

Analisis Aspek Mekanis Kegagalan Proses *Hot Rolling* pada Pembuatan Pelat Kuningan Hasil Coran

Pradoto Ambardi

Jurusan Teknik Metalurgi
Fakultas Teknik - Universitas Jenderal Achmad Yani
Ambardi_pradoto@yahoo.co.id

Abstrak. Retak pada pelat kuningan yang mengalami proses pengerolan panas satu tahap dari tebal 13 mm menjadi 7 mm terjadi diseluruh permukaan dengan arah tegak lurus arah pengerolan. Hal ini menyebabkan keinginan untuk mendapatkan tebal akhir pelat $3,1^{0,05}$ mm tidak dapat dipenuhi.

Hasil analisis mekanik menunjukkan bahwa laju regangan (ϵ) yang diberikan pada saat pengerolan satu tahap menghasilkan nilai yang lebih besar dari pada sensitivitas laju regangan (m). Kondisi tersebut memberikan indikasi bahwa reduksi yang dilakukan dalam satu tahap pengerolan terlalu besar sehingga material tidak mampu menahan deformasi tersebut yang pada akhirnya menghasilkan retak diseluruh permukaan pelat.

Kata kunci : *Hot rolling, kuningan, analisa kegagalan, laju regangan dan retak*

1 Pendahuluan

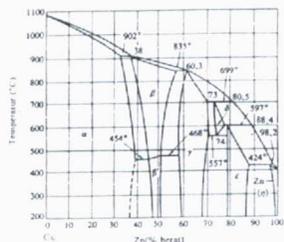
Pembuatan kuningan lembaran didahului oleh proses pengecoran (*casting*) yang dilanjutkan dengan pengerolan. Proses reduksi ketebalan *slab* kuningan menjadi lembaran yang masih cukup tebal dilakukan dengan cara pengerolan panas (*hot rolling*). Tebal awal *slab* adalah 13 mm dan tebal akhir yang diinginkan sebesar $3,1^{0,05}$ mm tanpa retak. Namun demikian, ketika proses *hot rolling* dilakukan dalam satu tahap dari ketebalan *slab* 13 mm menjadi pelat dengan tebal 7 mm (reduksi 46%), terjadi retakan di seluruh permukaan *slab*.

Hal tersebut akan menghambat laju produktivitas, maka perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui penyebab timbulnya retakan pada *slab* hasil *hot rolling*. Setelah itu dilanjutkan dengan pemberian rekomendasi untuk menghindari terulangnya kembali kejadian tersebut.

2 Tinjauan Pustaka

2.1 Kuningan (*Brass*)

Kuningan merupakan paduan antara Cu dengan Zn. Diagram fasa untuk Cu-Zn dapat dilihat pada Gambar 2.1. Fasa utama yang terdapat dalam sistem tersebut adalah α , β , γ , δ , dan ϵ , tetapi yang umumnya penting dalam industri adalah fasa α yang memiliki sel satuan *face centered cubic* (FCC) dan β yang memiliki sel satuan *body centered cubic* (BCC).

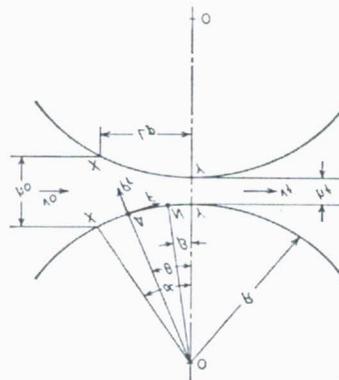


Gambar 1 Diagram fasa Cu-Zn

Kuningan dengan kandungan 30% Zn sangat mudah diolah bentuk dalam temperatur kamar dan memiliki *deep drawability* yang baik. Pada temperatur 300 – 800°C sifat plastisitas kuningan tersebut akan naik. Kuningan dengan dengan kandungan sekitar 40% Zn memiliki mampu mesin yang baik pada temperatur kamar dan bersifat cukup kuat dan keras, terutama jika mengandung 1% - 2% Pb. Paduan dengan kandungan 45% Zn memiliki kekuatan yang sangat tinggi tetapi tidak dapat dikerjakan, jadi hanya digunakan sebagai paduan cor.

