

PENGARUH TEMPERATUR PADA PEMBENTUKAN BAJA KARBON RENDAH ASTM A36 UNTUK APLIKASI HANGER ROD

Herry Oktadinata¹⁾

¹⁾Program Studi Teknik Mesin - Universitas Islam 45 Bekasi

ABSTRACT

In this study tested the tenacity ASTM A36 carbon steel at high temperatures forming in the hanger rod as raw material, in order to obtain the relationship between the temperature of the formability. Research methods include chemical analysis and tensile testing room temperature and high temperature. Then do the formation of hanger rod of carbon steel ASTM A36 diameter of 16, 20, 24 mm at a temperature of 600, 700, and 800 0C. Then test the hardness and microstructure observation. Tensile test results showed that the tensile strength and yield drops as temperature increases. Microstructure observation indicates the grain size at a temperature of 600 and 700 0C relatively the same, but at a temperature of 800 0C is much greater. Microstructure observation also shows that there are inclusions. Optimal results show that the formation of 600 and 700 0C better than at a temperature of 800 0C. While ductility at 700 0C is better than 600 0C. So the formation of rod hanger at 700 0C is recommended.

Keywords: carbon steel ASTM A36, formation, high temperature, microstructure, mechanical properties

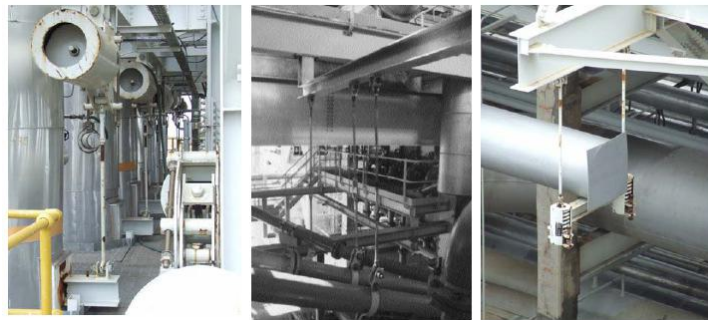
ABSTRAK

Pada penelitian ini diuji keuletan baja karbon ASTM A36 pada pembentukan di temperatur tinggi sebagai bahan dasar hanger rod, agar diperoleh hubungan antara temperatur terhadap mampu bentuk. Metode penelitian meliputi analisis kimia dan pengujian tarik temperatur ruang dan temperatur tinggi. Kemudian dilakukan pembentukan hanger rod dari baja karbon ASTM A36 berdiameter 16, 20, 24 mm pada temperatur 600, 700, dan 800 °C. Lalu dilakukan uji kekerasan dan pengamatan struktur mikro. Hasil uji tarik memperlihatkan bahwa kekuatan tarik dan luluh turun dengan naiknya temperatur. Pengamatan struktur mikro menunjukkan ukuran butir pada temperatur 600 dan 700 °C relatif sama, namun pada temperatur 800 °C jauh lebih besar. Pengamatan struktur mikro juga menunjukkan terdapat inklusi. Hasil optimal pembentukan menunjukkan bahwa 600 dan 700 °C lebih baik dibandingkan pada temperatur 800 °C. Sedangkan keuletan pada 700 °C lebih baik daripada 600 °C. Jadi pembentukan hanger rod pada 700 °C lebih direkomendasikan.

Kata kunci : baja karbon ASTM A36, pembentukan, temperatur tinggi, struktur mikro, sifat mekanik.

1. PENDAHULUAN

Baja karbon ASTM A36 digunakan untuk material *hanger rod* karena mempunyai kekuatan tinggi dan keuletan yang baik sehingga cocok untuk dilakukan pembentukan. Aplikasi *hanger rod* antara lain pada industri migas, petrokimia, dan pembangkit tenaga. Gambar 1.1 memperlihatkan penggunaan *hanger rod* untuk menahan posisi pipa agar tetap berada pada elevasi tertentu.



Gambar 1.1 Aplikasi *hanger rod* di industri.



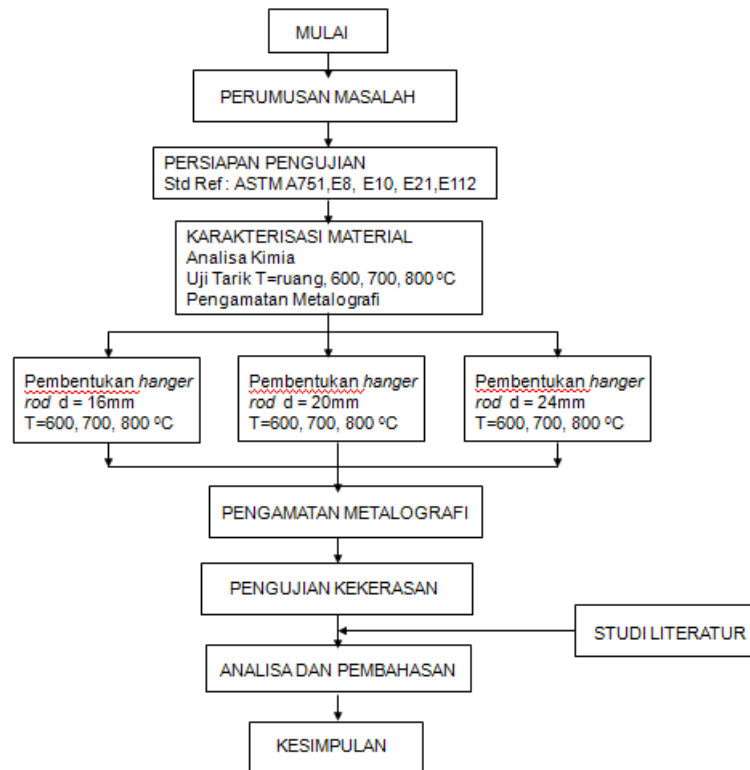
Gambar 1.2 *Hanger Rod* retak setelah pembentukan (kiri), ukuran penampang tidak seragam (kanan)

Hanger Rod dibuat melalui proses pembentukan pada temperatur tinggi sehingga terjadi deformasi plastis. Permasalahan yang terjadi pada pembentukan *hanger rod* adalah perubahan bentuk yang tidak seragam sepanjang bagian yang mengalami pembentukan, dan terjadinya retak.

