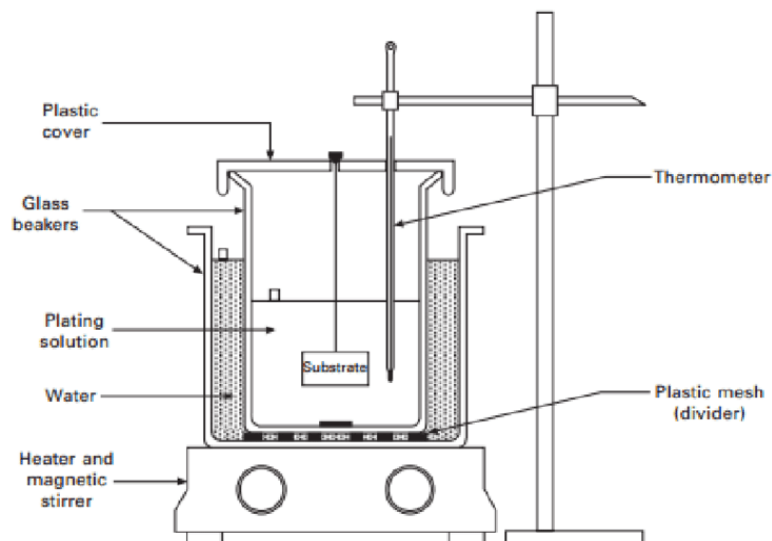


## BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 *Electroless Plating*

*Electroless* merupakan proses *plating* yang tidak menggunakan listrik dalam proses pelapisannya. Pelapisan yang terjadi karena adanya reaksi oksidasi dan reduksi pada permukaan barang, sehingga terbentuk lapisan logam yang berasal dari garam logam tersebut. Karena tidak menggunakan bantuan arus listrik dalam pertukaran elektron, proses pelapisan yang terjadi berjalan lebih lambat, sehingga untuk mempercepat pelapisan, temperatur proses harus tinggi. Dengan skema seperti dibawah ini :



Gambar 2. 1 Skema electroless plating

Keterangan :

1. Gelas plating
2. Larutan *electroless* aluminium dan magnesium
3. Bahan yang dilapisi (abu dasar batu bara)
4. Kompor *magnetic stirrer*

Pada penelitian *electroless plating* abu dasar batubara sebagai penguat komposit matrik logam yang dilakukan oleh (Edi Santoso, dkk., 2016) menunjukkan bahwa hasil yang diperoleh dari pengujian SEM-EDX dengan variasi % berat magnesium (Mg) dan variasi temperature oksidasi berpengaruh pada % Wt elemen – elemen pembentuk yang ada didalamnya, tetapi tidak berpengaruh terhadap unsur pembentuknya yaitu tetaplah sama. Dari semua spesimen menghasilkan produk reaksi

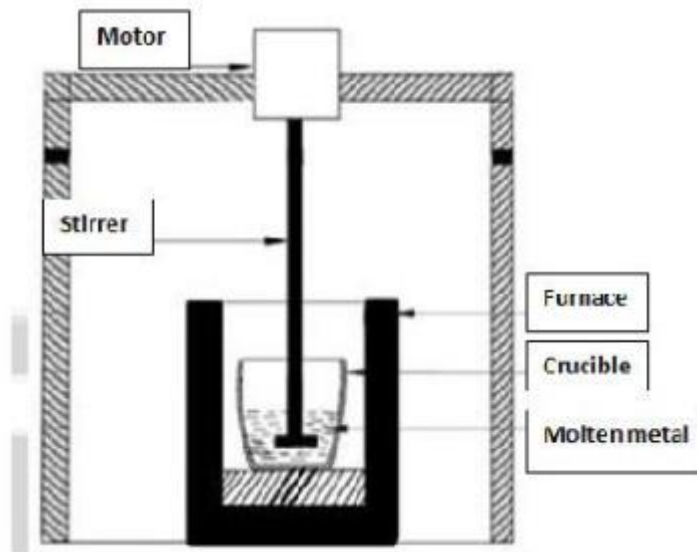
yang sama yaitu aluminium silicate ( $Al_2SiO_5$ ). Dari penelitian lain yang dilakukan oleh (**Adhi Setiawan, dkk., 2016**) menunjukkan bahwa material komposit Al dengan penguat abu dasar batubara memiliki sifat mekanik berbeda tergantung pada ketebalan lapisan *elcktroless plating* Mg pada permukaan partikel abu dasar, perbedaan ketebalan lapisan dipengaruhi oleh suhu oksidasi (100 °C, 200 °C, dan 300 °C) dimana semakin tinggi suhu oksidasi pada proses *elektroless plating* maka ketebalan lapisan Mg semakin besar serta homogenitas *coating* semakin tinggi.

*Electroless plating* adalah deposisi metal dari larutan dengan menggunakan agen pereduksi (RA) dalam larutan atau disolusi substrain dengan electron bebas. Electroless plating dibagi menjadi dua model yaitu *autocatalytic plating* dan *ion-exchange plating*. Dimana *autocatalytic plating* ditentukan oleh elektron bebas yang berasal dari reduksi agen bergabung dengan ion logam di dalam larutan dan membentuk logam padat permukaan, sedangkan *ion-exchange plating* berbasis pada oksidasi (*dissolution*) dari substrate yang akan dilapisi dan proses reduksi (*deposition*) oleh ion logam yang lain yang berasal dari larutan pelapis, lapisan yang terbentuk lebih tipis, sebab proses pelapisan akan terhenti ketika seluru substrate telah terlapis dan tidak dapat dihasilkan lagi suplai electron dengan proses oksidasi ( **M. Zainuri, dkk., 2008**).

## 2.2 Stir Casting

*Stir casting* merupakan salah satu metode pembuatan material komposit dengan mencampurkan bahan material disaat material dalam keadaan mencair, dimana pengadukannya secara mekanik (**Amir Arifin & Junaedi., 2017**). Keuntungan dari proses ini adalah mampu menggabungkan partikel penguat yang tidak dibasahi oleh logam cair, bahan yang tidak terdibasahi tersebut terdistribusi oleh adanya gaya pengadukan secara mekanik yang menyebabkan partikel penguat terperangkap dalam logam cair.

