

## BAB II KAJIAN PUSTAKA

### 2.1. Pengertian Squeeze Casting

*Squeeze casting* adalah kombinasi proses pengecoran dan penempaan yang dilakukan dengan bantuan tekanan pada logam semi padat. Penerapan tekanan pada logam semi padat tersebut bisa mengubah titik cair paduan yang meningkatkan kecepatan pembekuan pada coran dan mengurangi porositas penyusutan coran ( **M. Dhanashekara dan Senthil Kumar ,2014**). Untuk memperoleh produk cor yang memenuhi syarat-syarat ideal bagi suatu *sound-cast*, ada beberapa variabel yang perlu diperhatikan yaitu;

#### a. Volume Cairan Logam (*Melt Volume*)

Diperlukan kontrol yang kuat akurat ketika logam cair dituangkan ke dalam rongga cetak (*die cavity*). Laju pembekuan dipengaruhi oleh volume cairan, Sebuah produk cor-coran yang mempunyai variasi temperatur tuang 650°C, 700°C, dan 750°C dan temperatur cetakan 100°C, 200°C, dan 300°C menunjukkan perubahan serpihan Mg yang semula tebal menjadi tipis dikarenakan terjadinya laju pembekuan, temperatur tuang dan waktu pembekuan. Semakin tinggi temperatur tuang maka yang dihasilkan serpihan Mg semakin tebal yang terdapat oksidasi dikarenakan gas lingkungan seperti oksigen dan hidrogen yang menjadikan serpihan Mg menjadi tipis, serta lambatnya pembekuan menyebabkan logam cair teroksidasi lebih banyak yang ditunjukkan dengan dominan semakin kecilnya serpihan yang dihasilkan pada temperatur tuang yang tinggi. Pada temperatur 750°C dengan temperatur 200°C terjadi pengurangan serpihan garis tipis lebih dominan, berarti dengan adanya laju pembekuan dan waktu pembekuan yang cukup lama membuat magnesium lebih mudah teroksidasi yang membuat laju korosi semakin cepat. dengan penambahan Mg pada proses pengecoran membuat sifat mekanik suatu bahan semakin meningkat. Jumlah Mg yang berkurang mengakibatkan sifat reaksi oksidasi Mg cepat terjadi dan cepat menguap pada logam AlMg<sub>2</sub> mencapai titik lebur. Menurunnya unsur Mg dapat menurunkan kekuatan logam AlMg ( **Apris. L. K. W, dkk, 2016**).

#### b. Beban Penekanan (*Pressure Load*)

Beban penekanan adalah beban yang diberikan untuk penekanan pada saat coran dalam kondisi semi padat. Variasi beban penekanan dapat mempengaruhi sifat mekanik produk coran. Rentang tekanan normal adalah 50 – 140 MPa, tergantung pada bentuk geometri komponen serta sifat mekanis yang



dibutuhkan. Tetapi dimungkinkan tekanan minimum adalah 40 MPa. Tekanan yang sering digunakan 70 MPa. Beban penekanan didapat dari pada saat cairan telah dimasukkan kedalam cetakan. Kemudian ditekan agar mendapatkan produk coran yang padat. Bentuk coran dengan temperatur cairan 850°C kemudian di tekan dengan variasi 10 - 30 Mpa (**R. N. Raed, dkk, 2013**).

c. Temperatur Tuang (*Casting Temperature*)

Temperatur ini tergantung pada jenis paduan dan bentuk coran/komponen. Dalam proses penuangan diperlukan pengaturan temperatur penuangan, hal ini karena temperatur penuangan banyak sekali mempengaruhi kualitas coran, temperatur penuangan yang terlalu rendah menyebabkan pembekuan pendek, kecairan yang buruk dan menyebabkan kegagalan pengecoran. Selain itu dalam penuangan penting sekali dilakukan dengan cepat. Waktu penuangan yang cocok perlu ditentukan dengan mempertimbangkan berat dan tebal coran, sifat cetakan, dll. Temperatur tuang diukur dari proses penuangan pertama di mulut cetakan. Temperatur ini berpengaruh terhadap jenis paduan dan bentuk coran/komponen. Untuk benda cor dengan tekanan 25 MPa, temperatur cetakan 250°C, temperatur yang di pakai bervariasi antara 660°C – 750°C di atas temperatur *liquidus*. Pada *squeeze casting* Al-Si4Cu terdapat beban penekanan 10 – 30 MPa dengan temperatur tuang yang 750, 800, dan 850°C dengan durasi penekanan 30 detik, percobaan korosi dilakukan dengan beberapa waktu dan tekanan yang divariasikan. Pengujian korosi menggunakan larutan NaCl 3,5%. Dari hasil pengujian polarisasi didapat temperatur yang tinggi meningkatkan laju korosi meskipun parameter *squeeze casting* menurunkan kecepatan arus sekitar 100 mV dan tekanan yang semakin besar dapat dapat menurunkan laju korosi. Semakin halus mikrostruktur maka ketahanan korosinya semakin menurun. Pada pengujian ini korosi yang terjadi berupa korosi sumuran (**Yaseen. R. S, Hussein. H. A, 2015**). Pada beban penekanan 60 MPa dengan variasi temperatur tuang 680, 700, dan 720°C didapat ketebalan 0,02 mm dengan diameter 0.10. analisa struktur mikro menghasilkan bahwa temperatur tuang yang rendah dapat menyempurnakan struktur dendrite dan membentuk eutektik dibatas dendrite (**Zhang. X, dkk, 2017**). Dalam penelitian ini, A356 ditambahkan dengan skandium yang dibuat dengan menggunakan gravitasi die-casting dan efek dari jumlah tersebut skandium pada struktur mikro dan sifat mekanis adalah diselidiki, mengacu pada kondisi perlakuan panas. Berbasis pada penelitian ini, kesimpulan