Gambar 1.2 memperlihatkan retakan searah aliran regangan. Dan juga terlihat ukuran penampang yang tidak seragam dimana pengurangan diameter tidak sama disepanjang batang yang dibentuk. Untuk itu perlu dilakukan studi mengenai mampu bentuk material sebagai fungsi temperatur dan pengamatan metalografi untuk mengetahui perubahan struktur mikro setelah proses pembentukan pada temperatur tinggi.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 2.1 Diagram Alir Penelitian

2.2 Bahan

- Bahan uji karakterisasi terdiri dari 1 sampel uji komposisi kimia, 3 sampel uji tarik temperatur ruang, 3 sampel uji tarik temperatur 600 °C, 3 sampel uji tarik temperatur 700 °C, 3 sampel uji tarik temperatur 800 °C, dan 1 sampel uji metalografi.
- Bahan uji pembentukan terdiri dari 3 sampel uji untuk masing-masing temperatur pembentukan 600, 700, 800 °C.
- Bahan uji metalografi dan kekerasan diambil dari sampel bahan uji pembentukan.

2.3 Peralatan

Peralatan untuk pembentukan (*forming*) : blok pembentuk, pipa penyambung, oksigen dan gas *acetylene*, *torch*, alat ukur temperatur (*infra red thermometer* IRtek IR100e), dan alat pengukur waktu (*stopwatch*).

Peralatan untuk pengujian :

- Mesin uji tarik Shimadzu & dapur pemanas (*small furnace*)
- Alat uji komposisi kimia (*optical emission spectrometer*).
- Mikroskop optik.
- Alat uji SEM (*scanning electron microscope*).
- Alat uji kekerasan.
- Alat ukur *digital caliper*.

2.4 Karakterisasi Material

Pengujian karakterisasi material adalah untuk mengetahui sifat-sifat bahan dasar yang digunakan. Pengujian ini meliputi uji komposisi kimia, uji tarik, dan pengamatan struktur mikro.

2.4.1 Pengujian Komposisi Kimia

Pengujian dilakukan dengan alat uji *optical emission spectrometer* dan menggunakan standar pengujian ASTM A751.

2.4.2 Pengujian Tarik

Pengujian ini bertujuan untuk memperoleh data kekuatan tarik, kekuatan luluh, perpanjangan, dan reduksi area pada temperatur ruang dan temperatur tinggi.

Pengujian tarik pada T_0 = temperatur ruang, T_1 = 600 °C, T_2 = 700 °C, dan T_3 = 800 °C, dilakukan dengan 3 benda uji pada masing-masing temperatur.

Untuk keperluan uji tarik temperatur tinggi, bagian pegangan (grip) benda uji dibuat lebih panjang untuk mengakomodasi total panjang minimal yang dibutuhkan 500 mm agar pegangan benda uji berada diluar dapur pemanas (*furnace*).



Gambar 2.2 Mesin uji tarik dan benda uji tarik temperatur tinggi

Kecepatan pemanasan rata-rata dari temperatur ruang hingga temperatur pengujian adalah 15 °C/menit. Benda uji ditahan selama 5 menit (*holding time*) pada temperatur uji sebelum ditarik.

2.5 Proses Pembentukan

Proses pembentukan dilakukan pada beberapa temperatur untuk mengetahui pengaruh temperatur terhadap hasil pembentukan.

- Ukuran benda kerja = diameter 16 mm x panjang 500 mm
Temperatur pembentukan (T) = 600, 700, dan 800 °C
- Ukuran benda kerja = diameter 20 mm x panjang 500 mm
Temperatur pembentukan (T) = 600, 700, dan 800 °C
- Ukuran benda kerja = diameter 24 mm x panjang 500 mm
Temperatur pembentukan (T) = 600, 700, dan 800 °C

Pada proses pembentukan *hanger rod*, material dipanaskan dengan menggunakan *burner* yang terdiri dari oksigen, gas *acetylene* dan *torch* hingga mencapai temperatur yang diinginkan. Temperatur perlakuan dikontrol dengan menggunakan termometer infra merah, yang “ditembakkan” di sekitar 5 titik pada area yang dipanaskan.



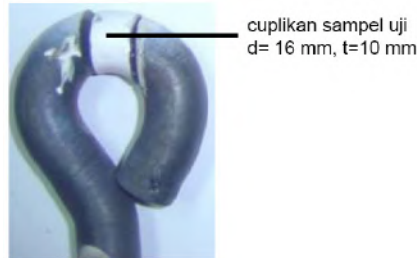
Gambar 2.3 Penggunaan *infra red thermometer* untuk mengontrol temperatur selama proses pembentukan

Ketika temperatur mencapai titik yang diinginkan, lalu ditahan 5 menit untuk memberi kesempatan agar temperatur bagian luar dan dalam sama, sebelum dilakukan proses pembentukan. Dari hasil pembentukan, diambil sampel untuk pengujian yang meliputi :

- a. Pengamatan metalografi (mikroskop optik, SEM, EDX)
- b. Pengujian kekerasan (kekerasan Brinell)
- c. Pengukuran reduksi area (%RA)

2.6 Pengamatan Metalografi

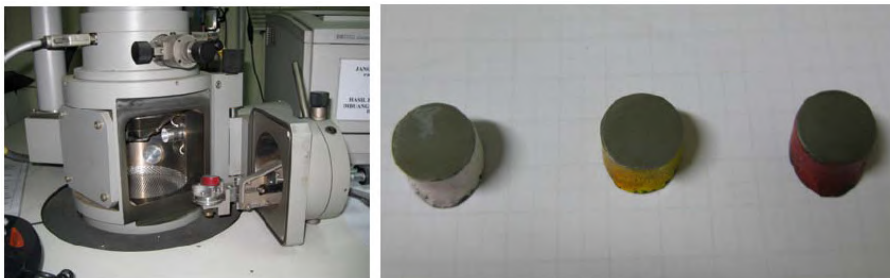
Setelah proses pembentukan panas, benda uji dipotong melintang untuk memperoleh cuplikan sampel. Cuplikan sampel pada masing-masing hasil pembentukan diambil dibagian “kepala” *hanger rod* seperti terlihat pada Gambar 2.4. Dasar pemilihan area pengamatan ini adalah karena merupakan daerah kritis yang mengalami deformasi ekstrim.



Gambar 2.4 Cuplikan sampel pengamatan metalografi

Kemudian pada cuplikan sampel tersebut dilakukan pengamatan struktur mikro untuk mengetahui fasa dan besar butir. Pengamatan metalografi dilakukan dengan mesin uji SEM untuk mengetahui pengaruh temperatur pembentukan 600, 700, 800 °C terhadap perubahan struktur mikro.

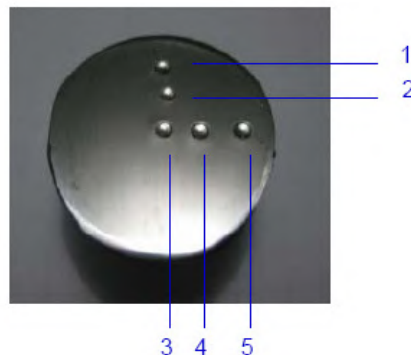
Untuk mengetahui terdapatnya inklusi, pengamatan dilakukan dengan mikroskop optik (perbesaran 500X, tanpa etsa). Selanjutnya untuk mengetahui jenis unsur yang terdapat pada inklusi maka dilakukan pengujian EDX.