Menurut penelitian yang dilakukan oleh (**Amir Arifin & Junaidi., 2017**) tentang pengaruh parameter *stir casting* terhadap sifat mekanik bahan AMC dengan variasi waktu pengadukan (180, 300, & 480 detik) dan temperatur pengadukan (700, 750, & 800 °C) didapatkan semakin lama waktu pengadukan sejalan dengan kekuatan sifat mekaniknya, sedangkan temperatur penuangan berbanding terbalik dengan nilai kekerasan dan keuletan material dimana semakin tinggi temperatur maka kekuatannya menurun karena semakin tinggi temperatur penuangan menyebabkan terjebaknya gas hydrogen semakin banyak hingga nilai kekuatan tarik elongasi dan nilai kekerasan mengalami penurunan. Dibawah ini merupakan skema metode *stir casting* :



Gambar 2. 2 Proses stir casting

Proses *stir casting* ini kadangkala mengalami beberapa kendala diantaranya adalah distribusi partikel yang kurang homogen dan *wettability* aluminium terhadap beberapa jenis keramik yang kurang baik, ketidak homogenan mikrostruktur disebabkan oleh pengumpulan partikel penguat (*clustering*) dan pengendapan selama pembekuan berlangsung akibat perbedaan densitas matrik dan penguat, terutama pada fraksi volume partikel tinggi (Andi Triono, dkk., 2015).

### 2.3 Homogenizing

*Homogenizing* adalah suatu pemanasan pada temperatur tinggi didaerah fasa austenit ( $\gamma$ ), jauh diatas titik kritis ( $A_3$  dan  $A_{cm}$ ). Proses ini bertujuan untuk menghilangkan efek segregasi kimia akibat proses pembekuan lambat ingot/billet dan untuk memperbaiki mampu pengerjaan panas (*hot workability*). Menurut penelitian yang dilakukan oleh (M. Ginanjar Widodo Mukti, dkk., 2018) pengaruh variasi temperatur homogenizing terhadap kekerasan komposit A356/nano- $Al_2O_3$  didapatkan, penambahan temperatur pada homogenizing dalam komposit A356 mampu meningkatkan nilai kekerasan komposit karena perubahan mikrostruktur silikon eutektik dari komposit A356.

### 2.4 Penekanan (*Pressing*)

*Pressing* adalah proses penekanan perlahan pada benda kerja dengan kekuatan tertentu dan menerapkan penekanan secara terus menerus, ini cara yang dapat digunakan untuk mereduksi ketebalan pada plat logam dengan cara mengubah

ketebalan benda kerja. Pengepresan dapat dilakukan dengan beberapa cara yang dilihat dari bahan yang di *press*. Jenis pengepresan yang umumnya digunakan antara lain : pengepresan datar dan pengepresan bentuk. Contohnya dalam pengepresan plat, maka dapat mempengaruhi bentuk butiran atau struktur mikro material yang di *press*. Material plat yang di *press* dapat dipengaruhi sifat mekanik pada perubahan butiran pada pengepresan. Perubahan ini diketahui melalui beberapa pengujian yang ada.

### **2.5 Hot Working**

Kerja panas adalah langkah awal dalam kerja mekanis sebagian besar logam dan paduan. Pekerjaan panas tidak hanya menghasilkan penurunan energi yang diperlukan untuk mendeformasi logam dan peningkatan kemampuan untuk mengalir tanpa retak, tetapi difusi yang cepat pada suhu kerja panas membantu dalam mengurangi ketidakhomogenan kimiawi dari struktur cor-ingot. Lubang gas dan porositas dieliminasi oleh pengelasan bersama rongga-rongga ini, dan butiran kolumnar kasar dari coran dipecah dan dimurnikan menjadi butiran rekristalisasi yang sama kecil. Perubahan-perubahan dalam struktur dari kerja panas ini menghasilkan peningkatan daktilitas dan ketangguhan pada kondisi cetakan.

Namun, ada beberapa kelemahan dari kerja panas. Karena suhu tinggi biasanya terlibat, reaksi permukaan antara logam dan atmosfer tungku menjadi masalah. Pekerjaan panas biasanya dilakukan di udara, hasil oksidasi, dan sejumlah besar logam dapat hilang. Logam-logam reaktif seperti molibdenum sangat dilumpuhkan oleh oksigen, dan oleh karena itu mereka harus dikerjakan dengan panas di atmosfer inert atau dilindungi dari udara dengan wadah yang sesuai. Dekarburisasi permukaan dari baja yang dikerjakan dengan panas bisa menjadi masalah serius, dan sering kali diperlukan finishing permukaan yang luas untuk menghilangkan lapisan yang terdekarburasi. Karena deformasi selalu lebih besar di lapisan permukaan, logam akan memiliki ukuran butir rekristalisasi yang lebih halus di wilayah ini. Karena interior akan berada pada suhu yang lebih tinggi untuk waktu yang lebih lama selama pendinginan daripada permukaan eksternal, pertumbuhan butir dapat terjadi di interior potongan besar, yang dingin perlahan dari suhu kerja. Batas suhu yang lebih rendah untuk pengerjaan panas logam adalah suhu terendah di mana laju rekristalisasi cukup cepat untuk menghilangkan pengerasan regangan pada saat logam berada pada suhu.

Untuk logam atau paduan tertentu suhu kerja panas yang lebih rendah akan tergantung pada faktor-faktor seperti jumlah deformasi dan waktu ketika logam pada suhu. Karena semakin besar jumlah deformasi semakin rendah suhu rekristalisasi, batas suhu yang lebih rendah untuk pekerjaan panas menurun untuk deformasi besar. Logam yang terdeformasi dengan cepat dan didinginkan dengan cepat dari temperatur akan membutuhkan suhu kerja panas yang lebih tinggi untuk tingkat deformasi yang

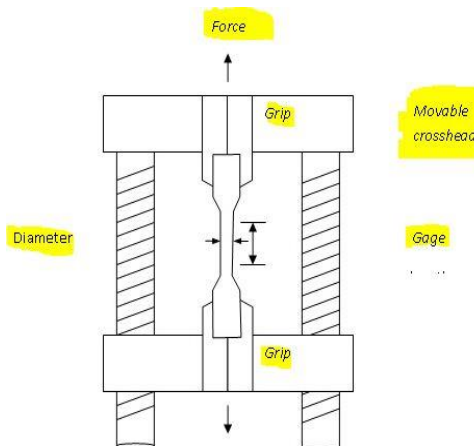
---

sama daripada logam yang dideformasi secara perlahan dan didinginkan secara perlahan. Batas atas untuk kerja panas ditentukan oleh suhu di mana terjadi pelelehan atau oksidasi berlebihan. Umumnya suhu kerja maksimum dibatasi hingga  $100^{\circ}\text{F}$  di bawah titik leleh. Ini untuk memungkinkan kemungkinan daerah terpisah dari bahan dengan titik lebur yang lebih rendah. Hanya sejumlah kecil lapisan batas butir dari konstituen yang lebur lebih rendah diperlukan untuk membuat suatu material hancur berkeping-keping saat dideformasi. Kondisi seperti ini dikenal sebagai sesak panas, atau terbakar. Sebagian besar operasi *hot-work* dilakukan dalam beberapa lintasan, atau langkah-langkah.