---



berikut dapat ditarik: untuk ukuran butir A356 dapat disempurnakan dengan menggunakan Sc, dikurangi 8% pada 0,2% berat, tetapi untuk peningkatan lebih lanjut dalam Sc wt.%, ukuran butir tidak berkurang secara signifikan. Dengan menerapkan perlakuan panas, ukuran butir 0,2% berat Sc berkurang hingga 60% dan tidak berkurang secara signifikan setelah itu. Dengan menerapkan perlakuan panas, kekuatan tarik utama (UTS) sebesar 0,6% berat Sc membaik menjadi 338,0 MPa, yang mana peningkatan 52% atas panas yang dirawat A356 murni. Untuk sebuah tujuan praktis, menggunakan 0,4% berat dari Sc seharusnya mengarah ke pencapaian kekuatan tarik di atas 300,0 MPa, jika perlakuan panas diterapkan. Hal ini menunjukkan bahwa microhardness memiliki signifikan perbaikan: sekitar 50% peningkatan, untuk 0,4% berat Sc, baik untuk yang tidak diberi perlakuan panas maupun yang diberi perlakuan panas sampel. Pada 0,6% berat Sc, microhardness tidak ditingkatkan lebih lanjut (**Ying Pio Lim, dkk, 2017**).

d. Temperatur Perkakas (*Tooling Temperature*)

Temperatur normal adalah 190 – 315°C. Untuk produk cor yang mempunyai penampang relatif tebal, rentang temperatur ini dapat diturunkan. Biasanya temperatur punch diatur 15 – 30°C dibawah temperatur die terendah untuk memungkinkan adanya kelonggaran atau ventilasi yang memadai diantara keduanya. Kelonggaran yang berlebihan antara punch dan die mengakibatkan erosi pada permukaan keduanya. Untuk produk cor yang mempunyai penampilan relatif tebal, rentang temperatur ini dapat diturunkan. Biasanya temperatur *die* dan *punch* dengan variasi 220°C - 330°C menggunakan sprayer kemudian ditahan 10 menit supaya temperaturnya merata di seluruh *die*.

e. Waktu tunggu (*Time Delay*)

Adalah lamanya waktu yang diukur dari saat pertama penuangan logam cair ke dalam rongga cetak hingga saat permukaan *punch* menyentuh dan mulai menekan permukaan logam cair. Bentuk penampang yang kompleks memerlukan waktu yang cukup bagi logam cair mengisi keseluruhan rongga cetakan. Untuk itu perlu adanya tenggang waktu yang cukup sebelum *punch* menyentuh dan menekan logam cair. Hal ini untuk menghindari terjadinya porositas akibat penyusutan (*shrinkage porosity*).

f. Batas Tekanan (*Pressure Level*)

Rentang tekanan normal adalah 50 – 140 MPa, tergantung pada bentuk geometri komponen serta sifat mekanis yang dibutuhkan. Tetapi dimungkinkan

---



tekanan minimum adalah 40 MPa. Tekanan yang sering digunakan 70 MPa. Beban penekanan didapat dari pada saat cairan telah dimasukkan kedalam cetakan. Kemudian ditekan agar mendapatkan produk coran yang padat. Bentuk coran dengan temperatur cairan 850°C kemudian di tekan dengan variasi 10 - 30 Mpa (R. N. Raed, dkk, 2013).

g. Durasi Penekanan (*Pressure Duration*)

Durasi penekanan dihitung dari saat punch di titik terendah sampai saat punch diangkat (penekanan dilepaskan). Untuk benda cor dengan berat hingga 9 kg, durasi penekanan yang sering dipakai bervariasi antara 30 – 120 detik. Akan tetapi biasanya durasi ini juga tergantung pada bentuk geometri coran yang diinginkan. Untuk material komposit pemberian tekanan setelah pembekuan (*solidification*) tidak memperbaiki sifat, tetapi hanya menambah waktu siklus saja.

h. Pelumasan (*Lubrication*)

Proses squeeze casting membutuhkan pelumas pada permukaan dies untuk memudahkan proses pengambilan produk cor dari cetakannya. Sistem pelumasan ini jangan sampai menutupi lubang ventilasi yang ada pada dies. Untuk paduan aluminium, magnesium, dan tembaga, permukaan dies biasanya disemprot dengan pelumas koloidal graphite.

i. Kecepatan Pengisian (*Filling rate*)

Makin rendah kecepatan pengisian akan menyebabkan makin tingginya kemungkinan untuk mendapatkan aliran *laminar*. Akan tetapi kecepatan pengisian yang terlalu rendah dapat menyebabkan kehilangan panas (*heat loss*) yang besar dan berakibat pada terjadinya premature *solidification* serta *cold shuts*. Oleh karena itu perlu ditentukan kecepatan pengisian yang optimal, sehingga aliran pengisian menjadi *laminar* dan tidak terjadi *turbulensi*. Kecepatan pengisian 2 cm/s -16 cm/s (Ndaliman, M. B dan Pius, A. P. 2013).

## 2.2. Beban Tenekanan (*pressure load*) terhadap sifat mekanik.

Beban penekanan adalah beban yang diberikan untuk penekanan pada saat coran dalam kondisi semi padat. Beban penekanan yang berbeda dapat mempengaruhi sifat mekanik produk coran. Parameter yang mempengaruhi diantaranya adalah besar tekanan, waktu penahanan penekanan, suhu pemanasan awal cetakan, waktu antara penuangan dan penekanan, temperatur penuangan logam dan temperatur peleburan dari logam tersebut. Dari sini dapat diketahui bahwa salah satu parameter penting untuk menurunkan porositas dan meningkatkan kekuatan coran adalah besar penekanan pada logam cair yang berada dalam cetakan logam. Kekuatan tarik dan porositas Paduan Aluminium die-casted Al-Mg-Si dengan

