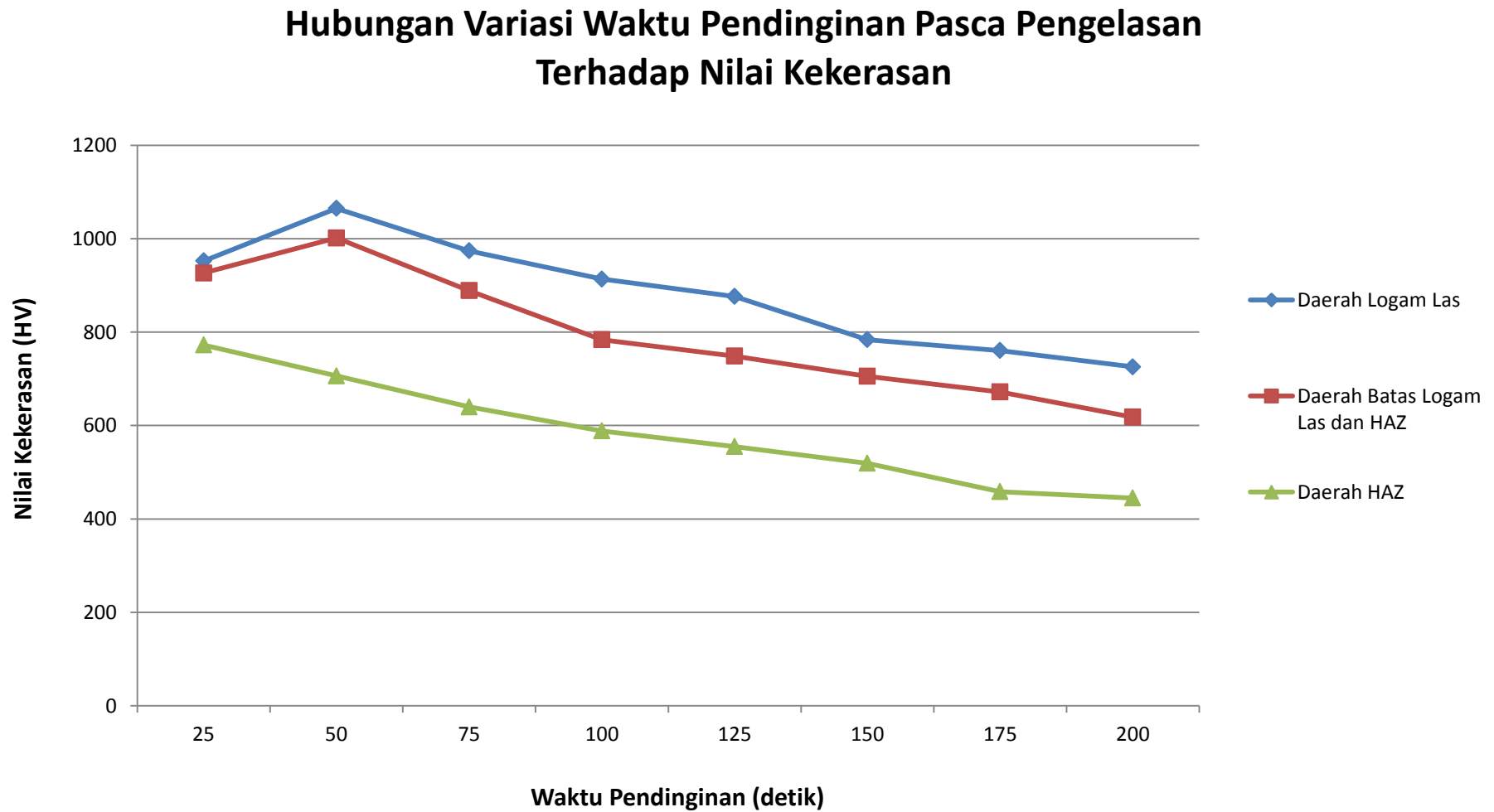
Dari grafik diatas terlihat bahwa nilai kekerasan pada masing-masing titik indentasi cenderung mengalami penurunan seiring bertambahnya waktu pendinginan yang semakin besar. Pada daerah las dengan bertambahnya besar waktu pendinginan mengakibatkan nilai kekerasan daerah las turun. Sedangkan pada daerah HAZ sangat terlihat pula penurunan nilai kekerasan dengan bertambah besarnya waktu pendinginan hal ini disebabkan daerah HAZ merupakan daerah pengaruh panas sehingga perubahan panas sedikit yang terjadi dari proses pengelasan akan memberikan pengaruh struktur butiran pada daerah HAZ.