2.2 Hubungan Geometri Dan Gaya Pada Pengerolan

Hubungan geometri pengerolan dengan gaya-gaya yang terlibat dalam proses deformasi logam dapat dilihat dalam Gambar 2.2. Dari gambar tersebut terlihat, *slab* dengan tebal h_0 dan kecepatan v_0 memasuki sel rol dan keluar melewati celah rol dengan tebal h_r . Jika tidak ada penambahan lebar *slab* maka seluruh deformasi pada arah vertikal diubah menjadi perpanjangan pada arah rol sehingga kecepatan keluar *slab* v_r lebih besar dari pada v_0 .



Gambar 2 Gaya-gaya yang bekerja pada proses pengerolan

Titik netral N (*no-slip point*) adalah titik dimana kecepatan permukaan rol sama dengan kecepatan lembaran. Antara bidang masuk XX sampai titik N, lembaran bergerak lebih lambat dibanding permukaan rol sehingga terjadi gesekan yang menyebabkan lembaran tertarik diantara rol. Pada daerah sebelah kanan titik N, lembaran bergerak lebih cepat dibanding permukaan rol.

Luas α permukaan kontak antara slab dan rol sama dengan lebar lembaran b dikali panjang proyeksi busur kontak L_p .

$$L_p = [R(h_0 - h_r)]^{1/2} \dots\dots\dots (1)$$

Karena R adalah jari-jari rol, maka tekanan rol spesifik adalah

$$p = P / (b \times L_p) \dots\dots\dots (2)$$

dimana P = beban pengerolan atau gaya rol untuk menekan slab.

Sudut antara bidang masuk dengan garis pusat pengerolan dinamakan sudut kontak. Komponen vertikal gaya normal adalah $P_r \sin \alpha$ dan komponen horizontal gaya gesek adalah $F \cos \alpha$. Agar *slab* dapat memasuki rol tanpa bantuan gaya dari luarmaka $F \cos \alpha = P_r \sin \alpha$ atau $F/P_r = \tan \alpha$, tetapi terlihat bahwa $F = P_r$, maka koefisien gesek = $\tan \alpha$. Jadi agar proses pengerolan dapat berlangsung maka : $\tan \alpha$.

3 Investigasi Lapangan dan Visualisasi

3.1 Tahapan proses pengerolan

a. Geometri *slab* kuningan

Tabel 1 Geometri pelat kuningan yang mengalami pengerolan panas

	Sebelum Hot rolling	Setelah Hot rolling	Keterangan
Lebar (mm)	70	70	Retak
Tebal (mm)	13	7	

b. *Slab* dipanaskan pada $T = 700^{\circ}\text{C}$ tanpa *soaking time* atau *holding time*, langsung di-rol dari ketebalan 13 mm menjadi 7 mm dalam satu tahap pengerolan (*single pass*) sehingga dihasilkan retakan yang menyeluruh di permukaan pelat. Visualisasi retakan pada pelat kuningan dapat dilihat dalam Gambar 3.1.



Gambar 3 Retakan pada permukaan pelat kuningan ($t = 7\text{ mm}$) hasil Hot Rolling. Non-etch. Pembesaran 4,5x.

3.2 Spesifikasi mesin roll :

- Diameter rol : 104 mm
- Lebar roll : maksimum 140 mm
- Celah roll : maksimum 15 mm
- Beban maksimum : 20 ton
- Kecepatan rol : 8 mm/det

4 Pengujian Laboratorium

4.1 Pemeriksaan Komposisi Kimia

Tabel 2 Hasil pengujian Komposisi kimia (%)

Unsur	Standar DIN 17660	Hasil Uji
Cu	71,00 – 73,00	71,500
Zn	Remainder	28,390
Pb	0,05 max.	0,057
Sn	0,02 max.	0,027
Fe	0,05 max.	0,040
Ni	0,2 max.	0,005
Mn	0,02 max.	0,001
Al	0,02 max.	0,001