Gambar 2.5 Cuplikan sampel pada mesin uji SEM (kiri) dan temperatur pembentukan 600, 700, 800 °C (kanan)

2.7 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan pada cuplikan sampel hasil pembentukan temperatur 600, 700, 800 °C, dan merupakan sampel yang sama yang digunakan pada pengujian SEM. Penjejakan dilakukan pada 5 titik dengan posisi dari bagian luar ke bagian dalam penampang benda uji. Tujuannya adalah untuk mengetahui apabila terdapat perbedaan kekerasan antara bagian dalam material dengan bagian kearah permukaan material.



Gambar 2.6 Sampel uji kekerasan.

2.8 Pengukuran Reduksi Area (% RA)

Pengukuran reduksi area dilakukan untuk mengetahui keuletan material pada beberapa temperatur dari hasil pengujian tarik dan hasil pembentukan. Pada hasil uji tarik, pengukuran dilakukan pada diameter penampang benda uji tarik di sekitar area yang terdekat dengan patahan. Sedangkan pada hasil pembentukan, pengukuran dilakukan pada area yang mengalami deformasi plastis.

3. HASIL PENELITIAN

3.1 Karakterisasi Material

Komposisi Kimia

Pengujian komposisi kimia dilakukan dengan mesin uji *optical emission spectrometer*. Data hasil uji komposisi kimia kemudian dibandingkan dengan standar ASTM A36 dan *mill certificate*.

Tabel 3.1 Perbandingan komposisi kimia antara standar ASTM A36, *mill certificate*, dan hasil karakterisasi

Referensi	Karbon (% Maks)	Mangan (%)	Phospor (% maks)	Sulfur (% maks)	Silikon(Si, % maks)
Standar ASTM A36	0.27	0.60 - 0.90	0.04	0.05	0.40
<i>Mill Certificate</i>	0.180	0.660	0.011	0.024	0.270
Hasil Karakterisasi	0.163	0.468	0.008	0.003	0.113

Sifat Mekanik

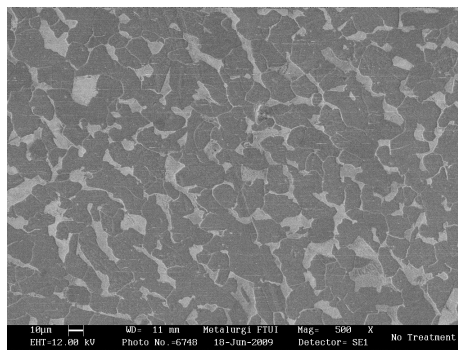
Uji tarik temperatur tinggi memberikan perkiraan kapasitas beban statik di bawah pembebanan waktu pendek.

Tabel 3.2 Hasil uji tarik pada temperatur ruang (25 °C), 600, 700, 800 °C

Benda Uji	Temperatur Uji (°C)	Diameter (mm)	Pmaks (kg)	Pluluh (kg)	ΔL (mm)	Tensile Strength (kg/mm ²)	Yield Strength (kg/mm ²)	% EL	Nilai rata-rata		
									Tensile Strength (kg/mm ²)	Yield Strength (kg/mm ²)	% EL
T0-1	25	8.90	3350	2300	11.45	53.88	36.99	32.71	52.80	36.45	33.95
T0-2	25	8.90	3150	2250	12.10	50.66	36.19	34.57			
T0-3	25	8.90	3350	2250	12.10	53.88	36.19	34.57			
T1-1	600	12.70	4875	3000	17.25	38.50	23.69	34.50	38.42	23.82	34.13
T1-2	600	12.80	5250	3250	16.75	40.82	25.27	33.50			
T1-3	600	12.70	4550	2850	17.20	35.94	22.51	34.40			
T2-1	700	12.75	2475	1650	22.90	19.39	12.93	45.80	19.66	13.11	45.47
T2-2	700	12.60	2675	1750	21.80	21.46	14.04	43.60			
T2-3	700	12.85	2350	1600	23.50	18.13	12.34	47.00			
T3-1	800	12.85	1550	1000	25.00	11.96	7.71	50.00	11.70	7.59	67.50
T3-2	800	12.90	1450	950	37.50	11.10	7.27	75.00			
T3-3	800	12.80	1550	1000	38.75	12.05	7.78	77.50			

Pengamatan Metalografi

Pengamatan metalografi dilakukan pada material dasar, dan pada material hasil pembentukan temperatur tinggi. Dari pengamatan tersebut diperoleh informasi ukuran butir dan jenis fasa.



Gambar 3.1 Foto hasil uji SEM pada baja karbon ASTM A36

3.2 Proses Pembentukan

Proses pembentukan dilakukan pada temperatur 600, 700, dan 800 °C dengan benda uji masing-masing berdiameter 16, 20, dan 24 mm. Produk hasil proses pembentukan terlihat pada Gambar 3.2.

3.2.1 Pengamatan Metalografi

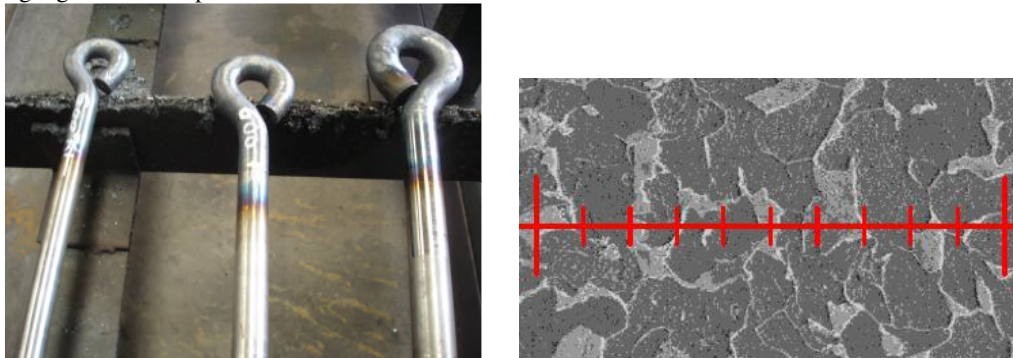
3.2.1.1 Ukuran butir

Dari hasil pengamatan metalografi, dilakukan pengukuran besar butir secara langsung dengan menentukan aktual rata-rata ukuran butir dari hasil uji SEM perbesaran 500X. Dengan menarik garis lurus dengan panjang tertentu pada foto struktur mikro, maka dapat dihitung jumlah butir yang berpotongan dengan garis lurus tersebut. Lalu dihitung rasio antara jumlah butir dan panjang garis sehingga diperoleh ukuran butir (Smith, Hashemi, 2006).