Nilai kekerasan pada spesimen daerah las dengan waktu pendinginan 25 detik terlihat mengalami penyimpangan dimana nilai kekerasannya berada dibawah nilai kekerasan spesimen daerah las dengan waktu pendinginan 50 detik dan 75 detik. Hal ini dikarenakan pada saat spesimen dicelup ke dalam air kemudian diangkat, temperatur pada daerah las spesimen tersebut masih lebih tinggi dari temperatur awal baja akibat dari proses pendinginan yang tidak optimal dimana selanjutnya mengalami pendinginan udara. Begitu pula nilai kekerasan pada spesimen daerah *fusion line* dengan waktu pendinginan 25 detik mengalami penyimpangan yang sama halnya dengan daerah las dikarenakan proses pendinginan yang kurang optimal.

Disamping faktor waktu pendinginan, nilai kekerasan juga dipengaruhi pula oleh laju pendinginan yang terjadi pada setiap spesimen. Apabila waktu pendinginan yang digunakan semakin kecil, maka laju pendinginan yang terjadi semakin besar sehingga spesimen akan terbentuk struktur martensit yang kasar, dimana memiliki sifat yang getas dan nilai kekerasan yang tinggi. Hal ini dapat ditunjukkan pada Gambar 4.3.

Kecenderungan nilai kekerasan yang semakin menurun disebabkan oleh laju pendinginan yang semakin rendah dimana salah satu faktor yang dapat mempengaruhi laju pendinginan media pendingin adalah perubahan suhu. Semakin kecil temperatur dalam media pendingin maka kecepatan pendinginan semakin cepat karena panas pada spesimen akan lebih cepat mengalir ke temperatur media pendingin yang lebih tinggi.

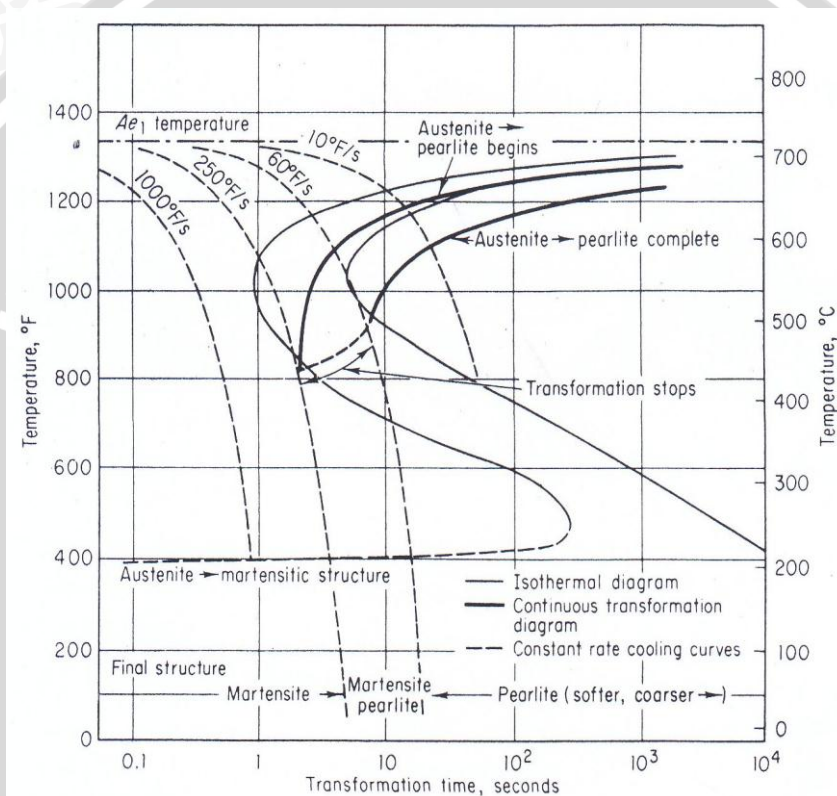
Secara keseluruhan kekerasan material yang didapat dari proses pendinginan cepat pada baja paduan karbon bertujuan untuk membentuk fasa martensit. Sehingga dengan demikian faktor waktu pendinginan yang dibutuhkan akan berpengaruh terhadap besar laju pendinginan dan akan mempengaruhi kekerasan yang didapat setelah proses *quenching*.