Umumnya suhu kerja untuk lintasan perantara dijaga jauh di atas suhu kerja minimum untuk mengambil keuntungan dari ekonomi yang ditawarkan oleh tekanan aliran yang lebih rendah. Sangat mungkin bahwa beberapa pertumbuhan butir akan terjadi setelah rekristalisasi pada suhu ini. Karena produk berukuran butiran halus biasanya diinginkan, praktik umum adalah menurunkan suhu kerja untuk lintasan terakhir ke titik di mana pertumbuhan butiran selama pendinginan dari suhu kerja akan diabaikan. Suhu akhir ini biasanya tepat di atas suhu rekristalisasi minimum. Untuk memastikan ukuran butir rekristalisasi halus, jumlah deformasi pada lintasan terakhir harus relatif besar.

## 2.6 Uji Tarik

Uji tarik adalah pengujian yang digunakan untuk mendapatkan suatu gambaran kekuatan material dari sifat material tersebut, dimana pengujian tarik bisa dilakukan dengan menambahkan beban secara perlahan di ujung batang sehingga berakibat adanya pertambahan panjang material hingga putus. Semua susunan material bisa diketahui dengan jelas, sehingga dapat menentukan material tersebut.



Gambar 2. 3 Mesin uji tarik dengan spesimen sesuai standart

Biasanya yang menjadi fokus perhatian adalah kemampuan maksimum bahan tersebut dalam menahan beban. Kemampuan ini umumnya disebut “*Ultimate Tensile Strength*” disingkat dengan UTS. **Hukum Hooke** (*Hooke’s Law*) untuk hampir semua logam, pada tahap sangat awal dari uji tarik, hubungan antara beban atau gaya yang diberikan berbanding lurus dengan perubahan panjang bahan tersebut. Ini disebut daerah linier atau *linear zone*. Di daerah ini, kurva penambahan panjang vs beban mengikuti aturan *hooke* sebagai berikut :

*rasio tegangan (strees) dan regangan (strain) adalah konstan*

*Stress* adalah beban dibagi dengan luas penampang sedangkan *strain* adalah pertambahan pertambahan panjang dibagi panjang awal beban. Tegangan – Regangan (stress – strain diagram) disebut juga diagram  $\sigma - \varepsilon$ , pada saat batang uji menerima beban sebesar P (kg) atau F (N) maka batang uji akan bertambah sebesar  $\Delta L$  (mm). Pada saat itu pada batang uji bekerja tegangan yaitu besarnya :

$$\sigma = \frac{F/P_{max}}{A_0}$$

Dimana  $\sigma$  = tegangan (kg/mm<sup>2</sup>), atau (N/mm<sup>2</sup>)  
P = beban tarik (kg), atau F = gaya tarik (N)  
 $A_0$  = luas penampang mula – mula (mm<sup>2</sup>)

Juga pada saat itu batang uji terjadi regangan yang besarnya :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{(L - L_0)}{L_0}$$

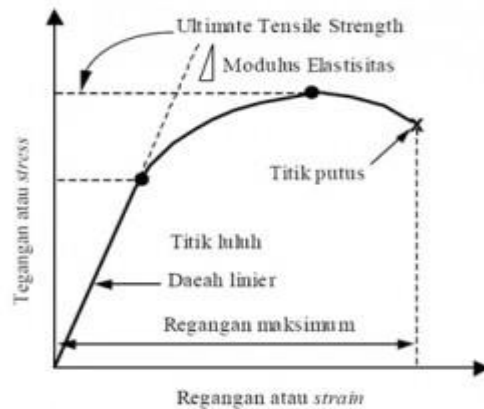
Dimana  $\varepsilon$  = regangan (%)

$L_0$  = panjang “batang uji” mula – mula (mm)

L = panjang “batang uji” saat menerima beban (mm)

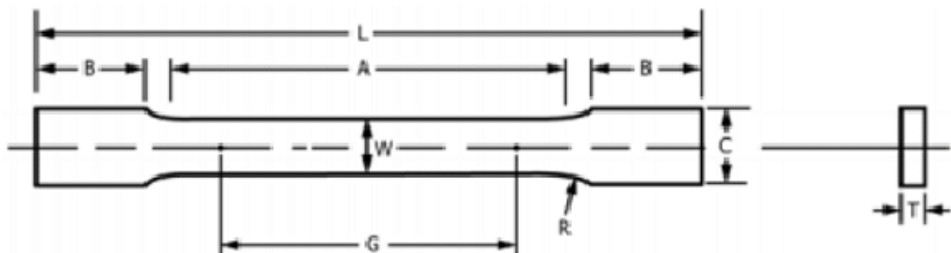
Modulus Elastisitas :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$



Gambar 2. 4 Kurva Tegangan – Regangan

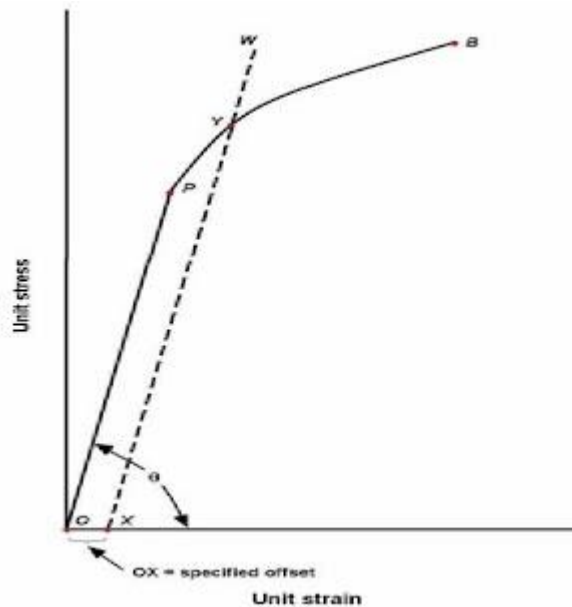
Bentuk bahan yang diuji, untuk logam biasanya dibuat spesimen uji seperti pada gambar berikut :



Gambar 2. 5 Spesimen Uji Tarik ASTM E8/E8M

### 2.6.1 Sifat Mekanik di Daerah Elastis

1. Kekuatan elastik menyatakan kemampuan untuk menerima beban/tegangan tanpa berakibat terjadinya deformasi plastik (perubahan bentuk yang permanen). Kekuatan elastik ini ditunjukkan oleh titik *yield* (besarnya tegangan yang mengakibatkan terjadinya *yield*). Untuk logam – logam yang ulet memperlihatkan terjadinya *yield* dengan jelas, tentu batas ini mudah ditentukan, tetapi untuk logam – logam yang lebih getas dimana *yield* dapat dicari menggunakan offset method. Harga yang diperoleh dengan cara ini dinamakan offse yield strength (kekuatan luluh). Dalam hal ini *yield* dianggap mulai terjadi bila sudah timbul regangan plastic 0,2 % atau 0,35 % (tergantung kesempatan). Secara grafik, offset yield strength dapat dicari dengan menarik garis sejajar dengan garis elastic regangan 0,2 % atau 0,35 % hingga memotong kurva. Titik perpotongan ini menunjukkan *yield*.