Berdasarkan ASTM E112, *Heyn Linear Intercept Procedure*, perkiraan ukuran butir rata-rata dihitung dari jumlah butir yang berpotongan (*intercept*) pada satu atau lebih garis lurus dengan sekurang-kurangnya 50 *intercept*.

Metode Pengukuran Besar Butir

Hasil uji SEM menunjukkan skala dimana 1 strip mewakili 10 mikron. Lima buah garis lurus dibuat pada foto hasil uji SEM. Panjang masing-masing garis lurus tersebut secara proporsional sama dengan 30 strip. Sehingga total panjang 1 garis = 30 strip x 10 mikron = 300 mikron.



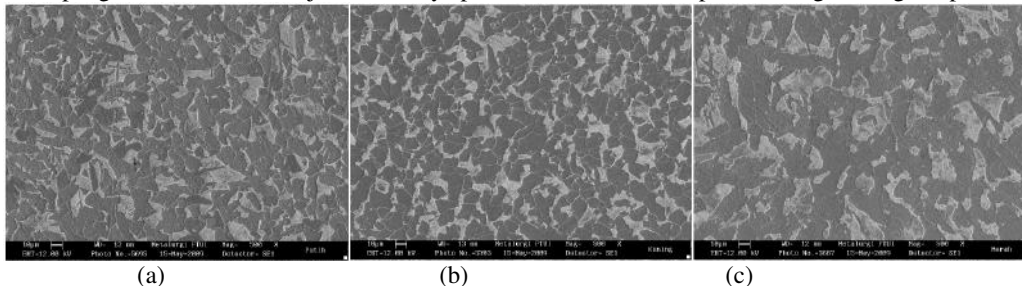
Gambar 3.2 Hasil pembentukan *hanger rod* pada temperatur 600 °C dengan diameter 16, 20, 24 mm (Kiri)

Gambar 3.3. Garis lurus pada metode pengukuran besar butir (Kanan)

Jumlah butir sepanjang 1 garis lurus dihitung dari banyaknya batas butir yang berpotongan dengan garis lurus tersebut. Besar butir dihitung dari panjang 1 garis lurus (= 300 mikron) dibagi jumlah batas butir yang berpotongan dengan garis lurus tersebut. Untuk setiap sampel uji, dibuat 5 garis yang kemudian diambil nilai rata-rata dari besar butirnya.

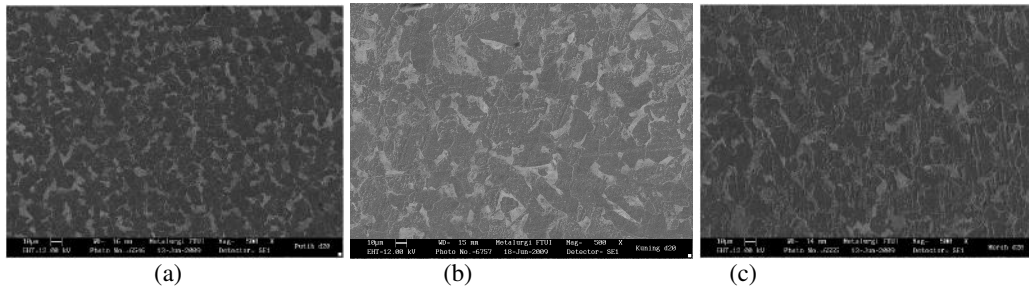
Foto Hasil Uji SEM

Uji SEM dilakukan pada sampel tanpa proses pembentukan dan sampel uji pembentukan temperatur 600, 700, 800 °C. Besar butir masing-masing sampel diukur. Ukuran butir tersebut dikonversikan ke *grain size* ASTM. Hasil pengukuran butir menunjukkan adanya perbedaan ukuran butir pada masing-masing temperatur.

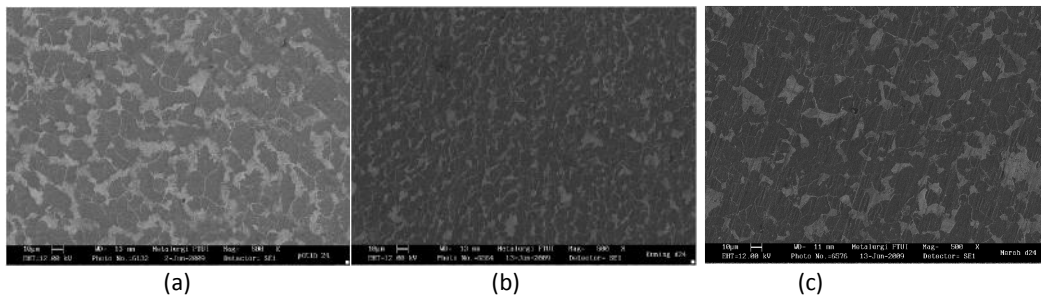


Gambar 3.4 Hasil pengujian SEM sampel diameter 16 mm pada temperatur pembentukan :

a) 600 °C, b) 700 °C, c) 800 °C (perbesaran 500X, etsa nital 2%)



Gambar 3.5 Hasil pengujian SEM sampel diameter 20 mm pada temperatur pembentukan : a) 600 °C, b) 700 °C, c) 800 °C (perbesaran 500X, etsa nital 2%)



Gambar 3.6 Hasil pengujian SEM sampel diameter 24 mm pada temperatur pembentukan : a) 600 °C, b) 700 °C, c) 800 °C (perbesaran 500X, etsa nital 2%)

Tabel 3.3 Ukuran butir dari pengamatan metalografi benda uji pada temperatur ruang

Jumlah Butir di Area Observasi	Panjang <i>Intercept</i> (μm)	Rata-rata Panjang <i>Intercept</i> (μm)	Rata-rata <i>Grain Size</i> ASTM
23	13.04	12.22	9.5
25	12.00		
26	11.54		
25	12.00		
24	12.50		

Tabel 3.4 Rata-rata ukuran butir pada temperatur pembentukan 600, 700, 800 °C

Benda Uji	Temperatur Pembentukan (°C)	Diameter Sampel (mm)	Rata-rata Panjang <i>intercept</i> (μm)	Rata-rata <i>Grain Size</i> No. (ASTM E112)
P1	600	16	10.36	10
P2	600	20	9.77	
P3	600	24	12.32	
K1	700	16	10.57	9.5
K2	700	20	13.42	
K3	700	24	9.28	
M1	800	16	16.02	8.5
M2	800	20	17.24	
M3	800	24	16.61	

3.2.1.2 Inklusi

Pengamatan melalui mikroskop optik

Pengamatan inklusi pada sampel hasil pembentukan 600, 700, 800 °C dilakukan melalui mikroskop optik dengan perbesaran 500X. Hasil foto mikroskop menunjukkan indikasi adanya inklusi dengan bentuk morfologi pipih memanjang, sebagaimana terlihat pada Gambar 3.7. Panjang 5 buah inklusi pada masing-masing sampel

diukur dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 3.5. Untuk memastikan unsur-unsur yang terdapat pada inklusi tersebut, maka dilanjutkan dengan analisa EDX.



