

HUBUNGAN ANTARA BESAR BUTIR DENGAN KEKUATAN DAN KEKERASAN
PADA ALUMINIUM PADUAN BERBUTIR KASAR^{*)}

Harsono Wirjosumarto⁺⁾ dan Rudy Setyo Purnomo⁺⁺⁾

R I N G K A S A N

Hubungan Hall-Petch, $\sigma_t = \sigma_i + KD^{-\frac{1}{2}}$ diteliti kembali dengan menggunakan aluminium paduan berbutir kasar, besar butir antara 0,069 mm dan 0,404 mm, sebagai bahan uji. Hasil penelitian menunjukkan bahwa harga konstanta K dari perhitungan teoritik dan dari percobaan mempunyai kesesuaian yang tinggi, yaitu perhitungan teoritik $K = 0,0514$ dan percobaan $K = 0,052$; tetapi harga eksponen dari percobaan bukannya $-0,5$ melainkan $-1,86$.

Hubungan antara kekerasan dan kekuatan hasil percobaan sesuai dengan hasil perhitungan teoritik, yaitu hubungan garis lurus dengan konstanta hasil percobaan $C = 0,335$ sedangkan perhitungan teoritik $C = 0,35 \div 0,39$. Dengan hasil ini hubungan tersebut untuk aluminium menjadi $\sigma_t = 0,335$ BHN.

Butir-butir aluminium yang berlainan besarnya dihasilkan dengan cara regang-anil dengan merubah temperatur anil pada harga regang dan waktu anil yang sama.

^{*)} Penelitian ini dilakukan di Departemen Mesin dan dibiayai oleh Badan Riset, Institut Teknologi Bandung.

⁺⁾ Departemen Mesin, Institut Teknologi Bandung.

⁺⁺⁾ Perusahaan Penerbangan Garuda Indonesia.

A B S T R A C T

Hall-Petch relation, $\sigma_t = \sigma_i + KD^{-\frac{1}{2}}$, is re-examined and tested to a coarse grain aluminum alloy with grain size between 0,069 mm and 0.404 mm. The result indicates that the theoretical and experimental value of K match each other closely, i.e. $K_{th} = 0.0514$ and $K_{exp} = 0.052$. On the other hand the experimental value of the exponent is -1.86 instead of -0.5 .

The experimental relation between hardness number and strength matches reasonably well to the theoretical analysis, which is linear. The experimental value of the linearity constant is $C_{exp} = 0.335$ and the theoretical constant is $C_{th} = 0.35 \div 0.39$, therefore for this aluminum alloy the relation is $\sigma_t = 0.335$ BHN.

The grain size difference of the specimen was obtained by strain-annealed method by varying the annealing temperature at constant strain and annealing time.

1. PENDAHULUAN

Sifat logam yang penting dalam teknik adalah sifat mekanik dimana kekuatan dan kekerasan logam termasuk dalam sifat tersebut. Telah diketahui bahwa sifat mekanik ini sangat dipengaruhi oleh struktur mikro dari logam dan dalam hal ini adalah besar butir. Karena besarnya pengaruh besar butir ini, maka penelitian ini ditunjukkan untuk mencari hubungan antara besar butir dengan kekuatan dan kekerasan.

Logam uji yang dipergunakan adalah logam aluminium paduan. Logam ini dipilih karena penumbuhan butir logam aluminium telah diketahui lebih banyak bila dibandingkan dengan logam-logam lain.

Secara garis besar jalannya penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

- i. Menumbuhkan butir logam aluminium dengan cara regangan, sehingga didapatkan ukuran butir yang berbeda-beda.
- ii. Menentukan kekuatan tarik dan kekerasan dari batang-batang uji yang telah diketahui besar butirnya.