Gambar 2. 6 Grafik penentu yield dengan offset method

Kekuatan elastik ini penting sekali dalam suatu perancangan karena tegangan yang bekerja pada suatu bagian tidak boleh melebihi yield point/strength dari bahan, supaya tidak terjadi deformasi plastic.

2. Kekakuan (*stiffness*). Suatu bahan yang memiliki kekakuan tinggi bila mendapat beban (dalam batas elastiknya) akan mengalami deformasi elastik tetapi hanya sedikit saja. Kekakuan ditunjukkan oleh modulus elastisitas (*Young's modulus, E*)

$$E = \frac{\sigma_{el}}{\varepsilon_{el}}$$

Dimana  $E$  = kekakuan ( $\text{kg/mm}^2$ )

$\sigma_{el}$  = tegangan elastis ( $\text{kg/mm}^2$ )

$\varepsilon_{el}$  = regangan elastisitas (%)

Kekakuan juga dapat dinyatakan dengan *poisson's ratio*. Bila batang uji ditarik secara uniaxial ke arah memanjang sebesar  $\varepsilon_x$ , juga akan mengalami regangan ke arah melintang sebesar  $\varepsilon_y$ , poisson ratio didefinisikan sebagai perbandingan antara regangan ke arah melintang dengan regangan ke arah memanjang, pada tegangan yang masih dalam batas elastis.

$$\nu = \frac{-\varepsilon_y}{\varepsilon_x}$$



Dimana  $\nu$  = poisson rasio (%)

$\varepsilon_y$  = regangan kearah melintang

$\varepsilon_x$  = regangan kearah memanjang

Harga negatif diberikan karena regangan ke arah melintang mempunyai harga positif. Harga  $\nu$  untuk logam biasanya berkisar antara 0,25 % dan 0,35 % makin besar harga  $\nu$  maka suatu logam itu makin kurang kaku.

3. Resilien (*Resilience*) menyatakan kemampuan untuk menyerap energi (kerja) tanpa mengakibatkan terjadinya deformasi plastic. Jadi dapat dinyatakan dengan banyaknya energi yang diperlukan untuk mencapai batas elastik. Resilien dinyatakan dengan modulus resilien (*modulus of resilience*) yang didefinisikan sebagai banyaknya energi yang diperlukan untuk meregangkan satu satuan volume bahan hingga sampai batas elastis. Ini dapat dinyatakan secara grafik sebagai luasan di bawah grafik daerah elastik.

$$UR = \frac{1}{2} \sigma_E \cdot \varepsilon_E = \frac{\sigma_E^2}{2E} \text{ (kg/mm}^2\text{)}$$

Dimana UR = modulus resilience (kg/cm<sup>2</sup>)

$\sigma_E$  = tegangan elastisitas (kg/mm<sup>2</sup>)

$\varepsilon_E$  = regangan elastisitas (kg/mm<sup>2</sup>)

E = kekakuan (kgm/mm<sup>2</sup>) Modulus Elastisitas

4. Modulus Elastisitas adalah ukuran kekuatan suatu bahan akan keelastisitasannya. Makin besar modulus, makin kecil regangan elastis yang dihasilkan akibat pemberian tegangan. Modulus elastisitas ditentukan oleh gaya ikat antar atom karena gaya – gaya ini tidak dapat dirubah tanpa terjadi perubahan mendasar pada sifat bahannya maka modulus elastisitas salah satu sifat – sifat mekanik yang tidak dapat diubah. Sifat ini hanya sedikit berubah oleh adanya penambahan paduan, perlakuan panas atau pengerjaan dingin. Secara matematis persamaan *modulus elastic* dapat ditulis :

$$Mo = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Dimana  $\sigma$  = tegangan

$\varepsilon$  = regangan

### 2.6.2 Sifat Mekanik di Daerah Plastis

1. Kekuatan tarik (*Tensile Strength*) menunjukkan kemampuan untuk menerima beban / tegangan tanpa menjadi patah rusak / putus. Ini dinyatakan dengan tegangan maksimum sebelum putus. Kekuatan tarik (*Ultimate Tensile Strength* – UTS) dinyatakan dengan rumus:

$$UTS = \sigma_u = \frac{P_{max}}{A_0}$$

Dimana UTS = kekuatan tarik ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

$P_{max}$  = beban tarik maksimum (kg)

$A_0$  = luas penampang batang uji mula mula ( $\text{mm}^2$ )

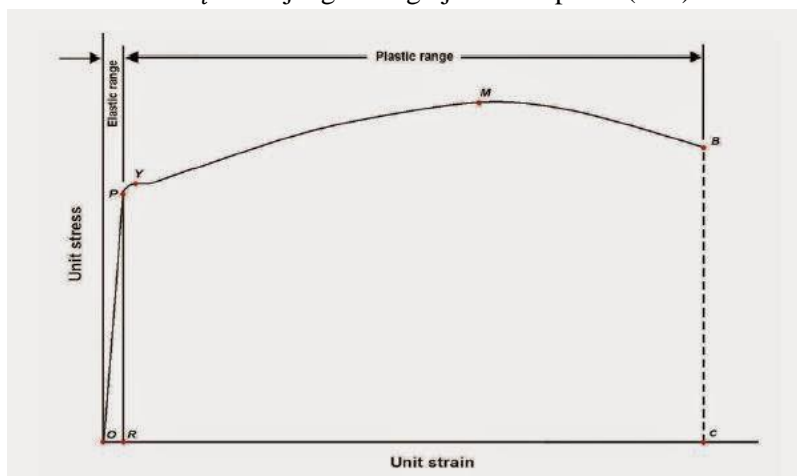
2. Keuletan (*ductility*) menggambarkan kemampuan untuk berdeformasi secara plastis tanpa menjadi patah. Dapat diukur dengan besarnya regangan plastis yang terjadi setelah batang uji putus. Keuletan biasanya dinyatakan dengan persentase perpanjangan (*percentage elongation*):

$$D\alpha = \frac{(L_i - L_0)}{L_0} \times 100 \%$$

Dimana  $D\alpha$  = keuletan (%)

$L_0$  = Panjang batang uji mula – mula (mm)

$L_i$  = Panjang batang uji setelah putus (mm)



Gambar 2. 7 grafik regangan elastis – plastis

Keuletan juga dapat dinyatakan dengan persentase pengurangan luas penampang (*percentage reduction in area*):

$$D\alpha = \frac{(A_0 - A_i)}{A_0} \times 100 \%$$

Dimana  $D\alpha$  = keuletan (%)

$A_0$  = luas penampang batang uji mula – mula ( $\text{mm}^2$ )