Gambar 4.2 Grafik Hubungan antara Variasi Waktu Pendinginan Pasca Pengelasan Terhadap Nilai Kekerasan

Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa variasi waktu pendinginan pada air akan berpengaruh terhadap nilai kekerasan hasil lasan baja ST 37 dengan tebal 10mm. Dimana semakin kecil waktu pendinginan maka semakin besar pula nilai kekerasannya hal ini dikarenakan pengaruh langsung dari besarnya laju pendinginan yang terjadi saat proses pendinginan.

Dengan demikian bahwa semakin besarnya nilai laju pendinginan maka waktu pendinginan yang dibutuhkan akan semakin singkat. Hubungan antara laju pendinginan dan waktu pendinginan dapat dilihat pada Gambar 4.3 berikut.



Gambar 4.3 Diagram CCT pada Baja Eutectoid

Sumber: Avner, 1982: 243

4.1.3 Perhitungan Besar Laju Perpindahan Kalor

Selain faktor laju pendinginan, besar aliran laju perpindahan kalor dalam logam akan mempengaruhi proses pendinginan dari temperatur tinggi ke temperatur yang lebih rendah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.4. Untuk mengetahui nilai laju perpindahan kalor yang terjadi pada setiap spesimen dengan beda waktu pendinginan, dapat digunakan rumus perpindahan kalor secara konduksi. Adapun persamaan dasar konduksi menurut Hukum Fourier (Holman, 1986: 26):

$$Q = -k A \frac{dT}{dx} \quad (4-1)$$

$$Q = -k A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (4-2)$$

$$Q = -k A \frac{(T_2 - T_1)}{(x_2 - x_1)} \quad (4-3)$$

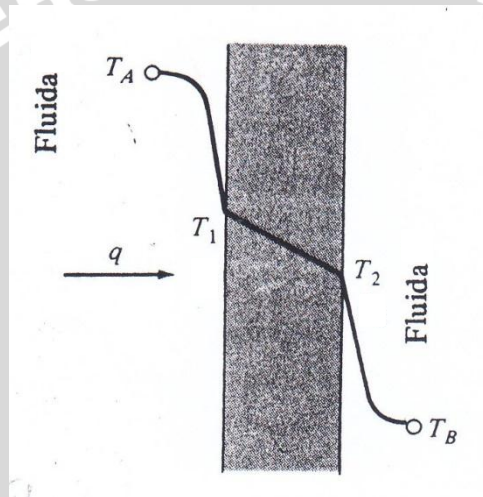
dengan:

Q = Laju perpindahan kalor (W)

k = Konduktifitas termal (W/m.K)

A = Luas penampang (m^2)

x = Tebal spesimen (m)



Gambar 4.4 Perpindahan Panas Konduksi

Sumber: Holman, 1986: 33

1) Spesimen pencelupan 25 detik:

$$T_1 = 997^\circ\text{C} \quad A = 0,0046\text{m}^2 = 46\text{cm}^2 \quad k = 53\text{W/m.K} = 0,53\text{W/cm.}^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 36^\circ\text{C} \quad x = 0,01\text{m} = 1\text{cm}$$

sehingga,

$$Q = -k A \frac{(T_2 - T_1)}{(x_2 - x_1)}$$

$$Q = - \left[(0,53\text{W/cm.}^\circ\text{C}) \times (46\text{cm}^2) \times \frac{(36 - 997)^\circ\text{C}}{(1\text{cm})} \right]$$

$$Q = 23429,18\text{W}$$

2) Spesimen pencelupan 50 detik:

$$T_1 = 997^\circ\text{C} \quad A = 0,0046\text{m}^2 = 46\text{cm}^2 \quad k = 53\text{W/m.K} = 0,53\text{W/cm.}^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 29^\circ\text{C} \quad x = 0,01\text{m} = 1\text{cm}$$

sehingga,

$$Q = -k A \frac{(T_2 - T_1)}{(x_2 - x_1)}$$

$$Q = - \left[(0,53W/cm.^\circ C) \times (46cm^2) \times \frac{(29 - 997)^\circ C}{(1cm)} \right]$$