Gambar 3.7 Hasil foto mikroskop pada sampel hasil pembentukan temperatur 600 °C (kiri), temperatur 700 °C (tengah), temperatur 800 °C (kanan), perbesaran 500X.

Tabel 3.5 Hasil pengukuran panjang inklusi sampel pembentukan temperatur 600, 700, 800 °C

Sampel Uji	Temperatur Pembentukan (°C)	Panjang Inklusi (µm)	Rata-rata Panjang Inklusi (µm)
P	600	18	18.2
		22	
		19	
		13	
		19	
K	700	12	8.6
		7	
		10	
		9	
		5	
M	800	23	17.8
		16	
		19	
		10	
		21	

Analisa EDX (Energy Dispersive X-Ray Analysis)

Analisa EDX dilakukan pada sampel P2, K2, dan M2 yang merupakan hasil pembentukan temperatur 600, 700, dan 800 °C. Pada masing-masing sampel dilakukan analisa unsur pada 4 area (*spot*) yang diduga sebagai inklusi. Hasilnya menunjukkan bahwa terdapat beberapa unsur seperti Mn, S, Si dan O.

Tabel 3.6 Hasil analisa EDX yang menunjukkan persentase unsur-unsur yang terdapat pada inklusi

Sampel Uji	Area Inklusi	Unsur (%)			
		Mn	S	Si	O
P2	Inklusi 1	18.23	11.79	0.00	0.00
	Inklusi 2	25.96	4.53	0.00	11.02
	Inklusi 3	5.44	26.56	0.00	0.00
	Inklusi 4	45.19	22.88	0.00	0.00
K2	Inklusi 1	0.00	7.17	0.00	26.23
	Inklusi 2	34.63	15.01	15.28	35.08
	Inklusi 3	21.37	13.97	1.68	6.09
	Inklusi 4	32.37	19.56	0.00	5.66
M2	Inklusi 1	0.00	0.00	0.00	26.08
	Inklusi 2	32.43	16.40	0.00	0.00
	Inklusi 3	61.41	38.59	0.00	0.00
	Inklusi 4	24.05	15.02	0.00	0.00

3.2.2 Pengujian Kekerasan

Kekerasan secara proporsional berbanding lurus dengan kekuatan tarik. Pada baja karbon rendah, hubungan antara kekerasan Brinell (*Brinell Hardness Number*) dengan kekuatan tarik (*ultimate tensile strength*) adalah sebagai berikut :

Kekuatan Tarik (MPa) = 3.45 X Kekerasan Brinell (HB) Dari data kekerasan Brinell dapat dihitung besarnya kekuatan yang diperoleh secara teoritis.

Tabel 3.7 Hasil uji kekerasan Brinell

Sampel	T Pembentukan (°C)	diameter sampel (mm)	Rata-rata d Penjejakan (mm)	Kekerasan (HB)	Rata-rata Kekerasan (HB)
P1	600	16	1.228	140	151
P2	600	20	1.176	160	
P3	600	24	1.225	152	
K1	700	16	1.232	137	141
K2	700	20	1.192	145	
K3	700	24	1.257	142	
M1	800	16	1.226	137	137
M2	800	20	1.284	134	
M3	800	24	1.276	139	

Tabel 3.8 Hasil perhitungan kekuatan tarik dari nilai kekerasan Brinell

Sampel	Temperatur Pembentukan (°C)	Diameter Sampel (mm)	Kekerasan (HB)	Tensile Strength		Rata-rata Tensile Strength	
				MPa	kg/mm ²	MPa	kg/mm ²
P1	600	16	140	483	49.29	520	53.04
P2	600	20	160	552	56.33		
P3	600	24	152	524	53.51		
K1	700	16	137	473	48.23	488	49.76
K2	700	20	145	500	51.05		
K3	700	24	142	490	49.99		
M1	800	16	137	473	48.23	472	48.11
M2	800	20	134	462	47.17		
M3	800	24	139	480	48.93		

3.2.3 Reduksi Area Hasil Pembentukan dan Hasil Uji Tarik

Reduksi area sebagai akibat proses pembentukan diperoleh dengan mengukur luas penampang sebelum dan setelah pembentukan. Sedangkan reduksi area hasil uji tarik diukur langsung pada benda uji sebelum dan setelah uji tarik.

Tabel 3.9 Persentase reduksi area pada pembentukan temperatur 600, 700, 800 °C

Sampel	Temperatur Pembentukan (°C)	d Awal (mm)	A Awal (mm ²)	d Akhir (mm)	A Akhir (mm ²)	Reduksi Area (%) RA)	Rata-rata Reduksi Area (%) RA)
P1	600	15.95	199.71	15.87	197.71	1.00	1.93
P2	600	19.90	310.87	19.67	303.72	2.30	
P3	600	23.90	448.40	23.60	437.21	2.49	
K1	700	15.95	199.71	15.49	188.35	5.68	4.24
K2	700	19.90	310.87	19.61	301.87	2.89	
K3	700	23.90	448.40	23.40	429.83	4.14	
M1	800	15.95	199.71	15.63	191.77	3.97	5.93
M2	800	19.90	310.87	19.25	290.89	6.43	
M3	800	23.90	448.40	23.00	415.27	7.39	

Tabel 3.10 Persentase reduksi area pada uji tarik temperatur 600, 700, 800 °C

Sampel	Temperatur Uji Tarik (°C)	D Awal (mm)	A Awal (mm ²)	d Akhir (mm)	A Akhir (mm ²)	Reduksi Area (% RA)	Rata-rata Reduksi Area (% RA)
T1-1	600	12.70	126.61	7.70	46.54	63.24	59.11
T1-2	600	12.80	128.61	8.10	51.50	59.95	
T1-3	600	12.70	126.61	8.60	58.06	54.14	
T2-1	700	12.75	127.61	6.40	32.15	74.80	78.22
T2-2	700	12.60	124.63	5.70	25.50	79.54	
T2-3	700	12.85	129.62	5.70	25.50	80.32	
T3-1	800	12.85	129.62	4.90	18.85	85.46	89.32
T3-2	800	12.90	130.63	3.90	11.94	90.86	
T3-3	800	12.80	128.61	3.70	10.75	91.64	

4. PEMBAHASAN

4.1 Komposisi Kimia dan Sifat Mekanik Logam Dasar

Hasil uji komposisi kimia menunjukkan bahwa material uji adalah baja karbon rendah dengan C = 0.163 %. Kadar unsur-unsur paduan lainnya sesuai dengan standar ASTM A36, kecuali Mn (manganese) = 0.468 %, lebih rendah dari standar ASTM A36 dimana Mn= 0.6 – 0.9 %.