$A_i$  = luas penampang batang uji pada patahan ( $\text{mm}^2$ )

3. Ketangguhan (*toughness*) menyatakan kemampuan menyerap energi tanpa mengakibatkan patah, dapat diukur dengan besarnya energi yang diperlukan
-

untuk mematahkan. Ketangguhan dinyatakan dengan modulus ketangguhan (*modulus of toughness* atau *toughness index number*) yang dapat didefinisikan sebagai banyaknya energi yang diperlukan untuk mematahkan satu satuan volume suatu bahan. Secara grafik, ini dapat diukur dengan luasan yang berada dibawah kurva tegangan – regangan dari hasil pengujian pengujian tarik. Ada beberapa pendekatan matematik yang dapat digunakan mengukur / menghitung besarnya modulus ketangguhan UT, yaitu :

- untuk bahan yang ulet (*ductility*)

$$UT = \sigma_u \cdot \varepsilon_t \quad \text{atau}$$

$$UT = \varepsilon_t \cdot (\sigma_u + \sigma_y) / 2$$

- untuk bahan yang getas (*brittle*)

$$UT = 2/3 \sigma_u \cdot \varepsilon_t$$

Dimana UT = modulus ketangguhan (*toughness index number*)

$\sigma_u$  = ultimate tensile strength

$\sigma_y$  = yield point / strength

$\varepsilon_t$  = regangan total pada saat putus

### 2.6.3 Diagram tegangan – regangan sebenarnya

Diagram tegangan – regangan seperti yang diberikan didepan disebut diagram tegangan – regangan normal karena perhitungan tegangan dan regangan tersebut berdasarkan panjang uji dan luas penampang mula – mula (nominal), pada hal setiap saat selalu terjadi perubahan sebagai akibat penarikan yang sedang berlangsung. Dengan demikian seharusnya tegangan dan regangan dihitung berdasarkan luas penampang dan batang uji pada sesaat itu (bukan yang mula – mula). Dari hal ini terlihat bahwa sebenarnya diagram tegangan – regangan normal (kadang – kadang disebut juga diagram tegangan – regangan konvensional) kurang akurat, namun demikian untuk keperluan teknik (*engineering*) pada umumnya dianggap sudah memadai, karena dinamakan juga diagram tegangan – regangan teknik (*engineering*).

Tetapi untuk beberapa keperluan tertentu, seperti misalnya untuk perhitungan pada proses pembentukan (*rolling, forging, dll*) serta untuk perhitungan yang untuk mendetail yang memerlukan ketelitian lebih tinggi akan diperlukan diagram tegangan – regangan sebenarnya (*true stress – true strain diagram*)

Definisi:

Tegangan normal :

$$\sigma = P/A_0$$

Regangan normal :

Tegangan sebenarnya :

$$\sigma_1 = P/A$$

Regangan sebenarnya :

$$\varepsilon = (L - L_0)/L_0$$

$$\varepsilon = \Delta L/L_0$$

$$\varepsilon_1 = (L_1 - L_0)/L_0 + (L_2 - L_1)/L_1 + (L_3 - L_2)/L_2 \dots\dots\dots$$

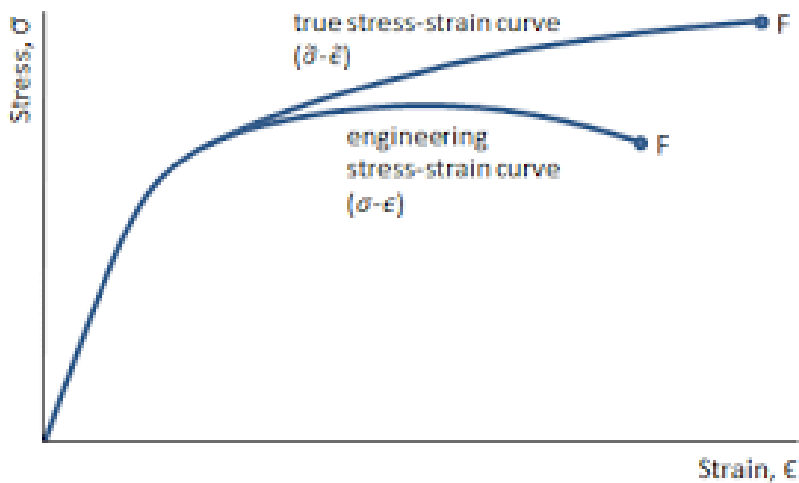
$$\varepsilon_1 = L_0 \int L dL/L = L_0 \ln L = \ln(L/L_0)$$

Hubungan antara tegangan normal dengan tegangan sebenarnya :

$$\sigma_1 = \sigma (1 + \varepsilon)$$

Hubungan antara regangan normal dengan regangan sebenarnya :

$$\varepsilon_1 = b (1 + \varepsilon)$$



Gambar 2. 8 Grafik tegangan regangan sebenarnya

Kedua hubungan diatas hanya berlaku hingga saat terjadinya *necking*, diluar itu maka tegangan dan regangan sebenarnya harus dihitung berdasarkan pengukuran nyata batang uji, beban dan luas penampang setiap saat. Untuk daerah elastis boleh dikatakan tidak ada perbedaan antara tegangan / regangan nominal dengan tegangan / regangan sebenarnya, perbedaan mulai terjadi di daerah plastis. Pada diagram tegangan – regangan normal sesudah melampaui tegangan maximum akan terjadi penurunan, sedang pada diagram tegangan – regangan sebenarnya terus naik hingga putus.

### 2.7 Uji Fatigue

Kelelahan adalah bentuk kegagalan yang terjadi pada struktur yang mengalami tekanan dinamis dan berfluktuasi, dalam keadaan ini mungkin untuk kegagalan terjadi pada tingkat tegangan jauh lebih rendah dari kekuatan tarik atau luluh untuk beban statis. Istilah kelelahan digunakan karena jenis kegagalan ini biasanya terjadi setelah periode yang lama dari tegangan yang berulang atau siklus

ketegangan. Kelelahan adalah penting karena merupakan penyebab terbesar kegagalan logam, kelelahan merupakan bencana besar dan berbahaya terjadi sangat tiba-tiba dan tanpa peringatan.

Kelelahan (*fatigue*) dimulai dengan berkembangnya garis slip. Garis slip terbentuk pada daerah konsentrasi tegangan, secara makro konsentrasi tegangan berada pada daerah yang memiliki perbedaan dimensi, alur tajam, dan cacat permukaan (semacam takik). Sedangkan dalam kerangka mikro konsentrasi tegangan berada pada batas butir struktur mikro. Dengan adanya tegangan bolak balik akan membuat alur yang merupakan awal retak.