$$Q = 23599,84W$$

3) Spesimen pencelupan 75 detik:

$$T_1 = 997^\circ C \quad A = 0,0046m^2 = 46cm^2 \quad k = 53W/m.K = 0,53W/cm.^\circ C$$

$$T_2 = 31^\circ C \quad x = 0,01m = 1cm$$

sehingga,

$$Q = -k A \frac{(T_2 - T_1)}{(x_2 - x_1)}$$

$$Q = - \left[(0,53W/cm.^\circ C) \times (46cm^2) \times \frac{(31 - 997)^\circ C}{(1cm)} \right]$$

$$Q = 23551,08W$$

4) Spesimen pencelupan 100 detik:

$$T_1 = 997^\circ C \quad A = 0,0046m^2 = 46cm^2 \quad k = 53W/m.K = 0,53W/cm.^\circ C$$

$$T_2 = 31^\circ C \quad x = 0,01m = 1cm$$

sehingga,

$$Q = -k A \frac{(T_2 - T_1)}{(x_2 - x_1)}$$

$$Q = - \left[(0,53W/cm.^\circ C) \times (46cm^2) \times \frac{(31 - 997)^\circ C}{(1cm)} \right]$$

$$Q = 23551,08W$$

5) Spesimen pencelupan 125 detik:

$$T_1 = 997^\circ C \quad A = 0,0046m^2 = 46cm^2 \quad k = 53W/m.K = 0,53W/cm.^\circ C$$

$$T_2 = 33^\circ C \quad x = 0,01m = 1cm$$

sehingga,

$$Q = -k A \frac{(T_2 - T_1)}{(x_2 - x_1)}$$

$$Q = - \left[(0,53W/cm.^\circ C) \times (46cm^2) \times \frac{(33 - 997)^\circ C}{(1cm)} \right]$$

$$Q = 23502,32W$$

- 6) Spesimen pencelupan 150 detik:

$$T_1 = 997^\circ\text{C} \quad A = 0,0046\text{m}^2 = 46\text{cm}^2 \quad k = 53\text{W/m.K} = 0,53\text{W/cm.}^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 34^\circ\text{C} \quad x = 0,01\text{m} = 1\text{cm}$$

sehingga,

$$Q = -k A \frac{(T_2 - T_1)}{(x_2 - x_1)}$$

$$Q = - \left[(0,53\text{W/cm.}^\circ\text{C}) \times (46\text{cm}^2) \times \frac{(34 - 997)^\circ\text{C}}{(1\text{cm})} \right]$$

$$Q = 23477,94\text{W}$$

- 7) Spesimen pencelupan 175 detik:

$$T_1 = 997^\circ\text{C} \quad A = 0,0046\text{m}^2 = 46\text{cm}^2 \quad k = 53\text{W/m.K} = 0,53\text{W/cm.}^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 35^\circ\text{C} \quad x = 0,01\text{m} = 1\text{cm}$$

sehingga,

$$Q = -k A \frac{(T_2 - T_1)}{(x_2 - x_1)}$$

$$Q = - \left[(0,53\text{W/cm.}^\circ\text{C}) \times (46\text{cm}^2) \times \frac{(35 - 997)^\circ\text{C}}{(1\text{cm})} \right]$$

$$Q = 23453,56\text{W}$$

- 8) Spesimen pencelupan 200 detik:

$$T_1 = 997^\circ\text{C} \quad A = 0,0046\text{m}^2 = 46\text{cm}^2 \quad k = 53\text{W/m.K} = 0,53\text{W/cm.}^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 35^\circ\text{C} \quad x = 0,01\text{m} = 1\text{cm}$$

sehingga,

$$Q = -k A \frac{(T_2 - T_1)}{(x_2 - x_1)}$$

$$Q = - \left[(0,53\text{W/cm.}^\circ\text{C}) \times (46\text{cm}^2) \times \frac{(35 - 997)^\circ\text{C}}{(1\text{cm})} \right]$$