4.2 Pengujian Kekerasan

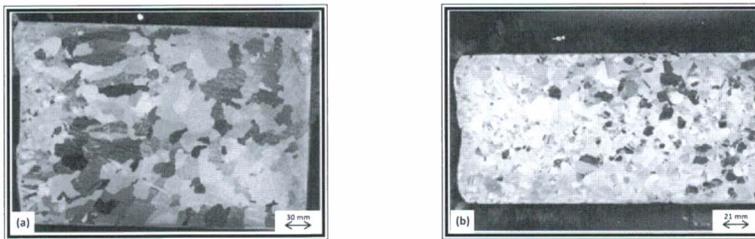
Pengujian kekerasan yang dilakukan pada arah tebal ditunjukkan dalam Tabel 4.2.

Tabel 3 Hasil pengujian kekerasan pelat kuningan sebelum dan sesudah *hot rolling* (VHN)

No. Uji	Kekerasan (VHN)			
	Sebelum Hot Rolling		Setelah Hot Rolling	
	Permukaan	Tengah	Permukaan	Tengah
1	93,5	60,0	78,1	62,2
2	107	66,3	73,2	60,2
3	94,8	64,9	75,2	67,0
4	98,3	65,7	75,4	66,6
5	98,1	67,2	74,6	64,5
Rata-rata	98,74	64,82	75,3	64,1

4.3 Pemeriksaan Struktur Makro

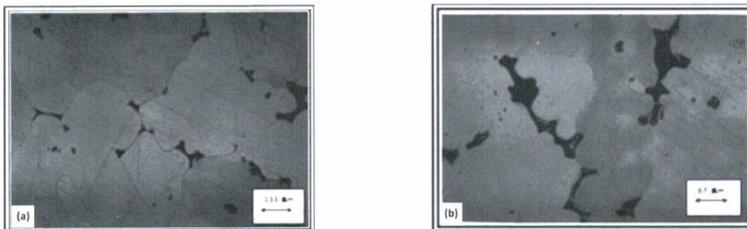
Pemeriksaan struktur makro dilakukan pada material awal sebelum diroll panas dan setelah diroll panas dengan menggunakan etsa 10 ml HNO_3 + 90 ml aquadest.



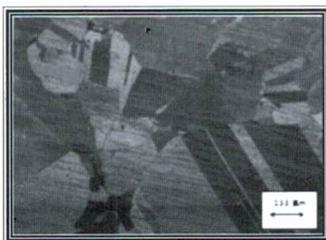
Gambar 4 Struktur makro *slab* kuningan. (a) Sebelum *hot rolling*, (b) Sesudah *hot-rolling*

4.4. Pemeriksaan Struktur Mikro

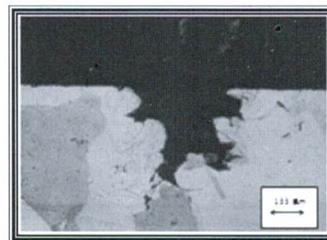
Pemeriksaan struktur mikro dilakukan pada material awal sebelum diroll dan sesudah diroll pada arah tebal. Bahan etsa yang digunakan adalah larutan yang terdiri dari 50 ml CrO_3 + HCl (1-2 tetes).



Gambar 5 Struktur mikro *slab* kuningan sebelum di-*hot rolling* memperlihatkan adanya porositas, rongga susut interdendritik, dan inklusi. (a) Arah memanjang, (b) arah melintang.



Gambar 6 Struktur mikro pelat kuningan setelah diroll panas memperlihatkan butir fasa yang memiliki *twinning*.



Gambar 7 Penampang retakan pada pelat kuningan setelah diroll panas.

5 Analisis Kegagalan

Retakan yang terjadi hampir diseluruh permukaan pelat kuningan ketika dirol panas dalam satu tahap dari tebal $t_0 = 13$ mm menjadi $t_1 = 7$ mm memiliki arah tegak lurus terhadap arah pengerolan. Berdasarkan data-data yang terkumpul maka analisis data dapat dibagi dalam dua kelompok yaitu analisis metalurgis dan analisis mekanik.