Unsur Mn berperan memperbaiki kekuatan, sifat mampu mesin material, dan pembentukan MnS. Tanpa Mn yang cukup, sulfur (S) membentuk FeS yang karena titik leburnya (*melting point*) rendah maka akan mengurangi kemampuan pengerjaan panas baja.

Dari hasil pengujian tarik diperoleh nilai kekuatan tarik, kekuatan luluh, dan perpanjangan. Pengujian tarik memperlihatkan kekuatan turun dan keuletan meningkat dengan naiknya temperatur.

Pada temperatur ruang (T25) : $\sigma = 52.80 \text{ kg/mm}^2$ dan $\epsilon = 33.95 \%$

Pada temperatur 600 °C (T600) : $\sigma = 38.42 \text{ kg/mm}^2$ dan $\epsilon = 34.13 \%$

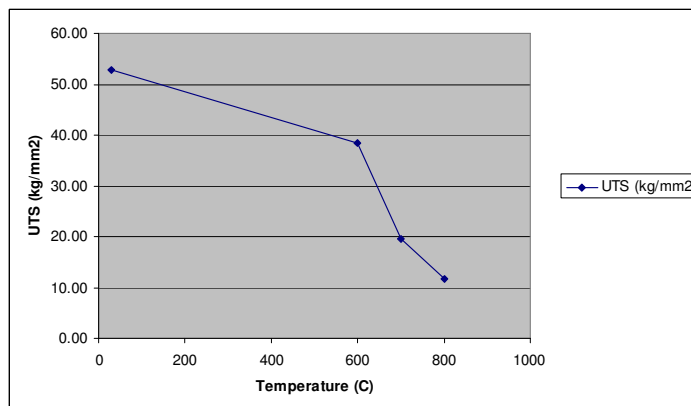
Pada temperatur 700 °C (T700) : $\sigma = 19.66 \text{ kg/mm}^2$ dan $\epsilon = 45.47 \%$

Pada temperatur 800 °C (T800) : $\sigma = 11.70 \text{ kg/mm}^2$ dan $\epsilon = 67.50 \%$

Kenaikan persentase *elongation* pada T700 dan T800 jauh lebih baik dibandingkan T600 yang hampir sama dengan T25. Karena keuletan yang tinggi pada T700 dan T800 maka pembentukan *hanger rod* pada temperatur tersebut dapat menjadi pilihan.

Gambar 4.1 memperlihatkan grafik hubungan kekuatan dengan temperatur. Reduksi kekuatan dari T600 ke T800 lebih besar dibandingkan reduksi kekuatan dari T25 ke T600. Artinya, temperatur diatas 600 °C sudah sangat tinggi bagi material baja karbon ASTM A36 yang mempengaruhi penurunan kekuatan secara ekstrim.

Reduksi kekuatan dari T600 ke T700 lebih besar dibandingkan dari T700 ke T800. Persentase reduksi kekuatan dari T600 ke T700 adalah 49 %, sedangkan reduksi kekuatan dari T700 ke T800 adalah 40 %. Hal ini dapat dianalisa lebih lanjut dari struktur mikro dan fasa yang terbentuk pada temperatur-temperatur tersebut.



Gambar 4.1 Grafik kekuatan tarik sebagai fungsi temperatur

Fasa Ketika Pengujian Tarik Temperatur Tinggi

Berdasarkan diagram fasa Fe-C, fasa-fasa yang terbentuk pada baja karbon dipengaruhi oleh temperatur dan kandungan karbon. Pada temperatur 600 °C material baja karbon dengan kandungan karbon 0.163 % mempunyai fasa ferit (α) dan perlit ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$). Demikian juga pada temperatur 700 °C, masih berada di fasa yang sama. Karakteristik ferit adalah bersifat lunak dan ulet dengan struktur kristal BCC.

Ketika temperatur dinaikkan hingga mencapai 800 °C, temperatur tersebut telah melampaui titik *eutectoid* (723 °C) sehingga terjadi perubahan fasa dimana perlit bertransformasi menjadi austenit (γ). Fasa austenit mempengaruhi sifat mekanik material. Austenit mempunyai sifat tangguh, dengan struktur kristal FCC yang mempunyai lebih banyak *interstitial position* yang ditempati oleh atom karbon, mempunyai sifat ulet pada temperatur tinggi. Selain itu, pada temperatur 800 °C ukuran butir lebih besar dibandingkan pada temperatur 600 °C atau 700 °C karena terjadi pertumbuhan butir. Pada temperatur tinggi, ukuran butir yang lebih besar berkontribusi dalam menahan pergerakan dislokasi ketika terjadi deformasi plastis.

Kombinasi antara perubahan fasa dan pertumbuhan butir yang lebih tinggi pada temperatur 800 °C dapat menjadi faktor yang berkontribusi pada perubahan sifat mekanik yang ikut mempengaruhi laju reduksi kekuatan dari temperatur 700 °C ke 800 °C.

4.2 Struktur Mikro Hasil Pembentukan

Struktur mikro penting untuk diketahui karena memiliki kontribusi pada sifat-sifat mekanik material. Analisa struktur mikro berikut ini meliputi jenis fasa, ukuran butir, dan inklusi.

4.2.1 Fasa Selama Proses Pembentukan

Benda uji adalah baja karbon dimana hasil uji komposisi kimia menunjukkan kandungan karbon 0.163 %. Ketika mengalami proses pembentukan dengan pemanasan hingga temperatur 600 dan 700 °C, material mempunyai fasa ferit-perlit, berada dibawah titik *eutectoid* pada diagram fasa baja karbon. Pemanasan pada temperatur tersebut tidak mengakibatkan perubahan fasa karena temperatur pemanasan masih dibawah titik *eutectoid*. Setelah proses pembentukan selesai, material didinginkan secara normal di udara. Hasil pembentukan temperatur 600 °C dan 700 °C pada pengamatan struktur mikro melalui SEM (perbesaran 500X dan etsa *nital* 2%) menunjukkan terdapatnya fasa ferit dan perlit. Ferit terlihat sebagai fasa yang dominan, sehingga sifat material secara keseluruhan lebih dipengaruhi oleh sifat ferit.