2. HASIL-HASIL TEORITIK YANG MENDASARI

2.1. Kekuatan Logam.

Teori kekuatan logam yang didasarkan atas adanya dislokasi di dalam logam, menyatakan bahwa: kekuatan logam adalah ketahanan logam terhadap gerakan dislokasi⁽¹⁾. Dari literatur telah diketahui bahwa logam-logam pada umumnya terdiri dari kristal-kristal banyak, yang merupakan butir-butir. Di antara butir kristal yang satu dan butir yang lain terdapat susunan atom yang tidak teratur yang merupakan batas butir. Karena susunan atom yang tidak teratur ini maka batas butir merupakan penghalang bagi gerakan dislokasi. Jadi dalam hal ini dapat disimpulkan bahwa: "Makin banyak batas butir, logam menjadi lebih kuat", atau dapat juga dikatakan sebagai berikut: "Makin halus butir-butir logam, kekuatannya makin besar".

Dalam hubungan ini Hall dan Petch telah menyusun suatu teori yang menghubungkan antara besar butir dan kekuatan logam yang didasarkan atas adanya sumber-sumber dislokasi yang bekerja aktif karena adanya tegangan dari luar⁽²⁾ dan jumlah dislokasi yang tertahan pada suatu batas butir⁽³⁾. Hubungan Hall-Petch dapat dinyatakan dalam bentuk rumus sebagai berikut:

$$\sigma_t = \sigma_i + \sqrt{\frac{8 G b \sigma_c}{K \pi}} D^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

dimana: σ_t = kekuatan tarik dari logam
 σ_i = tegangan friksi dalam logam
 G = modulus elastik geser
 b = vektor Burger
 σ_c = kekuatan tarik kritis
 k = konstanta dislokasi
 D = diameter butir logam.

Karena G , b , σ_c , k dan π adalah konstanta, maka persamaan tersebut di atas dapat disederhanakan menjadi:

$$\sigma_t = \sigma_i + K \cdot D^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

2.2. Kekerasan Logam

Kekerasan logam ditentukan oleh besarnya gaya dan ukuran lekukan bekas penekan yang ditekan ke dalam logam yang diukur dengan gaya tersebut. Jadi di sini jelaslah bahwa kekerasan logam dihubungkan dengan deformasi, sedangkan deformasi sendiri mempunyai hubungan yang erat dengan kekuatan. Karena itu kekerasan logam dapat dinyatakan sebagai fungsi kekuatan atau sebaliknya.

Dalam menyusun dasar teoritik dari hubungan ini diadakan penyederhanaan dengan menganggap bahwa regangan yang terjadi adalah regangan bidang⁽⁴⁾. Dengan memasukkan kriteria kegagalan dari Tresca⁽⁵⁾, maka didapatkan:

$$\sigma_t = 0,39 \text{ BHN} \quad (3)$$

Dimana: σ_t = kekuatan logam
BHN = kekerasan menurut Brinell

Bila kriteria kegagalan dari von Mises⁽⁶⁾ yang digunakan maka hubungan tersebut berubah menjadi:

$$\sigma_t = 0,35 \text{ BHN} \quad (4)$$

Dengan ini dapat dinyatakan bahwa analisa teoritik menghasilkan hubungan kekuatan dan kekerasan sebagai berikut:

$$\sigma_t = (0,35 \div 0,39) \text{ BHN} \quad (5)$$

3. BAHAN, METODA DAN ALAT

3.1. Bahan

Bahan yang dipergunakan adalah aluminium berbentuk strip yang terdapat dipasaran dengan ukuran tebal 6 mm dan lebar 24 mm. Setelah diadakan analisa kimia oleh Balai Penelitian Bahan-Bahan dapat diketahui bahwa logam tersebut mempunyai komposisi seperti dalam tabel 1.

Tabel 1. Komposisi kimia dari bahan

U n s u r	Si	Mg	Mn	Cu	Al
Persen berat	0,36	0,08	0,05	0,01	sisia

3.2. Metode Penelitian

a. Penumbuhan dan Pengukuran Butir

Penumbuhan butir pada batang-batang uji dilakukan dengan cara regang-anil⁽⁷⁾ dengan harga regang tetap sebesar 5 % dan waktu anil juga tetap sebesar 120 menit, sedang temperatur anil yang dirubah, yaitu: 200°C, 250°C, 300°C, 350°C, 400°C, 450°C dan 500°C. Peregangan dilakukan dengan menggunakan mesin tarik merek Instron 1195

Pengukuran butir dilakukan setelah pengerjaan standar untuk proses electropolish, yaitu pemotongan, penghalusan permukaan dengan kertas ampelas sampai kehalusan (000) dan kemudian diikuti dengan proses memolis dan mengetsas secara elektrolitik.