---



berbagai tekanan diterapkan diselidiki. Al-Mg-Si mencair dalam wadah induksi listrik dengan suhu 850 derajat Celcius. Aluminium cair dituangkan dalam cetakan logam yang dipanaskan di 150 derajat Celcius. Aluminium cair ditekan oleh plunger dengan tekanan 0,1, 10, 30, dan 50 MPa dan ditahan selama 5 menit. Setelah aluminium dipadatkan, spesimen untuk kekuatan tarik dan uji porositas dikerjakan. Uji kekuatan tarik, porositas dan mikro dilakukan. Hasil uji tarik dan porositas menunjukkan bahwa semakin tinggi tekanan plunger, porositas menjadi lebih rendah dan kekuatan tarik spesimen menjadi lebih tinggi. Kekuatan tarik maksimum terjadi pada spesimen yang ditekan dalam 50 MPa. Ini terjadi karena porositas minimum dan butiran kecil mikro dalam spesimen. **(Yudy Surya Irawan, dkk, 2013)** .

Proses pemerasan menghasilkan produk akhir yang akurat dengan kualitas yang baik. Ini hasil struktur mikro terlihat lebih padat dan homogen dan memiliki sifat mekanik yang baik bila dibandingkan dengan pengecoran lainnya. Bahan daur ulang yang digunakan adalah 25 kg paduan aluminium piston, 25 kg dan roda 25 kg dalam bentuk campuran (rem, penutup mesin, dan perabotan rumah tangga) yang dilebur di unit pengolahan. Proses sistem pemadatan dilakukan dengan teknik pengecoran langsung. Logam cair dituangkan ke dalam cetakan pada suhu 750 ° C, dan kemudian ditekan selama 60 hingga 70 detik. Proses tekanan 30 MPa diterapkan selama durasi 75 detik. Proses tekanan diulang pada 50,70,90,110 MPa, 130 dan 150 MPa dan bahan yang dicor itu dikeluarkan dari pengecoran tubuh dalam cetakan. Komposisi hasil uji aluminium daur ulang adalah 84,75% Al dan 8,985% Si, dengan kekerasan permukaan 130 MPa pada tekanan HBN 89,74. Proses pengecoran peras meningkatkan kekerasan permukaan hingga 22%. Kekerasan permukaan peras dipengaruhi oleh temperatur penuangan, tekanan waktu dan penekanan gaya. Struktur mikro material cenderung naik dan memendek dengan meningkatnya tekanan yang diterapkan. **(Taufiqurrahman, dkk, 2013)**.

. Teknik pengadukan dan penekanan berhasil digunakan untuk membuat komposit matriks aluminium hibrida (LM6) yang mengandung partikel SiC dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Partikel penguat ditambahkan ke dalam matriks aluminium cair dan campuran komposit dengan menerapkan tekanan menggunakan pers hidrolik. Pengaruh tekanan pemerasan (30 - 120 MPa) pada sifat mekanik dari paduan aluminium LM6 dan komposit. Spesimen disiapkan dari hasil proses casting dan dikenakan pengaruh terhadap karakterisasi mikrostruktur dan mekanis. Karakterisasi mikrostruktur menunjukkan bahwa hasil pengujian menjadikan ukuran butir menurun dengan meningkatnya tekanan perasan. Kepadatan komposit meningkat dengan meningkatnya tekanan perasan, dan menyebabkan porositas menurun. Sifat-sifat tarik seperti kekuatan luluh, kekuatan tarik akhir komposit meningkat dengan

---



meningkatnya tekanan perasan dan mencapai nilai maksimum pada tekanan 90 MPa tetapi elongasi menurun. Permukaan fraktur tarik dari spesimen komposit menunjukkan mode mekanisme fraktur. ( **M. Kamaraj and A. Ramesh, 2015**).

Pengecoran squeeze atau yang sering juga disebut penempaan logam cair adalah proses dimana logam cair dibiarkan membeku dalam cetakan yang diberi tekanan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh tekanan pengecoran squeeze terhadap kekuatan tarik dan mikrostruktur pada AL-AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> komposit. Dalam penelitian ini penulis memvariasikan tekanan 100 Mpa, 120 Mpa, 140 MPa dan persentase berat alumina pada 5%, 10% dan 15%. Sehingga penelitian ini mendapatkan hasil uji tarik paling tinggi pada spesimen dengan campuran berat alumina 10% dan tekanan 140 MPa dengan hasil rata-rata 215 MPa, untuk jarak dendritnya menghasilkan 17,62  $\mu\text{m}$ . Hal ini menunjukkan bahwa penambahan alumina pada komposit Al-AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> akan meningkatkan kekuatan pada penambahan 10% berat alumina menurut (**Sri Mukyo Bondan Respati, dkk, 2016**)

Pengecoran squeeze adalah proses pengecoran dimana logam cair dibekukan dibawah tekanan tinggi dengan menggunakan tenaga hidrolik, proses ini pada dasarnya mengkombinasikan keuntungan dari proses tempa dan pengecoran. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh tekanan terhadap struktur mikro dan kekerasan pada proses pengecoran squeeze pada paduan aluminium daur ulang pada produksi kampas rem sepeda motor. Paduan dilebur pada tungku peleburan dan dituang pada temperatur 700°C pada cetakan yang dipanaskan pada temperatur 400°C, kemudian diberikan variasi tekanan 125,71 MPa, 188,57 MPa dan 251,43 MPa. Hasil pengujian menunjukkan bahwa semakin tinggi tekanan yang diberikan dapat mengurangi cacat penyusutan, yang mengakibatkan kekuatan sifat mekanik meningkat menurut (**Muhammad Syaiful Nurkholiq, dkk**)