5.1 Analisis metalurgis

Berdasarkan komposisinya, *slab* kuningan yang digunakan dalam proses *hot rolling* termasuk kuningan α atau *admiralty brass* (Tabel 4.1) yang memiliki struktur mikro dengan fasa α , temperatur cair $T_m = 935$ °C dan temperatur *hot working* adalah 650 – 800°C.. Keberadaan fasa α menyebabkan material tersebut memiliki mampu bentuk yang tinggi dan ulet.

Kekerasaan yang lebih tinggi pada bagian dekat permukaan dibandingkan dengan bagian tengah pada arah tebal (Tabel 4.2) disebabkan karena kecepatan pendinginan pada bagian permukaan lebih tinggi dari pada bagian tengah. Tidak adanya peningkatan kekerasan pelat setelah di-*hot roll* disebabkan karena setelah mengalami pengerolan, temperatur akhir pelat kuningan masih berada di atas temperatur rekristalisasi sehingga mekanisme pelunakan dan rekristalisasi dinamik masih bisa terjadi.

Struktur *columnar* (Gambar 4.1.(a)) pada *slab* sebelum pengerolan menunjukkan bahwa *slab* dihasilkan dari proses pengecoran, dimana pembekuan dimulai dari daerah yang bersentuhan dengan dinding cetakan dan berlanjut ke bagian tengah. Selain itu dari Gambar 4.2.(a) dan 4.2.(b) terlihat adanya cacat coran berupa *shrinkage porosity* yang terbentuk di daerah *interdendritik* dan *Gasporosity* akibat udara/ gas yang terjebak.

Setelah mengalami pengerolan sampai ketebalan 7 mm, struktur mikro pelat kuningan relatif lebih *equaxial* dan memperlihatkan adanya *twinning*. Porositas gas dan *shrinkage porosity* pada pelat tersebut jauh berkurang dibandingkan dengan *slab* sebelum mengalami pengerolan.

5.2 Analisis Mekanis

Perencanaan proses pengerolan selain meninjau teknologi proses dan aspek metalurgi pada benda kerja, juga harus mencakup perkiraan besarnya gaya pengerolan. Hal ini diperlukan untuk mendapatkan ukuran besarnya mesin yang diperlukan. Adapun data yang terkumpul adalah sebagai berikut :

Lebar <i>slab</i> , <i>b</i>	= 70 mm
Tebal awal <i>slab</i> , <i>h₀</i>	= 13 mm
Tebal akhir <i>slab</i> , <i>h_f</i>	= 7 mm
Radius roll, <i>R</i>	= 52 mm
Kecepatan putar roll,	= 8 mm/det
Koefisien gesekan	= 0,34 (asumsi)

Pada $T = 700$ °C, material $So M_3 71 CuZn$ (*admiralty brass*) memiliki nilai sensitivitas laju regangan $m = 0,157$ dengan tegangan alir $\sigma_o = 15,3$ Kg/mm² pada laju regangan $\dot{\epsilon} = 10$ det⁻¹.

5.2.1 Perhitungan beban pengerolan

- Panjang proyeksi busur kontak L_p

$$L_p = \sqrt{R \Delta h} = \sqrt{52 \times (13 - 7)} = 17,66 \text{ mm}$$

- Besarnya sudut kontak α

$$\tan \alpha = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} = \sqrt{\frac{6}{52}} = 0,34$$

$$\alpha = 18,7^\circ$$

- Harga reduksi maximum (Δh_{max}) untuk mesin

$$\Delta h_{max} = \mu^2 R = 0,34^2 \times 52 = 6,01 \text{ mm}$$

dimana $\mu = \tan \alpha$

- Besarnya reduksi yang dilakukan di lapangan, q

$$\Delta h = h_0 - h_f = 13 - 7 = 6 \text{ mm}$$

$$q = \frac{\Delta h}{h_0} \times 100\% = \frac{6}{13} \times 100\% = 46\%$$

Jika dibandingkan antara Δh_{max} dengan persentase reduksi yang dilakukan pada saat pengerolan panas dapat diketahui bahwa reduksi atau penipisan *slab* dalam satu tahap pengerolan sama dengan harga reduksi maksimum proses, sehingga dapat dikatakan bahwa proses reduksi yang dilakukan masih cukup aman tetapi memiliki nilai yang sangat kritis. Sebaiknya nilai reduksi ketebalan yang dilakukan harus dibawah nilai reduksi maksimumnya, sehingga *slab* yang di-hot rolling berada dalam kondisi yang aman untuk ditipiskan.