Pada proses pembentukan temperatur 800 °C, terjadi perubahan fasa karena sudah melampaui titik *eutectoid*, material mempunyai fasa ferit (α) dan austenit (γ). Pendinginan normal diudara mengakibatkan austenit bertransformasi menjadi perlit ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$). Transformasi tersebut dimulai dari batas butir. Makin tinggi laju pendinginan, makin halus struktur perlit, dimana jarak antara lamel Fe_3C makin rapat. Hasil pengamatan struktur mikro melalui SEM menunjukkan terdapat fasa ferit dan perlit. Fasa perlit terlihat dalam bentuk lamel yang merupakan gabungan dari ferit dan sementit (Fe_3C). Karena pendinginan berjalan lambat di udara, maka jarak antar lamel tidak terlalu rapat.

4.2.2 Pertumbuhan Butir

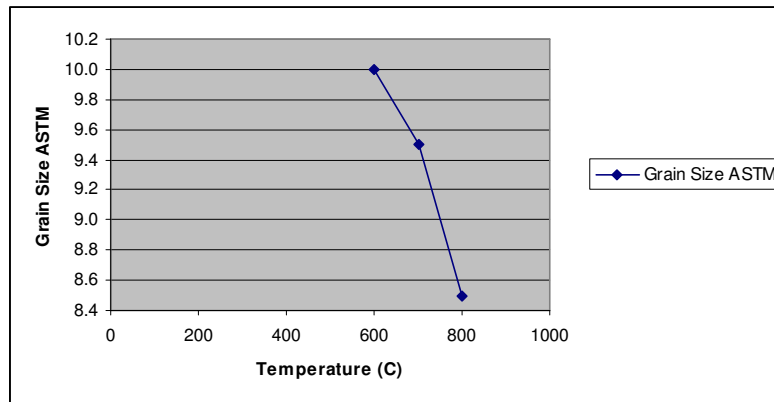
Hasil uji SEM pada sampel hasil pembentukan temperatur 600, 700, 800 °C menunjukkan terjadinya pertumbuhan butir yang signifikan pada temperatur 800 °C.

Hasil pengukuran besar butir pada pembentukan temperatur 600 dan 700 °C menunjukkan ukuran hampir sama yaitu berkisar antara 9-12 mikron untuk temperatur 600 °C, dan 9-13 mikron untuk temperatur 700 °C. Berdasarkan ASTM E112, besar butir tersebut dikategorikan dalam *grain size* no. 9.5 dan 10.

Hasil pembentukan temperatur 800 °C pada pengamatan struktur mikro menunjukkan pertumbuhan butir dimana ukuran butirnya jauh lebih besar dibandingkan hasil pembentukan temperatur 600 dan 700 °C, yaitu berkisar antara 16 sampai 17 mikron. Berdasarkan ASTM E112, besar butir tersebut dikategorikan dalam *grain size* no. 8.5.

Pengamatan ukuran butir pada beberapa ukuran sampel berdiameter 16, 20, dan 24 mm menunjukkan hasil yang mirip. Hal ini karena selama proses pembentukan, ada waktu tahan (*holding time*) selama 5 menit untuk memberi kesempatan temperatur bagian luar dan bagian dalam material menjadi sama.

Gambar 4.2 menunjukkan ukuran butir berdasarkan ASTM E112 pada sampel uji hasil pembentukan temperatur 600, 700, dan 800 °C. Sampel hasil pembentukan temperatur 600, 700 dan 800 °C masing-masing mempunyai *grain size* ASTM nomor 10, 9.5, dan 8.5. Artinya, semakin tinggi temperatur, semakin besar ukuran butir.



Gambar 4.2 Grafik ukuran butir (*grain size*) sebagai fungsi temperatur

4.2.3 Inklusi Mangan Sulfida (MnS)

Pengamatan metalografi pada sampel pembentukan temperatur 600, 700, dan 800 °C menunjukkan terdapatnya inklusi yang berasal dari logam dasar yang digunakan. Inklusi dihasilkan dari proses pembuatan baja.

Hasil pengamatan mikroskop optik membuktikan bahwa inklusi terdapat pada semua sampel uji dengan besar bervariasi. Panjang inklusi bervariasi dari 5 hingga 23 mikron.

Untuk mengetahui unsur-unsur yang terdapat pada area inklusi tersebut, maka dilakukan pengujian EDX. Hasil uji menyatakan bahwa pada inklusi terdapat unsur-unsur Mn, S, Si, dan O. Unsur Mn dan S terlihat dominan sehingga menguatkan dugaan terdapatnya inklusi MnS.

Inklusi MnS berpotensi menjadi awal terjadinya retak pada skala mikro (*micro crack*) dalam proses pembentukan *hanger rod*. Inklusi yang tinggi akan mengurangi keuletan dan ketangguhan material.

4.3 Kekerasan dan Kekuatan Hasil Pembentukan

Pengujian kekerasan dilakukan dengan penjejukan pada 5 titik dengan lokasi berbeda, dari bagian luar ke bagian dalam material. Hasil uji menunjukkan tidak terdapat kecenderungan perbedaan kekerasan antara bagian luar dan dalam. Ini berarti bahwa selama proses pembentukan panas, temperatur bagian luar dan dalam relatif sama. Hal ini karena ketika temperatur pembentukan tercapai, ada waktu tahan (*holding time*) sekitar 5 menit sebelum pembentukan dimulai.

Pengujian kekerasan pada sampel dilakukan berdasarkan standar kekerasan Brinell sehingga diperoleh nilai kekerasan sampel hasil proses pembentukan temperatur 600, 700, 800 °C. Nilai kekerasan dikonversikan menjadi kekuatan material. Sehingga diperoleh nilai kekuatan material sebagai berikut :

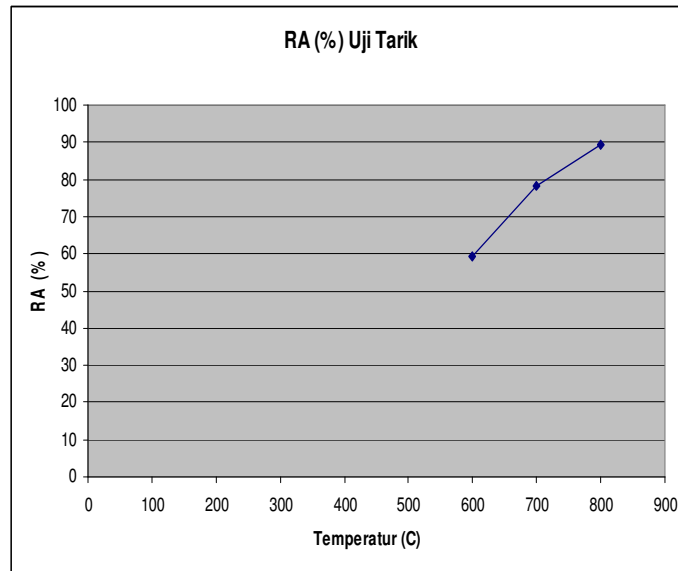
$$\begin{aligned}\sigma_{600} &= 53.04 \text{ kg/mm}^2 \\ \sigma_{700} &= 49.76 \text{ kg/mm}^2 \\ \sigma_{800} &= 48.11 \text{ kg/mm}^2\end{aligned}$$

Kekerasan dan kekuatan material hasil pembentukan temperatur 600, 700, 800 °C menunjukkan kecenderungan turun dengan makin tingginya temperatur pembentukan.