Besarnya arus, tegangan dan lamanya proses memolis dan mengetsas adalah sebagai berikut:

Memolis : arus I = 4,0 amper
 tegangan V = 48 volt
 waktu t = (4 atau 5) x 5 detik

Mengetsas : arus I = 1,5 amper
 tegangan V = 18 volt
 waktu t = (2 atau 3) x 3 detik.

Pengukuran butir dilakukan dengan dua cara, yaitu pertama secara langsung melalui mikroskop yang berskala standar butir ASTM dan kedua dilakukan pada potret mikrografi yang didapat.

b. Pengujian kekuatan dan kekerasan

Pengujian kekuatan dilakukan secara standar pada mesin tarik Instron dengan kecepatan penarikan 0,5 mm/menit. Sedangkan pengukuran kekerasan dilakukan menurut cara Brinell⁽⁸⁾ dengan beban 62,5 kg dan diameter bola penekan 5,0 mm.

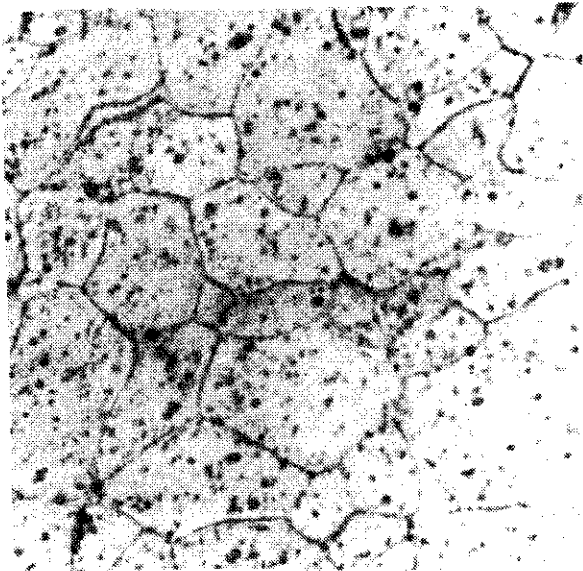
3.3. Alat Yang Dipergunakan

- Semua pembuatan batang uji dilakukan dengan mesin frais merek Maho.
- Proses pemanasan dilakukan dalam tungku merek Ruhstrat KG.
- Proses polis dan etsa dikerjakan dengan alat electropolish merek Struers Lectropol.
- Mikroskop yang dipergunakan adalah mikroskop merek Reichert.
- Pengujian tarik dilakukan pada mesin tarik merek Instron 1195.
- Pengujian kekerasan dilakukan dengan hardness tester buatan Albert Gnehm.