- Laju regangan yang diberikan, $\dot{\epsilon} v = \frac{L_p}{t} \Rightarrow t = \frac{L_p}{\dot{\epsilon}} = \frac{17,66}{8} = 2,21 \text{ detik}$

t = lamanya waktu putar roll sepanjang busur kontak atau lamanya reduksi.

$$\dot{\epsilon} = \frac{\ln \frac{h_0}{h_f}}{t} = \frac{\ln \frac{13}{7}}{2,21} = 0,3 \text{ det}^{-1}$$

- Tegangan alir (σ_o) slab kuningan pada laju regangan $\dot{\epsilon} = 0,3 \text{ det}^{-1}$

$$\sigma_o = c (\dot{\epsilon})^m$$

Pada $T = 700^\circ\text{C}$ dengan $\dot{\epsilon} = 10 \text{ det}^{-1}$

$$15,3 = c (10)^{0,157} \text{ ,maka } c = \frac{15,3}{10^{0,157}} = 10,66$$

➤ Tegangan alir yang terjadi pada saat proses pengerolan panas slab kuningin :

$$\sigma_o = 10,66 (0,3)^{0,157} = 8,83 \frac{kg}{mm^2}$$

➤ Beban pengerolan pada saat proses pengerolan

$$P = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_o \left[\frac{1}{Q} (e^Q - 1) b \sqrt{R \Delta h} \right]$$

$$\bar{h} = \frac{h_o + h_f}{2} = \frac{13 + 7}{2} = 10 \text{ mm}$$

$$Q = \frac{\mu L_p}{\bar{h}} = \frac{0,34 \times 17,66}{10} = 0,6$$

$$P = \frac{2}{\sqrt{3}} 8,83 \left[\frac{1}{0,6} (e^{0,6} - 1) 70 \sqrt{52 \times 6} \right] = 17273,83 \text{ kg}$$

$$P = 17,3 \text{ ton}$$

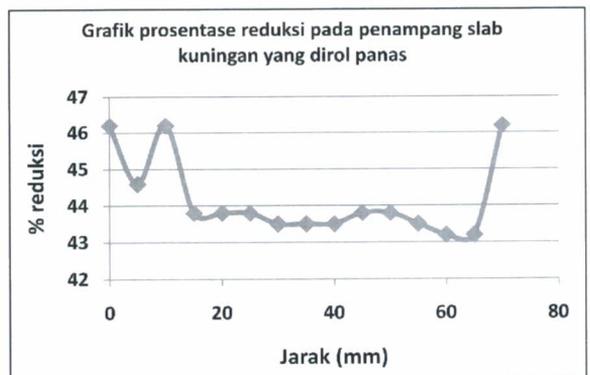
5.2.2 Analisis keseragaman deformasi

Proses pemanasan sampai temperatur 700 °C tanpa *holding time* yang cukup akan sangat berpengaruh terhadap proses deformasi pada saat pengerolan berlangsung. Hal ini terjadi karena tegangan alir pada setiap titik di dalam *slab* menjadi tidak seragam.

Untuk mengetahui pengaruh *holding time (soaking time)* terhadap kehomogenan deformasi maka dilakukan pengukuran ketebalan *slab* yang retak pada setiap jarak 5 mm dalam arah lebar.

Tabel 3 Distribusi ketebalan pada slab hasil *hot rolling* yang mengalami retak.