Secara umum mekanisme patah lelah terdiri dari tiga tahap yaitu: tahap awal terjadinya retak (*crack initiation*), tahap perambatan retak (*crack propagation*), dan tahap patah akhir yang sering disebut tahap patah statis. Secara makroskopis awal perambatan retakan dimulai dengan terjadinya deformasi plastis setempat yang disebabkan oleh besarnya pemusatan tegangan akibat adanya cacat pada material, antara lain :

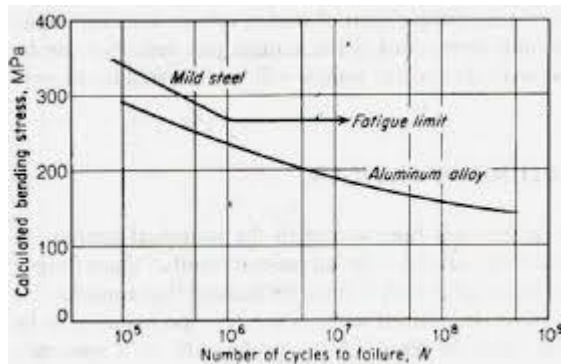
1. Goresan pada permukaan.
2. Retakan pada permukaan atau dekat permukaan.
3. Inklusi, adanya diskontinu akibat adanya logam yang tidak menyatu dengan logam lain dalam satu paduan.

Proses deformasi selalu diawali melalui dislokasi atau cacat bidang, cacat bidang selalu terdapat pada kristal logam adalah cacat pada batas butir (*grain boundary*). Pada batas butir selalu terdapat distorsi baik karena pengaruh tegangan permukaan maupun akibat dari interaksi dengan atom – atom dari kristal tetangganya.

### 2.7.1 Tegangan Uji Fatigue

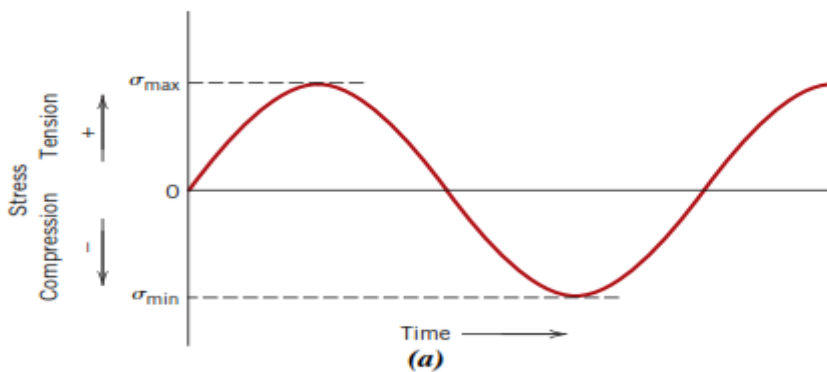
Setelah mengalami sejumlah siklus pembebanan akan terjadi retak mikro dimana pada tahap ini retak mulai mengintip, kemudian terjadi retak makro yang akan merambat sehingga penampang sisa akan menjadi semakin kecil yang pada akhirnya penampang tersebut tidak lagi menahan beban berfluktuasi.

Umur lelah dinyatakan sebagai siklus yang dicapai material sampai material tersebut mengalami patah Lelah dengan pembebanan tertentu. Batas Lelah (*Fatigue limit* atau *endurance limit*) didefinisikan sebagai beban maksimal yang menghasilkan umur lelah tak terhingga.



Gambar 2. 9 Batas lelah logam ferrous dan non-ferrous

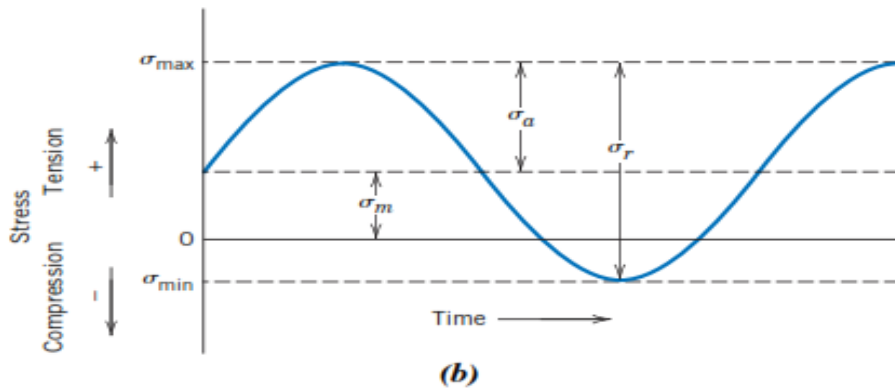
Uji lelah yang sederhana dilakukan dengan memberikan pembebanan atau tegangan yang relatif sederhana, yaitu beban uniaksial atau lenturan. Dengan beban tersebut akan diperoleh tegangan tarik dan tegangan tekan yang berfluktuasi. Tegangan yang diterapkan bersifat aksial (tegangan-kompresi), lentur (bending), atau puntir (*twisting*). Secara umum, tiga mode tegangan-waktu yang berfluktuasi berbeda dimungkinkan. Satu diwakili secara skematis oleh ketergantungan waktu reguler dan sinusoidal pada gambar :



Gambar 2. 10 Reversed stress cycle, dimana tegangan berganti dari tegangan tarik maksimum (+) ke tegangan tekan maksimum (-) dengan magnitude yang sama.

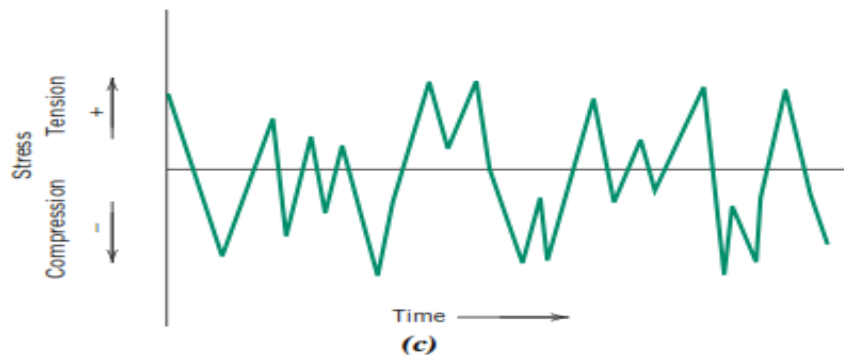
Dimana amplitude simetris tentang tingkat tegangan nol rata-rata, misalnya bergantian dari tegangan tarik maksimum ( $\sigma_{max}$ ) ke tegangan tekan minimum ( $\sigma_{min}$ ) yang sama besarnya, ini disebut sebagai siklus tegangan terbalik. Tipe lain disebut siklus tegangan berulang, diilustrasikan pada gambar :

---



Gambar 2. 11 siklus berulang, dimana tegangan maksimum dan minimum adalah asimetri relative terhadap tingkat tekanan nol, berarti tegangan , rentang tegangan , dan amplitude tegangan ditunjukkan.