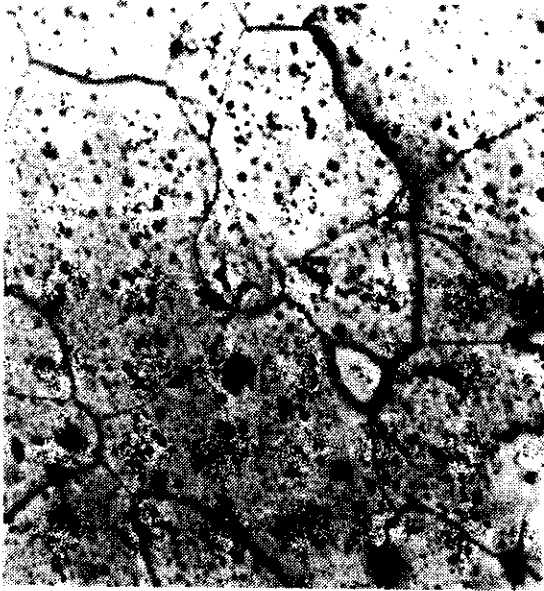
4. HASIL-HASIL PENGUJIAN

4.1. Hasil Metalografi

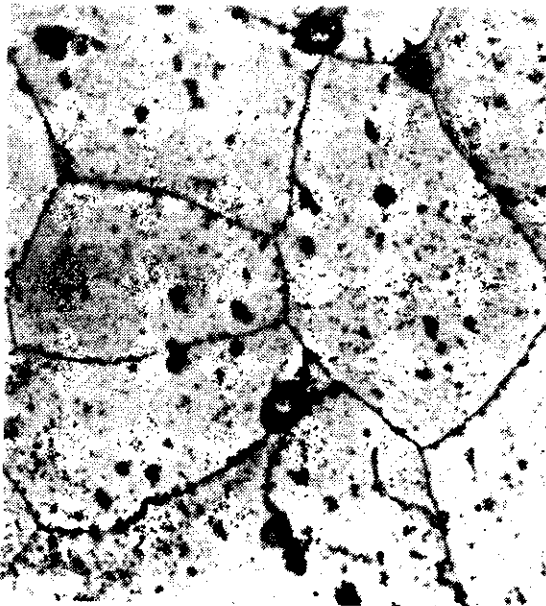
Tiga dari hasil pemotretan struktur mikro yang diperoleh dapat dilihat dalam gambar 1, 2, dan 3.



Gambar 1. Mikrografi batang uji no. 1, besar butir 0,069 mm pembesaran 320 x.



Gambar 2. Mikrografi batang uji no. 6, besar butir 0,148 mm
pembesaran 320 x.



Gambar 3. Mikrografi batang uji no. 7, besar butir 0,404 mm
pembesaran 125 x.

4.2. Hasil Pengukuran Besar Butir

Hasil pengukuran dari besar butir untuk masing-masing batang uji ditabelkan dalam tabel 2.

Tabel 2. Hasil pengukuran besar butir

Nomor batang uji	1	2	3	4	5	6	7
Temperatur anil ($^{\circ}\text{C}$)	200	250	300	350	400	450	500
Besar butir (mm)	0,069	0,078	0,088	0,098	0,123	0,148	0,404

4.3. Hasil Pengukuran Kekuatan dan Kekerasan

Kekuatan yang dipergunakan adalah kekuatan tarik sebenarnya yang dihitung menurut rumus berikut⁽⁵⁾:

$$\sigma_t = \frac{F}{A_0} (1 + e) \quad (6)$$

dimana: σ_t = kekuatan

F = beban pada pengujian

A_0 = luas penampang mula batang uji.

Kekerasan ditentukan menurut cara Brinell dengan menggunakan rumus berikut⁽⁸⁾:

$$\text{BHN} = \frac{P}{\frac{\pi D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (7)$$

dimana: BHN = kekerasan Brinell

p = beban

D = diameter bola penekan
d = diameter lekukan.

Hasil-hasil kedua pengukuran ini ditabelkan dalam tabel 3.

Tabel 3. Hasil pengukuran kekuatan dan kekerasan

Nomor batang uji	1	2	3	4	5	6	7
Kekuatan σ_t (kg/mm ²)	17,26	16,16	15,30	13,51	10,91	10,55	9,60
Kekerasan Brinell BHN (kg/mm ²)	51,6	48,2	45,8	40,3	32,4	31,5	28,9