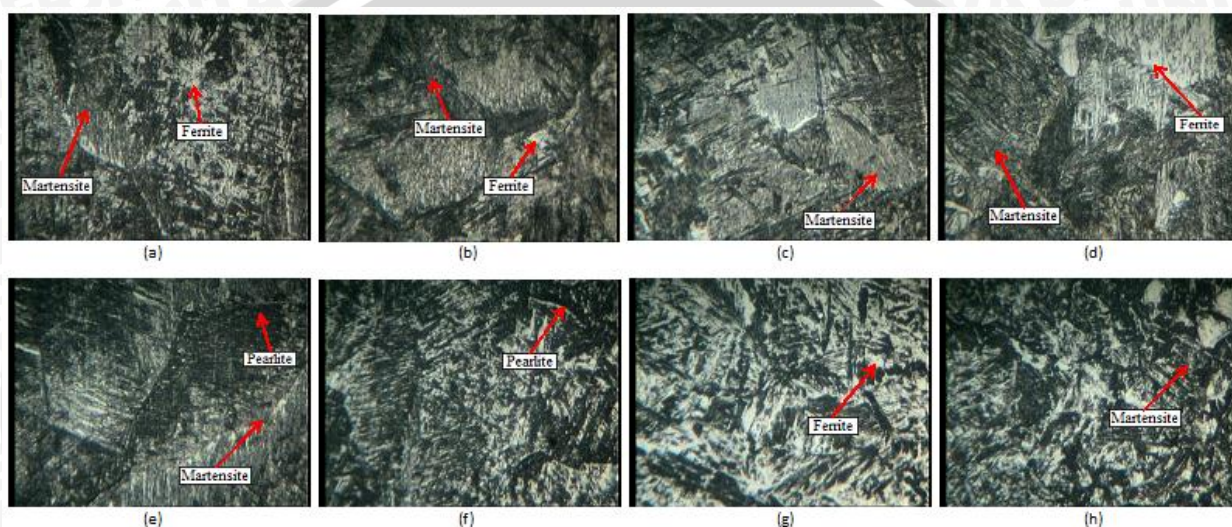
$$Q = 23453,56\text{W}$$

Sehingga dengan demikian dapat disimpulkan bahwa harga kekerasan dipengaruhi oleh besar waktu pendinginan, besar laju pendinginan, serta laju perpindahan kalor pada saat logam mengalami proses pencelupan pada air. Semakin cepat waktu pendinginan yang dibutuhkan maka laju pendinginan yang terjadi semakin besar dan begitu pula sebaliknya. Disamping itu, semakin kecil temperatur pada media pendingin maka akan mempengaruhi besar laju pendinginan yang akan semakin tinggi sehingga kecepatan pendinginan semakin lebih besar dan didapatkan nilai kekerasan yang optimal.

Adapun besarnya perpindahan kalor yang terjadi pada logam saat *quenching*, akan mempengaruhi besar nilai kekerasan yang didapat. Semakin besar perpindahan energi kalor pada produk lasan saat pendinginan maka penurunan temperatur akan semakin lebih cepat sehingga didapatkan temperatur rendah yang optimal dan akan berpengaruh terhadap pembentuk struktur martensit serta nilai kekerasan menjadi lebih tinggi.

4.2 Pembahasan Struktur Mikro

4.2.1 Struktur Mikro Daerah Las



Gambar 4.5 Foto Mikrostruktur Daerah Las (Perbesaran 400×):

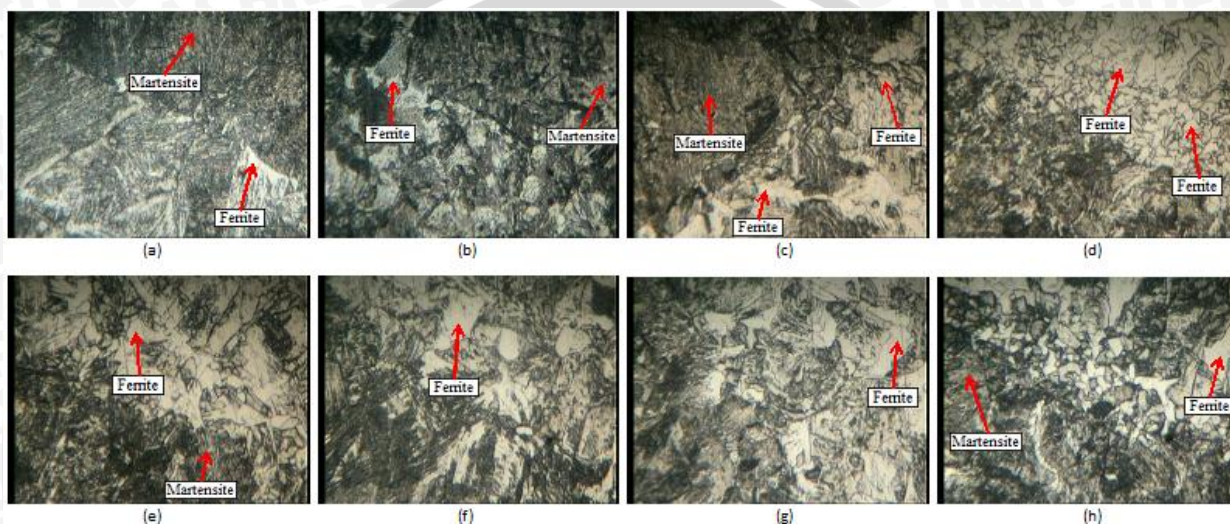
- | | |
|--------------------------------|--------------------------------|
| (a) <i>Quenching</i> 25 detik | (e) <i>Quenching</i> 125 detik |
| (b) <i>Quenching</i> 50 detik | (f) <i>Quenching</i> 150 detik |
| (c) <i>Quenching</i> 75 detik | (g) <i>Quenching</i> 175 detik |
| (d) <i>Quenching</i> 100 detik | (h) <i>Quenching</i> 200 detik |