Maksima dan minima relative asimetris terhadap tingkat tegangan nol. Akhirnya, tingkat tegangan dapat bervariasi secara acak dalam amplitude dan frekuensi seperti gambar :



Gambar 2. 12 siklus tegangan acak, dengan konvensi tegangan tarik adalah positif dan tegangan tekan negative. Misalnya, untuk siklus tegangan terbalik nilai R adalah -1.

Beberapa parameter yang digunakan untuk mengkarakterisasi siklus tegangan yang berfluktuasi. Amplitudo tegangan berganti tegangan rata-rata  $\sigma_m$  didefinisikan sebagai rata-rata tegangan maksimum dan minimum dalam siklus, atau

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$$

Kisaran tegangan  $\sigma_r$  adalah perbedaan antara  $\sigma_{max}$  dan  $\sigma_{min}$ , yaitu

$$\sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_{min}$$

Amplitudo tegangan adalah setengah dari kisaran tegangan ini, atau

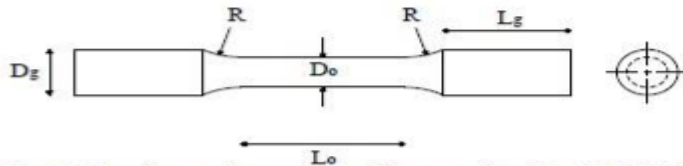
$$\sigma_a = \frac{\sigma_r}{2} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$

Akhirnya, rasio tegangan R adalah rasio amplitudo tegangan minimum dan maksimum:

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$$

Kekuatan tarik memiliki hubungan berbanding lurus dengan kekuatan leleh, semakin besar kekuatan tarik maka semakin besar kekuatan lelehnya suatu material. Kekuatan leleh adalah tegangan maksimum yang bisa diterima material yang dapat menyebabkan kegagalan material pada siklus tertentu.

Pada pengujian *fatigue* terdapat beberapa mesin yang digunakan, salah satunya adalah menggunakan mesin uji *fatigue* rotary banding. Pengujian *fatigue* dengan mesin tersebut menggunakan standar spesimen uji ASTM E466.



Gambar 2. 13 Spesimen Uji Fatigue ASTM E466

## 2.8 Rekristalisasi Dinamik

Rekristalisasi dinamik berlangsung pada rentang regangan selama deformasi yang berkenaan dengan kondisi *steady state* aliran tegangan. Pada baja karbon yang mengalami proses canai, peran rekristalisasi dinamik ini dapat dikatakan kecil. Hal ini berdasarkan bahwa aliran kritis yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi *steady state* aliran tegangan sangat besar. Nukleasi dari rekristalisasi ini akan terbentuk bila regangan kritis ( $\epsilon_c$ ) tercapai, tetapi aliran tegangan tidak menurun pada titik ini dimana tegangan masih naik sampai nilai regangan puncak ( $\epsilon_p$ ), setelah beberapa fraksi rekristalisasi terjadi dan penurunan efek *strain hardening* menurun akibat adanya *recovery* dan rekristalisasi dinamik. Perubahan struktural dari material akan menyebabkan meningkatnya densitas dan energi yang tersimpan pada saat  $\epsilon_c$  dan juga meningkatkan *recovery* dan rekristalisasi dinamik pada saat  $\epsilon_c$ . Pada saat *recovery* dinamik, dislokasi tersusun kembali ke batas bagian butir. Nilai  $\epsilon_p$  tergantung dari parameter Zener Hollomon (Z). Parameter Zener Hollomon adalah fungsi temperatur yang mengimbangi laju regangan.

---

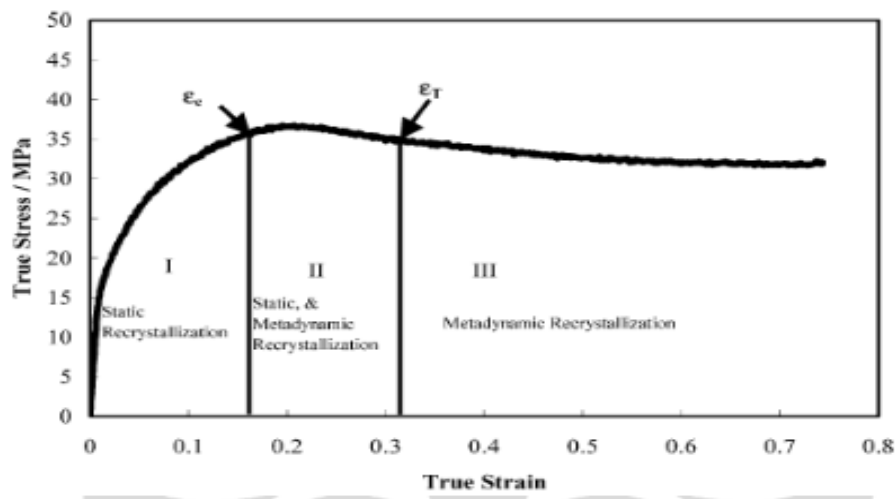


Pada temperatur yang tinggi dengan laju regangan yang rendah rekristalisasi dinamik ( $X_d$ ) akan terjadi. Beberapa penelitian menyatakan bahwa Batasan dari rekristalisasi dinamik terjadi pada  $\varepsilon_c \approx 0,8 \cdot \varepsilon_p$ , dan jika  $\varepsilon \geq \varepsilon_c$  maka efek dari rekristalisasi dinamik terhadap laju tegangan dapat dikembangkan.

## 2.9 Rekristalisasi Statik

Rekristalisasi statik terjadi setelah material mengalami preses deformasi panas dan tidak lagi dipengaruhi oleh beban. Perubahan struktur pada rekristalisasi statik ini lebih stabil bila dibandingkan dengan rekristalisasi dinamik. Setelah deformasi, pelunakan akibat *recovery* dan rekristalisasi statik terjadi dengan waktu dan laju yang tergantung pada kondisi deformasi sebelumnya dan temperatur tahannya.

Proses ini diikuti dengan perubahan tegangan *yield* dan tegangan alir pada deformasi kedua yang diberikan setelah suatu waktu tahan yang berbeda untuk memperoleh indeks tegangan yang tersimpan. Selama proses deformasi panas, baja berada dalam fase autenit. *Flow stress* awalnya akan bertambah sesuai dengan bertambahnya regangan, dengan adanya pengerasan regang dan proses *recovery*. Waktu tercapai regangan kritis  $\varepsilon_c$ , terjadi pelunakan akibat rekristalisasi dinamik dan *flow stress* menurun drastis hingga tercapai keadaan stabil (*steady-state*) setelah interval  $\varepsilon_x$ , dimana terjadi rekristalisasi dari sejumlah besar butir. Puncak *flow stress* terjadi pada rekristalisasi sejumlah butir, sehingga pada regangan puncak  $\varepsilon_p$  *flow stress* selalu lebih tinggi daripada kondisi regangan kritis  $\varepsilon_p$ . Peristiwa rekristalisasi dalam karakteristik aliran tegangan digambarkan sebagai berikut :



Gambar 2. 14 Aliran tegangan dalam proses pelunakan selama deformasi panas, dimana terdapat regangan kritis,  $\epsilon_c$  untuk terjadi rekristalisasi dinamik.