5. PEMBAHASAN HASIL PENELITIAN

5.1. *Pengolahan Data*

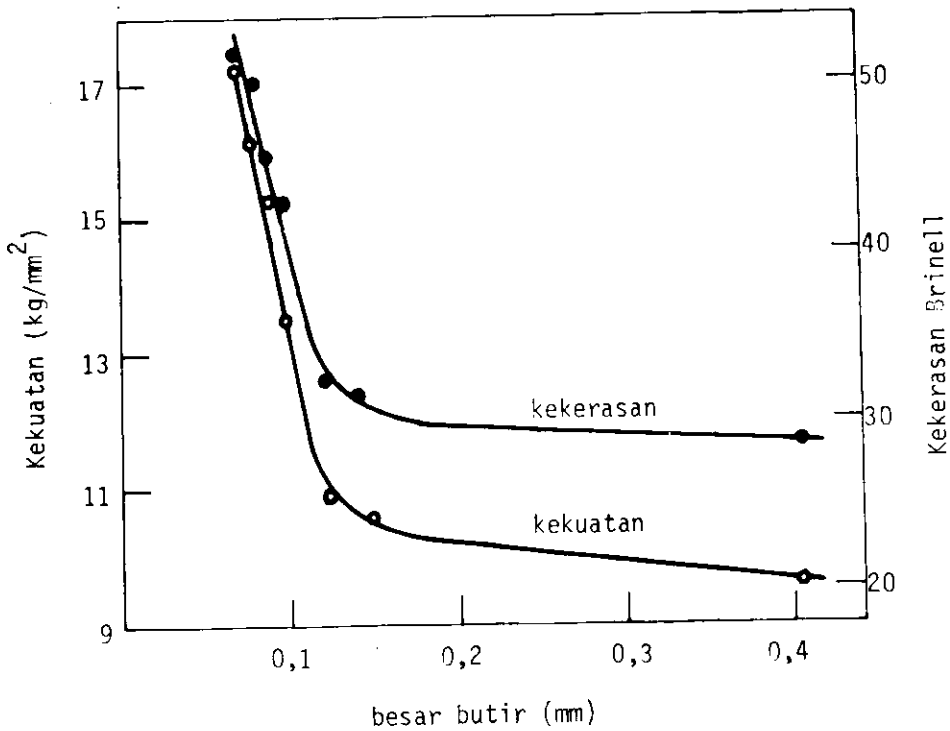
Penelitian ini bertujuan mencari hubungan antara kekuatan, kekerasan dan besar butir. Di dalam Tabel 2 telah dikumpulkan hasil penelitian yang dapat menghubungkan antara besar butir dan kekuatan, sedangkan dalam Tabel 3, dapat dicari hubungan antara kekuatan dan kekerasan. Untuk memudahkan analisa maka kedua tabel tersebut disatukan sehingga terjadi tabel baru seperti dalam Tabel 4.

Untuk lebih mempermudah lagi, maka Tabel 4 dirubah menjadi suatu grafik seperti yang terlihat dalam Gambar 4. Dari gambar tersebut terlihat jelas bahwa makin besar butir logam makin turun kekuatan dan kekerasannya.

Analisa yang lebih mendalam dalam hubungan antara besar butir dan kekuatan dan hubungan antara kekuatan dan kekerasan dilakukan secara terpisah.

Tabel 4. Hasil-hasil pengukuran besar butir, kekuatan dan kekerasan.

Nomor Batang uji	Besar butir (mm)	Kekuatan (kg/mm ²)	Kekerasan (kg/mm ²)
1	0,069	17,26	51,6
2	0,078	16,16	48,2
3	0,088	15,30	45,8
4	0,098	13,51	40,3
5	0,123	10,91	32,4
6	0,148	10,55	31,5
7	0,404	9,60	28,9



Gambar 4. Hubungan antara kekuatan, kekerasan dan besar butir.

5.2. Pembahasan Hubungan Antara Besar Butir dan Kekuatan

Pembahasan ini didasarkan pada anggapan bahwa hubungan ini mempunyai hubungan matematika seperti persamaan 2, yang dikenal dengan persamaan Hall-Petch:

Dengan bentuk persamaan tersebut harga K dapat dicari dengan cara berikut:

$$\sigma_t = \sigma_i + K D^{-\frac{1}{2}}$$

$$\sigma_t - \sigma_i = K D^{-\frac{1}{2}}$$

$$\ln (\sigma_t - \sigma_i) = \ln K - \frac{1}{2} \ln D \quad (8)$$

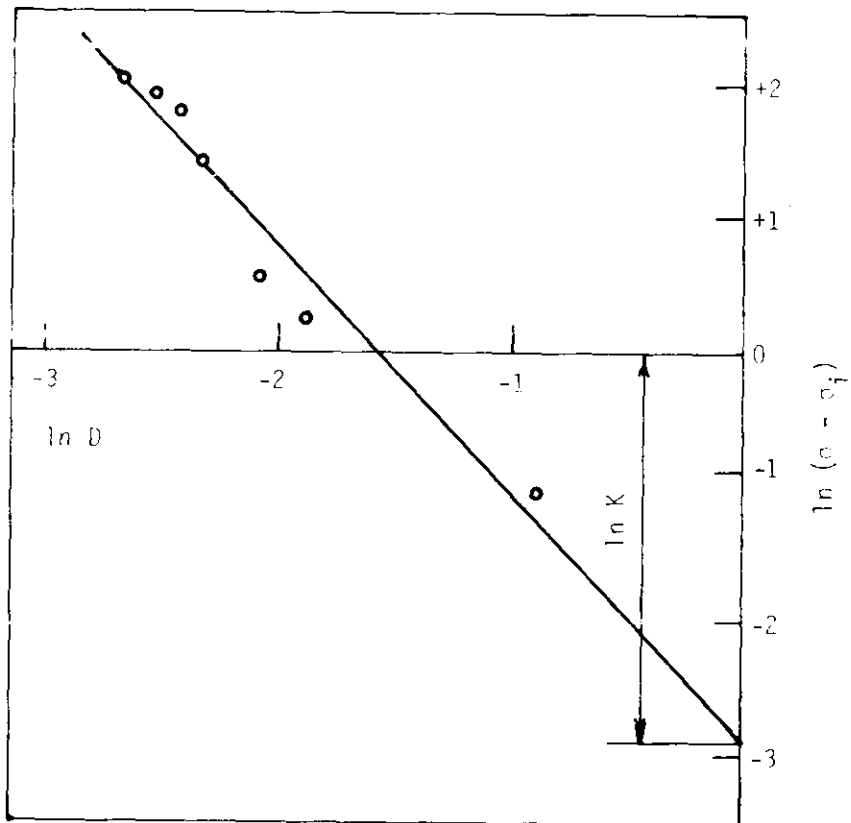
Dengan persamaan 8, harga-harga K dapat dicari dengan mudah karena persamaan tersebut merupakan garis lurus. Tetapi untuk menghitung ini, sebelumnya sudah harus ditentukan besarnya harga σ_i . Penentuan ini dapat dianalisa dari persamaan 2, dan kemudian diperkirakan dari grafik pada Gambar 4. Dari persamaan tersebut dapat dilihat bahwa harga $K D^{-\frac{1}{2}}$ akan mendekati nol bila D mendekati harga tidak terhingga. Ini berarti bahwa makin besar butir kekuatan makin turun, maka dapat disimpulkan bahwa harga σ_i sama dengan harga σ_t terendah. Dari grafik dalam Gambar 4, dapat diperkirakan bahwa harga σ_i akan mencapai $9,25 \text{ kg/mm}^2$. Dengan harga ini maka logaritma dari $(\sigma_t - \sigma_i)$ dan D dapat dihitung. Hasil perhitungan ini dicantumkan dalam Tabel 5.

Untuk menentukan harga K, maka harga-harga logaritma dari tegangan dan besar butir yang terdapat dalam Tabel 5, dipindahkan ke dalam bentuk grafik seperti terlihat pada Gambar 5. Setelah diadakan pendekatan dengan garis lurus ternyata bahwa harga eksponen dari persamaan 2, tidak sama dengan $-\frac{1}{2}$. Berhubungan dengan kenyataan-kenyataan ini maka persamaan 2, diganti dengan persamaan sejenis yang lebih umum seperti pada persamaan 9, yaitu:

$$\sigma_t = \sigma_i + K D^m \quad (9)$$

Tabel 5. Harga besaran mekanik dan logaritmanya

Besaran	Nomor Batang uji						
	1	2	3	4	5	6	7
σ_t (kg/mm ²)	17,26	16,16	15,30	13,51	10,91	10,55	9,60
σ_i (kg/mm ²)	9,25	9,25	9,25	9,25	9,25	9,25	9,25
$\sigma_t - \sigma_i$	8,01	6,91	6,05	4,26	1,66	1,30	0,35
$\ln (\sigma_t - \sigma_i)$	2,081	1,933	1,800	1,449	0,507	0,262	- 1,050
D (mm)	0,069	0,078	0,088	0,098	0,123	0,148	0,404
$\ln D$	- 2,674	- 2,551	- 2,430	- 2,323	- 2,096	- 1,911	- 0,906