Pada foto struktur mikro daerah lasan dari hasil pendinginan cepat terlihat bahwa persebaran struktur martensit lebih banyak pada produk lasan yang di*quenching* dengan air selama 50 detik. Hal ini menunjukkan bahwa proses pendinginan selama 50 detik akan cenderung membentuk fase martensit yang lebih banyak sehingga nilai kekerasan akan lebih tinggi dikarenakan pendinginan yang optimal. Selain terbentuknya martensit, lama pendinginan yang semakin besar juga menyebabkan terbentuknya struktur *ferrite* serta *pearlite* dimana hasil lasan semakin lunak dan tahan karat, dikarenakan perubahan laju pendinginan yang berkurang dan perubahan suhu media pendingin yang menyebabkan nilai kekerasannya menurun.

Dalam proses pendinginan cepat atau *quenching*, terbentuknya struktur martensit pada hasil lasan hampir terdapat pada seluruh daerah lasan dikarenakan fasa martensit merupakan pembentukan dari *quenching austenite*. Sifatnya yang keras dan rapuh serta

stabil dibawah 1500°C menyebabkan hasil lasan memiliki tingkat kekerasan yang lebih besar. Semakin cepat waktu pendinginan maka laju pendinginan yang terjadi akan semakin besar. Begitu pula apabila waktu pendinginan yang diperlukan semakin lama maka besar laju pendinginan yang terjadi semakin rendah sehingga nilai kekerasannya akan turun.

4.2.2 Struktur Mikro Daerah *Fusion Line*



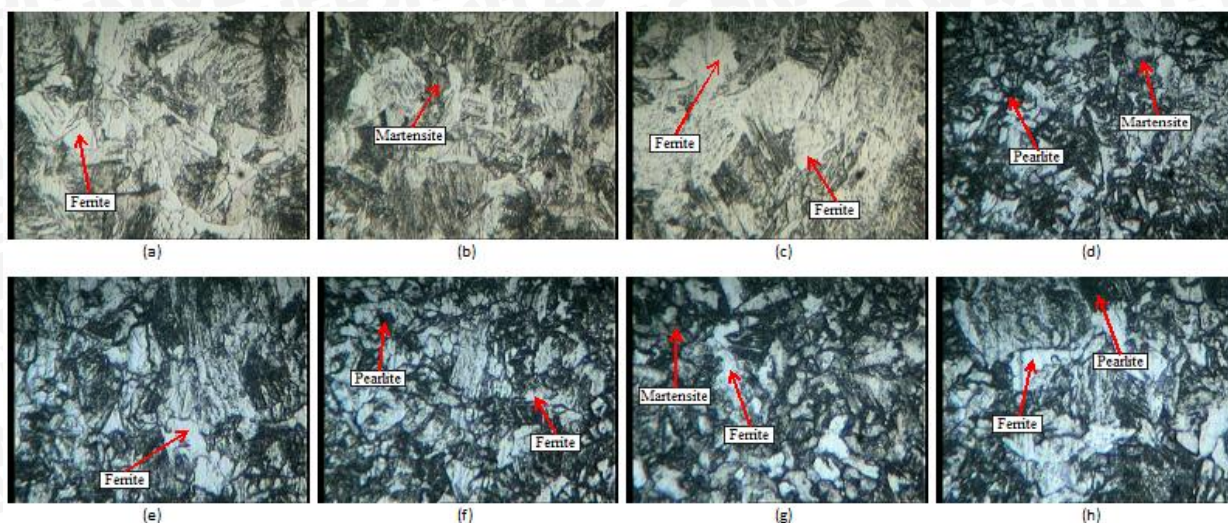
Gambar 4.6 Foto Mikrostruktur Daerah *Fusion Line* (Perbesaran 400×):