Pengembangan proses pengecoran alternatif sangat penting untuk tingginya permintaan komponen magnesium ringan yang akan digunakan dalam industri otomotif, yang sering mengandung ketebalan bagian yang berbeda. Memeras pengecoran dengan keunggulan yang melekat telah disetujui untuk kemampuan meminimalkan porositas gas dalam paduan magnesium. Untuk desain teknik canggih aplikasi otomotif ringan magnesium, sangat penting untuk memahami efek ketebalan bagian pada sifat mekanik paduan magnesium pemerasan cor. Dalam penelitian ini, magnesium alloy AM60 dengan ketebalan bagian yang berbeda dari 6, 10 dan 20 mm pemerasan bawah tekanan diterapkan dari 30 MPa diselidiki. Pemerasan yang disiapkan untuk spesimen AM60 diuji tarik pada saat temperature. Hasil menunjukkan bahwa sifat mekanik termasuk kekuatan luluh (YS), kekuatan tarik utama (UTS) dan perpanjangan (A) menurun dengan peningkatan ketebalan

---



bagian pemerasan AM60. Analisis mikro menunjukkan bahwa peningkatan dalam perilaku tarik dari pemerasan AM60 terutama disebabkan oleh tingkat porositas gas rendah dan structure butir halus yang dihasilkan dari variasi laju pendinginan dari ketebalan bagian yang berbeda. Simulasi numerik (MagmaSoft®) digunakan untuk menentukan tingkat solidifikasi setiap langkah, dan hasil simulasi menunjukkan bahwa tingkat pemadatan paduan menurun dengan peningkatan ketebalan bagian. Tingkat solidifikasi dihitung mendukung pengamatan eksperimental pada perkembangan struktur butir. Menurut (Xuezhi Zhang, dkk, 2012).

Makalah ini melaporkan penelitian di mana upaya telah dilakukan untuk mengoptimalkan parameter pemerasan pemerasan seperti pemerasan tekanan, suhu mati, suhu tuang dan waktu pemerasan untuk memperoleh kekuatan benturan maksimum paduan kuningan menggunakan desain metode eksperimen Taguchi. Signal to Noise ratio menggunakan metode yang lebih tinggi - lebih baik dan Analisis Varians dilakukan untuk menganalisis data eksperimen yang dihasilkan. Berdasarkan investigasi eksperimental yang optimal kondisi (seperti tekanan mati: 120MPa, suhu mati: 100°C, menuangkan suhu: 1000°C dan peras waktu: 45 detik) diperoleh untuk mendapatkan nilai maksimum kekuatan tumbukan paduan kuningan tuang.

### 2.3. Volume Cairan Logam (*Melt Volume*)

Volume cairan sangat berpengaruh pada hasil coran yang berhubungan dengan laju pembekuan coran. Diperlukan kontrol yang kuat untuk mengatur akurasi pada saat cairan logam dituangkan kedalam rongga cetak (*die cavity*).

Penelitian menurut (S. Seifeddine, 2009) pengaruh laju pembekuan pada aluminium A380, berpengaruh pada hasil produk coran. Waktu laju pembekuan yang cepat kekerasan material semakin tinggi akan tetapi keuletannya berkurang. (L.A. Dobrzanski, 2007) meneliti pengaruh perbedaan laju pembekuan pada saat melakukan proses pengecoran. Semakin cepat laju pembekuan akan meningkatkan sifat mekanik suatu bahan salah satunya kekerasannya, dibalik kekerasannya yang meningkat terdapat nilai keuletan yang menurun. Hal ini dibuktikan bahwa volume cairan sangat berpengaruh pada sifat mekanik hasil coran. ini berkaitan selama proses waktu pembekuan akan terjadi proses pembentukan struktur mikro, semakin cepat laju pembekuan akan meningkatkan sifat mekanik suatu bahan terutama pada kekerasannya. Pada aluminium paduan Al-Si-Cu laju pembekuan yang cepat dapat meningkatkan kekerasan, yaitu 68,48 HRF untuk laju 0,14°C/s., 70,63 HRF untuk laju 0,46°C/s serta 74,58°C/s yang berarti semakin cepat laju pembekuan nilai kekerasan semakin meningkat.

---



#### 2.4. Perlakuan panas T6 (*Heat Treatment*)

Menurut (Guoping Liu, 2017) alumunium 6101/A356 yang dilakukan proses perlakuan panas T6 (540 °C selama 5 jam, didinginkan di dalam air dingin dan penuaan pada 175 °C selama 4 jam) dapat memperbaiki sifat mekanis dan mikrostruktur yang terdiri dari struktur butir yang halus

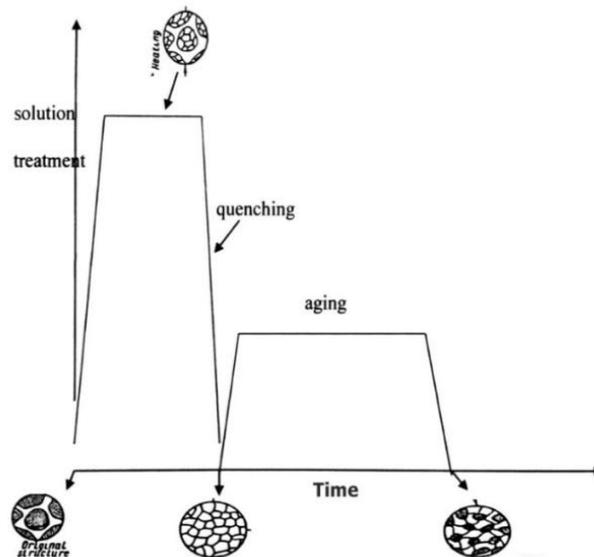
Perlakuan panas pada alumunium paduan dilakukan dengan memanaskan sampai terjadi fase tunggal kemudian ditahan beberapa saat dan diteruskan dengan pendinginan cepat hingga tidak sempat berubah ke fase lain. Jika bahan tadi dibiarkan untuk jangka waktu tertentu maka terjadilah proses penuaan (*aging*). Perubahan akan terjadi berupa presipitasi (*pengendapan*) fase kedua yang dimulai dengan proses nukleasi dan timbulnya klaster atom yang menjadi awal dari presipitat. Presipitat ini dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasannya. Proses ini merupakan proses *age hardening* yang disebut *natural aging*. Jika setelah dilakukan pendinginan cepat kemudian dipanaskan lagi hingga di bawah temperatur solvus (*solvus line*) kemudian ditahan dalam jangka waktu yang lama dan dilanjutkan dengan pendinginan lambat di udara disebut proses penuaan buatan (*artificial aging*).