Gambar 5. Hubungan logaritma antara kekuatan dan besar butir

Dengan mempergunakan analisa regresi-garis, akhirnya didapatkan bahwa:

$$m = - 1,86$$

dan

$$K = 0,052$$

dengan tingkat kesesuaian sebesar 0,94.

Dari kedua harga tersebut, jelas bahwa harga m tidak sesuai dengan harga teoritik. Berhubung dengan hal ini, maka

perlu dihitung harga teoritik dari K. Perhitungan ini dapat dilakukan dengan mempergunakan harga K dari persamaan 1, yaitu:

$$K = \sqrt{\frac{8 G b \cdot \sigma_c}{k \pi}}$$

Untuk aluminium harga-harga komponen dari K, pada persamaan tersebut adalah⁽⁹⁾:

$$G = 2900 \text{ kg/mm}^2$$

$$k = 0,833$$

$$\sigma_c = 1,04 \text{ kg/mm}^2$$

$$b = 2,857 \times 10^{-7} \text{ mm}$$

Dari harga-harga tersebut, maka:

$$K = \sqrt{\frac{8 \times 2900 \times 2,857 \times 10^{-7} \times 1,04}{0,833 \times 3,142}} = 0,0514$$

Harga ini ternyata sesuai dengan percobaan. Dengan hasil penelitian ini, maka kekuatan aluminium dapat didekati dengan persamaan 10:

$$\sigma_t = 9,25 + 0,052 \cdot D^{-1,86} \text{ kg/mm}^2 \quad (10)$$

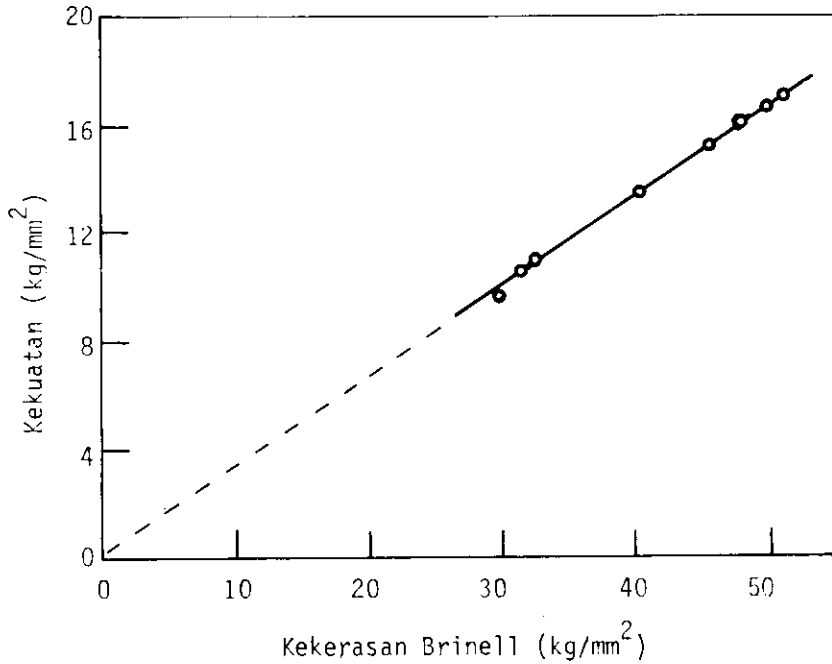
Dimana: σ_t = kekuatan

D = diameter butir (mm).