- | | |
|--------------------------------|--------------------------------|
| (a) <i>Quenching</i> 25 detik | (e) <i>Quenching</i> 125 detik |
| (b) <i>Quenching</i> 50 detik | (f) <i>Quenching</i> 150 detik |
| (c) <i>Quenching</i> 75 detik | (g) <i>Quenching</i> 175 detik |
| (d) <i>Quenching</i> 100 detik | (h) <i>Quenching</i> 200 detik |

Pada Gambar 4.6 terlihat dengan jelas bahwa terdapat perbedaan struktur antara daerah lasan maupun daerah HAZ. Pada daerah las, terlihat lebih dominan terbentuknya struktur martensit dikarenakan pada saat mengalami proses *quenching*, hasil lasan dengan temperatur tinggi langsung mendapat pendinginan paksa dari air sehingga secara singkat temperaturnya menjadi rendah sehingga struktur martensitnya semakin banyak dan nilai kekerasannya lebih tinggi daripada struktur di daerah HAZ.

Sedangkan pada daerah HAZ, lebih dominan terbentuknya struktur *ferrite* yang lunak dan tahan karat sehingga nilai kekerasannya cenderung lebih rendah daripada daerah las. Pada hasil foto mikrostruktur daerah *fusion line* terlihat bahwa daerah HAZ dipenuhi dengan struktur *ferrite* dikarenakan daerah HAZ merupakan daerah yang mudah terpengaruh akibat perubahan panas

4.2.3 Struktur Mikro Daerah HAZ



Gambar 4.7 Foto Mikrostruktur Daerah HAZ (Perbesaran 400×):

- | | |
|-------------------------|-------------------------|
| (a) Quenching 25 detik | (e) Quenching 125 detik |
| (b) Quenching 50 detik | (f) Quenching 150 detik |
| (c) Quenching 75 detik | (g) Quenching 175 detik |
| (d) Quenching 100 detik | (h) Quenching 200 detik |

Pada Gambar 4.7 terlihat bahwa pada daerah HAZ dengan berbagai variasi waktu pendinginan cenderung membentuk *ferrite* dan *pearlite* dikarenakan pendinginan yang belum mencapai temperatur optimal untuk membentuk fase martensit seluruhnya. Struktur *ferrite* memiliki ciri-ciri lunak dan tahan karat serta stabil kurang dari 810°C. Sedangkan struktur *pearlite* memiliki sifat keras dan tahan karat. Daerah HAZ merupakan daerah pengaruh panas sehingga perubahan panas sedikit yang terjadi dari proses pengelasan akan memberikan pengaruh struktur butiran pada daerah HAZ.

Banyaknya struktur *ferrite* yang terbentuk pada daerah HAZ menyebabkan nilai kekerasannya lebih rendah daripada daerah las maupun daerah batas (*fusion line*). Dapat dilihat pada Gambar 4.7 pula bahwa semakin lama waktu pendinginan yang dibutuhkan menyebabkan terbentuknya struktur *ferrite* dan *pearlite* yang semakin banyak serta disamping masih terdapat bentuk struktur martensit karena diperlakukan secara proses pendinginan cepat.

Sehingga dengan demikian dapat disimpulkan bahwa transformasi pembentukan martensit tidak bergantung pada pergerakan atom, namun dengan proses tanpa difusi. Akibat dari tidak terjadinya difusi dari proses pembentukan martensit, sehingga pembentukannya hanya dipengaruhi oleh variabel waktu. Maka untuk mendapatkan hasil distribusi kekerasan yang maksimal dan merata pada daerah lasan dari proses pendinginan cepat dengan air dibutuhkan waktu pencelupan selama 50 detik.