Fraksi rekristalisasi ( $X_v$ ) semakin meningkat seiring dengan waktu dan umumnya membenruk kurva signoidal.

## 2. 10 Strukturmikro

Mikro struktur atau metalografi adalah suatu bentuk susunan struktur yang terbentuk pada material logam dengan ukuran yang sangat kecil dan tidak beraturan, bentuknya berbeda-beda tergantung pada unsur dan proses yang dialami pada saat pembentukan, bentuk strukturnya hanya dapat dilihat bila menggunakan mikroskop optik (Ilham Hatta, 2012). Dari strukturmikro dapat dilihat :

- Ukuran butir dan bentuk butir.
- Distribusi fasa yang terdapat dalam material khususnya logam.
- Pengotor yang terdapat dalam material.

### 2. 10. 1 Metode Perhitungan Ukuran Butir

Menurut ASTM E112-12 ada beberapa metode untuk menghitung menghitung ukuran butir yang salah satunya adalah metode planimetri, dalam metode planimetri tuliskan lingkaran atau persegi panjang dari area yang diketahui (biasanya 5.000 mm<sup>2</sup> untuk menyederhanakan perhitungan) pada mikrograf, monitor atau pada layar groundglass dari metalograf. Pilih perbesaran yang akan memberikan setidaknya 50 butir dalam bidang yang akan dihitung. Jumlah semua bijian termasuk sepenuhnya

---

di dalam daerah yang diketahui ditambah setengah jumlah bijian yang bersilangan dengan lingkaran tersebut.

Magnification Used, $M$	Jeffries' Multiplier, $f$ , to Obtain Grains/mm <sup>2</sup>
1	0.0002
10	0.02
25	0.125
50	0.5
75 <sup>A</sup>	1.125
100	2.0
150	4.5
200	8.0
250	12.5
300	18.0
500	50.0
750	112.5
1000	200.0

Gambar 2. 15 Pengali *Jeffries*

Untuk menghitung besaran butir yaitu dengan mengalikan jumlah butir dan pengali *Jeffries* ( $f$ ) pada gambar diatas. Adapun rumus yang digunakan :

$$G = [3,322 \log (N_a)] - 2,95$$

Dan

$$N_a = f(N_1 + N_2/2)$$

Ket :

$G$  = Besaran butir dirujukke tabel ASTM E112 untuk mencari nilai diameter butir.

$N_a$  = Jumlah butir

$N_1$  = Jumlah butir dalam lingkaran

$N_2$  = Jumlah butir yang bersinggungan dengan garis lingkaran

$f$  = faktor pengali pada tabel *jeffries*

Grain Size No. $G$	$\bar{N}_A$ Grains/Unit Area		$\bar{A}$ Average Grain Area		$\bar{d}$ Average Diameter		$\bar{T}$ Mean Intercept		$\bar{N}_L$ No./mm
	No./in. <sup>2</sup> at 100X	No./mm <sup>2</sup> at 1X	mm <sup>2</sup>	$\mu\text{m}^2$	mm	$\mu\text{m}$	mm	$\mu\text{m}$	
00	0.25	3.88	0.2581	258064	0.5080	508.0	0.4525	452.5	2.21
0	0.50	7.75	0.1290	129032	0.3592	359.2	0.3200	320.0	3.12
0.5	0.71	10.96	0.0912	91239	0.3021	302.1	0.2691	269.1	3.72
1.0	1.00	15.50	0.0645	64516	0.2540	254.0	0.2263	226.3	4.42
1.5	1.41	21.92	0.0456	45620	0.2136	213.6	0.1903	190.3	5.26
2.0	2.00	31.00	0.0323	32258	0.1796	179.6	0.1600	160.0	6.25
2.5	2.83	43.84	0.0228	22810	0.1510	151.0	0.1345	134.5	7.43
3.0	4.00	62.00	0.0161	16129	0.1270	127.0	0.1131	113.1	8.84
3.5	5.66	87.68	0.0114	11405	0.1068	106.8	0.0951	95.1	10.51
4.0	8.00	124.00	0.00806	8065	0.0898	89.8	0.0800	80.0	12.50
4.5	11.31	175.36	0.00570	5703	0.0755	75.5	0.0673	67.3	14.87
5.0	16.00	248.00	0.00403	4032	0.0635	63.5	0.0566	56.6	17.68
5.5	22.63	350.73	0.00285	2851	0.0534	53.4	0.0476	47.6	21.02
6.0	32.00	496.00	0.00202	2016	0.0449	44.9	0.0400	40.0	25.00
6.5	45.25	701.45	0.00143	1426	0.0378	37.8	0.0336	33.6	29.73
7.0	64.00	992.00	0.00101	1008	0.0318	31.8	0.0283	28.3	35.36
7.5	90.51	1402.9	0.00071	713	0.0267	26.7	0.0238	23.8	42.04
8.0	128.00	1984.0	0.00050	504	0.0225	22.5	0.0200	20.0	50.00
8.5	181.02	2805.8	0.00036	356	0.0189	18.9	0.0168	16.8	59.46
9.0	256.00	3968.0	0.00025	252	0.0159	15.9	0.0141	14.1	70.71
9.5	362.04	5611.6	0.00018	178	0.0133	13.3	0.0119	11.9	84.09
10.0	512.00	7936.0	0.00013	126	0.0112	11.2	0.0100	10.0	100.0
10.5	724.08	11223.2	0.000089	89.1	0.0094	9.4	0.0084	8.4	118.9
11.0	1024.00	15872.0	0.000063	63.0	0.0079	7.9	0.0071	7.1	141.4
11.5	1448.15	22446.4	0.000045	44.6	0.0067	6.7	0.0060	5.9	168.2
12.0	2048.00	31744.1	0.000032	31.5	0.0056	5.6	0.0050	5.0	200.0
12.5	2896.31	44892.9	0.000022	22.3	0.0047	4.7	0.0042	4.2	237.8
13.0	4096.00	63488.1	0.000016	15.8	0.0040	4.0	0.0035	3.5	282.8
13.5	5792.62	89785.8	0.000011	11.1	0.0033	3.3	0.0030	3.0	336.4
14.0	8192.00	126976.3	0.000008	7.9	0.0028	2.8	0.0025	2.5	400.0

Gambar 2. 16 Hubungan Ukuran Butir Dihitung untuk Seragam, Berorientasi Acak, Butir Equiaxed.