5.3. Hubungan antara Kekuatan dan Kekerasan

Berdasarkan hasil teoritik yang dikemukakan dalam 2.2., dapat diketahui bahwa antara kekuatan dan kekerasan seharusnya mempunyai hubungan garis lurus. Untuk menguji kebenarannya,

maka harga-harga kekuatan dan kekerasan yang terdapat dalam Tabel 4, dipindahkan dalam bentuk grafik seperti terlihat dalam Gambar 6.



Gambar 6. Hubungan antara Kekuatan dan Kekerasan

Untuk meneliti hubungan linear ini, dianggap bahwa kedua besaran tersebut memenuhi persamaan 11, yaitu:

$$\sigma_t = a \cdot \text{BHN} + b \quad (11)$$

Dimana: σ_t = kekuatan (kg/mm²)
 BHN = kekerasan Brinell (kg/mm²)
 a, b = konstanta.

Dengan mempergunakan harga-harga dari Tabel 4, setelah dilakukan analisa regresi-garis, maka didapatkan bahwa:

$$a = 0,335$$

$$b = -0,014$$

dengan tingkat kesesuaian sebesar: 0,999.

Disini harga b sangat kecil bila dibandingkan dengan harga-harga σ_t dan BHN, karena itu b dapat diabaikan, sehingga hubungan kedua besaran ini:

dari percobaan

$$\sigma_t = 0,335 \text{ BHN} \quad (12)$$

teoritik

$$\sigma_t = (0,35 \div 0,39) \text{ BHN} \quad (13)$$

Dari kedua harga tersebut jelas bahwa harga menurut teori dan pengujian saling mendekati dengan baik.

6. KESIMPULAN

1. Dengan regangan 5 % dan waktu anil 120 menit dengan temperatur pemanasan antara 200°C dan 500°C , dapat ditumbuhkan butir aluminium dengan diameter antara 0,069 dan 0,404 mm.
2. Kekuatan aluminium naik bila butir-butirnya lebih halus.
3. Secara garis besar hubungan Hall-Petch dipenuhi tetapi eksponen yang didapat bukan -0,5 melainkan -1,86, sedangkan harga K sesuai dengan perhitungan teoritik. Sehingga hubungan Hall-Petch untuk aluminium dengan butir antara 0,069 - 0,404 mm, menjadi:

$$\sigma_t = 9,25 + 0,052 D^{-1,86}$$

4. Dengan hasil ini perlu diadakan penelitian lebih banyak lagi untuk meneliti kebenaran dari hubungan Hall-Petch.
5. Hubungan antara kekuatan (σ_t) dan kekerasan Brinell (BHN)

adalah:

$$\sigma_t = 0,335 \text{ BHN}$$

DAFTAR REFERENSI

1. Hardwood, J.J., *Strengthening Mechanism in Solid (Preface)*, American Society for Metal, 1962.
 2. Hull, D., *Introduction to Dislocation* (New York: Pergamon Press), 1969.
 3. Eshelby, J.D., Frank, F.C. and Nabarro, F.R. "The equilibrium of Linear Arrays of Dislocation", *Philosophy Magazine*, vol. 42, 1951.
 4. Timoshenko, S. and Goodier, J.N., *Theory of Elasticity*, (New York: Mc Graw-Hill Book Company, Inc.). 1951.
 5. Dieter Yr, G.E., *Mechanical Metallurgy*, (New York: Mc Graw-Hill Book Company, Inc.), 1961.
 6. Cottrell, A.H., *The Mechanical Properties of Matter*, (New York: John Wiley & Sons, Inc.), 1964.
 7. Wirjosumarto, H., "To Grow Single Crystals of 6061 Aluminum Alloy", *Proceedings ITB*, vol. 3, No. 4, 1965.
 8. Davis, H.E., Troxell, G.E. and Wiskocil, C.T., *The Testing and Inspection of Engineering Materials*, (New York: Mc Graw-Hill Book Company Inc.), 1955.
 9. Cottrell, A.H., *Dislocation and Plastic Flow in Crystals*, (New York: Oxford University Press), 1953.
-