No	Jarak (mm)	Tebal (mm)	Reduksi (%)
1	0	7	46,2
2	5	7,2	44,6
3	10	7	46,2
4	15	7,3	43,8
5	20	7,3	43,8
6	25	7,3	43,8
7	30	7,35	43,5
8	35	7,35	43,5
9	40	7,35	43,5
10	45	7,3	43,8
11	50	7,3	43,8
12	55	7,35	43,5
13	60	7,25	43,2
14	65	7	44,2
15	70	7	46,2
Rata-rata		7,22	44,44



Gambar 8 Grafik distribusi reduksi pada *slab* hasil *hot rolling* yang mengalami retak.

Dari gambar 8 terlihat bahwa deformasi yang terjadi pada saat pengerolan berlangsung tidak seragam. Hal ini dapat dipengaruhi oleh :

a. *Holding time* yang tidak cukup lama sehingga bagian luar *slab* menjadi lebih panas dan lebih mudah mengalir dari pada bagian dalam. Sebaliknya pada saat menjelang proses pengerolan, bagian permukaan *slab* menjadi lebih dingin. Pada saat pengerolan berlangsung, bagian dalam yang lebih panas berusaha berdeformasi dan berekspansi, tetapi bagian luar yang lebih rendah temperaturnya akan berusaha menahan deformasi tersebut sehingga dapat memungkinkan terjadinya retakan pada *slab* .

b. Celah roll yang tidak sejajar menyebabkan sisi tertentu dari *slab* akan mengalami reduksi ketebalan yang berlebihan. Karena volume dan lebar pelat yang konstan, maka sisi tersebut mengalami perpanjangan ke arah longitudinal melebihi bagian yang lain. Kondisi tersebut dapat mengakibatkan keretakan pada bagian tepi dan menyebar ke bagian pusat lembaran.

Besarnya tegangan yang bekerja pada arah transversal dan longitudinal dapat dihitung berdasarkan persentase reduksi rata-rata.

- Beban pengerolan P berdasarkan reduksi rata-rata:

$$P = \frac{2}{3} \sigma_o \left[\frac{1}{Q} (e^Q - 1) b \sqrt{R \cdot \Delta h} \right]$$

$$\bar{h} = \frac{h_o + h_f}{2} = \frac{13 + 7,22}{2} = 10,11 \text{ mm}$$

$$Q = \frac{\mu \cdot L_p}{\bar{h}} = \frac{0,34 \times 17,66}{10,11} = 0,6$$

$$P = \frac{2}{\sqrt{3}} 8,83 \left[\frac{1}{0,6} (e^{0,6} - 1) 70 \sqrt{52(13 - 7,22)} \right] = 16954,19 \text{ kg}$$

- Tegangan arah transversal $\sigma_t = \frac{p}{b \cdot L_p}$

$$\sigma_t = \frac{16954,19}{70 \times 17,66} = 13,7 \text{ kg/mm}^2$$

- Tegangan arah longitudinal $\sigma_L = \sigma_t(1 + e)$

$$\sigma_L = 13,7(1 + 0,4444) = 19,8 \text{ kg/mm}^2$$

5.2.3 Analisis Formability Material

Parameter yang mempengaruhi *formability* atau kemampuan suatu material untuk menahan penipisan (reduksi) pada proses *hot rolling* adalah laju regangan ($\dot{\epsilon}$) dan sensitivitas laju regangan bahan (m), dimana laju regangan hasil proses harus lebih kecil dari pada harga sensitivitas laju regangan ($\dot{\epsilon} < m$).

Berdasarkan perhitungan hasil proses pengerolan panas yang dilakukan pada material kuningan α (71 CuZn) terlihat bahwa reduksi sebesar 46% (dari $h_o = 13$ mm ke $h_f = 7$ mm) yang dilakukan dalam satu tahap pengerolan (*single passes*) menghasilkan nilai $\dot{\epsilon} = 0,3 \text{ det}^{-1}$ yang lebih besar dari nilai sensitivitas laju regangan $m = 0,157$. Jadi dapat dikatakan bahwa nilai reduksi tersebut (46%) terlalu besar untuk dilakukan dalam satu tahap sehingga cenderung menghasilkan kegagalan berupa retak pada pelat yang di-*hot rolling*.