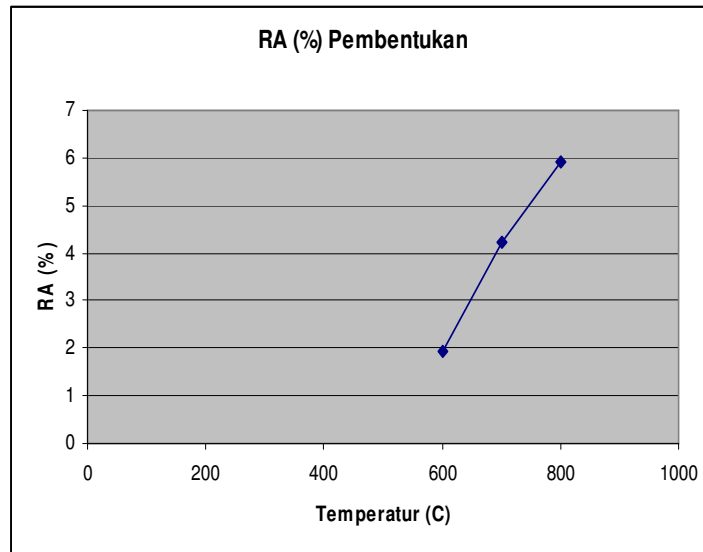
Makin tinggi temperatur pembentukan, makin besar ukuran butir. Pada pengujian ini ukuran butir hasil pembentukan temperatur 800 °C lebih besar dibandingkan temperatur 600 dan 700 °C. Ukuran butir yang besar menyebabkan kekuatan turun sebagaimana terlihat dari hasil pengujian kekerasan.

4.4 Reduksi Area Hasil Uji Tarik dan Hasil Pembentukan Temperatur 600, 700, dan 800 °C

Data pengujian menunjukkan makin tinggi temperatur maka makin tinggi persentase reduksi area. Reduksi area (% RA) pada sampel *hanger rod* hasil pembentukan temperatur 600, 700, 800 °C menunjukkan nilai yang jauh dibawah reduksi area sampel uji tarik sebagaimana terlihat pada Gambar 4.3 dan Gambar 4.4. Dengan demikian persentase perpanjangan (*elongation*) ketika pembentukan *hanger rod* jauh dibawah perpanjangan hasil uji tarik. Jadi sangat kecil kemungkinan material mengalami kegagalan karena perpanjangan selama proses pembentukan.



Gambar 4.3 Grafik reduksi area (% RA) hasil uji tarik sebagai fungsi temperatur



Gambar 4.4 Grafik reduksi area (% RA) hasil pembentukan sebagai fungsi temperature

5. KESIMPULAN

1. Kekuatan baja karbon ASTM A36 turun dengan naiknya temperatur. Reduksi kekuatan dari temperatur 600 °C ke 800 °C jauh lebih besar dibandingkan dari temperatur ruang (25 °C) ke temperatur 600 °C. Temperatur diatas 600 °C terlalu tinggi bagi material yang mempengaruhi reduksi kekuatan.
2. Pada proses pembentukan temperatur tinggi, terjadi pertumbuhan butir dengan naiknya temperatur. Hasil uji SEM sampel pembentukan temperatur 800 °C menunjukkan ukuran butir 16-17 µm, jauh lebih besar dibandingkan sampel pembentukan temperatur 600 °C dan 700 °C yang mempunyai ukuran butir 9-13 µm. Ukuran butir hasil pembentukan temperatur 600 °C dan 700 °C menunjukkan kemiripan.
3. Dengan ukuran butir yang lebih kecil, kekerasan dan kekuatan hasil pembentukan temperatur 600 °C dan 700 °C lebih tinggi dibandingkan temperatur 800 °C. Sedangkan keuletan ketika dilakukan pembentukan pada temperatur 700 °C lebih baik dibandingkan temperatur 600 °C. Dengan demikian pembentukan *hanger rod* pada temperatur 700 °C lebih direkomendasikan.
4. Hasil pengamatan metalografi dengan mikroskop optik dan analisa EDX menunjukkan terdapatnya inklusi mangan sulfida (MnS). Inklusi dapat berpotensi menjadi pemicu retak pada skala mikro (*micro crack*).

DAFTAR REFERENSI

- [1] ASM Metals Handbook Vol. 08 Mechanical Testing and Evaluation, 2000
- [2] ASM Metals Handbook Vol. 09 Metallography and Microstructures, 2004
- [3] ASTM A36 Standard Specification for Carbon Structural Steel
- [4] George Krauss, Steel Processing, Structure, and Performance, ASM International, 2005
- [5] G.Y. Li, Investigation on Hot Ductility and Strength of Continuous Casting Slab for AH32 Steel, Journal on Acta Metallurgica Sinica (English Letter) Vol. 19 No.1 pp 75-78, Feb 2006
- [6] H. Avdusinovic, A. Gigovic, The Morphology and Distribution of MnS in Low Carbon Steel, Journal on Metallurgija 44 , 2005
- [7] John E. Neely, Thomas J. Bertone, Practical Metallurgy and Materials of Industry, Sixth Edition, Prentice Hall, 2003
- [8] J.R. Davis, Tensile Testing, Second Edition, 2004
- [9] Ju Chen, Behaviour of High Strength Structural Steel at Elevated Temperatures, Journal of Structural Engineering © ASCE, December 2006
- [10] Lawrence W. Fisher, Selection of Engineering Materials and Adhesives, Taylor & Francis Group, 2005
- [11] N. Wolanska, A.K Lis, Microstructure Investigation of Low Carbon Steel after Hot Deformation, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol.20, Issues 1-2, Jan-Feb 2007
- [12] N. Wolanska, A.K Lis, The Deformation Analysis of 1008 Steel at 0.01/s Strain Rate, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol.25, Issue 1, Nov 2007
- [13] Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid, Manufacturing Engineering and Technology, Fifth Edition, Prentice Hall, 2006
- [14] Taylan Altan, Soo Ik Oh, Metal Forming - Fundamentals and Applications, American Society for Metals
- [15] William F Smith, Javad Hashemi, Foundations of Materials Science and Engineering, Fourth Edition, New York, McGraw Hill, 2006