Salah satu cara perlakuan panas pada logam paduan alumunium adalah dengan penuaan keras (*age hardening*). Melalui penuaan keras, logam paduan alumunium akan memperoleh kekuatan dan kekerasan yang lebih baik. Dahulu orang menyebut penuaan keras dengan sebutan pemuliaan atau penemperan keras. Penamaan tersebut kemudian dibakukan menjadi penuaan keras karena penemperan keras pada logam paduan alumunium berbeda dengan penemperan keras yang berlangsung pada penemperan keras baja.

Paduan alumunium yang dapat ditua keraskan atau di *age hardening* dibedakan atas paduan alumunium yang dapat ditua keraskan dalam keadaan dingin dan paduan alumunium yang dapat ditua keraskan dalam keadaan panas. Penuaan keras berlangsung dalam tiga tahap.

Tahapan perlakuan panas T6 (*Age Hardening*) adalah :

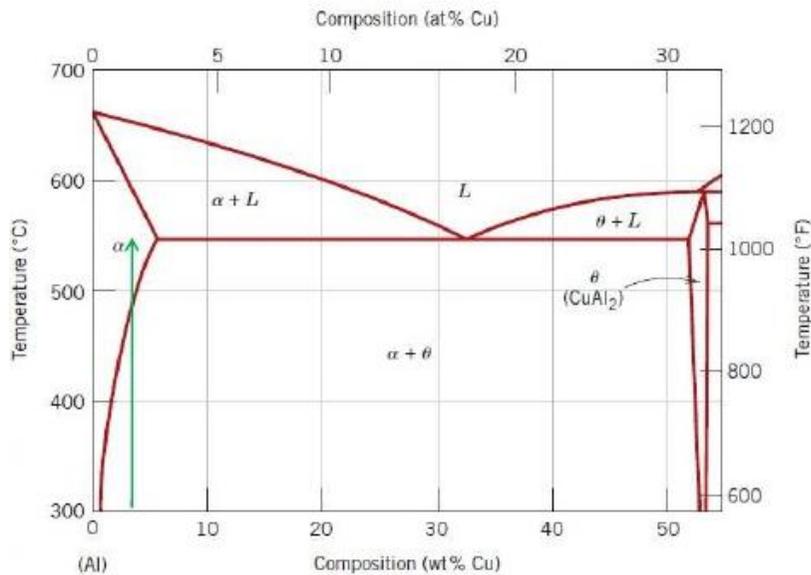
1. *Solution treatment*
2. *Quenching*
3. *Aging*



**Gambar 2.1.** Siklus Perlakuan Panas T6

#### 2.4.1. Perlakuan Panas Pelarutan (*Solution Heat Treatment*).

Tahap pertama dalam proses age hardening yaitu *solution heat treatment* atau perlakuan panas pelarutan. *Solution heat treatment* yaitu pemanasan logam aluminium dalam dapur pemanas dengan temperatur 550°C - 560°C dan dilakukan penahanan atau *holding* sesuai dengan jenis dan ukuran benda kerja (Schonmetz, 1990). pada tahap *solution heat treatment* terjadi pelarutan fasa-fasa yang ada, menjadi larutan padat. Tujuan dari *solution heat treatment* itu sendiri yaitu untuk mendapatkan larutan padat yang mendekati homogen.



**Gambar 2.2.** Diagram fasa perlakuan panas Al-Cu

#### 2.4.2. Pendinginan Cepat (*Quenching*)

*Quenching* atau pendinginan cepat, bertujuan mempertahankan larutan padat yang telah terbentuk, dapat pula dikatakan bahwa proses ini berguna untuk menahan atom-atom yang larut dalam atom pelarut. Jadi ketika paduan didinginkan dari temperatur pelarut dalam keadaan cepat. Proses pembentukan presipitat dalam aluminium terjadi dengan cepat pada temperatur 260-400°C. Walaupun pendinginan cepat akan menciptakan tegangan sisa dan distorsi tetapi ini juga menjadi suatu pertimbangan tersendiri pada setiap proses desain paduan.

#### 2.4.3. Tahapan Penuaan (*Aging*).

*Aging* dapat dilakukan dengan membiarkan larutan lewat jenuh itu pada temperatur kamar selama beberapa waktu. Dinamakan *natural aging* atau dengan memanaskan kembali larutan lewat jenuh itu ke temperatur di bawah garis solvus dan dibiarkan pada temperatur tersebut selama beberapa saat. Dinamakan *artificial aging* Bila *aging* temperatur terlalu tinggi dan atau *aging time* terlalu panjang maka partikel yang terjadi akan terlalu besar (sudah mikroskopik) sehingga efek penguatannya akan menurun bahkan menghilang sama sekali, dan ini dinamakan *over aged*.

Setelah dilakukan pendinginan cepat kemudian dipanaskan lagi hingga dibawah temperatur solvus (*solvus line*) kemudian ditahan dalam jangka waktu yang lama dan dilanjutkan dengan pendinginan lambat di udara. Perubahan sifat-sifat

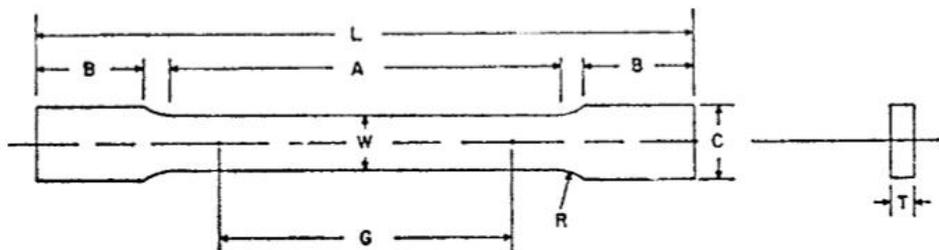
dengan berjalannya waktu pada umumnya dinamakan *aging* atau penuaan. Aging atau penuaan pada logam paduan dibedakan menjadi dua, yaitu penuaan alami (*natural aging*) dan penuaan buatan (*artificial aging*).