Untuk mengurangi laju regangan atau mendapatkan $\dot{\epsilon}$ yang lebih kecil dari harga sensitivitas laju regangan m , maka waktu kontak *slab* dengan rol di sepanjang busur kontak harus

diperbesar (diperlambat). Sebagai contoh, asumsikan nilai $\dot{\epsilon} = m = 0,157 \text{ det}^{-1}$

$$\text{maka } \dot{\epsilon} = \frac{\ln\left(\frac{h_0}{h_f}\right)}{t} \Rightarrow 0,157 = \frac{\ln\left(\frac{13}{7}\right)}{t} \Rightarrow t = 3,94 \text{ detik}$$

Waktu kontak $t = 3,94$ detik menunjukkan keadaan kritis, maka sebaiknya dipilih waktu yang lebih lama, misalnya sebesar 4 detik sehingga dihasilkan laju regangan.

$$\dot{\epsilon} = \frac{\ln\left(\frac{13}{7}\right)}{4} = 0,155 \text{ det}^{-1}$$

Untuk menentukan reduksi yang aman, dilakukan metode perbandingan antara nilai laju regangan dan persentase reduksi *hot rolling* di lapangan dengan harga laju regangan sebesar $0,155 \text{ det}^{-1}$.

$$\dot{\epsilon} = 0,3 \text{ det}^{-1} \text{ , besar reduksi adalah } 46\%$$

$$\dot{\epsilon} = 0,155 \text{ det}^{-1} \text{ , besar reduksi adalah } q.$$

$$\text{Maka } q = \frac{0,155}{0,3} \times 46\% = 24\%$$

Jadi reduksi yang aman dilakukan dalam satu tahap pengerolan panas adalah 24% atau dari ketebalan awal 13 mm menjadi 10 mm. Kondisi ini menyebabkan material yang diproses (kuningan) akan mampu menahan penipisan akibat pengerolan panas karena deformasi yang diberikan tidak terlalu besar sehingga keretakan dapat dihindari.

6 KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

6.1 Kesimpulan

1. Retakan yang terjadi di sepanjang permukaan pelat kuningan memiliki arah tegak lurus terhadap arah pengerolan. Hal ini terjadi karena deformasi yang diberikan dalam satu tahap terlalu besar sehingga nilai $\dot{\epsilon} (0,3 \text{ det}^{-1})$ lebih besar dari pada $m (0,157)$.
2. Material yang digunakan termasuk kuningan (*admiralty brass*) sesuai dengan DIN 17660.
3. Struktur *columnar, gas porosity, shrinkage porosity*, dan inklusi pada *slab* sebelum diroll panas menunjukkan bahwa material tersebut dihasilkan dari proses pengecoran.

6.2 Rekomendasi

1. Pada saat peleburan sebaiknya dilakukan *degassing* untuk mengurangi gas yang terjebak selama pembekuan.
2. *Soaking time* sebaiknya diperlama untuk menghindari ketidakseragaman deformasi pada saat pengerolan berlangsung.
3. Untuk menghindari terjadinya retak, maka sebaiknya dilakukan reduksi sekitar 24% pada pengerolan satu tahap.

7 Daftar Pustaka

1. Dieter, G.E., "*Mechanical Metallurgy*", Mc Graw – Hill Book Company (UK), 1988.
2. DR. Ir.Mardjono Siswosuwarno., "*Teknik Pembentukan Logam*", Diktat Kuliah.
3. Prof. Ir. Tata Surdia MS.Met.E., "*Pengetahuan Bahan Teknik*".
4. ASME., "*Metal Properties ASME Handbook*". Mc Graw – Hill Book Company., USA.
5. Kurt Lange., "*Hand Book Of Metal Forming*". Mc Graw – Hill Book Company., USA. 1976.
6. Kenneth G. Budinski, Michael K. Budinski., "*Engineering Materials Properties and Selection*", Sixth Edition.
7. Thomsen, EG, et, al., "*Mechanics Of Deformation in Metal Processing*", Mac Millan Co., New York 1965.