*Aging* (perlakuan penuaan) yaitu perlakuan panas dengan menahannya pada suatu temperatur tertentu (temperatur kamar atau temperatur dibawah *solvus line*/batas pelarut) untuk jangka waktu tertentu. Penuaan dapat dibagi menjadi dua yaitu :

- 1) Penuaan yang dilakukan dengan membiarkan larutan padat jenuh itu pada temperatur kamar selama beberapa waktu, dinamakan *natural aging* yaitu penuaan yang terjadi secara alamiah.
- 2) Penuaan dengan memanaskan kembali larutan padat jenuh itu kesuatu temperatur di bawah garis *solvus* dan dibiarkan pada temperatur tersebut selama beberapa saat, dinamakan *artificial aging* (*aging* buatan/*aging treatment*).

## 2.5. Pengujian Tarik

Uji tarik mungkin adalah cara pengujian bahan yang paling mendasar. Pengujian ini sangat sederhana, tidak mahal dan sudah mengalami standarisasi di seluruh dunia, misalnya di Amerika dengan ASTM E8.



**Gambar 2.3.** Spesimen Uji Tarik ASTM E8

Untuk dapat digunakan menggambarkan sifat bahan secara umum, maka grafik  $P - \Delta L$  harus dijadikan grafik lain yaitu suatu diagram Tegangan – Regangan (Stress – strain diagram), disebut juga suatu diagram  $\sigma - \epsilon$ , kadang-kadang juga disebut Diagram Tarik. Pada saat batang uji menerima beban sebesar  $P$  (kg) maka batang uji (yaitu panjang uji) akan bertambah sebesar  $\Delta L$ (mm). Pada saat itu pada batang uji bekerja tegangan yang besarnya:

$$\sigma = P_{\text{maks}} / A_0$$

dimana  $\sigma$  = tegangan ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

$P$  = beban tarik (kg)

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

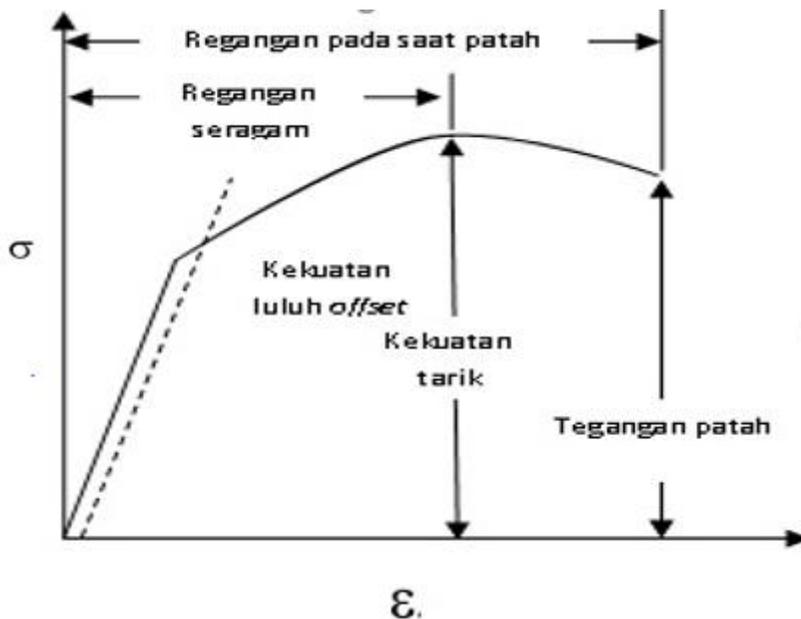
Juga pada saat itu pada batang uji terjadi regangan yang besarnya :

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

dimana  $\varepsilon$  = regangan (%)

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

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

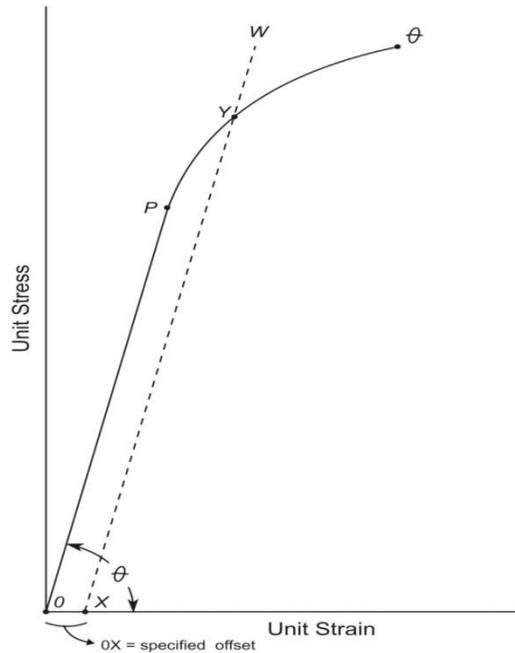


Gambar 2.4. Grafik Tegangan-Regangan.

### 2.5.1. Sifat mekanik di daerah elastik

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 dengan menggunakan offset method. Harga yang diperoleh dengan cara ini dinamakan offset yield strength (kekuatan luluh). Dalam hal ini yield dianggap mulai terjadi bila sudah timbul regangan plastik sebesar 0,2 % atau 0,35 % (tergantung kesempatan). Secara grafik, offset yield strength

dapat dicari dengan menarik garis sejajar dengan garis elastik dari titik regangan 0,2 % atau 0,35 % hingga memotong kurva. Titik perpotongan ini menunjukkan yield.



**Gambar 2.5.** Grafik penentuan 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 plastik.

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)

$$E = \sigma_{el} / \varepsilon_{el} \quad (\text{kg/cm}^2)$$

dimana E = kekakuan (kg/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_{el}$  = tegangan elastis (kg/mm<sup>2</sup>)

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

Kekakuan juga dapat dinyatakan dengan Poisson's ratio. Bila batang uji ditarik secara uniaxial ke arah memanjang maka disamping akan terjadi regangan ke arah memanjang sebesar  $\varepsilon_x$ , juga akan mengalami regangan ke



arah melintang yaitu sebesar  $\epsilon_y$ , Poisson ratio didefinisikan sebagai perbandingan antara regangan ke arah melintang dengan regangan ke arah memanjang, pada tegangan yang masih dalam batas elastik

$$\nu = - \epsilon_y / \epsilon_x \quad (\%)$$

dimana  $\nu$  = poisson rasio (%)

$\epsilon_y$  = regangan ke arah melintang

$\epsilon_x$  = regangan ke arah memanjang

Harga negatif diberikan karena regangan ke arah melintang mempunyai harga negatif sedang ke arah memanjang mempunyai harga positif.

Harga  $\nu$  untuk logam biasanya berkisar antara 0,25% dan 0,35.% makin besar harga  $\nu$  suatu logam maka logam itu makin kurang kaku.

3. Resilien (Resilience) menyatakan kemampuan untuk menyerap energi (kerja) tanpa mengakibatkan terjadinya deformasi plastik. 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 elastik. Ini dapat dinyatakan secara grafik sebagai luasan di bawah grafik daerah elastik

$$UR = \frac{1}{2} \sigma_E \cdot \epsilon_E = \sigma_E^2 / 2E \quad (\text{kg/cm}^2)$$

dimana UR = tmodulus resilience (kg/mm<sup>2</sup>)

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

$\epsilon_E$  = 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 elastik 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 sebagai berikut.

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

Dimana,  $\sigma$  = tegangan

$\epsilon$  = regangan

### 2.5.2. Sifat mekanik didaerah plastis

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

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

dimana UTS = kekuatan tarik (kg/mm<sup>2</sup>)

P<sub>max</sub> = beban tarik maximum (kg)

A<sub>0</sub> = luas penampang batang uji mula-mula (mm<sup>2</sup>)

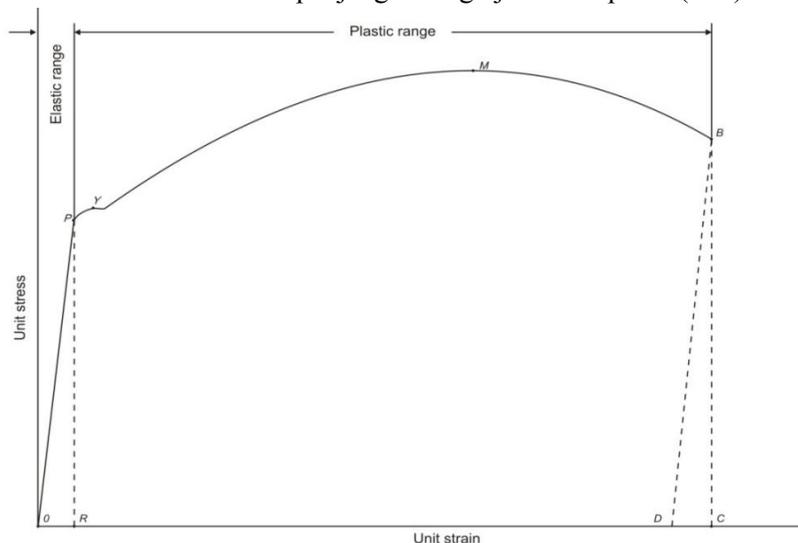
2. Keuletan (ductility) menggambarkan kemampuan untuk berdeformasi secara plastis tanpa menjadi patah. Dapat diukur dengan besarnya regangan plastis yang terjadi setelah batang uji putus. Keuletan biasanya dinyatakan dengan persentase perpanjangan (percentage elongation) :

$$D\alpha = (L_i - L_0)/L_0 \times 100 \%$$

dimana D $\alpha$  = keuletan (%)

L<sub>0</sub> = panjang batang uji mula-mula (mm)

L<sub>i</sub> = panjang batang uji setelah putus (mm)



**Gambar 2.6.** Grafik regangan elastis-plastis.

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

$$D\alpha = (A_0 - A_i)/A_0 \times 100 \%$$

dimana D $\alpha$  = keuletan (%)



$A_o$  = 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 tarik.

Ada beberapa pendekatan matematik yang dapat digunakan mengukur/menghitung besarnya modulus ketangguhan UT, yaitu :

- untuk bahan yang ulet (ductile) :

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

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

- untuk bahan yang getas (brittle)

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

Dimana :

UT = modulus ketangguhan (toughness index number)

$\sigma_u$  = ultimate tensile strength

$\sigma_y$  = yield point/strength

$\epsilon_t$  = regangan total pada saat putus

### 2.5.3. Diagram tegangan – regangan sebenarnya

Diagram tegangan – regangan seperti yang dibicarakan 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 lebih mendetail yang memerlukan ketelitian lebih tinggi akan diperlukan diagram tegangan – regangan sebenarnya (true stress – true strain diagram).

Definisi :

Tegangan normal :

$$\sigma = P/A_0$$

Tegangan sebenarnya :

$$\sigma_1 = P/A$$

Regangan normal :

$$\epsilon = (L - L_0)/L_0 \quad \epsilon_1 = (L_1 - L_0)/L_0 + (L_2 - L_1)/L_1 + (L_3 - L_2)/L_2 \dots$$

$$\epsilon = \Delta L/L_0$$

Regangan sebenarnya :

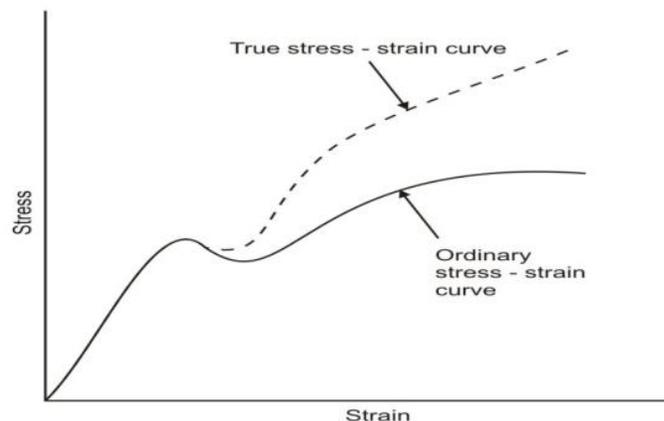
$$\epsilon_1 = L_0 \int L \, dL/L = L_0 \ln L = \ln (L/L_0)$$

Hubungan antara tegangan normal dengan tegangan sebenarnya :

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

Hubungan antara regangan normal dengan regangan sebenarnya :

$$\epsilon_1 = b (1 + \epsilon)$$



**Gambar 2.7.** Grafik tegangan regangan sebenarnya

Kedua hubungan diatas hanya berlaku hingga saat terjadinya necking, di luar itu maka tegangan dan regangan sebenarnya harus dihitung berdasarkan pengukuran nyata pada batang uji, beban dan luas penampang setiap saat.

Untuk daerah elastik boleh dikatakan tidak ada perbedaan antara tegangan/regangan nominal dengan tegangan/regangan sebenarnya, perbedaan mulai terjadi di daerah plastik. Pada diagram tegangan –regangan normal sesudah melampaui tegangan maximum akan terjadi penurunan, sedang pada diagram tegangan – regangan sebenarnya terus naik hingga putus.

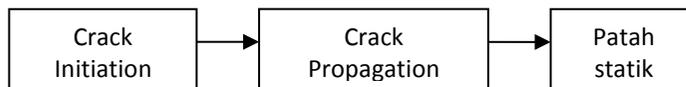
## 2.6. Uji Fatik

### 2.6.1. Prinsip Dasar Kelelahan pada Logam

Patah yang terjadi pada komponen konstruksi akibat pembebanan yang berulang-ulang yang berupa beban dinamis, dimana beban tersebut berupa tegangan yang masih jauh di bawah tegangan statis maksimumnya.

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 (gambar 2.1) yaitu : tahap awal terjadinya retakan (*crack initiation*), tahap perambatan retakan (*crack propagation*), dan tahap patah akhir yang sering disebut tahap patah statis [5].



**Gambar 2.8.** Mekanisme kelelahan logam

Secara makroskopis awal retakan dimulai dengan terjadinya deformasi plastik setempat yang disebabkan oleh besarnya pemusatan tegangan akibat adanya cacat pada material, antara lain [5]:

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.

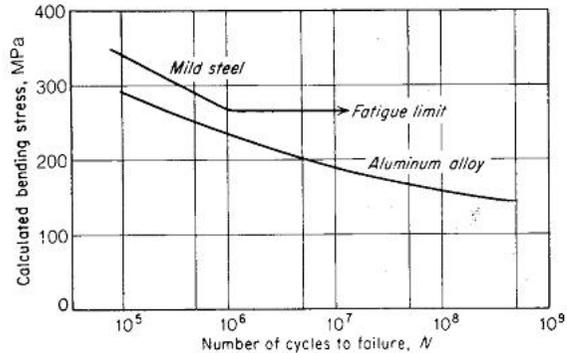
Proses deformasi selalu diawali melalui dislokasi atau cacat bidang. Cacat bidang yang selalu terdapat pada kristal logam adalah cacat pada batas butir (*grain boundary*). Pada batas butir selalu terdapat distorsi baik karena pengaruh tegangan permukaan maupun akibat dari interaksi dengan atom-atom dari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

### 2.6.2. Tegangan Uji Lelah

Setelah mengalami sejumlah siklus pembebanan akan terjadi retak mikro dimana pada tahap ini retak mulai mengintit. Kemudian terjadi retak makro yang akan merambat sehingga penampang sisa akan menjadi semakin kecil yang pada akhirnya penampang tersebut tidak lagi dapat 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 besarnya beban maksimal yang menghasilkan umur lelah tak terhingga[6].



**Gambar 2.9.** Batas lelah logam ferrous dan non-ferrous

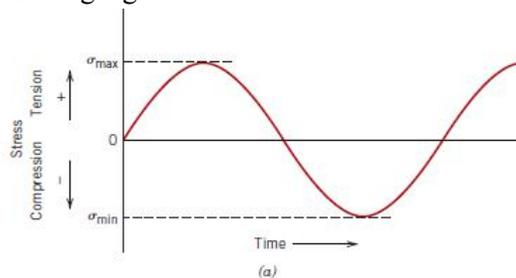
Uji lelah yang sederhana dilakukan dengan memberikan pembebanan atau tegangan yang relatif sederhana, yaitu beban uniaksial atau lenturan. Dengan beban tersebut akan diperoleh tegangan tarik dan tegangan tekan yang berfluktuasi.

Notasi tegangan yang biasa dipakai dari kondisi beban yang berulang tersebut dapat dikenai berbagai parameter tegangan, yaitu:

$$\text{Rasio tegangan (stress ratio) : } R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$

Dimana :  $\sigma_{\min}$  = tegangan minimum

$\sigma_{\max}$  = tegangan maksimum



**Gambar 2.10.** Notasi untuk beban siklus amplitudo konstan

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